AWK'21

# INTERNET OF PRODUCTION
# TURNING DATA INTO SUSTAINABILITY

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Fraunhofer IPT

Apprimus

# Digitalization in **Machine Tool Manufacturing –** Thinking further!

Individualisierte Produktion und konjunkturelle Unsicherheit: Industrieunternehmen stehen vor ständig neuen Herausforderungen. Das Digital Enterprise bereitet den Weg hin zu einer hochflexiblen, modularen Produktion.
Moderne CNC-Steuerungen wie SINUMERIK ONE nutzen digitale Zwillinge, um Produkte, Produktion und Performance zu verbessern. Auch die Erfassung, Verarbeitung und Nutzung der Daten spielen eine entscheidende Rolle: Edge-Computing bietet maßgeschneiderte Lösungen, um den Maschinenbetrieb zu optimieren.

Denken Sie mit uns weiter!
**siemens.de/emo**

SIEMENS

AWK'21

# INTERNET OF PRODUCTION
# TURNING DATA INTO SUSTAINABILITY

Herausgeber:

**AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium**

Thomas Bergs
Christian Brecher
Robert Schmitt
Günther Schuh

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über https://portal.dnb.de abrufbar.

Thomas Bergs, Christian Brecher, Robert Schmitt, Günther Schuh (Hrsg.):

30. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2021
Internet of Production – Turning Data into Sustainability

Weitere Mitwirkende:
Susanne Krause, Alexander Kreppein, Christian Lürken, Markus Meurer, Heidi Peters, Michèle Robrecht, Stefanie Strigl

1. Auflage, 2021

Apprimus Verlag, Aachen, 2021
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien an der RWTH Aachen
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen
Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-86359-994-2

DOI: 10.24406/ipt-n-640534

## Vorwort

In den vergangenen 100 Jahren hat die Industrialisierung nahezu alle Wirtschaftsbereiche erfasst und durch kontinuierliche Kostenoptimierung, Zeiteinsparung und Qualitätssteigerung geprägt. Doch die daraus entstandene, rein ökonomisch durchaus sinnvolle Überproduktion hat dazu geführt, dass der Ressourcenverbrauch und die $CO_2$-Emissionen rapide angestiegen sind. Zwar können es sich deshalb heute große Teile der Bevölkerung leisten, gekaufte Güter wie Kleidung, Geräte, Fahrzeuge, Maschinen oder Infrastruktur zu besitzen und nicht zu nutzen, die Herstellung dieser Güter beansprucht jedoch Energie und Rohstoffe, deren Rückgewinnung oft unmöglich ist.

Dieses kapital- und ressourcenintensive Produktivitätsdenken wird heute vom Zukunftsbild einer stärker ökologisch denkenden Gesellschaft überholt. In der Folge verändert auch der Kapitalmarkt seine Ausrichtung: weg von den kapitalintensiven Geschäftsmodellen der Industrie. Entsprechend wandelt sich auch der Fokus von Investoren hin zu Themen der Umwelt, des Sozialwesens und der Unternehmenssteuerung, die produzierende Unternehmen zu nachhaltigen Veränderungen zwingen.

An vielen Stellen der Produktion stoßen wir mit herkömmlichen Methoden, Technologien und Prozessen an die Grenzen unserer Erkenntnis. Die Digitalisierung versetzt uns aber jetzt in die Lage, diese Grenzen zu überschreiten. Je besser wir unsere komplexen Prozesse und ihre Randbedingungen kennen, desto fundierter können wir die wahren Kosten unserer Produkte benennen, wertvolle Ressourcen sparen und Emissionen senken.

Vor allem die Daten über die Bedarfe, die Entwicklung, die (Serien-) Produktion und die Nutzung von Gütern müssen dazu bereits in die Produktgestaltung und Produktionsplanung einfließen, damit die Produktion selbst kontinuierlich optimiert werden kann. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Unternehmen wird sich in den kommenden Jahren in allen produzierenden Branchen stark verschieben. Daher sind Unternehmen nun gefordert, ihr Leistungsspektrum und ihre Wertschöpfung anhand der drei nachhaltigkeitsbezogenen Bereiche der Unternehmensverantwortung zu bewerten und zu optimieren: Umwelt, Corporate Social Responsibility und Corporate Governance. Als wichtigsten Befähiger einer solchen Produktionswende sehen wir das sogenannte Internet of Production (IoP): die durchgängige Digitalisierung und Vernetzung von Maschinen und Anlagen innerhalb der Produktions- und Wertschöpfungskette.

Das IoP soll produzierenden Unternehmen zu mehr Nachhaltigkeit, Effizienz, Produktivität, Qualität und Wettbewerbsfähigkeit verhelfen. Die sichere Verfügbarkeit von Daten, Informationen und Wissen, zu jeder Zeit und an jedem Ort, gilt als eines der wichtigsten Versprechen der Industrie 4.0 und bildet gleichzeitig die Grundlage für Transparenz entlang aller Produktlebenszyklen und Wertschöpfungsstufen. Dies kann dazu beitragen, dass die Produktion sich schließlich an den tatsächlichen Anforderungen und Bedarfsmengen der Kunden orientiert.

Nicht zuletzt durch die Auswirkungen der Coronapandemie, die viele produzierende Unternehmen trifft und die weltweite Wirtschaft langfristig verändert, ergeben sich richtungsweisende Fragen rund um die Zukunft der Produktionstechnik. Unter dem Leitthema »Turning Data into Sustainability« haben wir diese Fragen im Rahmen des 30. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquiums (AWK) am 22. und 23. September 2021 in Zusammenarbeit mit hochkarätigen Expertenteams aus Industrie und Wissenschaft ins Visier genommen: Gemeinsam wollen wir den unternehmerischen Blick in die Zukunft schärfen, damit die Produktionswende zu nachhaltiger Produktivität gelingen kann. Unser Ziel – und damit auch Botschaft dieses Tagungsbandes – ist es, Unternehmen in die Lage zu versetzen, erfolgreich mit einschneidenden Krisen umzugehen und in kurzer Zeit wieder rentabel und gleichzeitig nachhaltiger als zuvor wirtschaften zu können. Die bereits vorhandenen und zum Teil auch schon gut erprobten Ansätze des Internet of Production können sich hier als wertvolle Werkzeuge erweisen.

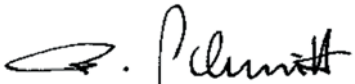
Das AWK'21 ist renommiertes Netzwerktreffen und hybrider Informations-Hub zugleich. Begleitet durch ein international hochkarätig besetztes Vortragsprogramm und mit thematischen Besichtigungstouren durch die gastgebenden Forschungseinrichtungen – vor Ort in Aachen ebenso wie online – bietet die Konferenz einen umfassenden Einblick in die Trends der angewandten Forschung und Entwicklung für Fach- und Führungskräfte aus Industrie und Wissenschaft.

Das vorliegende Kompendium setzt die Reihe der AWK-Vortragsbände fort. Wir freuen uns, die Ergebnisse unserer Expertenteams einem breiten Interessentenkreis zugänglich zu machen. Wir danken all jenen, die mit ihrem außerordentlichen Engagement an der Diskussion sowie der Erstellung der Vorträge und der Beiträge in diesem Buch mitgewirkt haben.

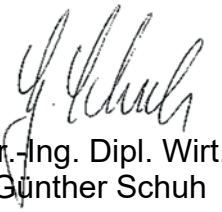
Aachen, im September 2021

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs MBA

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher



Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt



Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Günther Schuh

# Inhaltsverzeichnis


***Grußworte*** ..... **I**

***Plenarvorträge*** ..... **1**

***Session 1: Architektur einer vernetzten, adaptiven Produktion*** ..... ***29***

1. Architektur einer vernetzten, adaptiven Produktion ..... 31
   - 1.1 Linked data – from shop floor to top floor ..... 49
   - 1.2 Value Capture – Datengetriebene Geschäftsmodelle erfolgreich in nachhaltig produzierenden Unternehmen implementieren ..... 67
   - 1.3 Individuelle Prozessketten im Werkzeugbau durch daten- und modellbasierte Prognosen ..... 91

***Session 2: Der digitale Zwilling im Production Cycle*** ..... ***117***

2. Nachhaltige Produktion mit dem Digitalen Zwilling ..... 119
   - 2.1 Die digitale Ökonomie der Dinge ..... 151
   - 2.2 Biologische Transformation in der Produktion ..... 171
   - 2.3 Montage der Zukunft – Automatisierung jenseits der Massenproduktion ..... 195

***Session 3: Data Science in Production*** ..... ***223***

3. Data Science in Production ..... 225
   - 3.1 Funktionale und ökologische Rückverfolgbarkeit von Prozessketten ..... 263
   - 3.2 Predictive Quality – Data Analytics zur Steigerung unternehmerischer Nachhaltigkeit ..... 289
   - 3.3 Worldwide Lab – Transformation durch Lernen im Netzwerk ..... 319

***Session 4: Sustainable Productivity*** ..... ***349***

4. Subskriptionsmodelle für Sustainable Productivity im Maschinen- und Anlagenbau ..... 351
   - 4.1 Industrial Innovation & Employability – Sustainable Skilling of Smart Experts ..... 373
   - 4.2 Monetarisierung von Fertigungsdaten zur Steigerung der ökologischen Effizienz ..... 409
   - 4.3 Nachhaltige Geschäftsmodelle für Werkzeugmaschinen ..... 437

**Grußwort des Ministerpräsidenten des Landes Nordrhein-Westfalen,**
**Armin Laschet,**
**zum 30. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium**

Bereits zum 30. Mal findet das Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium nun statt. Im Jahr 1948, so kurz nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs mit seinen enormen Zerstörungen, gehörten Mut und Zuversicht dazu, ein solches Kolloquium ins Leben zu rufen. Aber wenn es eine Konstante dieser Konferenz in den mehr als 70 Jahren seiner Existenz gibt, dann ist es genau diese: Mit Mut und Zuversicht in die Zukunft schauen. Hier wurden die wichtigsten Trends entdeckt, hier wurden die richtungsweisenden Impulse für die Zukunft der Produktionstechnik gesetzt. Damit wir nicht nur wissen, wo wir heute stehen, sondern auch, wo wir morgen sein werden.

Das gilt auch dieses Jahr mit Ihrem Schwerpunkthema „Internet of Production – Turning Data into Value". Während andernorts noch über Industrie 4.0, also über die Vernetzung von Maschinen, diskutiert wird, machen Sie sich bereits Gedanken darüber, wie man die dabei entstehenden Daten mit möglichst großem Mehrwert nutzen kann. Sie liefern also den Unterbau, damit Industrie 4.0 gelingen kann. Denn Daten an sich haben keinen Wert, wenn unklar ist, wie man sie nutzen und auswerten kann. Ob dezentrale Datenverarbeitung beim Edge-Computing, intelligente Algorithmen mit maschinellem Lernen, Track & Trace mittels Blockchain oder Echtzeit-Informationsaustausch mit 5G – was abstrakt klingt, wird in den hier gezeigten Umsetzungsbeispielen anschaulich. Der in Aachen seit langem praktizierte enge Austausch zwischen Forschung und Industrie stellt gewaltige Potenziale für neue Geschäftsmodelle, Produkte und Prozesse sicher.

Zum Beispiel 5G: Am Campus Melaten der RWTH Aachen wird mit dem „5G Industry Campus Europe" das größte 5G-Forschungsnetzwerk Europas aufgebaut. Hier entsteht ein weltweit einmaliges Ökosystem zur Erforschung und Entwicklung dieser Technologien für die Industrie 4.0. Die dort entwickelten Anwendungen und Lösungen für die digitalisierte und vernetzte Produktion werden eine große Bedeutung für produzierende Unternehmen haben. Für das Industrieland Nordrhein-Westfalen ist 5G eine Schlüsseltechnologie. Mit unserer 5G-Mobilfunkstrategie wollen wir erreichen, dass Nordrhein-Westfalen eine Führungsrolle bei der Einführung dieser Technologie übernimmt, indem wir dabei helfen, innovative Anwendungen zu erproben und neue Geschäftsmodelle zu entwickeln.

Ein zweites Beispiel: die Batteriezellenfertigung. Ich halte es für entscheidend, dass wir zukunftsorientierte Wertschöpfungsketten und Produktionsverfahren in Deutschland halten und weiter aufbauen. Deshalb bin ich sehr froh darüber, dass es mit den vereinten Kräften der Produktionstechnik und der Batterieforschung an den Standorten Aachen, Jülich und Münster gelungen ist, die Forschungsfertigung Batteriezelle nach Münster zu holen. Ich bin überzeugt, dass aus der Produktionsforschung wichtige Impulse für den Aufbau einer industriellen Batteriezellfertigung in ganz Deutschland folgen werden.

Drittes Beispiel: Nachhaltigkeit. Daten in Echtzeit bieten völlig neue Potenziale zur Optimierung von Fertigungsprozessen und helfen, Verschnitt und Abfall zu vermeiden. So können Energie- und Rohstoffverbräuche reduziert werden. Auch hochwertige Werkzeugmaschinen mit langer Nutzungsdauer sind ein Beitrag zur Nachhaltigkeit. Auf diese Weise hilft uns Industrie 4.0 auch auf dem Weg zur nachhaltigen Wirtschaft.

Die Corona-Krise hat die Werkzeugmaschinenindustrie in einer schwierigen konjunkturellen Situation hart getroffen. Nun, da die Aufträge wieder zunehmen, drohen Engpässe bei den Zulieferungen. Mit einer Exportquote von über 70 Prozent hängt diese Branche wie kaum eine andere von weltwirtschaftlichen Entwicklungen ab. Gerade in solch konjunkturell herausfordernden Zeiten ist es wichtig, sich für die Zukunft optimal aufzustellen. Wo kann sich die Branche besser darüber informieren, was alles möglich ist, als auf der AWK ´21?

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen eine erfolgreiche Konferenz.

Armin Laschet

## Grußwort

**Dr.-Ing. Volker Kefer**
*Präsident des Verein Deutscher Ingenieure e.V.*

Der Maschinenbau gehört zu den größten Industriezweigen Deutschlands und spielt seit der Erfindung der Dampfmaschine von James Watt für das Ingenieurwesen eine der wichtigsten Rollen. 1848 stellte der deutsche Schlosser Johann von Zimmermann als Erster Werkzeugmaschinen in Chemnitz her. Seitdem hat sich der Maschinenbau mit rund 6.600 Unternehmen zu einer der führenden Industriebranchen Deutschlands entwickelt. Für das Ingenieurwesen ist er vor allem stark mittelstandsgeprägt. Laut des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) ist die Zahl der beschäftigten Ingenieurinnen und Ingenieure auf knapp 200.000 gestiegen. Damit ist die Branche die Nummer eins der Ingenieurarbeitgeber.

Um diese Position allerdings zu halten, hat uns das vergangene Jahr gezeigt, wie wichtig digitale Innovationen für Unternehmen sind. Denn mit der Corona-Pandemie wächst auch der Wettbewerbsdruck. Die Resilienz gegenüber Veränderungen entscheidet über die Zukunftsfähigkeit von Unternehmen. Das diesjährige Thema des Werkzeugmaschinen-Kolloquiums „Turning Data into Sustainability – durch nachhaltige und resiliente Produktion die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit sichern“ weist daraufhin, dass Unternehmen sich für unvorhersehbare Krisen wie die der Corona-Krise wappnen sollten, indem sie innovationsfähig bleiben und in Geschäftsmodellen denken. Unternehmen sollten erkennen, wo ihre Kernkompetenzen liegen und wie diese – auch mit Hilfe moderner Automatisierungstechnik – auf neue Geschäftsfelder übertragen werden könnten. Außerdem ermöglicht die Digitalisierung mehr Teilhabe am Umweltschutz. Allein die weltweite Datenverfügbarkeit zu Klima und Umwelt bietet eine sehr gute Basis für den Klimaschutz, denn nur global vernetzte Umweltkompetenz führt zu einer nachhaltigen Zukunft.

Seitens der Automatisierungstechnik ist für bedarfsgerechte Anpassung der Produktion und eine Erhöhung der Resilienz von Unternehmen insbesondere Flexibilität gefragt. Das gilt es auch schon früh in der Lehre zu vermitteln und zu verankern. Damit Unternehmen auf globalen Märkten bestehen, muss der Grundstein für das interdisziplinäre Denken in Geschäftsmodellen in der Ingenieurausbildung an Universitäten und Hochschulen gelegt werden. Gerade diese unabdingbare Interdisziplinarität wird hier in Aachen, einer Hochburg der Ingenieurwissenschaften, in der Lehre vorbildlich gelebt. Die RWTH gilt weltweit als Aushängeschild der deutschen Ingenieurausbildung. Derzeit studieren hier über 25.000 junge Menschen Ingenieurwissenschaften, die in ein paar Jahren unseren

Arbeitsmarkt bereichern. Mit ihrem Wissen und ihren Fähigkeiten tragen sie entscheidend zur Sicherung des Technologie- und Innovationsstandorts Deutschland bei.

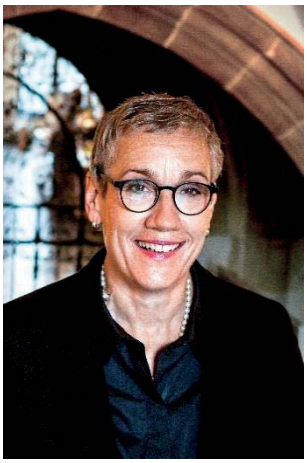
Damit die Lehre mit dem Tempo der Transformation Schritt halten kann, ist die Rolle der Industrie an Hochschulen entscheidend. Für ein Drittel der befragten Studierenden der VDI-Studie „Ingenieurausbildung für die Digitale Transformation“ sind vor allem Unternehmen die Treiber für digitale Lehrinhalte. Daher fordert der VDI, dass Hochschulen verstärkt mit Unternehmen bei Fragen zur Digitalen Transformation kooperieren. Innovationsallianzen zwischen Industrie und Hochschulen ermöglichen die Verknüpfung von Grundlagen- und Anwendungswissen. Außerdem können Hochschulen auch Unternehmen bei der Weiterbildung von Mitarbeitenden vor dem Hintergrund des lebenslangen Lernens unterstützen. Das wird vom WZL bereits seit vielen Jahren vorbildlich gelebt und dies gilt es weiter zu entwickeln.

Denn ich bin der Meinung, dass wir agile, leicht anpassbare Studiengänge brauchen, die neue Themen rasch integrieren können. Die Digitale Transformation muss sich aber auch im Pflichtbereich der Curricula niederschlagen. Der VDI steht hierfür sowohl Unternehmen als auch Hochschulen beratend zur Seite. Ich bin sehr zuversichtlich, dass sowohl heutige und als auch künftige Ingenieur*innen die Digitale Transformation so zu einem Erfolg werden lassen.

Ich wünsche dem Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium gutes Gelingen, spannende Diskussionen und innovative Ideen!

Ihr

Volker Kefer



## Grußwort

**Sibylle Keupen**
*Oberbürgermeisterin der Stadt Aachen*

Das AWK ist eine Institution und feste Größe für Produktionsunternehmen weltweit. Zwei Tage lang schauen Gäste aus dem In- und Ausland zum 30. Mal nach Aachen, um sich über die neuesten Technologietrends der Werkzeugmaschinenbranche zu informieren und auszutauschen. In Aachen werden Zukunftsaufgaben mit Innovationen verbunden, um Wirtschaft nachhaltig zu gestalten und den Klimazielen zu entsprechen.

Corona beeinflusst Zeitplan und Form des Kolloquiums. Es findet um ein Jahr verschoben statt als hybride Veranstaltung. Inhaltlich präsentiert es sich zusätzlich mit dem Fokus auf Nachhaltigkeit. Die Änderung des Mottos zu „Turning Data into Sustainability“ zeigt, dass der Weg zur Klimaneutralität in Forschung und Produktion ein wichtiges Anliegen ist und einen Schlüssel für zukünftige Wettbewerbsfähigkeit darstellt. Die Frage, wie man Wertschöpfung zusammen mit Nachhaltigkeit denken kann, wird in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Die Digitalisierung bietet riesige Chancen für klimaneutrale Produktion. Die Themenvielfalt des Kolloquiums verdeutlicht die Herausforderungen für die Zukunft. Digitalisierung bedeutet neuartige datengetriebene Geschäftsmodelle und Architekturen. Mit Sensoren und Data Science lassen sich die Produktionsprozesse ressourcenschonender und ausfallsicherer betreiben. Produkte können individueller und nützlicher für den Kunden produziert werden. Die Produktlebenszyklen können lückenlos dokumentiert und ausgewertet werden. Aufgezeichnete Produktionsdaten erlauben Menschen und Maschinen zu lernen, wie die Prozesse und Werkzeuge verbessert werden können und weniger Ausschuss anfällt.

Die Industrie 4.0 wird mit diesem Kolloquium mitgestaltet und ermöglicht die internationale Weiterentwicklung. Beim letzten AWK 2017 trafen sich mehr als 1000 Teilnehmer aus aller Welt. Ich bin mir sicher, dass alle Beteiligten interessante neue Anregungen erhalten und wünsche viel Erfolg bei der Umsetzung der Ideen.

Sibylle Keupen

## Grußwort

**Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Reimund Neugebauer**
*Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft*

Digitalisierte Produktionstechnologien beeinflussen Geschäftsmodelle und verändern Marktstrukturen. Die vierte industrielle Revolution, die »Industrie 4.0«, vernetzt im Sinne einer optimierten, resilienten und nachhaltigen Wertschöpfung Produktentwicklung, Produktion, Logistik und Kunden. Künftig werden komplette Fertigungsanlagen auf virtueller Ebene visualisiert. Eine Vielzahl von Sensoren registriert den Betriebszustand der Maschinen und gibt die Daten an das Kontrollzentrum weiter. Der Mensch kann den Ablauf der Produktion in Echtzeit überblicken und bei Bedarf eingreifen. Es wird möglich, Einzelstücke herzustellen, ohne die Produktion anzuhalten – und das bei einem optimalen, zukunftsorientierten Ressourceneinsatz. Daten gewinnen bei diesem Prozess stetig an Bedeutung: Methoden des maschinellen Lernens und der automatisierten Modellbildung erschließen hieraus große Optimierungspotenziale, die uns noch weiter voranbringen – beispielsweise durch schnelle Ursachenfindung bei Störungen, Kausalitätsanalyse oder der Steigerung von Energie- und Ressourceneffizienz.

Die Verfügbarkeit immer größerer Datenmengen bietet große Potenziale. Um diese effizient und effektiv zu nutzen, sind geeignete Ansätze zur Datenverarbeitung erforderlich. Aus diesem Grund stehen Unternehmen vor der Herausforderung, auf Basis der neuesten Entwicklungen im engen Zusammenspiel mit der Forschung innovative Lösungen zu entwickeln und umzusetzen, um auch international wettbewerbsfähig zu bleiben. Dabei stehen neben der Datenverarbeitung, der Sicherheit von Produktionsnetzen und der Ausfallsicherheit von Produktionseinheiten insbesondere deren flexibler, nachhaltigkeitsorientierter Einsatz sowie die intuitive Gestaltung der Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine im Vordergrund. Zu diesem Zweck müssen wir Erfahrungen durch Forschung und weitere praktische Umsetzung sammeln. Gleichzeitig müssen Unternehmen und Anwender darauf vertrauen können, dass ihre Daten sicher sind. Nur dann werden sie neue Wege gehen und die Chancen der Digitalisierung sowie den Wert ihrer Daten vollumfänglich nutzen. Initiativen wie der International Data Space, die es ermöglichen, Daten zum gegenseitigen Nutzen zu teilen und gleichzeitig die volle Kontrolle über die eigenen Daten zu behalten, sind hier beispielhaft.

Deutschland verfügt im Bereich der digitalen Produktionstechnik über ein enormes Potenzial, das uns zur Technologieführerschaft verhelfen kann. Das vom Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2020 adressierte Leitthema »Turning Data Into Sustainablity – durch nachhaltige und resiliente Produktion die zukünftige

Wettbewerbsfähigkeit sichern« kommt daher zur richtigen Zeit. Zukunftsorientierte, effiziente Produktion ist eine tragende Säule für eine nachhaltige, werteorientierte Wertschöpfung.

Reimund Neugebauer

## Grußwort

**Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. mult. Ulrich Rüdiger**
*Rektor der RWTH Aachen*

Sehr geehrte Damen und Herren,

als Rektor der RWTH Aachen University begrüße ich Sie sehr herzlich zum 30. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium (AWK).

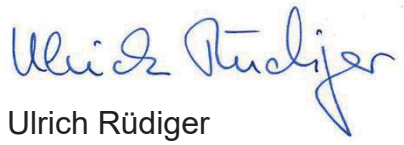
Eigentlich hätten wir bereits im letzten Jahr das Jubiläum des AWKs gefeiert. Aufgrund der Corona-Pandemie musste die Veranstaltung leider verschoben werden. Es freut mich sehr, dass die Veranstalter*innen in diesem Jahr mit dem hybriden Veranstaltungsformat eine Lösung für die Durchführung des AWK gefunden haben. Solch ein weitreichendes Format konnte man sich 1948, als das erste AWK unter der Federführung von Professor Herwart Opitz, mit rund 250 Teilnehmerinnen und Teilnehmern in Aachen stattgefunden hat, sicherlich noch nicht vorstellen. Die Beständigkeit dieses traditionsreichen Kolloquiums und die konsequente Weiterentwicklung, orientiert an zukunftsweisenden Themen, machen das AWK 73 Jahre später mit über 1000 teilnehmenden Personen zu einem der bedeutendsten Treffen zwischen Industrie und Forschung.

Als RWTH Aachen sind wir uns schon lange der Verantwortung bewusst, die wir gegenüber der Gesellschaft tragen. Um den global-gesellschaftlichen Herausforderungen erfolgreich entgegenzutreten, müssen wir in internationalen, interdisziplinären Forschungsteams zielgerichtet nach Lösungen für diese Herausforderungen suchen. Deshalb freut es mich, dass mit dem diesjährigen Motto „Turning Data into Sustainability – durch nachhaltige und resiliente Produktion die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit sichern“ wieder einmal hochaktuelle und zukunftsweisende Themen in den Mittelpunkt des Kolloquiums gestellt werden.

Die Erforschung der Potenziale und Gefahren von Industrie 4.0 mit dem Ziel, die Produktion dauerhaft nachhaltiger und resilienter zu gestalten, ist ein wichtiges Forschungsfeld. Wir betreiben diese Forschung, um Wertschöpfungsketten effizienter gestalten zu können und Industrieunternehmen zu helfen, ressourcenschonender zu agieren. Die dazu notwendige, einzigartige Infrastruktur auf dem Campus Melaten, fördert dabei die Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Industrie. Und auch Forschungsprojekte zu digitalen Zwillingen, zur Konnektivität, zu 5G-Netzen, zu Netzwerken, adaptiver Produktion und prädiktiver Qualität helfen uns dabei zu verstehen, welche Möglichkeiten die Digitalisierung von Arbeitsprozessen bietet, um diese nachhaltiger zu gestalten.

Ich freue mich sehr zu sehen, dass das AWK immer wieder Ziel für viele führende Vertreter*innen aus Industrie und Forschung ist, die zum Austausch und zur Weiterentwicklung innovativer Ideen bei diesem Kolloquium zusammenkommen.

Aufgrund unseres Jubiläums habe ich im letzten Jahr häufig in die Vergangenheit geblickt. Ich finde es überaus bemerkenswert, was an der RWTH, in ihrem Umfeld und von ihren Alumni erforscht, erfunden und erschaffen wurde. Dies macht auch neugierig auf all das, was noch kommen wird. In diesem Sinne wünsche ich Ihnen für das erste hybride AWK interessante Einblicke in die Aachener Forschung und einen lebhaften Austausch miteinander.



Ulrich Rüdiger

# Plenum

## TURNING DATA INTO SUSTAINABILITY

Durch nachhaltige und resiliente Produktion die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit sichern

**Plenarvortrag**

# Dekarbonisiert | Digital | Profitabel: Die Zukunft der Metallindustrie

**Prof. Dr.-Ing. Katja Windt**
*Mitglied der Geschäftsführung, CDO, SMS group GmbH*

**Geburtsjahr:**
1969

**Aktuelle Position:**

| | |
|---|---|
| seit 01/2018 | Mitglied der Geschäftsführung, CDO, SMS group GmbH, Düsseldorf |
| seit 06/2019 | Mitglied Board of Governors Technion, Israel Institute of Technology, Haifa |
| seit 02/2018 | Honorar Professorin für Global Production Logistics, Jacobs University gGmbH |
| seit 06/2016 | Mitglied Leopoldina – Die Nationale Akademie der Wissenschaften |
| seit 07/2012 | Mitglied acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften |

**Bisherige Positionen:**

| | |
|---|---|
| 02/2014 - 01/2018 | Präsidentin und Geschäftsführerin, Jacobs University Bremen gGmbH |
| 01/2013 - 01/2014 | Provost/Geschäftsführerin, Jacobs University Bremen gGmbH |
| 02/2008 - 01/ 2018 | Professorin für Globale Produktionslogistik, Jacobs University Bremen gGmbH |
| 04/2001 - 11/2007 | Abteilungsleiterin am Bremer Institut für Produktion und Logistik (BIBA) |

**Studium:**

| | |
|---|---|
| 06/1995 - 06/2000 | Promotion (Dr.-Ing.) am Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), Leibniz Universität Hannover |
| 04/1992 - 09/1992 | Visiting Scholar am Massachusetts Institute of Technology/USA |
| 10/1988 - 04/1995 | Maschinenbaustudium mit Schwerpunkt Produktionstechnik, Leibniz Universität Hannover |

# Dekarbonisiert | Digital | Profitabel: Die Zukunft der Metallindustrie

*K. Windt, Mitglied der Geschäftsführung, CDO, SMS group GmbH*

## Kurzfassung

Die Reduzierung des globalen $CO_2$-Fußabdrucks in immer komplexeren und volatilen Märkten erfordert neue Denkweisen, Veränderungsbereitschaft und den Einsatz von disruptiven Technologien. SMS bietet bereits nicht nur neue Prozesse und Anlagen für die Produktion von Hochleistungswerkstoffen im Bereich der Metallurgie, sondern auch das lernende Stahlwerk, das digitalisierte und vernetzte Prozesse als Teil von Industrie 4.0, Lösungen für "Additive Metal Manufacturing" und nachhaltige, innovative Umwelttechnologien bietet. Die "New Horizon"-Initiative der SMS group hat zum Ziel, innovative Produkt- und Produktionslösungen für die Metallindustrie zu entwickeln und bewährte SMS-Lösungen in Geschäftsfeldern einzusetzen, die sich ähnlichen technologischen Herausforderungen und Veränderungen stellen. Auf diese Weise dringt die SMS group auch in angrenzende Branchen wie den Energiesektor und die Hafen-Logistik vor.

Der Einsatz neuer Technologien ist für Unternehmen der Stahlindustrie sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus ökologischer Sicht interessant: Wasserstoff soll Kohlenstoff als Reduktionsmittel und Energieträger ersetzen, so dass bei der Stahlerzeugung in Zukunft die $CO_2$-Emissionen erheblich reduziert werden. Bei SMS group ermöglicht dies die MIDREX®-Technologie, die weltweit führende Technologie für die Direktreduktion von Eisenerz der Firma Midrex. Neu ist, dass Wasserstoff als Reduktionsmittel anstelle von Erdgas eingesetzt wird. Das so erzeugte, direkt reduzierte Eisen (DRI) wird im Lichtbogenofen mit grünem Strom zu grünem Rohstahl weiterverarbeitet. Daher spielt Wasserstoff eine entscheidende Rolle bei der Produktion von grünem Roheisen. Hier ist die Anforderung, dass die zum Schmelzen im Lichtbogenofen und zur Erzeugung des Wasserstoffs durch Elektrolyse verwendete Energie ohne $CO_2$-Emissionen erzeugt wird.

Über ihre Tochtergesellschaft Paul Wurth ist SMS group an dem Startup-Unternehmen SunFire beteiligt, das Anlagen und Einrichtungen zur Herstellung von erneuerbaren technischen Gasen und Brennstoffen entwickelt und eines der innovativsten Unternehmen der Welt im Bereich der Wasserstofferzeugung unter Verwendung von Hochtemperaturelektrolyse ist. Als e-gas, e-fuel oder e-chemicals ersetzen diese Ersatzstoffe für konventionell erzeugten Wasserstoff, Rohöl und Erdgas die fossilen Energiequellen in vorhandenen Infrastrukturen.

### Vorhersage der Zukunft mit digitalen Lösungen

Ressourceneffiziente und nachhaltige Produktionsprozesse spielen in der Fertigungsindustrie inzwischen eine immer wichtigere Rolle. Hohe Anlagenverfügbarkeit und maximale Produktqualität sind wesentliche Leistungsindikatoren im Anlagenbetrieb.

Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML) haben in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht und werden in der industriellen Fertigung eingesetzt, um diese Ziele zu erreichen. Wenn Anlagen-Know-how, Erfahrung in der Prozessmodellierung und moderne Data Science intelligent kombiniert werden, können Verbesserungen bei der vorausschauenden Wartung, Qualität, Produktionsplanung und Energiemanagement erreicht werden, wodurch die Rentabilität eines Stahlwerks erhöht wird. Mit digitalen Lösungen, die den Bedarf an Personal vor Ort reduzieren, sowie klimafreundlichen Lösungen für die $CO_2$-freie Stahlproduktion, ist die SMS group zusammen mit ihrer digitalen Tochtergesellschaft SMS digital gerüstet, um den ständig steigenden Anforderungen an eine nachhaltige Industrieproduktion gerecht zu werden.

Mit ihrer hochdynamischen Prozesskette, modernen Produktionseinrichtungen und Prozesstechnologien für hochwertige Stahlprodukte generiert ein Stahlwerk enorme Datenmengen. Diese Daten sind von großer Bedeutung für verschiedene Arten von Leistungsauswertungen und Systemanpassungen. Daten sollten jedoch immer mit einem Mehrwert verknüpft werden, weshalb Datensilos und historisch gewachsene Strukturen aufgehoben werden müssen. Hier liefert die SMS DataFactory die Grundlage, um Daten in Informationen und Informationen wiederum in Mehrwert zu verwandeln. Nur durch die Verbindung und Auswertung aller Parameter ist das lernende Stahlwerk in der Lage, kontinuierlich zu kommunizieren und den Prozessablauf so zu koordinieren und zu optimieren, wie es vom Kunden gefordert wird. Erkenntnisse über den Anlagenzustand und die Prozessleistung sowie deren Einfluss auf Produktqualität und Betriebskosten können somit gewonnen werden.

Energie und Ressourcen machen einen erheblichen Teil der Gesamtkosten in der Fertigungsindustrie aus. Eine einzelne Anlage kann über eine Vielzahl von Energiequellen verfügen, die sorgfältig ausbalanciert werden müssen, um eine kostengünstige und umweltschonende Energiematrix zu gewährleisten. Ungenaue Energieprognosen und -Planung sowie schlechte Kalkulation und ineffektive Management-Abläufe bieten einen fruchtbaren Boden für intelligentere, digitale Managementlösungen, die den Energie- und Ressourcenverbrauch reduzieren und gleichzeitig Effizienz, Planung und Management der Anlage und des Anlagenbetriebs verbessern. Um die Energiebilanz während des gesamten Produktionsprozesses zu optimieren, den $CO_2$-Verbrauch zu reduzieren und den Einsatz von Ressourcen zu minimieren, werden Energieoptimierungstools wie die Viridis Energy & Sustainability Plattform eingesetzt. Mit Hilfe von Energieleistungsindikatoren der Level 2 und 3 sowie künstlicher Intelligenz und Algorithmen des maschinellen Lernens optimiert Viridis nicht nur den Durchsatz und die Qualität, sondern auch Energiekosten, Rohmaterialeinsatz und sogar Kohlenstoff-, Treibhausgas- und Abfallemissionen. Diese Indikatoren liefern wiederum Informationen für die Produktionsplanungs- und Qualitätsmanagement-Software, die sicherstellen, dass die entsprechenden Parameter während laufender und zukünftiger Produktionsprozesse berücksichtigt werden und die Produktionsplanung so effizient und umweltfreundlich wie möglich gestaltet werden kann. Viridis hilft Unternehmen, die Anforderungen nach ISO 50001 zu erfüllen und die Betriebs-, Audit- und Wartungskosten drastisch zu senken. Mit mehr als 300 Systemfunktionen kann Viridis jede Praxis und Definition des Standards implementieren und operationalisieren, wodurch eine erhebliche Anzahl von zugehörigen Aktionen automatisch ausgeführt werden kann und somit die Teamproduktivität weiter verbessert wird. Die Energiezertifizierung trägt nicht nur dazu bei, die Energieversorgungs- und Energiemanagementstrategien des Unternehmens langfristig zu erhalten, sondern beinhaltet auch ein ernsthaftes Engagement für Gesellschaft und Umwelt.

**Neue Geschäftsmodelle bieten maximale Flexibilität**

Während sich viele aktuelle Digitalisierungsprojekte hauptsächlich auf die Verbesserung eines bestehenden Prozesses konzentrieren, ist mit disruptiven Veränderungen zu rechnen, die sich zunehmend auf Geschäftsebene ereignen. Im Hinblick auf den Geschäftsbetrieb wird die digitale Transformation die Art und Weise wie Unternehmen heute interagieren erheblich ändern. Durch die Ausrüstung eines Stahlwerks für die Digitalisierung wird die EBITDA-Marge um sechs bis acht Prozent verbessert. Digitale Services im Zusammenhang mit dem lernenden Stahlwerk erfordern jedoch oft alternative Preismodelle. Anstelle eines Produkts wird dem Kunden eine Lösung und ein entsprechendes Nutzenversprechen angeboten. Daher bietet SMS group verschiedene Preismodelle an: Konventionelle Vertragsgestaltung und Lizenz-Modelle, Software-as-a-Service (SaaS) und Equipment-as-a-Service (EaaS) sowie leistungsbasierte Vertragsvergabe. Leistungsbasierte Geschäftsmodelle ermöglichen es dem Kunden, CAPEX in OPEX umzuwandeln und die Investitionskosten zu senken. Mit SaaS können die notwendigen Tools bereitgestellt werden, um auf kosteneffiziente Weise eine vollständig vernetzte Zusammenarbeit zu ermöglichen. Darüber hinaus können Konfigurationseinstellungen geändert und die Software innerhalb bestimmter Parameter an die individuellen Anforderungen angepasst werden. Ziel ist es, Anlagen wirtschaftlich mit größtmöglichem Erfolg zu betreiben. Daher ist ein ressourceneffizienter und energiesparender Betrieb von entscheidender Bedeutung. Die Anlagen verfügen über Selbstdiagnosefunktionen und bieten hochentwickelte Reaktionen auf spontane Veränderungen. Dadurch können sich Anlagenbetreiber und Mitarbeiter weit mehr auf betriebliche und strategische Aufgaben konzentrieren und komplexe technologische Aufgaben von Maschinen ausführen lassen. Letztendlich wird die Digitalisierung die Industrie in eine grüne Zukunft führen.

## Plenarvortrag

# Gestaltung einer nachhaltigen Luftfahrt durch revolutionäre Antriebe

**Lars Wagner**
*Vorstand Technik (COO/ CTO), MTU Aero Engines AG*

**Geburtsjahr:**
1975

**Aktuelle Position:**

| | |
|---|---|
| seit 2018 | Vorstand Technik (COO/ CTO), MTU Aero Engines AG, München |

**Bisherige Positionen:**

| | |
|---|---|
| 2015-2017 | Bereichsleiter OEM Operations, MTU Aero Engines AG, München |
| 2011-2015 | Leiter Long Range Fuselage, Leiter A350 Fuselage Operations, Airbus Operations GmbH, Hamburg |
| 2009-2011 | Senior Director Strategy Integration, Airbus Central Entity, Toulouse (F) |
| 2009 | Task Force A400M Fuselage Recovery Program, Airbus Bremen, Seville (E) |
| 2006-2009 | Leiter Overall Aircraft Mass Properties, Airbus Hamburg, Bremen, Toulouse (F), Filton (GB), Madrid (E) |
| 2003-2006 | Assistent Werk- und Standortleitung, Airbus Bremen |

**Studium:**

| | |
|---|---|
| 2003 | Collège des Ingénieurs, Paris (F)<br>Abschluss: Master of Business Administration (MBA) |
| 1997-2003 | Studium Maschinenbau und Luft- und Raumfahrttechnik an der RWTH Aachen, am Imperial College London (GB), und am Massachusetts Institute of Technology (USA)<br>Abschluss: Diplom-Ingenieur |

# Gestaltung einer nachhaltigen Luftfahrt durch revolutionäre Antriebe

*L. Wagner, Vorstand Technik (COO/ CTO), MTU Aero Engines AG*

## Kurzfassung

Die Zeiten für die Luftfahrt könnten nicht spannender sein. Bereits vor der Covid19-Krise war eine deutliche Umbruchstimmung zu verspüren. Der Klimawandel und die Notwendigkeit, diesen aufzuhalten, war und ist in aller Munde. Als Triebwerkshersteller legt die MTU seit jeher mit jeder neuen Triebwerksgeneration das Augenmerk auf erhöhte Effizienz, nicht nur aus ökologischen, sondern auch aus wirtschaftlichen Gründen. Auch die Reduktion von Lärmemissionen ist schon seit Längerem fester Bestandteil der MTU-Produktentwicklungsstrategie. Mit dem Getriebefan wurden 2016 nochmals neue Maßstäbe gesetzt. Doch nun steht die Industrie an einem Punkt, an dem mit der evolutionären Weiterentwicklung von bestehenden Triebwerkskonzepten nur noch bedingt der Weg zu einer emissionsfreien Luftfahrt beschritten werden kann. Es ist an der Zeit, neue revolutionäre Antriebskonzepte zu entwickeln, denn der Antriebsstrang bietet den mit Abstand größten Hebel.

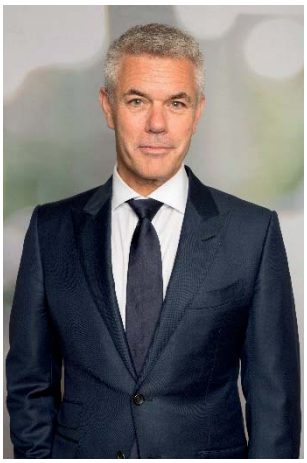
Auf Basis des Getriebefans ist es möglich, in den nächsten Jahren nochmals gut zehn Prozent an Effizienz zu gewinnen, doch dann wird auch diese Technologie ausgereizt sein.

Die traditionellen Gasturbinen waren über Jahrzehnte das Erfolgskonzept für die Luftfahrt und hatten den immensen Vorteil, dass sie für alle Schubklassen und Reichweiten skalierbar waren. In der Zukunft einer emissionsfreien Luftfahrt wird man sich von der Idee lösen müssen, mit einem einzigen Konzept alle Klassen bedienen zu können. Es werden (hybrid-) elektrische Antriebe, Brennstoffzellen aber auch weiterhin effiziente Gasturbinen zum Einsatz kommen. Um auch letztere klimaneutral betreiben zu können, ist es unabdingbar, Sustainable Aviation Fuels (SAFs) voran zu treiben. Die Technologie dazu gibt es bereits, und es wurde auch schon in mehreren Pilotversuchen gezeigt, dass mit SAFs bestehende Triebwerke fliegen können. Allerdings gibt es heute noch keine Infrastruktur, um SAFs bzw. den dafür erforderlichen Wasserstoff in ausreichenden Mengen zu produzieren. Hier kommt es in den nächsten Jahren darauf an, eine Supply Chain in industriellem Maßstab aufzubauen.

Neben den technologischen Herausforderungen für neue Produkte, stellt sich auch die Luftfahrtindustrie auf ein digitales Zeitalter um. Die digitale Transformation bietet die Möglichkeit, eine verstärkte End-To-End-Betrachtung von der Produktentwicklung über die Produktion bis hin zur Flottenüberwachung und der Wartung zu etablieren. Hier wird auch die Einbindung der internen und externen Zulieferer sowie der Kunden in die digitale Systemlandschaft eine immer wichtigere Rolle spielen. In der Produktion selbst findet

eine zunehmende Automatisierung hin zu einer vollständig „smart factory“ statt. Und auch in diesem Kontext sind smarte Lösungen seitens des Maschinen- und Anlagenbauer für eine effektive Analyse von Maschinendaten und selbstoptimierende Fertigungsprozesse erforderlich.

Mit modernsten Produktions- und Produkttechnologien starten wir in das neue Zeitalter der emissionsfreien Luftfahrt.



**Plenarvortrag**

# Empowering Autonomous Future - Können Daten die Welt retten?

**Ola Rollén**
*Präsident und Chief Executive Officer, Hexagon AB*

**Geburtsjahr:**
1965

**Aktuelle Position:**
seit 2000 Präsident und Chief Executive Officer, Hexagon AB

**Bisherige Positionen:**
Bevor er zu Hexagon wechselte, hatte Rollén die Positionen des Präsidenten von Sandvik Materials Technology, des geschäftsführenden Vizepräsidenten von Avesta-Sheffield und des Präsidenten von Kanthal inne. Darüber hinaus war er zuvor als Vorstandsmitglied von Vestas Wind Systems A/S tätig.

**Studium:**
bis 1989 Stockholm University

# Empowering Autonomous Future - Können Daten die Welt retten?

*Ola Rollén, Präsident und Chief Executive Officer, Hexagon AB*

## Kurzfassung

Wer hätte sich vor dreißig Jahren vorstellen können, dass das Thema des 30. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquiums „Turning Data into Sustainability“ lauten würde und wie hoch der Einsatz sein würde? Seit fast zwei Jahren befindet sich die Welt im Kampf gegen eine der tödlichsten Pandemien der Geschichte. Und so verheerend sie auch war, die Schäden, die die Menschheit in der gleichen Zeitspanne der Umwelt zugefügt hat - Ineffizienz, Verschwendung, nicht nachhaltiges Wachstum - bedrohen unsere eigene Existenz.

**Die Zukunft wird dadurch bestimmt, wie die Gegenwart die Vergangenheit verwaltet**

Während viele Unternehmen davon sprechen, bis 2050 die CO2-Neutralität zu erreichen, glauben wir, dass wir diese Krise bereits heute angehen müssen. Wir können nicht zulassen, dass Perfektion der Feind des Guten ist. So ist es allgemeiner Konsens, dass wir der Welt irreversiblen Schaden zufügen, wenn wir unsere Emissionen nicht bis 2050 entscheidend reduzieren. Ich würde behaupten, dass es im Jahr 2050 bereits zu spät ist. Die Veränderungen, die wir von heute bis 2030 herbeiführen, werden unser zukünftiges Schicksal bestimmen. Wir haben unseren Spielraum für Fehler in den letzten Jahrzehnten ausgeschöpft und die Menschheit wird schon bald das Ressourcenäquivalent von drei Erden verbrauchen.

**Deus ex machina: Wie Daten die Welt retten können**

Wir warten auf einen deus ex machina, ein Begriff aus griechischen und römischen Theaterstücken, bei dem ein Gott per Kran (der „Maschine“) auf die Bühne herabgelassen wurde, um den Tag aus einer unmöglichen und aussichtslosen Situation zu retten. Zwar stehen uns keine Götter zur Verfügung, die wir in dieser verzweifelten Stunde auf die Bühne bringen könnten, dennoch haben wir zwei unerschöpfliche Ressourcen, die uns große Hoffnung geben: Daten und menschlichen Einfallsreichtum.

Die Wahrheit ist, dass wir zehnmal mehr Daten haben als noch vor ein paar Jahren. Warum sind wir dann nicht zehnmal effizienter, produktiver und nachhaltiger? Weil wir die Daten nicht zu unserem Vorteil einsetzen.

Wir wissen, dass die Nutzung der nahezu unbegrenzt zur Verfügung stehenden Daten mit einer Komplexität epischen Ausmaßes behaftet ist. So kann man sich leicht in einem

Netz aus unberührten, nicht verwerteten und nicht analysierten Daten verfangen. Wenn Unternehmen Daten wirklich als Wettbewerbsvorteil nutzen wollen, müssen sie in der Lage sein, diese selbstständig, im Hintergrund und ohne die Hilfe menschlicher Entscheidungen zu nutzen.

Ein solches übergeordnetes Zielbild ist es wert, dass wir es mit unserer gebündelten Aufmerksamkeit und unserer gesamten Energie verfolgen - um der Welt zu helfen, Daten zu nutzen, um eine neue Realität zu ermöglichen: eine Zukunft, in der Daten über die einfache Automatisierung von Aufgaben hinaus genutzt werden, um immer autonomer zu werden und uns dabei zu unterstützen, unsere Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.

Viele begrenzen Autonomie auf etwas, was für uns unsere Autos steuern wird. Wir glauben, dass sie so viel mehr tun wird. Autonomie wird unsere Städte schützen. Autonomie wird unser Klima verbessern. Autonomie wird fossile Brennstoffe sauberer, den Bergbau sicherer, die Produktion effizienter, Gebäude intelligenter machen und die Zukunft unserer Kinder verbessern.

So können Daten in Nachhaltigkeit verwandelt werden. Autonomie ist Daten in ihrem besten, fortschrittlichsten und wertvollsten Zustand. Sie ist die ultimative Form der Hebelwirkung von Daten. Sie wird durch Ihren Ideenreichtum und Ihren Mut den Status quo überwinden. Sie wird zu mehr Effizienz, Produktivität, Qualität und vor allem zu Nachhaltigkeit im großen Maßstab führen.

**Plenarvortrag**

# Intelligente Produktion als wichtiger Erfolgsfaktor der Nachhaltigkeitsstrategie

**Dr. Stefan Spindler**
*Vorstand Industrial, Schaeffler AG*

**Geburtsjahr:**
1961

**Aktuelle Position:**

| | |
|---|---|
| seit 2015 | Vorstand Industrial, Schaeffler AG |

**Bisherige Positionen:**

| | |
|---|---|
| 2012-2014 | Mitglied des Vorstands und Leiter Geschäftsbereich Mobile Applikationen, Bosch Rexroth AG |
| 2010-2012 | Mitglied des Vorstands und Leiter Geschäftsbereich Erneuerbare Energien, Bosch Rexroth AG |
| 2009-2010 | Mitglied des Vorstands/Chief Technology Officer, MAN Diesel & Turbo SE |
| 2002-2009 | Mitglied des Vorstands/Business Units Power Plants und Marine Medium Speed, MAN Diesel SE |
| 2000-2002 | Leiter Produktbereich Motoren und stellvertretender technischer Geschäftsführer, Liebherr Machines Bulle S.A. |
| 1986-1999 | Diverse Positionen, MTU Motoren- und Turbinen-Union Friedrichshafen GmbH |

**Studium:**

| | |
|---|---|
| 1992 | Promotion (Dr.-Ing.) in der Fachrichtung Verbrennungsmotoren |
| bis 1986 | Studium (Dip.-Ing.) des Maschinenbaus |

# Intelligente Produktion als wichtiger Erfolgsfaktor der Nachhaltigkeitsstrategie

*S. Spindler, CEO Schaeffler Industrial*

## Kurzfassung

Nachhaltigkeit entlang der industriellen Wertschöpfungskette ist ein wesentlicher Beitrag zum Unternehmenserfolg und ein Differenzierungsmerkmal mit zunehmender Bedeutung. Speziell in Energie- und Ressourcen-intensiven Industrieprozessen sind intelligente Produktions- und Prozesssteuerungen Schlüsselelemente auf dem Weg zur CO2-neutralen Produktion.

In der Betrachtung der Wertschöpfungskette vom Rohstoff bis zum Endkunden sind Nachhaltigkeitsmaßnahmen in der Produktion von entscheidender Bedeutung für die Steigerung der Energieeffizienz und die Erreichung deutlicher CO2-Reduktionsziele. Darüber hinaus rückt die Kreislaufwirtschaft, d.h. die Wiederverwendung von Materialien, mehr und mehr in den Vordergrund. Kreisläufe wachsen zwischen der Produktion und deren Lieferanten wie auch zwischen den Produktherstellern und deren Endkunden. Als Beispiele seien wiederverwendbare Verpackungen, die Optimierung der Logistik und das Wiederaufarbeiten von Produkten nach Erreichen der Lebensdauer genannt. Weiterhin wird die Erzeugung der Rohmaterialien von substanziellen Veränderungen geprägt sein. Diese ergeben sich aus der Kombination der Strategie zur Dekarbonisierung mit wirtschaftlichen Aspekten. Die Herstellungsprozesse von Rohmaterialien werden ihren CO2 Footprint deutlich reduzieren müssen, als Beispiel sei die chemische Reduktion von Eisenerz durch Erdgas und Wasserstoff als Ersatzstoffe für Kohle genannt. Gleichzeitig werden die Materialkosten im Kontext der weltweiten Wettbewerbsfähigkeit weiterhin unter Druck sein.

Schaeffler hat in seiner Nachhaltigkeitsstrategie 7 wesentliche Ziele entlang der Wertschöpfungskette formuliert. Mit konkreten Maßnahmen für eine CO2-neutrale Produktion bis 2030, zur Senkung des Frischwasserbedarfs um 20% bis 2030, für eine Steigerung der Energieeffizienz um 100 GWh sowie für 100% Strombezug aus regenerativen Energien bis 2024 werden klimaschonende Maßnahmen in der eigenen Wertschöpfung konsequent umgesetzt. Ebenso sind ambitionierte Zielsetzungen für das CDP-Klimarating und die Selbstauskunft zur Nachhaltigkeit (SAQ) der Zulieferer vereinbart. In einer weiteren Dimension ist die Mitarbeitersicherheit ein wesentlicher Baustein: Bis 2024 soll die Unfallrate um jährlich 10% gesenkt werden. Aufgrund der zentralen Bedeutung der Steigerung der Energieeffizienz als Beitrag zur Nachhaltigkeit werden exemplarische Maßnahmen am Beispiel der Standorte Schweinfurt/Deutschland und Elgoibar/Spanien aufgezeigt.

Der Produktionsstandort Schweinfurt ist die Zentrale der Industriedivision und einer der führenden Standorte im Werkeverbund. Mehr als 5.000 Menschen entwickeln und fertigen hier ein breites Spektrum von Komponenten, das sich von hochpräzisen Speziallagern über Standardwälzlager bis zu Großlagern für Windkraftanlagen erstreckt. Darüber hinaus werden strategische Zukunftsfelder wie Robotics, Mechatronics und digitale Services ausgebaut. Erfolgskritische Technologien reichen vom Schmieden über das Schleifen und das Beschichten bis zur Montage. Der Energieverbrauch des Standorts entspricht dem einer Stadt mit 120.000 Einwohnern. Knapp die Hälfte des Energiebedarfs entsteht durch die Prozesse in der Wärmebehandlung und in der Schmiede. Die Wärmebehandlung entscheidet u.a. über die Leistungsfähigkeit und Gebrauchsdauer des Wälzlagers in der Anwendung. Der jeweilige Energiebedarf ist abhängig vom verwendeten Wälzlagermaterial und der Komponentengröße. Durch Konnektivierung und Sensorisierung der Schmiedeanlage wird ein intelligentes Simulationsmodels aufgebaut, welches ungünstige Produktionsreihenfolgen identifiziert und automatisiert den Produktionsplan optimiert.

Im nordspanischen Werk Elgoibar werden Wälzkörper für Nadellager hergestellt. Mit der Erfindung des käfiggeführten Nadellagers hat Dr. Georg Schaeffler den Grundstein für das Unternehmen gelegt. Dieses Produkt wurde über Jahrzehnte weiterentwickelt und bildet nach wie vor eine wichtige Säule für das Geschäft. Erfolgskritisch sind eine hochpräzise Umform-, Schleif- und Poliertechnik in Verbindung mit einer kontinuierlichen Steigerung der Produktivität. Für den Polier- und Waschprozess der Nadeln benötigt das Werk Elgoibar rund 122.500 Kubikmeter Wasser im Jahr, umgerechnet fast 50 Olympia-Schwimmbecken. Im Polierprozess werden die Nadeln als Halbzeug mit einer wasserbasierten Poliermasse (~100 Liter Wasser) für mehrere Stunden in Poliertrommeln bearbeitet. Nach Beenden dieses Vorgangs und Säubern der Trommel wird der Waschvorgang in der Waschtrommel eingeleitet. Hierbei werden die verbliebenen Partikel ausgespült. Der Wasserbedarf des Vorgangs beträgt bis zu 3.000 Liter. Das Werk Elgoibar betreibt in Summe ~160 Polier- und Waschtrommeln. Durch Anpassungen im Produktionsprozess und bei den Aufbereitungsanlagen gelingt es dem Werk, bereits rund 60 Prozent des verwendeten Wassers wiederzuverwerten. Durch ein neues Wasseraufbereitungssystem soll die Kapazität zur Nutzung von recyceltem Wasser künftig auf bis zu 100 Prozent erhöht werden. Elgoibar gilt als Vorbild im Werkeverbund: Bereits heute fertigt Schaeffler hier CO2-Emissionsfrei.

Vergleichbare und darüberhinausgehende Maßnahmen wie z.B. die bedarfsgerechte Erzeugung der Druckluft werden je nach Schwerpunkt der eingesetzten Technologien in allen Werken umgesetzt.

## Plenarvortrag

# Zukunft hat mehr Wert

**Saori Dubourg**
*Mitglied des Vorstands der BASF SE*

**Geburtsjahr:**
1971

**Aktuelle Position:**

| | |
|---|---|
| seit 2017 | Mitglied des Vorstands der BASF SE, Ludwigshafen, Deutschland |

**Bisherige Positionen:**

| | |
|---|---|
| 2013-2017 | President, Nutrition & Health, BASF SE, Lampertheim, Deutschland |
| 2009-2013 | President, Asia Pacific, BASF East Asia Regional Headquarters Ltd., Hongkong |
| 2009 | Senior Vice President, Global HR-Executive Management & Development, BASF SE, Ludwigshafen |
| 2008-2009 | Senior Vice President, Senior Project Leader Diversity & Inclusion, BASF SE |
| 2004-2008 | Director, Business Management Europe, BASF AG |
| 2002-2004 | Manager Fibre Bonding Business & Controlling, BASF South East Asia Singapur |
| 2001-2002 | Stab eines Vorstandsmitglieds, BASF South East Asia, Singapur |
| 2000-2001 | Senior Manager, E-Commerce Dispersions, BASF AG |
| 1999-2000 | Projekt bei BASF Japan Ltd., Tokio, Japan |
| 1998-1999 | Projekt bei BASF Corporation, Charlotte, North Carolina, USA |
| 1997-1998 | Manager, Globale Strategie Dispersions, BASF AG |
| 1996-1997 | Regionales Marketing Europa, BASF AG |

# Zukunft hat mehr Wert

*S. Dubourg, Mitglied des Vorstands der BASF SE*

## Kurzfassung

Die Welt befindet sich an einem Wendepunkt hin zu einer ressourceneffizienten Wirtschaft.

Europa hat als Vorreiter und mit der Entscheidung für eine eigene nachhaltige Transformation unter der großen Überschrift „European Green Deal“ nicht nur das ambitionierteste Klimaprogramm weltweit vorgelegt, sondern gleichzeitig eine starke politische Vision.

Es geht beim Green Deal aber nicht nur darum, das europäische Haus klimapolitisch in Ordnung zu bringen. Vielmehr geht es darum, die europäische Wirtschaft so auszurichten, dass sie im globalen Wettbewerb zum starken Player für Nachhaltigkeit wird.

Dabei werden Billionen von Investitionsgeldern mobilisiert, die die Dimensionen des Marshallplans bei Weitem übersteigen. Das ist eine verantwortungsvolle, generationenübergreifende und herausfordernde Aufgabe. Dafür braucht es nicht nur massive Investitionen in Infrastruktur, neue Technologien und Innovationen, sondern auch neue Steuerungskonzepte, die über die klassischen Ansätze und der BWL des letzten Jahrhunderts hinausgehen.

Mit der Werteallianz entwickeln BASF und weitere Partner einen Ansatz, der eine neue Perspektive auf die Wertschöpfung von Unternehmen ermöglicht. Diese versucht eine Antwort auf die zentrale Frage zu geben: Wie sind makroökonomisch Gewinnoptimierung und Ressourceneffizienz am klügsten zusammenzubringen? Es bewertet die ökonomischen, ökologischen und sozialen Auswirkungen unternehmerischen Handelns entlang der Wertschöpfungskette.

Die Zukunft der Wirtschaft, ihre Bedeutung und Akzeptanz sowie ihre globale Wettbewerbsfähigkeit sind eng verknüpft mit ihrer Fähigkeit zum ressourcenschonenden Wachstum. Deshalb müssen wir jetzt anfangen, weltweit Maßstäbe zu setzen und in die richtigen Zukunftsmärkte zu investieren.

## Plenarvortrag

# Nachhaltigkeit durch eine ganzheitliche Betrachtung der flexiblen Blechbearbeitung

**Dr.-Ing. Heinz-Jürgen Prokop**
*Mitglied der Gruppengeschäftsführung und*
*Vorsitzender des Geschäftsbereichs Werkzeugmaschinen,*
*TRUMPF GmbH + Co. KG*

**Geburtsjahr:**
1958

**Aktuelle Position:**

| | |
|---|---|
| seit 2017 | Mitglied der Gruppengeschäftsführung und<br>Vorsitzender des Geschäftsbereichs Werkzeugmaschinen,<br>TRUMPF GmbH + Co. KG |

**Bisherige Positionen:**

| | |
|---|---|
| 2012-2017 | Geschäftsführer Entwicklung und Einkauf,<br>TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG |
| 2007-2011 | Geschäftsführender Gesellschafter, Frigoblock Grosskopf GmbH, Essen |
| 2002-2006 | Vorsitzender Geschäftsführer, Fritz Studer AG, Schweiz |

**Studium:**

| | |
|---|---|
| 1988 | Promotion zum Dr.-Ing. an der Universität Stuttgart<br>Institut für Maschinenelemente und Gestaltungslehre |
| bis 1985 | Studium der Verfahrenstechnik an der Universität Stuttgart |

# Nachhaltigkeit durch eine ganzheitliche Betrachtung der flexiblen Blechbearbeitung

*H.-J. Prokop, Mitglied der Gruppengeschäftsführung und Vorsitzender des Geschäftsbereichs Werkzeugmaschinen, TRUMPF GmbH + Co. KG*

## Kurzfassung

Klimaneutralität zu erreichen und ressourcenschonend zu handeln ist für uns alle eine wesentliche Herausforderung der nächsten Jahrzehnte. Sie betrifft sowohl jeden Einzelnen von uns als auch die Unternehmen. Viele Unternehmen haben Ihre Klimastrategie daher bereits formuliert.

Seit Ende 2020 produziert TRUMPF bilanziell $CO_2$-neutral und hat sich gegenüber der Science Based Target Initiative verpflichtet, weitere Maßnahmen zum 1,5 Grad-Reduktionspfad des Pariser Klimaabkommens umzusetzen. Hierbei werden beispielsweise die Emissionen aller Produkte weltweit bis 2030 um 14 % reduziert.

Um diese globalen Ziele zu erreichen sind Investitionen und der Aufbau von Know-How notwendig. Da Werkzeugmaschinen in erheblichem Maß zur $CO_2$-Emmission beitragen, haben wir, als Hersteller, die Verantwortung auch unsere Kunden bei der Erreichung Ihrer Klimaziele zu unterstützen. Insbesondere auf drei Themenfeldern können hierbei Fortschritte erzielt werden:

1. Werkzeugmaschinen müssen so energieeffizient und ressourcenschonend wie möglich gestalten werden.

Dazu wurden Bearbeitungstechnologien auf niedrige $CO_2$-Emission hin optimiert und Algorithmen und Services geschaffen, die einen störungsarmen Betrieb der Werkzeugmaschine gewährleisten.

2. Es müssen Lösungen entwickeln werden, die helfen, die Wertschöpfungsketten der Kunden weitgehend störungs- und verschwendungsfrei zu gestalten.

Neuartige Sensorik-Lösungen vermeiden Ausschuss, Fertigungssteuerungssysteme erhalten durch Ortungssysteme Echtzeitdaten aller Materialbewegungen wodurch geschlossene Regelkreise entstehen.

3. Die gefertigten Produkte müssen mit dem energieeffizientesten Verfahren und mit geringstmöglichem Materialeinsatz produziert werden.

Einer der größten Verursacher von $CO_2$-Emissionen in der metallverarbeitenden Industrie ist der Materialeinsatz für die auf Werkzeugmaschinen gefertigten Produkte. Durch geeignete Wahl der Materialien, materialarme Konstruktion und Auswahl des Fertigungsverfahrens können Emissionen in erheblichem Maß reduziert werden.

Datenanalyse und Künstliche Intelligenz leistet in allen drei Themenfeldern wertvolle Unterstützung, den jeweiligen Optima näherzukommen. Dabei gehen Ökologie und Ökonomie in erstaunlicher Weise Hand in Hand.

## Plenarvortrag

# Sustainable Operations

**Dr. Christina Reuter**
*Head of DDMS Program at Operations,*
*Airbus Defence and Space*
*Mitglied des Aufsichtsrats der KION GROUP AG*

**Geburtsjahr:**
1985

**Aktuelle Position:**

| | |
|---|---|
| seit 2020 | Head of DDMS Program at Operations, Airbus Defence and Space (ab 09/2020 in Elternzeit) |
| seit 2016 | Mitglied des Aufsichtsrats der KION Group AG |

**Bisherige Positionen:**

| | |
|---|---|
| 2019-2020 | Head of Operations for Space Electronics, Airbus Defence and Space |
| 2017-2018 | Head of Central Manufacturing Engineering and Operational Excellence, Space Equipment, Airbus Defence and Space |
| 2014-2016 | Oberingenieurin, Abteilungsleiterin Produktionsmanagement, Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen University |
| 2014-2016 | Senior Trainer, Lean Enterprise Institut |
| 2012-2013 | Gruppenleiterin Produktionslogistik, WZL der RWTH Aachen University |
| 2010-2013 | Projektleiterin, Wissenschaftliche Mitarbeiterin, WZL der RWTH Aachen University |

**Studium:**

| | |
|---|---|
| 2010-2014 | Promotion zur Dr.-Ing., WZL der RWTH Aachen University |
| 2008-2009 | Masterstudiengang Industrial Engineering, Tsinghua University (Peking, China) |
| 2004-2010 | Diplomstudiengang Wirtschaftsingenieurwesen mit Schwerpunkt Maschinenbau, RWTH Aachen University |

## Sustainable Operations

*C. Reuter, Head of DDMS Program at Operations, Airbus Defence and Space*

## Kurzfassung

Airbus hat seinen Purpose (Zweck) wie folgt definiert: „Wir sind Pioniere einer nachhaltigen Luft- und Raumfahrt für eine sichere und vereinte Welt.“. Nachhaltigkeit hat dabei eine doppelte Bedeutung. Auf der einen Seite bedeutet es für Airbus, ein nachhaltiges, wettbewerbsfähiges und zukunftsfähiges Unternehmen zu sein. Auf der anderen Seite wird unter Nachhaltigkeit die Ambition verstanden, den Einfluss auf die Umwelt zu minimieren und den Weg für einen nachhaltigen globalen Luftverkehr zu gestalten. Dabei bezieht sich Nachhaltigkeit nicht nur auf den Umweltschutz, sondern hat eine umfassendere Bedeutung. Die Vereinten Nationen definieren Nachhaltigkeit als „eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeit künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen“.[1] Airbus folgt diesem Verständnis von Nachhaltigkeit und berücksichtigt dabei die Dimensionen Umwelt, Soziales, Wirtschaftlichkeit und Governance.

Der oben beschriebene Unternehmenszweck wird durch die Strategie des Unternehmens sowie der einzelnen Divisionen des Airbus Konzerns zum Leben gebracht. In diesem Beitrag wird Bezug auf die Division Defence and Space genommen. Die Produkte und Lösungen der Division Defence and Space unterstützen Regierungen, Organisationen des Katastrophenschutz und Gesundheitseinrichtungen beim weltweiten Schutz und der Verteidigung von Zivilisten und stellen Infrastrukturen zur Kommunikation, Zusammenarbeit und Wissensaufbereitung bereit. So helfen beispielsweise Erdbeobachtungssatelliten ein besseres Verständnis bezüglich des Klimawandels zu erreichen.

In dem Plenarvortrag werden verschiedene Beispiele des Funktionsbereichs Operations vorgestellt, die die Nachhaltigkeitsziele des Unternehmens adressieren. Der Funktionsbereich Operations umfasst Dienstleistungen für die verschiedenen Programmlinien und ist in die Bereiche Produktion, Einkauf, Qualität und Industrial Strategy gegliedert. In den Beispielen im Plenarvortrag geht es etwa um die Reduktion des Energieverbrauchs in der Produktion oder die Sicherstellung von Arbeitsplatzsicherheit. Außerdem werden Erfolgsfaktoren zur Erreichung von „Sustainable Operations“ vorgestellt.

[1] United Nations, Report of the World Commission on Environment and Development, Our Common Future, 1987

Ein wesentlicher Erfolgsfaktor von „Sustainable Operations“ ist neben dem Einsatz von innovativen, ressourcenschonenden Technologien die digitale Vernetzung der Prozesse sowie die funktionsübergreifende Kollaboration. Dafür ist eine Etablierung einer Daten- und Informationsdurchgängigkeit entlang des kompletten Wertstroms unter Einbeziehung der Lieferanten sowie entlang der verschiedenen Hierarchieebenen zur Erreichung vollständiger Transparenz zu jeder Zeit und von jedem Ort essenziell. Eine Grundlage bildet die IT-Infrastruktur, die genau diese Informationsdurchgängigkeit und -verfügbarkeit sicherstellt. Darüber hinaus ist ein besonderes Augenmerk auf die Datenqualität sowie auf die Qualität der Prozesse, mit denen Wert aus Daten generiert wird, zu legen.

Ein wichtiger Vorteil der Digitalisierung ist die höhere Anzahl von Messgrößen und der damit verbundene höhere Grad der Individualisierung von Daten, da Entscheidungen nicht mehr von Durchschnittswerten, sondern auf Basis von Korrelationen abgeleitet werden können. Während die Leistung des Produktionssystems in der Vergangenheit maßgeblich durch Produktivitätsmessgrößen ermittelt wurde und Kennzahlen wie Zeit (z.B. Durchlaufzeit, Termintreue), Kosten (z.B. Anlagenkosten, produktive Stunden) und Qualität (z.B. Fehlerraten) im Vordergrund standen, ist nun ein ganzheitlicherer Ansatz möglich und erforderlich. Zusätzlich zu den genannten Kenngrößen rücken Kennzahlen zur Nachhaltigkeit wie Energie- oder Wasserverbrauch sowie Unfallraten, Polyvalenz der Mitarbeiter und andere in den Fokus. Der Wert der Daten wird durch ihre Relevanz für den Nutzer in Bezug auf die Zielerreichung bestimmt und kann durch die Aggregation und Veredelung der Daten gesteigert werden.

Durch die transfunktionale Informationsverfügbarkeit sowie die Individualisierung der Daten werden eine bessere Prozesseffizienz, schnellere Entscheidungen und niedrigere Kosten ermöglicht. Dabei müssen Entscheider in der Lage sein, Daten vorurteilsfrei zu lesen, gegebenenfalls kontraintuitive Ergebnisse zuzulassen und datengestützte Entscheidungen abzuleiten. Darüber hinaus ist die Art der funktionsübergreifenden Zusammenarbeit entscheidend für die Effizienzsteigerungen. Eine digitale Infrastruktur alleine reicht nicht aus, um den Wert der Daten zu heben. Vielmehr bedarf es organisatorische Anpassungen, einem Umdenken der Prozessbeteiligten, weg von einem Silodenken hin zu prozessorientiertem Denken vom Anfang bis Ende des Prozesses. Eine datengetriebene, kollaborationszentrierte Kultur in Ökosystemen, in der die individuellen Stärken von Mitarbeitern und technischen Systemen zielorientiert gebündelt werden, ist essenziell für die Leistungsfähigkeit des Systems. Die funktionsübergreifende Zusammenarbeit und die Verfügbarkeit von relevanten Daten bilden die Basis für eine schnellere Anpassungsfähigkeit auf unvorhersehbare Ereignisse was sich positiv auf die Wettbewerbsfähigkeit auswirkt. Auch wenn zukünftige Ereignisse durch dynamische Einflussfaktoren weniger planbar erscheinen, können sie durch schnelle Anpassungsfähigkeit besser begegnet werden.

Die Treiber für Sustainable Operations liegen in innovativen, ressourcenschonenden Technologien, der digitalen Infrastruktur, der Art der interdisziplinären Zusammenarbeit sowie in einer Unternehmenskultur, in der datengetriebenes und nachhaltiges Handeln selbstverständlich ist. Damit werden wirtschaftliche und nachhaltigkeitsorientierte Ziele vereinbar. Der Wert der Daten für eine Sustainable Operations kann nur durch Interdisziplinarität und funktionsübergreifende Zusammenarbeit gehoben werden.

# SESSION 1

## ARCHITEKTUR EINER VERNETZTEN, ADAPTIVEN PRODUKTION

HEXAGON

# Empowering an autonomous future

## Data-driven manufacturing solutions from Hexagon

Put data to work in your manufacturing processes to improve efficiency, quality and productivity.

Hexagon is accelerating digital transformation in manufacturing, bringing data from design and engineering, production and metrology together to enable manufacturers to deliver better products.

Find out more at **hexagonmi.com**

**#makeitsmarter**

# 1 Architektur einer vernetzten, adaptiven Produktion

*R. H. Schmitt, N. König, S. Jung, M. Peterek*

## Gliederung

1 Einleitung ....33

2 Anforderungen der Produktion an Vernetzung und Adaptivität ....34

2.1 Universelle Konnektivität – „Connect Everything“ ....34

2.2 Datenintegrität ....37

2.3 Souveränität ....39

2.4 Beitrag der vernetzten, adaptiven Produktion zu den Nachhaltigkeitszielen von Unternehmen ....40

3 Architektur für die vernetzte, adaptive Produktion ....41

3.1 Standortübergreifende Vernetzung ....41

3.2 Dynamische Vernetzung ....42

3.3 Plattformen für die unternehmensübergreifende Vernetzung ....45

4 Ausblick ....45

5 Literatur ....47

## Kurzfassung

**Architektur einer vernetzten, adaptiven Produktion**

Die Vision einer vernetzten, adaptiven Produktion gelingt nur über eine leistungsfähige Infrastruktur. Was sind die Leistungsmerkmale einer solchen Infrastruktur und wie sieht eine skalierbare Umsetzung im Produktionsumfeld aus? Welche Bausteine ermöglichen die echtzeitfähige Bereitstellung von Information entlang der gesamte Prozesskette und können auch ohne bedeutende Mehrkosten in die Produktion integriert werden? Welchen Beitrag liefert die Digitalisierung zu den Nachhaltigkeitszielen eines Unternehmens? Das Internet of Production ist der Rahmen für eine solche durchgängige, sichere und leistungsfähige Architektur. Die Integrität, Souveränität und Echtzeitfähigkeit der erhobenen Daten ist dabei notwendige Bedingung für die Nutzbarmachung in der Produktion.

## Abstract

**Architecture of a networked, adaptive production**

The vision of a networked adaptive production can only be achieved with a high-performance infrastructure. What are the performance characteristics of such an infrastructure, and what does a scalable implementation in the production environment look like? Which components enable the real-time provision of information along the entire process chain and can also be integrated into production without significant additional costs? What contribution does digitization make to a company’s sustainability goals? The Internet of Production is the framework for such an end-to-end, secure, and efficient architecture. The integrity, sovereignty, and real-time capability of the data collected are necessary for production.

# 1 Einleitung

Die wirtschaftliche Situation in Deutschland ist maßgeblich auf die Stärke der produzierenden Industrie zurückzuführen. Sie schafft wertschöpfende Arbeitsplätze und Produkte, die höchsten Qualitätsanforderungen genügen. Dabei sehen Unternehmen die Digitalisierung zunehmend als Chance [1] – durch die Sammlung und Verwertung von Produktions- und Produktdaten über den gesamten Produktlebenszyklus lassen sich Produktivitätssprünge erzielen oder gleich gänzlich neue datenbasierte Geschäftsmodelle anbieten. Diese Datenmenge wird bis 2025 auf 79,4 Billionen Gigabyte anwachsen [2], birgt bei Datenverlust jedoch ein Risiko des Know-how-Abflusses oder bei Manipulation gar die Nichterfüllung von Kunden-, Qualitäts- oder Gesetzesanforderungen. Die große Datenmenge dem Wertschöpfungsnetzwerk sicher bereitzustellen, um auf deren Basis die Produktivität zu erhöhen, ist ein kritischer Faktor für die Zukunftsfähigkeit von Unternehmen.

Gleichzeitig sieht sich die Wirtschaft den zunehmenden Forderungen nach Nachhaltigkeit und Erfüllung von Unternehmenszielen gemäß der ESG-Kriterien ausgesetzt. Dies ist zum einen politisch motiviert, wie etwa in Form des European Green Deal [3], zum anderen zeichnet sich ab, dass der Kapitalmarkt Unternehmen zunehmend nach ESG-Kriterien bewertet. Boos [4, 5] schlägt daher vor, die ESG-Kriterien mit einer finanziellen Bewertung der Produktivität eines Unternehmens zu koppeln und sieht weiterhin einen erheblichen Mehrwert durch die Digitalisierung.

Dies macht deutlich, dass die größtmögliche Realisierung von Potenzialen der Digitalisierung unabdingbar ist, um im Wettbewerb produzierender Unternehmen auf globalen Märkten dauerhaft eine Vorreiterrolle einnehmen zu können. Aufgrund steigender Komplexität in den Produktionsabläufen steigt die Anzahl der immanenten Wechselwirkungen einzelner Prozesse immer stärker an. Darüber hinaus führt die steigende Individualisierung der Produkte zu einer deutlichen Erhöhung der Prozessvarianz. Die konsequente Nutzung des Wissens, welches in den exponentiell ansteigenden Datenmengen steckt, verfügt dabei über eine starke Hebelwirkung zur kontinuierlichen *Verbesserung der produkt- und prozessbezogenen Qualität*. Anstatt einer reinen Beurteilung anhand der Prozessdaten können auch vorhandene Informationen über Zwischenerzeugnisse und individuelle Baugruppen berücksichtigt werden. Gleichzeitig kann so durch eine qualitätsgetriebene Optimierung des Ressourceneinsatzes den stetig zunehmenden Nachhaltigkeitsforderungen aus Bevölkerung und Politik begegnet werden. Der rasante *Anstieg an Datenverfügbarkeit* liegt zum einen an einer immer stärkeren Vernetzung von Liefernden, Produzierenden und Kundenkreis, zum anderen an der Nutzung einer steigenden Anzahl unterschiedlicher Informationskanäle von integrierter Sensorik bis zu online Produktreviews.

Ziel ist dabei immer einen sehr konzentrierten und bewussten Umgang mit den Themen der Vernetzung und Digitalisierung zu ermöglichen. Jedoch ist die Vernetzung kein Selbstzweck, sondern soll im Sinne des Internet of Production (IoP) einen direkten Mehrwert für die Produktion bedeuten. Letzterer entsteht durch eine durchgängige Nutzung der verfügbaren Daten – Turning Data into Value.

In diesem Beitrag liegt der Fokus an der notwendigen Infrastruktur, die eine solche Nutzung erst ermöglicht. Es sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, die bereits jetzt einsetzbar und integrierbar sind. Die Kommunikation erfolgt dabei in der Regel in verteilten Kommunikationsnetzwerken. Eine Infrastruktur im Sinne des IoP berücksichtigt dabei funktionale, physikalische und konzeptionelle Perspektiven des Digitalen Schattens [6] in der Produktion. Die physische Infrastruktur unterstützt die verteilten Multi-Agent-Modellausführungen und Datenflüsse mit hoher Leistung, Zuverlässigkeit und Sicherheit in verteil-

ten Kommunikationsnetzen. Darüber hinaus muss die Infrastruktur den Digitalen Schatten als Wissensdiagramm heterogener Datenspeicher und Agenten konsistent verwalten, formale Zuordnungen zwischen ihnen ermöglichen und Code für eine effiziente Datenintegration und einen effizienten Datenaustausch generieren. Die angestrebte Infrastruktur schafft eine neuartige Kombination von datengesteuerten Lernalgorithmen und physikalischen oder Simulationsmodellen, um über den Digitalen Schatten große Datenmengen in Instanzen und formale Modelle zu verwandeln, die zusammen mit Kontextänderungen wiederum neue Daten erzeugen. Aber auch die dabei entstehenden Herausforderungen, wie Datenintegrität und Datensouveränität, sollen beleuchtet werden.

## 2 Anforderungen der Produktion an Vernetzung und Adaptivität

Grundlage der vernetzten, adaptiven Produktion bildet die vollständige Vernetzung von Maschinen, Produkten und Menschen mittels Software zu einem cyber-physischen Produktionssystem [7]. Dafür sind unterschiedliche Wertschöpfungsglieder einzubinden. Für eine mögliche Skalierung des Ansatzes auf die gesamte Wertschöpfungskette, die alle Phasen des Produktlebenszyklus abbildet, d.h. von der Idee über die Entwicklung, Fertigung, Nutzung, Wartung bis zum Recycling, ist eine einfache und schnelle Einbindung vieler unterschiedlicher Teilnehmenden wie Produktionsmaschinen, Datenbanken und IT-Systemen notwendig. Als Ideal werden daher Technologien angestrebt, die eine *universelle Konnektivität* bieten.

Mitunter ist ein Datenaustausch zwischen mehreren Unternehmen mit einer dezentralen Datenspeicherung erforderlich. Hierdurch wird der Produktstatus in allen Phasen transparent und rückverfolgbar. Die transparente Rückverfolgung bietet im Produktschadensfall die bestmögliche Versicherung der Wertschöpfungspartner gegen Regressforderungen und Reputationsverluste. Die Vernetzung von Wertschöpfungsketten und die dezentrale Verfügbarkeit von Daten aller Beteiligten ist somit Treiber für die Wettbewerbsfähigkeit.

Die grundlegende Forderung nach Vernetzung muss jedoch einhergehen mit der Gewährleistung der Sicherheit von Daten, wobei deren Austausch durch Verschlüsselung gegen unbefugten Zugriff und Nutzerberechtigungen sichergestellt werden muss. Insbesondere die Manipulationssicherheit der Daten zum Qualitätsnachweis ist innerhalb der Wertschöpfungskette in Form einer Echtheitsprüfung essentiell.

Der Aufwand für die Vernetzung in der Produktion muss sich in einem quantifizierbaren Mehrwert niederschlagen. Daher müssen die Produktivitäts- und ökologischen Kennzahlen einer vernetzten, adaptiven Produktion im positiven Verhältnis zum finanziellen und energetischen Aufwand stehen.

Zusammenfassend leiten sich verschiedene Handlungsfelder ab, die im Folgenden beschrieben werden.

### 2.1 Universelle Konnektivität – „Connect Everything“

Die oben genannte Forderung, die verschiedenen Glieder der Wertschöpfung vollständig zu vernetzen, stellt Unternehmen vor die Herausforderung, Daten in einem heterogenen Ressourcennetzwerk zwischen unterschiedlichen Endpunkten über verschiedene Schnittstellen und in verschiedenen Protokollen zu übertragen. Die Forderung nach einer einfachen und schnellen Einbindung ist diametral hierzu, bedeutet sie doch in Konsequenz die Komplexität in der Auswahl aus den vielzähligen Optionen stark zu reduzieren.

Eine *universelle Konnektivität* soll dagegen auf eine geringstmögliche Auswahl an Übertragungstechnologien zurückgreifen können, ohne dass die jeweilige Applikation an Leistungsfähigkeit einbüßt. Eine Auswahl kann an Hand der folgenden Kriterien getroffen werden:

- *Mobilität* – Fähigkeit, Daten von bzw. zu mobilen Gütern über weite Flächen zu übertragen, z.B. mobile und sensorgestützte Roboter, kabellose Sensoren, autonome Förderzeuge (AGV).
- *Echtzeitfähigkeit* – Möglichkeit der Synchronisation von Endgeräten sowie Übertragungsraten und Datentransferintervalle im Bereich weniger Millisekunden, um damit eine Konnektivität bis in die Feldbusebene zu ermöglichen.
- *Übertragungsbandbreite* – Vermögen, Daten mit Übertragungsraten bis in den einstelligen GBit/s Bereich je Endgerät zu übertragen.
- *Skalierbarkeit* – Vermögen, die oben genannten Eigenschaften für mehrere Endgeräte gleichzeitig zur Verfügung zu stellen.

Eine besondere Bedeutung kommt der echtzeitfähigen Kommunikation zu. Bislang ist diese primär auf die Feldbusebene beschränkt. Eine umfängliche Nutzung der Daten aus dieser Ebene, d.h. die Erfassung, Aggregation und Verarbeitung der Daten sowie die Rückkopplung in die Wertschöpfungskette bis in die Feldebene, setzt voraus, dass die Echtzeitfähigkeit der Datenübertragung in allen Ebenen gewährleistet ist.

| ***Kriterium*** | **WLAN** | **Bluetooth** | **ZigBee** | **5G** | **Ethernet** |
|---|---|---|---|---|---|
| *Mobilität* | + | o | o | + | — |
| *Echtzeitfähigkeit* | — | o | — | + | + |
| *Übertragungsbandbreite* | o | — | — | + | + |
| *Skalierbarkeit* | o | — | o | + | + |

*Tabelle 1: Bewertung verschiedener Technologien für die Konnektivität*

Tabelle 1: Bewertung verschiedener Technologien für die Konnektivität zeigt eine qualitative Bewertung verschiedener Konnektivitätslösungen in Bezug auf die oben angeführten Kriterien. WLAN erfüllt die Anforderungen hinsichtlich Mobilität im industriellen Kontext. Über eine entsprechende Anzahl an WLAN Access Points lässt sich prinzipiell ein WLAN-Netz für eine gesamte Produktionshalle aufspannen. Es gibt eine Vielzahl an kostengünstigen Sende-Empfangsmodulen für die Integration in die Produktionsausrüstung. Da WLAN im unlizenzierten Spektrum betrieben wird, ist es herausfordernd, eine robuste und performante Konnektivität zu erreichen. WLAN-Netze sind typischerweise bandbreitenoptimiert, das heißt, dass die zur Verfügung stehende Bandbreite auf alle Beteiligten aufgeteilt wird. Dies und die Tatsache, dass ein Betrieb im unlizenzierten Spektrum anfällig für Störungen ist, legen den Schluss nahe, dass eine Echtzeitfähigkeit mit niedriger und reproduzierbarer Latenz mit WLAN schwer zu realisieren ist. Zwar lassen sich seit Einführung von Technologien gemäß des IEEE 802.11ac Standards Übertragungsraten von bis zu 1,3 GBit/s erreichen, jedoch werden diese auf alle Teilnehmenden aufgeteilt. Auf Grund der hier genannten Eigenschaften ist insbesondere die robuste, echtzeitfähige Übertragungseigenschaft für WLAN kritisch zu sehen.

Bluetooth verfügt auf Grund der vergleichsweise geringen Reichweite von mehreren 10 m sowie der vorwiegenden Nutzung im Peer-to-Peer Verfahren mit nur wenigen Beteiligten über eine begrenzte Mobilitätseignung. Auf Grund der geringen Anzahl an verbundenen

Endgeräten lassen sich über Bluetooth vergleichsweise geringe, reproduzierbare Übertragungslatenzen von bis zu 2 ms erreichen. Auch hier gilt wie bereits für WLAN, dass die Übertragung in einem unlizenzierten Spektrum stattfindet und generell störanfällig ist. Als Übertragungsbandbreiten werden bis zu 2 Mbit/s angegeben, was für zahlreiche Anwendungen nicht ausreichend ist. Ein großer Schwachpunkt von Bluetooth ist die mangelnde Skalierbarkeit. Es lassen sich keine Netze mit einer größeren Anzahl an Teilnehmenden wie z.B. Sensornetzwerke realisieren, weshalb es als universelle Konnektivitätslösung ausscheidet.

Ähnliche Eigenschaften wie Bluetooth besitzt ZigBee, welches von der Skalierbarkeit jedoch besser ist, da es sich als Mesh verbindet und damit generell mehr Teilnehmende integrieren kann. Nachteilig ist die geringe Übertragungsbandbreite von max. 250 kBit/s sowie die höhere Latenz im zweistelligen ms-Bereich.

5G dagegen unterscheidet sich von den anderen drahtlosen Verbindungstechnologien dadurch, dass die Übertragung im lizenzierten Spektrum erfolgt und damit deutlich weniger störanfällig ist als die vielen Verfahren, die im unlizenzierten Frequenzbereich von 2,4 GHz übertragen. 5G lässt in der sogenannten Ultra-Reliable Low Latency Communication (URLLC) Latenzen im einstelligen ms-Bereich zu. Eine weitere Ausprägung ist die sogenannte Enhanced Mobile Broadband (eMBB) Übertragung, die dafür sorgt, dass mit bis zu 10 GBit/s genügend Kapazitäten zur Verfügung stehen. Ebenso ist es möglich, die genannten Bedingungen für eine große Anzahl an Beteiligten zu garantieren und damit die Konnektivitätslösung im industriellen Umfeld für ein Unternehmen leicht zu skalieren. Die Möglichkeit in Zukunft ein Time Sensitive Network (TSN) [8] über 5G zu realisieren eröffnet mit einer synchronisierten Datenübertragung das Potenzial, Sensordaten mit einem Zeitstempel zu versehen oder Steuerungsaufgaben in eine Cloud auszulagern.

Ethernet hat sich als Standard in der drahtgebundenen Kommunikation etabliert. Über eine zeitgemäße Netzwerkinfrastruktur sind die Anforderungen hinsichtlich der Übertragungsbandbreite mit 1 GBit/s über Kupferleitungen und der Gruppengröße leicht skalierbar. TSN wird auch für Ethernet umgesetzt, so dass mit Hilfe der Precision Time Protocol (PTP) die Echtzeitfähigkeit gelöst werden kann. Erste Produkte hierfür sind auf dem Markt erhältlich. Die Konnektivität für mobile Anwendungen kann wegen der Kabelverbindung selbstverständlich nicht gewährleistet werden.

Die Analyse zeigt, dass der Wunsch einer universellen Konnektivität durch eine Kombination von Ethernet für die kabelgebundene Infrastruktur (Server, stationäre Produktionsausrüstung) sowie 5G für die mobile Produktionsausrüstung erreicht werden. Wie eine solche Architektur aussehen kann, zeigt Abbildung 1. Verschiedene kabellose Sensoren mit 5G-Übertragung befinden sich an unterschiedlichen Messorten in der Produktion, z.B. Körperschall-, Beschleunigungs- oder Kraftsensoren auf Werkstücken zur Prozessüberwachung, Schwingungssensoren oder Mikrofone in Werkzeugmaschinen zur Zustandsüberwachung oder verteilte Sensoren für Temperatur oder Luftfeuchte zur Überwachung der Infrastruktur. Die verschiedenen Sensoren übertragen Messdaten und empfangen Konfigurationsdaten, zum Beispiel zur Bestimmung der Messfrequenz oder Ein/Aus, drahtlos mittels 5G. Die Daten werden an der 5G-Basisstation beziehungsweise dem 5G-Core per Local Breakout über Ethernet in die Produktions-IT gekoppelt. Hier können Sie beispielsweise in einer Factory Cloud, einer on-premise Edge-Cloud Lösung, in verschiedenen virtuellen Maschinen verarbeitet werden. Die Werkzeugmaschine kann über verschiedene hardware- oder softwarebasierte Monitoring-Möglichkeiten ihren jeweiligen Bearbeitungszustand, unter anderem Achskoordinaten oder Spindeldrehzahlen, als Datenstrom übermitteln. Die Datenströme der Sensoren und Maschinen können in der Factory Cloud zentral zusammengeführt und ausgewertet werden. Die Prozessdokumentation kann als Digitaler Zwilling in Datenbanken abgelegt werden und steht für weitere

Auswertungen zur Verfügung. Prozesseingriffe und Prozessregelungen können von der Factory Cloud drahtgebunden über Machine-to-Machine (M2M) Kommunikation zur Werkzeugmaschine übertragen werden. Weitere Informationen sind im Deliverable 3.2 des EU-Projekts „5G-SMART“ zu finden [9]. Im Falle einer Regelung ist in jedem Fall eine Echtzeitfähigkeit aller Kommunikationskanäle inklusive der Factory Cloud notwendig.

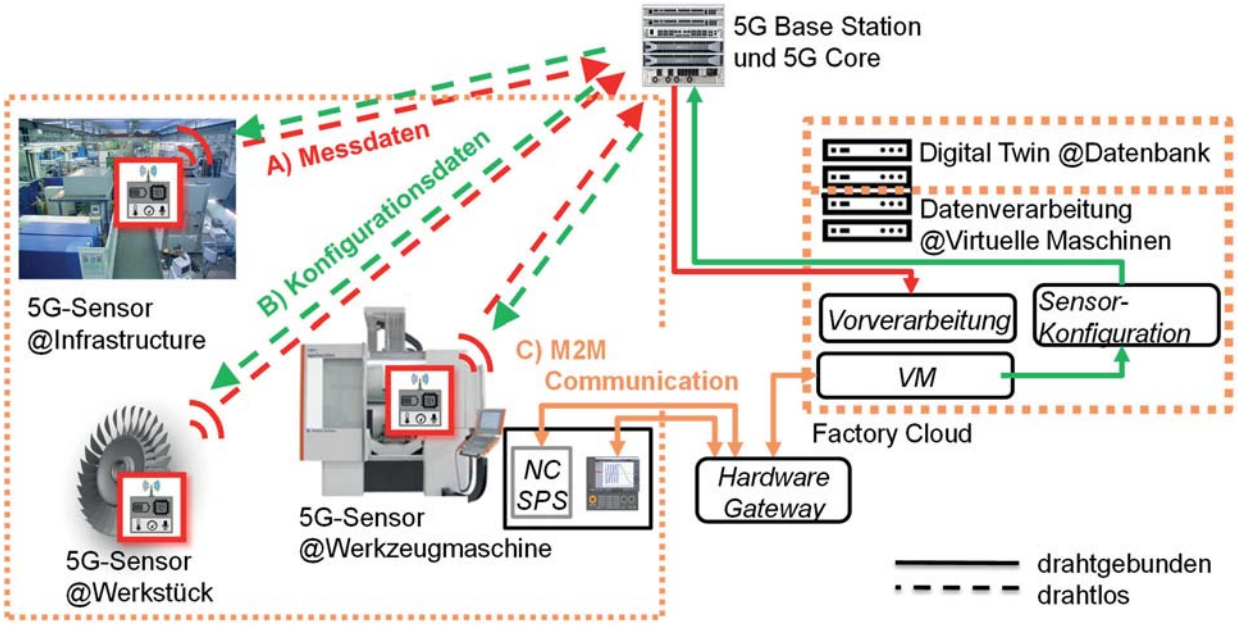



*Abbildung 1: Architektur für ein 5G-basiertes Prozess- und Zustandsmonitoring (nach [9])*

Potenziell kann die Konnektivität über 5G auch für nicht-mobile Anwendungen sinnvoll sein, etwa wenn die Datenraten über 1 GBit/s liegen oder eine Verlegung zusätzlicher Ethernet-Verbindungen wirtschaftlich nicht sinnvoll ist.

Neben der reinen Datenverfügbarkeit gilt es noch zwei weitere klassischen Ziele der Informationssicherheit zu betrachten – die Datenintegrität und die Datensouveränität.

## 2.2 Datenintegrität

Durch diese neu entstandene, durchgehende Konnektivität werden die Verfügbarkeit und Nutzung von Daten für Unternehmen somit immer einfacher werden. Vernetzte Produktionsressourcen produzieren laufend Daten und die neu entstandene IT-Infrastruktur ist in der Lage, Daten automatisiert und effizient zu speichern, zu verarbeiten und zu nutzen.

Mit dieser zunehmenden Vernetzung und Verfügbarkeit von Daten ergeben sich immer neue Herausforderungen in Bezug auf die Zuverlässigkeit und Vertrauenswürdigkeit von Daten – die sogenannte *Datenintegrität* (siehe Abbildung 2). Sendet zum Beispiel eine Person, in dem Fall Alice, ein Datenpaket zu ihrem Kollegen Bob, beschreibt die Datenintegrität die Korrektheit, Vollständigkeit und Konsistenz der Daten, sodass sichergestellt ist, dass Mallet die Daten nicht verändert hat. Dies wird insbesondere dann relevant, wenn sich Entscheidungen in Bezug auf das Geschäft oder die Produktion in zunehmendem Maße auf Daten stützen. So geben laut Aussage des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik 87% der Betroffenen an, dass Cyber-Angriffe erhebliche Konsequenzen für den Betriebsablauf verursachten [10]. Aus diesem Grund muss sichergestellt sein, dass die zugrundeliegenden Daten korrekt sind. Kann eine Veränderung oder Beschädigung der Daten nicht verhindert werden, so muss dies mindestens erkannt werden. Folgende Begriffe sind im Kontext der Datenintegrität wichtig:

- Richtigkeit des Inhaltes – korrekte Abbildung von realen Sachverhalten.
- Unveränderter Zustand – Daten werden bei einer Übertragung unverändert zugestellt und durch Systeme bei einer Verwendung nicht verändert.
- Erkennung von Modifikation – unterwünschte Modifikationen werden erkannt.
- Zeitliche Korrektheit – relevante Bedingungen wie Reihenfolge oder Verzögerungen werden eingehalten.
- Sicherstellung regulatorischer Vorgaben – Einhaltung der DSGVO und Datensicherheit.

Somit unterscheidet sich die Datenintegrität von der Datensicherheit in der Zielstellung – die Datensicherheit bezieht sich auf den Schutz von Daten und der Minimierung des Risikos eines Datenverlustes, wobei die Datenintegrität sich auf die Vertrauenswürdigkeit von Daten bezieht.

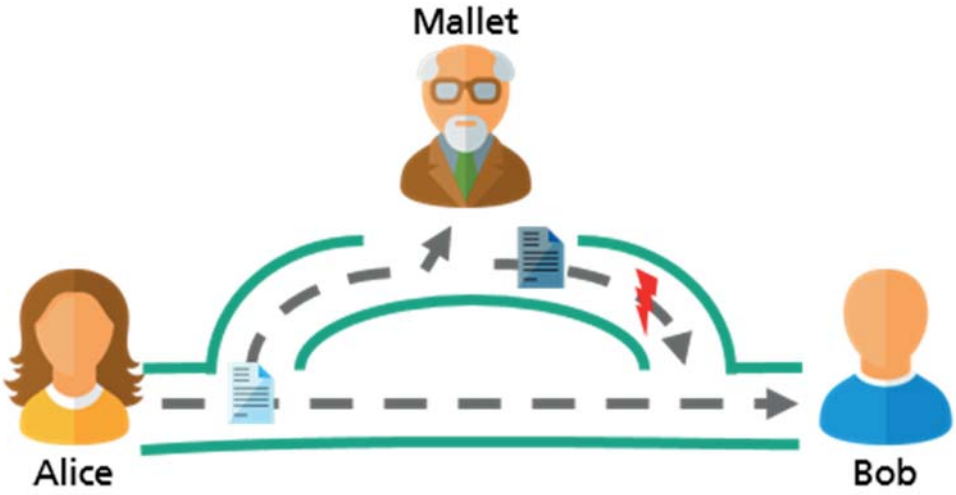



*Abbildung 2: Schaubild der Datenintegrität*

Die Datenintegrität umfasst somit Maßnahmen, Daten während deren gesamter Lebensdauer vor unautorisierter Veränderung zu schützen. Besonders im öffentlichen Fokus gewinnt das Thema häufig im Zusammenhang mit kriminellen Risiken an Aufmerksamkeit, welche z.B. unautorisierte Angriffe oder Datendiebstahl umfasst. Dabei Zielen solche Angriffe darauf ab, Daten zu verändern oder zu beschädigen, um Unternehmensprozesse zu manipulieren oder stillzulegen. Dabei können Gefahren für die Datenintegrität sehr vielschichtig sein und sich neben böswilligen Handlungen ebenfalls auf menschliches Versagen und auf technische Fehler beziehen.

- Menschliche Fehler – Informationen können durch Beschäftigte beabsichtigt oder unbeabsichtigt falsch erfasst oder gelöscht werden.
- Übertragungsfehler – werden Daten zwischen Systemen transferiert, so können Daten beabsichtigt oder unbeabsichtigt verloren oder verändert werden.
- Kriminelle Handlungen – Unautorisierte Zugriffe auf Daten mit dem Ziel diese bewusst zu manipulieren oder zu entwenden.
- Technische Fehler – sind essentielle Infrastrukturkomponenten defekt, wie z.B. Netzwerkkomponenten, Serverhardware oder Softwaresysteme, können Daten falsch oder unvollständig sein.

Die Hauptaspekte der Datenintegrität sind somit hauptsächlich die Nachvollziehbarkeit und Transparenz. Im Sinne der Datenintegrität gilt es demnach, geeignete Maßnahmen mit Hilfe von geeigneten Systemen, Prozessen und Standards zu entwickeln, um das Risiko von Gefahrenquellen zu minimieren oder komplett auszuschließen. Die besondere Herausforderung hierbei ist die flächendeckende Auswirkung auf globaler Ebene auf Grund der allgegenwärtigen Vernetzung. Unternehmen und Systemherstellende werden in Zukunft noch enger zusammenarbeiten und vorliegende Abhängigkeiten identifizieren und auflösen müssen. Eine technisch gelungene aber dafür mit heterogenen Systemen, wie sie in der Industrie häufig historisch gewachsen sind, inkompatible Lösung, liefert an der Stelle keinen Mehrwert. Die Herausforderung hierbei ist, den Aspekt der Datenintegrität ausreichend zu beleuchten, den Fortschritt jedoch nicht zu hemmen oder zu verlangsamen.

## 2.3 Souveränität

Gemäß einer Studie von PwC [11] äußern 59% von 200 befragten Führungskräften deutscher Unternehmen, dass sie Angst haben, die Kontrolle über die eigenen Daten zu verlieren. Dies ist verbunden mit Bedenken, wertvolle Daten und Geschäftsgeheimnisse zu verlieren, bei 57% der befragten Personen. Fehlende Möglichkeiten, diesen Bedenken organisatorisch, technisch und regulatorisch zu begegnen, können somit als Hindernis für die Digitalisierung in Unternehmen gesehen werden. Neben den Aspekten Sicherheit und Vertrauen ist auch die *Datensouveränität* zu adressieren, auf welche im Folgenden näher eingegangen wird.

Die Datensouveränität ist zu verstehen als die Hoheit eines Dateneigners über die Nutzung der eigenen Daten souverän und exklusiv zu entscheiden. Exklusivität bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Zuständigkeit dieser Entscheidung eindeutig ist (siehe Abbildung 3). Eine Datensouveränität versetzt Unternehmen somit in die Lage, die Verarbeitung und Nutzung der Daten proaktiv steuern zu können. Dies ist genau genommen unabhängig von den Fragen des Datenschutzes und der Integrität, jedoch profitiert die Souveränität von der Gewissheit, dass die Daten korrekt und vor unbefugtem Zugriff geschützt sind. Als Beispiel ist die Monetarisierung von Daten genannt, welche ein Unternehmen souverän umsetzen kann, wenn es sicherstellen kann, dass die Daten beim Klientel korrekt und unversehrt ankommen, insbesondere, wenn daran Haftungsfragen geknüpft sind. Damit ist ebenfalls verbunden, dass der Ort der Speicherung und der Verarbeitung der Daten zu allen Zeiten bekannt ist, genauso wie die Möglichkeit, die Löschung der Daten zu kontrollieren.

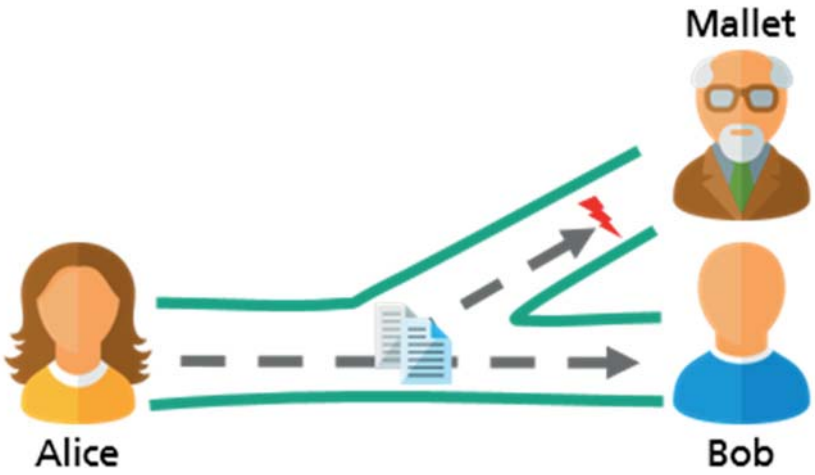



*Abbildung 3: Schaubild der Datensouveränität*

Die DSGVO liefert die rechtliche Grundlage für eine Datensouveränität, wenngleich sie primär auf die Verarbeitung persönlicher Daten abzielt. Während eine Verordnung einen Standard auf der rechtlichen Seite setzt, braucht es auch auf der technischen Seite einen Standard für den Austausch von Unternehmensdaten. Hier setzt die International Data Spaces (IDS) Association mit seinen mehr als 100 Mitgliedern an. Im Rahmen mehrere Projekte wurde ein Referenzarchitekturmodell geschaffen, welches den Datenaustausch zwischen Datengebenden und Datennutzenden und die dafür nötigen Konnektoren sowie Zertifizierung, Verschlüsselung, Datenstruktur bis hin zur Übermittlung des Nutzungsvertrags für die Daten spezifiziert [12].

Neben der Spezifizierung ist auch das Schaffen eines Datenraums sehr wichtig, um das Konzept der Souveränität auch als digitale Souveränität zu begreifen, welche die dafür notwendige Infrastruktur mit einbezieht. Das Projekt GAIA-X schafft die Randbedingungen für einen solchen Datenraum auf europäischer Ebene und bringt Datengebende und -nutzende mit Anbietenden für Cloud- und Edge-Cloud-Lösungen zusammen. Über die Vernetzung dezentraler Infrastrukturdienste hin zu einem homogenen, nutzungsfreundlichen System haben auch Unternehmen die Chance, sich mit der GAIA-X Infrastruktur zu verbinden und ihre Daten abzulegen und zu teilen.

Beide Initiativen, International Data Spaces und GAIA-X, tragen zur Sicherheit und Souveränität einer europäischen Plattformökonomie und verbesserten Wettbewerbsposition bei.

## 2.4 Beitrag der vernetzten, adaptiven Produktion zu den Nachhaltigkeitszielen von Unternehmen

Die Bezifferung des ökologischen Vorteils der Digitalisierung in der Produktion ist Gegenstand der Forschung sowohl in ingenieur- als auch in wirtschaftswissenschaftlichen Disziplinen. Wenige Beiträge betrachten ganzheitlich den Vorteil der Vernetzung sowohl in Bezug auf die Produktivität als auch auf ökologische Vorteile (z.B. Energieeinsparung, Ausschussreduktion, etc.). *Kiesel und Schmitt* [13] analysieren konkret die ökonomischen Vorteile in der digitalisierten Produktion durch den Einsatz von 5G und stellen ein methodisches Vorgehen und ein Kennzahlensystem vor. 5G ist hierbei nur als eine mögliche Konnektivitätstechnologie zu sehen, welche jedoch die klarsten Vorteile in Bezug auf die Produktivität verspricht [14]. Dazu zählen u.a. Aspekte, die die Qualität, Flexibilität, Auslastung sowie die (Arbeits-)Sicherheit der Produktion betreffen.

In *Becker et al.* [15] wird ein 5G-basiertes Sensorsystem zum Monitoring des Zerspanprozesses von Triebwerkskomponenten vorgestellt. Hierdurch wird die Qualität des Bauteils sichergestellt und Ausschuss verringert. Durch diese Lösung kann für eine Stückzahl von 100.000 p.a. ein Betrag von 360 Mio. EUR gespart und eine $CO_2$-Emission von 360 Tonnen vermieden werden [16].

Neben den direkt nutzbaren Vorteilen der vernetzten, adaptiven Produktion ergeben sich zukünftig weitere ökologische Vorteil durch die zunehmende Virtualisierung der Produktion. Zum einen lassen sich Teile von Maschinen- und Anlagensteuerungen über Echtzeitkommunikationssysteme wie TSN und 5G in Echtzeit-Virtualisierungsumgebungen in on-premise Edge-Clouds auslagern. Hierdurch können sich Vorteile im Energieverbrauch ergeben, da dieser auf diese Weise lediglich von der anforderten Rechenlast abhängig ist. Rechenintensive Operationen wie z.B. für das Machine Learning lassen sich über vernetzte Edge-Cloud Instanzen an Standorten verlagern, die einen ökologisch günstigeren Energieverbrauch haben wie z.B. Rechenzentren, in Meeresnähe liegen und bevorzugt über eine Wasserkühlung verfügen, oder allgemein an Standorte mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien.

# 3 Architektur für die vernetzte, adaptive Produktion

Auf Grund der zunehmenden Spezialisierung von Unternehmen und der damit einhergehenden Fragmentierung von Prozessketten hat die Konnektivität dabei längst die Grenzen der Produktion überwunden und eine standortübergreifende Vernetzung gewinnt zunehmend an Bedeutung (siehe Abbildung 4). Dies stellt insbesondere neue Anforderungen an *einheitliche Kommunikations- und Datenkonzepte* als auch eine *leistungsfähige Ende-zu-Ende Infrastruktur*. So ergeben sich im Zuge der Digitalisierung unter anderem Problemstellungen wie Echtzeitfähigkeit zwischen den Netzwerkknoten verschiedener Standorte, eine effiziente und skalierbare Handhabe und Verarbeitung der erzeugten Datenmenge für Big Data Anwendungen und vor allem ein sicherer Zugriff und Austausch bei transparenten Mehrparteiennetzwerken.

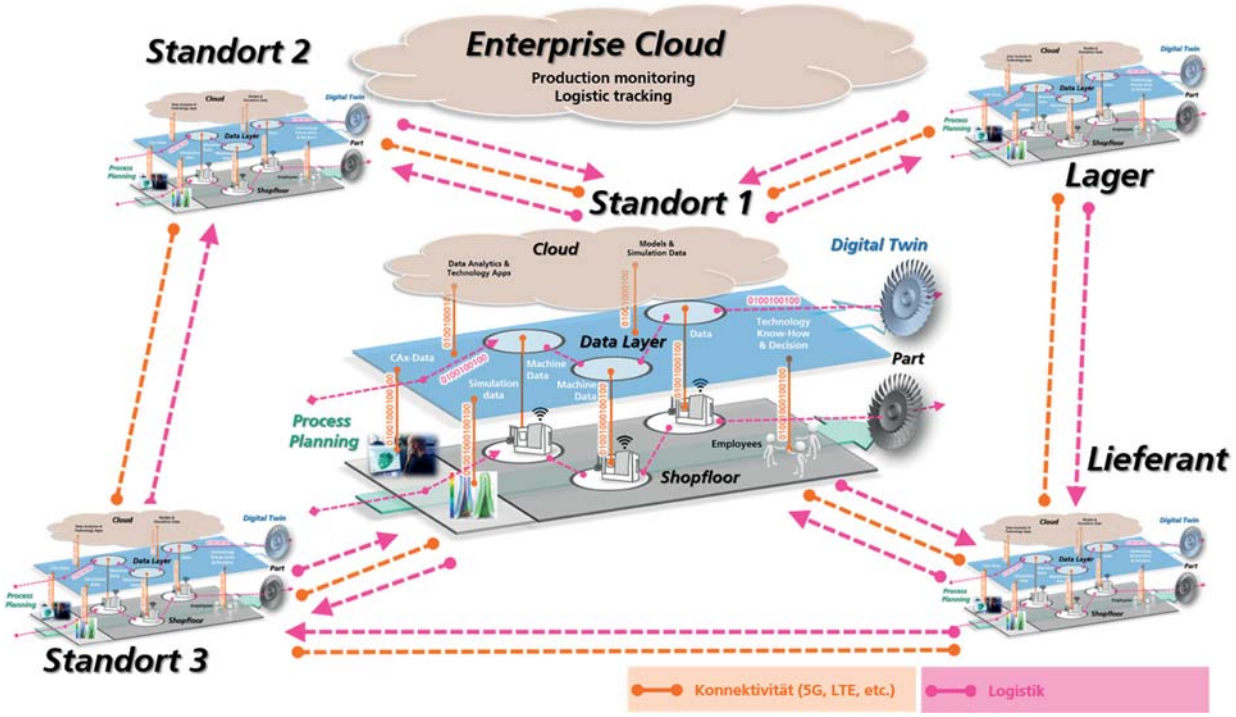



*Abbildung 4: Architektur einer durchgängigen, standortübergreifenden Vernetzung*

## 3.1 Standortübergreifende Vernetzung

Oberstes Ziel der Produktion ist stets die Herstellung eines Bauteils unter Einhaltung aller vorgegebenen Toleranzen. Daher ist es wichtig, alle Daten aufzuzeichnen, die Hinweise auf die Entwicklung des Bauteilzustands entlang der Prozesskette geben können. Durch Sensoren in der Fertigungsmaschine lassen sich zum Beispiel wertvolle Informationen über Vibrationen, Bearbeitungskräfte und Prozesstemperaturen gewinnen, an denen der Anwendende sehen kann, ob eine Toleranzverletzung droht oder nicht. Die Voraussetzung dafür ist die vollständige Vernetzung der Maschinen, Sensoren, Simulationstools und Datenbanken mit der Historie der gefertigten Bauteile. Daher müssen produzierende Unternehmen in der heutigen Zeit praktisch in zwei Welten agieren – in einer realen, in der mit Bauteilen, Werkzeugen und Maschinen umgegangen werden muss und getrennt davon in einer virtuellen Welt, in der Prozess- und Bauteildaten zu verwalten sind.

Disruptive Technologien versprechen hier eine Lösung für eine *durchgängige Ende-zu-Ende Konnektivität*. Auf lokaler Ebene hat sich zunehmend der Bedarf nach drahtloser Kommunikation aufgetan, um eine leichte Nachrüstbarkeit ohne Umbau der vorhandenen Infrastruktur zu erreichen oder um prozessintegrierte oder mobile Sensorik mit in das

Produktionsnetzwerk integrieren zu können. Dabei lässt sich unterscheiden zwischen sehr lokalen Verbindungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel Bluetooth oder ZigBee, und flächendeckenden Lösungen, wie zum Beispiel 5G und WLAN. Der Vorteil ist jeweils zugleich auch Nachteil – lokale Ansätze brauchen keine aufwändige Infrastruktur und lassen sich unabhängig temporär oder lokal einsetzen, flächendeckende Lösungen lassen dafür einheitlich und zentral verwalten, wodurch eine Fehleranfälligkeit und gegenseitige Störungen vermieden werden. Auch zwischen den Technologien gibt es deutliche Leistungsunterschiede, sodass pro Anwendungsfall individuell zu untersuchen ist, welche Lösung in dem Fall technisch als auch wirtschaftlich am besten geeignet ist. Insbesondere 5G hat sich dabei, wie bereits in Kap. 2.1 beschrieben, als Allround-Lösung herauskristallisiert, da es mit den geringen Latenzen und hohen Datenraten allen industriellen Anwendungen gerecht wird und die einzige Technologie ist, bei der das Frequenzspektrum reguliert und damit kontrollierbar ist. Somit ist es gerade für die Summe an verschiedensten Anwendungsfälle geeignet und lohnenswert. Im Zusammenspiel mit verschiedenen Netzwerken und verteilten Datenquellen sorgen dann Ansätze wie Time Sensitive Networking (TSN) für die Einhaltung von harten Anforderungen an eine Maschinenkommunikation wie Echtzeitfähigkeit und erlauben das weitere Aufbrechen von lokalen Anwendungen hin zu globalen und verteilen Netzwerken.

Aufbauend auf der reinen Konnektivität gibt es eine Reihe verschiedener *Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle*, wie zum Beispiel Modbus, MQTT, MT-Connect, Umati oder OPC-UA. Entwickelt für verschiedene Einsatzzwecke ist stets die Intention, Daten möglichst einheitlich zu verpacken und zu versenden. Für eine gegenseitige Kommunikation müssen dafür beide Seiten dasselbe Protokoll sprechen. Ähnlich wie die verschiedenen Konnektivitätstechnologien haben auch die Kommunikationsprotokolle individuelle Leistungseigenschaften und müssen für jeden Anwendungsfall untersucht werden.

Generell zeichnet sich jedoch der Trend ab, für eine standardisierte und autonome Kommunikation zwischen Maschinen und Software Protokolle einzusetzen, die neben den reinen Daten ebenfalls die semantische Struktur übertragen, um die Daten global und maschinenlesbar verständlich zu machen. Auch hier basiert dies jedoch darauf, dass alle Teilnehmenden sich über die verwendete Semantik einig sind, wie z.B. bei der Sensor Markup Language (SenML) [17]. Gerade im Hinblick auf branchenübergreifende Prozessketten ist diesbezüglich noch akuter Entwicklungsbedarf. Dazu kommt, dass im Zweifel solche Protokolle den Nachteil haben, auf Grund des übertragenen Overheads deutliche Performanceeinbußen vorzuweisen, weswegen häufig für Anwendungen mit hohen Leistungsanforderungen, wie zum Beispiel bei der Prozessüberwachung oder der Maschinenregelung, noch deutlich primitivere Protokolle zur Anwendung kommen, was eine Plug & Play Fähigkeit verhindert oder erschwert. Auch hier ist noch Nachholbedarf füprotokolle oder Implemenprotokolle oder Implementierungen.

## 3.2 Dynamische Vernetzung

Dynamische Prozesse und eine schwankende Nachfrage verlangen heutzutage sich schnell ändernde und erweiterbare Produktionssysteme. Gerade für die IT-Infrastruktur bedeutet dies ein Höchstmaß an *Flexibilität und Skalierbarkeit – S*oftware, Hardware oder ganz neue Technologien müssen in immer häufigeren Abständen eingebunden oder ausgetauscht werden und Anwendungen müssen heutzutage nach Bedarf gestartet oder erweitert werden. Cloudsysteme boten hier schon frühzeitig einen Ansatz, um nicht nur schnell und *dynamisch Speicher- und Rechenkapazität* auszulagern, sondern ebenfalls um besonders kleinen und mittelständischen Unternehmen eine wirtschaftliche Lösung zu bieten. Ermöglicht wurde dies vor allem durch den enormen Ausbau der Netzwerk-

bandbreite in den 90er Jahren. Eine Cloud ist in der Regel ein zentral verwaltetes Rechenzentrum, bei dem virtuelle Ressourcen an verschiedene Zielgruppen vermietet werden und von diesen in die lokale IT-Infrastruktur eingebunden werden können. Somit wird die reine Verwaltung der Hardware ausgelagert und es müssen lokal keine großen Kapazitäten für Lastspitzen vorgehalten werden. Bei Bedarf lassen sich einfach weitere Ressourcen hinzubuchen oder pausieren. Hier lassen sich zwei grundlegende Ansätze unterscheiden: beim Scale-Up wird eine Skalierbarkeit über eine Vergrößerung der genutzten Ressourcen erreicht, beispielweise über die Verwendung einer größeren virtuellen Maschine, beim Scale-Out werden weitere, gleiche Instanzen der Anwendung auf zusätzliche Ressourcen verteilt, um die Last zu verteilen. In diesem Zusammenhang haben sich verschiedene Dienstleistungskonzepte etabliert: stellt eine Cloud lediglich Hardwareinfrastruktur für den Betrieb eigener Softwaresysteme bereit, so spricht man von IaaS (Infrastructure as a Service), umfasst die Dienstleistung zusätzlich Betriebssysteme und Laufzeitumgebungen, so spricht man von PaaS (Platform as a Service) und werden darüber hinaus ganze Softwareumgebungen bereitgestellt, so spricht man von SaaS (Software as a Service). Bei allen drei Konzepten wird der Verbrauch nutzungsbezogen berechnet und ermöglicht so die hohe Flexibilität.

Auf Grund von Latenzzeiten und besondere Anforderungen an die Datenhoheit kann es für ein Unternehmen sinnvoll sein, die Rechenzentren lokal zu betreiben – dann spricht man von einer sogenannten Private Cloud. Eine solche Lösung bietet alle Vorteile einer dynamischen Allokation von Rechen- und Speicherressourcen, liegt jedoch in der vollen Kontrolle der unternehmenseigenen IT. Mischt ein Unternehmen dann Elemente einer Private Cloud und einer Public Cloud, so ergibt sich eine Hybrid Cloud. Hybride Cloud-Architekturen vereinen hier die Vorteile beider Ansätze und ermöglichen einen flexiblen Ansatz für verteilte Systeme. Daher wird es für die nächsten Jahre als dominierendes Betriebsmodell gehandelt [18].

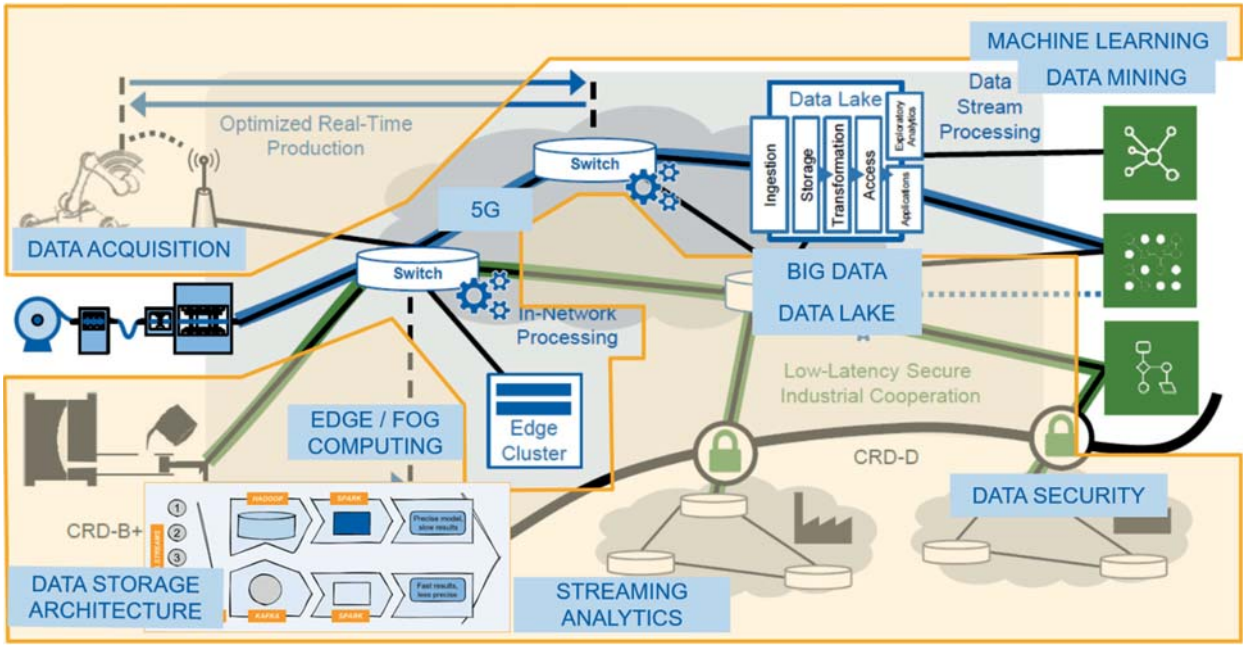



*Abbildung 5: Referenzarchitektur des Internet of Production*

In diesem Rahmen haben sich sogenannte Microservice-Architekturen etabliert, bei denen komplexe Softwaresysteme durch das Zusammenspiel von einzelnen, unabhängigen Anwendungen entstehen, die untereinander kommunizieren (siehe Abbildung 5). Dabei

übernimmt jede Komponente eine spezifische kleine Aufgabe und ermöglicht auf diese Weise einen beliebigen modularen Aufbau, der leicht ergänzt oder erweitert werden kann. So werden beispielsweise keine komplexen, ganzheitlichen Softwaresysteme für Datenspeicherung, -aufbereitung, und -auswertung geschaffen, sondern einzelne, spezialisierte Softwaremodule, die jeweils eine dieser Aufgaben übernehmen und miteinander zum Wohle des gemeinsamen Ziels zusammenarbeiten. Ermöglicht wird dies durch immer neue technologische Ansätze der Virtualisierung, bei der Ressourcen, wie zum Beispiel ein Server, über eine Abstraktionsschicht logisch und unabhängig von der darunterliegenden Hardware in verschiedene Bereiche aufgeteilt werden kann. Softwaresysteme werden dann nicht mehr manuell auf verschiedenen Systemen installiert, sondern werden in sogenannte virtuelle Maschinen (VMs) oder seit neuestem auch Containern betrieben. Diese lassen sich dann nicht nur standardmäßig von verschiedenen Anwendenden nutzen, sondern auch per Software automatisiert verlagern und verwalten. Hauptunterschied zwischen den beiden genannten Lösungen ist, dass Container im Gegensatz zu VMs ebenfalls das Betriebssystem virtualisieren, wodurch mehrere Instanzen von Containern parallel auf dem selben Betriebssystem laufen können. Bei VMs ist lediglich die Hardware virtualisiert, wodurch mehrere VM Instanzen parallel auf der selben Hardware laufen können. Man könnte also sagen, dass Container leichtgewichtiger sind, je nach Anwendung haben beide Ansätze jedoch Vor- und Nachteile, was die Leistungsfähigkeit und Kompatibilität zu Softwarebibliotheken angeht.

Um diese modularen Microservice-Systeme effizient verwalten zu können, ergab sich schnell der Bedarf nach IT-Infrastrukturen, dessen Abläufe vollständig durch Software definiert und automatisiert sind, sogenannte SDDC (Software Defined Data Center). In Rechenzentren werden daher neben den reinen Virtualisierungs- und Containerlösungen zur parallelen Nutzung der Serverhardware auch sogenannte Cloud-Integrations-Stacks verwendet, wie zum Beispiel OpenStack oder Kubernetes. Ihre Aufgabe ist es, große Cluster an Ressourcen und Applikationen zu orchestrieren und vor allem zu automatisieren. Mit Ihrer Hilfe ist es möglich, ganze Netzwerklandschaften und verteilte virtuelle Rechencluster per Software zu definieren und automatisiert zu verwalten. Insgesamt entsteht so ein sehr flexibles System, das je nach Bedarf erweitert oder angepasst werden kann oder sich sogar selbständig anpasst. Schon jetzt ist dies kein lokales Phänomen mehr – betrachtet man heutige Anwendungen in der Produktion, so beziehen sich viele Dienste auf standort- oder sogar unternehmensübergreifende IT-Ressourcen, oft sogar dynamisch zwischen diesen wechselnd. So werden zum Beispiel Algorithmen zur adaptiven Prozessüberwachung und -steuerung heutzutage als Dienstleistung von Maschinenherstellenden angeboten, müssen jedoch möglichst nah am Rande des Netzwerks bei der Kundschaft vor Ort bereitgestellt werden. Andere Anwendungen erwarten sogar, dass digitale Dienste dem realen Produkt bei seinem Weg durch die einzelnen Netzwerkknoten einer komplexen IT-Infrastruktur folgen, um zum Beispiel Latenzanforderungen bei Lokalisierungsanwendungen einzuhalten. Bereits jetzt zeichnen sich erste Lösungen ab, um Software dynamisch und unabhängig vom Standort und Betrieb zu verwalten.

Durch das Aufbrechen der standortbezogenen IT-Infrastruktur ergeben sich ganz neue Möglichkeiten für eine vernetzte, adaptive Produktion. Eines ist jedoch sicher: in Zukunft werden nahtlose Ressourcen- und Anwendungsverwaltungen über Unternehmens- und sogar Betriebsgrenzen hinweg die Industrie beschäftigen und dominieren.

### 3.3 Plattformen für die unternehmensübergreifende Vernetzung

Über die reine Virtualisierung und Flexibilisierung von IT-Infrastrukturen hinaus resultiert auch immer mehr der Bedarf, Daten aber auch Anwendungen standardisiert unternehmensübergreifend zur Verfügung zu stellen. Hierfür bieten die in Kap 3.2 beschriebenen XaaS (Anything as a Service) Ansätze eine Möglichkeit, in dem die Infrastrukturen unterschiedlicher Unternehmen über Marketplace-Applikationen miteinander verbunden werden. Neben der Datenmonetarisierung (siehe Kap. 2.3) ergeben sich durch den Vertrieb von Applikationen beziehungsweise Microservices neue Geschäftsmodelle. Ein Prototyp eines solchen Marketplace ist Teil des Virtual Fort Knox (VFK), einer Cloud-Lösung der Fraunhofer-Gesellschaft. Einzelne Rechenknoten werden lokal betrieben, sind aber gleichzeitig untereinander vernetzt. Über ein Software Development Kit (SDK) können produzierende Unternehmen, aber auch Drittorganisationen, ihre Softwareanwendungen für den Marketplace vorbereiten. Das VFK verfügt über spezielle Automatisierungslösungen, mit dem diese Anwendungen ähnlich wie in einem App-Store vertrieben beziehungsweise verteilt werden können. Applikationen, die auf diesem Wege ausgetauscht werden, können den Anwendenden sogar als virtuelle Maschine in der lokalen Instanz zur Verfügung gestellt werden (vgl. SaaS). Neben einfachen Softwareprogrammen sind aufwändigere Simulations- und Berechnungstools, beispielsweise spezielle CAM-Programme, denkbar und – eine echtzeitfähige Kommunikation zwischen den lokalen Knoten und der Feldebene vorausgesetzt – sogar das Zuweisen von Steuerungen beziehungsweise Steuerparameter für Roboter und Maschinen gelangt in Reichweite. Forschende der Fraunhofer-Gesellschaft arbeiten an einem Transfer dieser Funktionalität in eine OpenStack-Plattform, einer OpenSource Virtualisierungsumgebung, welche aktuell einen erhöhten Verbreitungsgrad erfährt und durch die Nutzung der TSN-fähigen Version StarlingX die erwähnte Echtzeitfähigkeit ermöglichen soll.

Entscheidend für den Erfolg unternehmensübergreifender XaaS-Anwendungen und damit die Erschließung neuer Geschäftsmodelle wird es sein, einheitliche Schnittstellen für die technische Integration zu schaffen. Für den Austausch von Daten bietet die International Data Spaces Association [12] eine sehr gute Grundlage. Um dabei innerhalb des Teilnehmendennetzwerkes die Authentizität zu gewährleisten, bieten sich zum Beispiel Blockchain-Mechanismen an. Daten und Dienste sollen demnach in einer sogenannten Blockchain-basierten Datenökonomie zum wichtigsten Treiber moderner Geschäftsmodelle werden. Dezentrale, standardisierte Buchführungsmechanismen gewährleisten dabei eine lückenlose Dokumentation von Transkationen durch kryptografische Verkettungen. Damit wird es unmöglich gemacht, frühere Transaktionen zu manipulieren und garantiert eine Rückverfolgbarkeit innerhalb des Netzwerks.

Die Verteilung von Applikationen ist schwieriger, weil hier die Fragen der Funktion und Haftung hinzukommen. Zu lösen ist in jedem Fall die Aufgabe der Softwareprüfung, die im Bereich von Smart Device von den Betreibenden der jeweiligen App-Store Google und Apple übernommen werden. Sofern diese Hürden überwunden werden können, bieten sich neue Geschäftsmodelle für produzierende Unternehmen, Softwareanbietende sowie für Anbietende und Betreibende von Cloud-Lösungen. Für Nutzende aus der produzierenden Industrie kann es die Aufwände für eigene Entwicklungen drastisch verkürzen.

## 4 Ausblick

Die Vision einer vernetzten, adaptiven Produktion gelingt nur über eine geeignete und maßgeschneiderte Infrastruktur. Dabei sind viele Bausteine bereits aktuell verfügbar und können an die Bedürfnisse der Anwendenden angepasst werden.

Das Internet of Production bildet den Rahmen für eine solche durchgängige, sichere und leistungsfähige Architektur. Die Integrität, Souveränität und Echtzeitfähigkeit in der Produktion erhobener Daten sind dabei notwendige Bedingung für eine leistungsfähige Infrastruktur zur verteilten Kommunikation. Insbesondere die standortübergreifende Vernetzung wird zum entscheidenden Faktor einer erfolgreichen Nutzbarmachung von Daten. Gelingt der Aufbau einer maßgeschneiderten Infrastruktur, kann zum Beispiel Ressourceneffizienz durch datengetriebene Unterstützungssysteme die Produktion nachhaltiger gestaltet werden.

Reallabore ermöglichen die konzentrierte Entwicklung leistungsfähiger Architekturen. Dabei wird das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten unter realen Bedingungen erprobt und weiterentwickelt. Ein solches Beispiel ist das Blockchain Reallabor Rheinisches Revier. Solche Labore erleichtern durch die Kooperation der Wissenschaft und des praktischen Einsatzes die Standardisierung besonders leistungsfähiger Komponenten. Die Standardisierung ist wie in diesem Beitrag ausführlich beschrieben insbesondere in Hinblick auf die Kommunikation ein kritischer Baustein für eine belastbare Kommunikations-Infrastruktur. Im Bereich 5G beispielsweise erarbeitet die 5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA), die ein Zusammenschluss aus IT-Unternehmen, Produktionsausrüstern sowie akademischen Partnern ist, Handlungsanweisungen und Vorgaben für Standards für das 5G-Ökosystem.

Viele der hier beschriebenen Elemente der vernetzten, adaptiven Produktion basieren auf einer leistungsfähigen Infrastruktur. Ein weiteres Reallabor, welches eine solche Infrastruktur schafft, ist der 5G-Industry Campus Europe [19], ein Zusammenschluss des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie IPT, des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen sowie des FIR e.V. an der RWTH Aachen. Im 5G-Industry Campus Europe werden zahlreiche Anwendungen aus dem gesamten Spektrum der Produktion mit 5G umgesetzt, von drahtloser Sensorik über mobile Robotik und Logistik bis hin zu standortübergreifenden Ende-zu-Ende Vernetzungslösungen für die Fertigungssteuerung und -diagnostik. Hierfür wird das größte private 5G-Netz für die Produktion in Europa geschaffen, welches unter anderem die Abdeckung mehrerer Maschinenhallen sowie des Campus Melaten der RWTH Aachen beinhaltet. Alle Teilnetze in den einzelnen Hallen sind so konfiguriert, dass die einzelnen Institute die Souveränität über ihre eigenen Daten behalten. Das zentrale Core-Netzwerk am Fraunhofer IPT regelt die Zugriffsrechte sowie Roaming-Agreements für jeden einzelnen Netzwerkteilnehmenden. Als Teil des Ökosystems verfügt der 5G-Industry Campus Europe über ein Edge-Cloud System der Firma German Edge Cloud, welches für die beteiligten Institute als XaaS-Plattform für latenzkritische Anwendungen genutzt werden kann. Die so geschaffene Infrastruktur ist damit optimal für konkrete Umsetzungen im Sinne der vernetzten, adaptiven Produktion ausgestattet.

Die Vorteile der vernetzten, adaptiven Produktion für die Produktivität liegen auf der Hand. Die verbesserten Möglichkeiten einer echtzeitfähigen Dokumentation von Prozesszuständen tragen u.a. zu kürzeren Anlaufzeiten, geringen Fehlerraten, höheren Flexibilität und allgemein zu einer höheren Resilienz bei. Durch das Senken von Fehlerraten und eine bessere Anlagenausnutzung ergeben sich auch ökologische Vorteile und wertvolle Beiträge zu den Nachhaltigkeitszielen produzierenden Unternehmen.

# 5 Literatur


[1] Dirks, T.: Digitalisierung der Wirtschaft. Hannover 2017.

[2] MacGillivray, C.; Reinsel, D.: Worldwide Global DataSphere IoT Device and Data Forecast, 2019–2023.

[3] The European Green Deal. Brüssel 2019.

[4] Who Cares Wins. Connecting Financial Markets to a Changing World. Washington D.C. 2004.

[5] Boos, W.: Die Produktionswende – Turning Data into Sustainability. Durch das Internet of Production zu nachhaltiger Produktion und Betrieb. Aachen 2021.

[6] Bauernhansl, T.; Krüger, J.; Reinhart, G.; Schuh, G.: WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Darmstadt.

[7] Bobek, T.; Winands, K.; Bergs, T.; Klocke, F.; Staasmeyer, J.-H.; Pothen, M.; Liu, G.; Huwer, T.: Vernetzte, adaptive Produktion. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): *Internet of Production für agile Unternehmen. AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017*, 18. bis 19. Mai. Aachen 2017.

[8] IEEE: IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications 35.110 (2019) P802.1AS. New York.

[9] Ansari, J.; Németh, G.; König, N.; Mohanram, P.; Kehl, P.; Padovani, R.; Torreggiani, A.; Lange, D.; Overbeck, D.: Report on System Design Options for Monitoring of Workpieces and Machines. Deliverable 3.2 2020.

[10] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2019. Bonn 2019.

[11] Pauer, A.; Nagel, L.; Fedkenhauser, T.; Fritzsche-Sterr, Y.; Resetko, A.: Data exchange as a first step towards data economy. Frankfurt 2018.

[12] Otto, B.; Steinbuß, S.; Teuscher, A.; Lohmann, S.: IDS Reference Architecture Model 3.0. Dortmund 2019.

[13] Kiesel, R.; Schmitt, R. H.: Requirements for Economic Analysis of 5G Technology Implementation in Smart Factories from End-User Perspective: *2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal*, Indoor and Mobile Radio Communications 2020 - 2020.

[14] Saunders, J.; Mavrakis, D.; Larner, M.; Martin, R.; Ling, K.: Unlocking The Value Of Industry 4.0. Why and How Connectivity Drives Future Profitability and Growth. New York 2019.

[15] Becker, P.; König, N.; Gierlings, S.; Venek, T.; Bergs, T.; Schmitt, R.: 5G Networked Aerospace Production. In: *Aerospace Manufacturing 14* (2019) 1, S. 18–20.

[16] A case study on real-time control in manufacturing. An Ericsson Consumer & IndustryLab Insight Report 2018.

[17] Internet Engineering Task Force (IETF): *Sensor Measurement Lists (SenML)* (2018). URL: https://tools.ietf.org/html/rfc8428.

[18] IDC: Mit Consumption-based Services die Hybrid Cloud optimal nutzen 2020.

[19] Willrett, M.: In Echtzeit auf eine neue Stufe. Forschungs-Campus zeigt den Nutzen von 5G für die vernetzte Produktion. In: *Industrieanzeiger 142* (2020) 14, S. 38–41.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 1.0:

Prof. Dr.-Ing. R. Schmitt, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT
N. König, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
S. Jung, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Dr.-Ing. M. Peterek, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

## 1.1 Linked data – from shop floor to top floor

*C. Brecher, K. Schilling, M. Belke, S. Storms, S. Pieske, A. Müller, O. Petrovic*

**Gliederung**

1 Einleitung ....51
2 Vision ....52
3 Grundlagen ....53
4 Use-Cases ....54
4.1 Kultivierung und Differenzierung von Stammzellen in der iCellFactory ....54
4.2 OBDA für Werkzeugmaschinen ....56
4.3 Verteilte flexible Montage ....57
4.4 Interoperable und Menschzentrierte KI ....59
5 Zusammenfassende Leitfragen ....62
6 Literatur ....64

## Kurzfassung

**Linked data - from shop-floor to top-floor**

Vernetzte Geräte, dezentrale Steuerung, datenbasierte Anwendungen – im technischen Sinne ist damit die Idee des Internet of Things in der Fabrikhalle angekommen. Die Erhebung und Speicherung der Daten ist der erste Schritt, welcher durch die nachgelagerte Verarbeitung und Aufbereitung ergänzt werden muss, um Einsichten zu geben, diese zu kontextualisieren, Erkenntnisse abzuleiten und damit Mehrwert zu schaffen. Durch die Verbindung der Rohdaten mit ihrer semantischen Bedeutung sowie der Verknüpfung von Konzepten und Modellen, wird die Voraussetzung für ein verteiltes, anwendungsspezifisches Informationsmodell geschaffen. Die Interoperabilität der Informationsmodelle ist eine zwingende Voraussetzung, um Daten der heterogenen Datenlandschaft und Softwaresysteme produzierender Unternehmen abbilden zu können. Auf dieser Basis können intelligente Anwendungen Erkenntnisse auf allen Ebenen - vom Shop-Floor bis zur Management-Ebene, dem Top-Floor - aufzeigen. Sie helfen den Fachkundigen, die passenden Informationen zu extrahieren und damit Schwachstellen zu beheben und Optimierungspotenziale zu identifizieren.

Ziel des Beitrags „Linked data - from shop-floor to top-floor” ist es, ausgehend von der Vision eines verteilten und interoperablen Informationsmodells, die Voraussetzungen und konzeptionellen Schritte zur Realisierung dieser Vision aufzuzeigen.

Der Beitrag wurde durch ausgewiesene Autoritäten aus der Industrie, sowohl Nutzende als auch Technologie- und Systemliefernde, gestaltet und zeigt die Bedeutung der Informationsmodellierung für die Vision eines Internet of Production (IoP). Gleichzeitig wird durch die Anwendersicht ein realistischer Ausblick zur Verwirklichung der Vision geschaffen.

## Abstract

**Linked data - from shop-floor to top-floor**

Networked devices, decentralized control, data-based applications - in a technical sense, the idea of the Internet of Things has thus arrived on the shop floor. The collection and storage of data is the first step, which must be complemented by downstream processing and preparation in order to provide insights, contextualize them, derive findings and thus create added value. By connecting the raw data with its semantic meaning and linking concepts and models, the prerequisite for a distributed, application-specific information model is created. The interoperability of information models is a mandatory prerequisite to be able to map data of the heterogeneous data landscape and software systems of producing companies. On this basis, intelligent applications can reveal insights at all levels - from the shop floor to the management level, the top floor. They help experts extract the appropriate information and thus eliminate weaknesses and identify optimization potential.

The aim of the article "Linked data - from shop-floor to top-floor" is to show the prerequisites and conceptual steps for realizing this vision, based on the vision of a distributed and interoperable information model.

The paper was designed by proven experts from the industry, both users and technology and system suppliers, and shows the importance of information modeling for the vision of an Internet of Production (IoP). At the same time, the user perspective creates a realistic outlook for realizing the vision.

# 1 Einleitung

Die in den letzten Jahren am stärksten wachsenden Unternehmen der westlichen Welt sind die Unternehmen Google, Apple, Facebook, Amazon, Tesla und Microsoft. Allesamt Technologieunternehmen. Eines der Kerngeschäfte dieser Unternehmen ist das Sammeln und die anschließende Verarbeitung von Daten. Um aus diesen, durchaus großen Mengen an Daten einen Mehrwert zu generieren, ist nicht nur das reine Sammeln der Daten von Bedeutung, sondern vor allem die Sicherstellung ihrer Qualität sowie die Aufbereitung zur Erfüllung bestimmter Zwecke [1]. Indem die genannten Technologieunternehmen Daten mittels beispielsweise Suchmaschinen, Smartphones und virtuellen Assistenzsystemen sammeln, erhalten sie Informationen über die Nutzer:innen und deren Präferenzen in alltäglichen Situationen bei der Verwendung der Produkte, nicht aber Informationen über Maschinen und Produktionsprozesse. Dies unterscheidet die heute schon erfolgreichen Konzerne von produzierenden Unternehmen, die weitestgehend noch keine Geschäfts- oder Monetarisierungsmodelle auf Basis ihrer Daten etablieren konnten. Die Rolle, die gerade das produzierende Gewerbe hier einnehmen kann, ist die eines datengetriebenen Unternehmens, welches über große Mengen Daten verfügt und diese gewinnbringend einsetzt.

Um datengetriebene Entscheidungen treffen zu können, müssen die Systemzustände zum jeweiligen Zeitpunkt zunächst persistiert werden. Dies kann beispielsweise in einem sogenannten Data Lake geschehen. Wie die gewählte Art der Persistierung skalieren muss, zeigt ein Blick in die Statistik: Bis zum Jahr 2025 steigt die Menge der generierten Daten jährlich um mehr als 25% an. Gleichzeitig werden heute nur 32% der Daten genutzt, welche den Unternehmen zur Verfügung stehen [2]. Neben der Aufnahme und Speicherung kommt in den nächsten Jahren der Nutzbarmachung der Daten eine hohe Bedeutung zu, um daraus Informationen zu gewinnen und so Mehrwerte schaffen zu können. Die Daten sollten, um nutzbar zu werden und zu bleiben, nicht um des Speicherns willen gesammelt werden. Vielmehr gilt es, den Werten einen Sinn zu geben. Die Modellierung sowie die Verknüpfung der Daten mit ihrer semantischen Bedeutung ist ein Lösungsansatz, der es ermöglicht, dass Daten weiterverarbeitet werden können, aber auch durch Mitarbeiter:innen in unterschiedlichster Granularität nutzbar bleiben.

Nachdem im ersten Beitrag „Holistic Automation“ [3] der Fokus auf die durchgängige Vernetzung für cyberphysische Produktionssysteme mit verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten gelegt wurde, soll dieser Beitrag beleuchten, welche Herausforderungen die Modellierung von Daten mit sich bringt. In Kapitel 2 wird eine Vision beschrieben, welche die Potentiale der semantischen Modellierung von Daten aufzeigt. Nach den Grundlagen in Kapitel 3 schließen sich in Kapitel 4 aktuelle Anwendungen an. Aus diesen heraus werden in Kapitel 5 Leitfragen abgeleitet, die bei der Realisierung einer semantischen Modellierung in Unternehmen helfen.

## 2 Vision

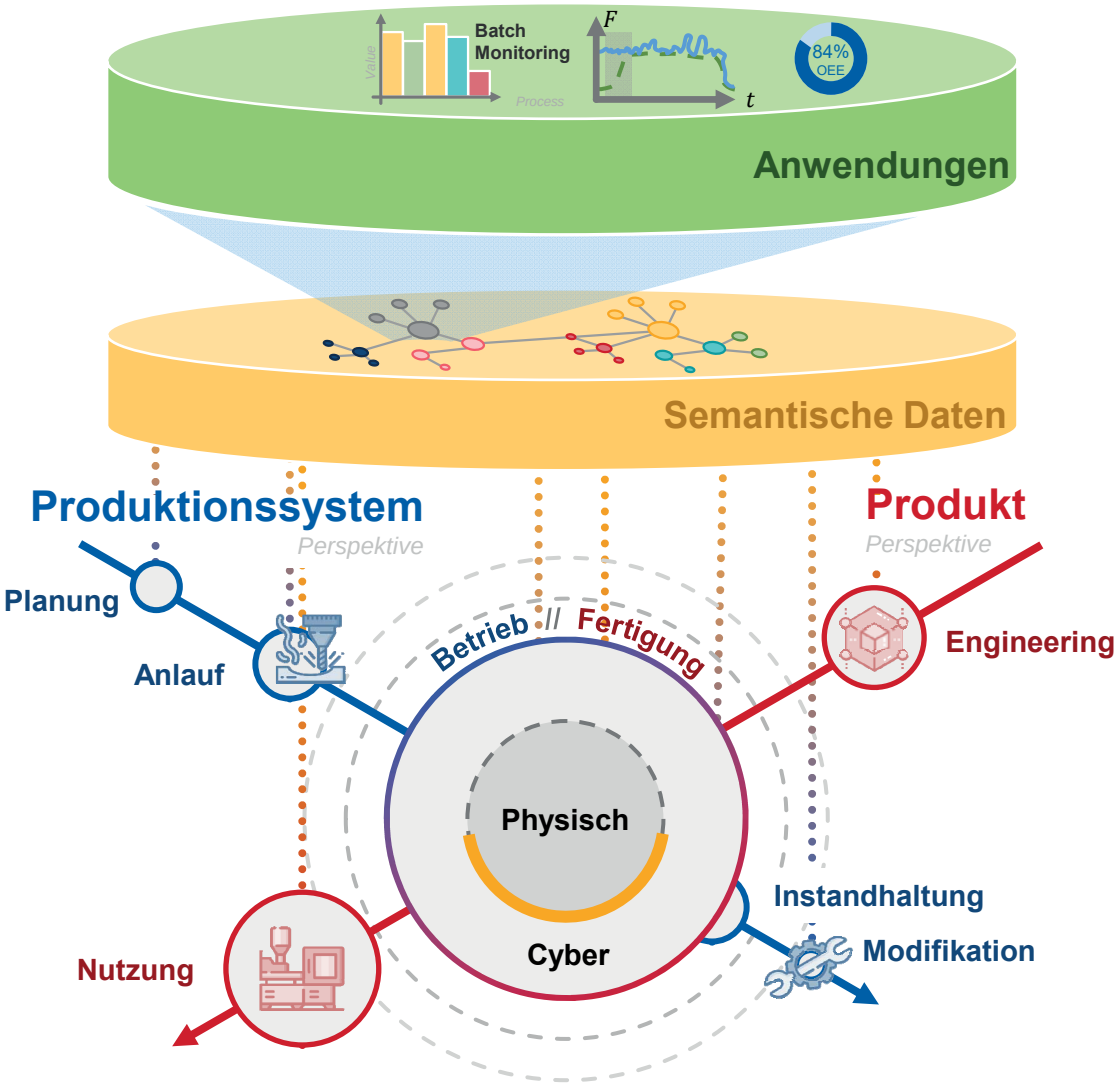



*Bild 1: Erzeugung semantischer Daten zur weiteren Analyse durch Anwendungsprogramme*

Aus dem alltäglichen Umfeld ist ein Szenario bekannt, an dem die Vision von Linked Data in der Produktion motiviert werden soll. Es handelt sich um die Suche von Informationen im Internet mit Hilfe von Suchmaschinen. Bei einer Suchanfrage werden zunächst einige Begriffe von Benutzer:innen explizit angegeben, wonach gesucht werden soll. Die vorhandenen Datenmengen würden aber dazu führen, dass die Suche oft Ergebnisse liefert, die nicht den gewünschten entsprechen. Um die Suche für Benutzer:innen zu vereinfachen, werden daher verschiedenste Zusatzinformationen ausgewertet, um das tatsächlich Gesuchte schnell zu finden. Dazu können Standortdaten zählen oder der historische Suchverlauf, um darin Muster zu erkennen und somit auf die neue Anfrage zu schließen. Eine Korrektur falsch geschriebener Wörter und die Überprüfung auf einen Zusammenhang zwischen den Wörtern kann die Suche weiter verfeinern, um schlussendlich effizient die richtigen Informationen zu finden.

Wenn man dieses Szenario auf die Produktionstechnik überträgt, werden den Expert:innen der Produktionstechnik die Daten zur Analyse von Produktionsprozessen zur Verfügung gestellt. Wissen über die Informationstechnik seitens der Expert:innen ist dabei nicht erforderlich. Auf einer technisch tieferen Ebene kann die Analyse die Auswertung der Standzeit von Werkzeugen bedeuten, um Ressourcen zu sparen und Stillstandszeiten zu reduzieren. Dazu können die Daten eines bestimmten Werkzeuges in einem bestimmten Zeitraum über beliebig viele Maschinen hinweg ausgeleitet werden, um diese automatisiert analysieren zu lassen und daraus Erkenntnisse zu gewinnen. In Bild 1 werden die Daten im ersten Schritt durch verschiedene Sensoren aufgenommen und mit Informationen über das Produkt, das Produktionssystem, das Werkzeug etc. verknüpft. Durch diese Verknüpfung werden aus den Rohdaten semantische Daten, welche als Grundlage für weitergehende Analysen dienen. [4]

Auf einer höheren Ebene bietet beispielsweise die Rückverfolgbarkeit von Lieferketten ein großes Potential. Wenn bei einem gelieferten Bauteil erkannt wird, dass es Qualitätsmängel hat, müssten klassischerweise die Daten heterogener Systeme ausgewertet werden und nicht selten müssten Personen die Gegebenheiten vor Ort prüfen und weitere Daten sammeln. Durch ein interoperables Informationsmodell kann digital nachverfolgt werden, durch welche Transportmittel das Bauteil geliefert wurde, welcher Produktionscharge es angehört und welche Maschinen und Werkzeuge genutzt wurden. Die Lieferkette lässt sich auf diese Weise transparent zurückverfolgen und auf mögliche Anomalien untersuchen. Hierfür ist es notwendig, dass Daten aus verschiedenen Quellen miteinander verknüpft werden. Durch die Nutzung von Semantik kann ein gleiches Verständnis von Daten aus verschiedenen Quellen sichergestellt und die Relationen untereinander abgebildet werden. [5]

Um Nachhaltigkeitspotenziale zu finden, ist meist eine globale Betrachtung des Unternehmens notwendig. Die ESG Kriterien Umwelt (Environmental), Soziales (Social) und Unternehmensführung (Governance) können durch Semantik miteinander verknüpft werden, sodass eine ganzheitliche Betrachtung möglich wird. Die Durchgängigkeit der Daten sowie die Verbindung mit ihrer semantischen Bedeutung erlaubt es auf der einen Seite, zu analysieren, in welcher Form die Prozesse Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit haben. Auf diese Weise können problematische Bereiche des Unternehmens identifiziert werden. Auf der anderen Seite können Teile des Unternehmens ähnlich zu den in diesem Beitrag beschriebenen Use-Cases semantisch modelliert werden. Aufbauend auf diesen Modellen ist es möglich, die Prozesse im Hinblick auf unterschiedliche Nachhaltigkeitskriterien hin zu optimieren.

## 3 Grundlagen

Während der Mensch als Anwendender oder Entwicklender die Bezeichnung von Datenobjekten beim Lesen unmittelbar auch interpretiert, hat die gewählte Zeichenkette für den Computer keine inhaltliche Bedeutung – ihm fehlt die **Semantik** der Bezeichnung. Allein auf Basis der Zeichenkette versteht der Computer nicht, welches Konzept hinter dem Variablennamen „Time“ oder „Temperature“ steht, sie haben für ihn den gleichen Informationsgehalt wie „gwtb“ oder „v?lane7oev“. Indem man sich also nicht nur auf zeichenbasierte Bezeichneungen, sondern auf die Konzepte bezieht, gibt man dem Computer die Möglichkeit, eine Art „maschinelles Verstehen“ zu implementieren.

Das **Semantik Web** ist ein Konzept, das in Webdokumenten enthaltene Wissen (z.B. ein Wikipedia-Artikel) um semantische Konzepte zu ergänzen. So wird es für den Computer

bspw. möglich, zwischen dem „Bach“ mit dem Konzept Person und dem mit dem Konzept Gewässer zu unterscheiden. Weiterhin werden Relationen zwischen Konzepten abgebildet, was auch als Linked Data bezeichnet wird: Das Konzept Person hat bspw. ein Geburtsdatum und einen Geburtsort, welcher wiederum über Geokoordinaten festgelegt ist und zu einem konkreten Land gehört, usw.

Die Beschreibung solcher Zusammenhänge bezeichnet man als **Ontologie**. Eine Ontologie ist in der Informatik ein Konstrukt, um ein gemeinsames Verständnis von einem Themenfeld zu erreichen. Dazu wird eine einheitliche Syntax verwendet, mit Hilfe derer die Beziehungen und die Bedeutungen der Objekte untereinander dargestellt werden können. Man kann zwischen Upper Ontologies, welche allgemeingültige Begriffe beschreiben, und Domain Ontologies, welche spezielle Begriffe der realen Welt beschreiben, unterscheiden. [6]

Eine konkrete Technologie zur Implementierung dieser Konzepte sind die **Semantic Web Technologies**. Diese basieren auf Webtechnologien wie bspw. XML und bilden den Standard zur maschinenlesbaren Beschreibung von Wissensgraphen (bzw. Ontologien).

# 4 Use-Cases

Im Folgenden werden vier Use-Cases dargestellt, welche aktuell sowohl im Rahmen von Forschungs- als auch Industrieanwendungen umgesetzt sind oder sich aktuell in der Umsetzungsphase befinden.

## 4.1 Kultivierung und Differenzierung von Stammzellen in der iCellFactory

Die iCellFactory ist eine Plattform zur Etablierung und Validierung von Prozessen zur Kultivierung und Differenzierung von Stammzellen. Sie besteht aus einer variablen Anzahl von Geräten zur Durchführung einzelner Teilprozeduren und Operationen. Geräte können dabei beliebig in die iCellFactory eingebracht oder entnommen werden. Das Setting umfasst im Allgemeinen eine Liquid Handling Unit (LHU) zum Pipettieren von Flüssigkeiten, ein Inkubator zum Lagern von Zellkulturen unter optimalen Wachstumsbedingungen, ein Mikroskop zum Messen von Wachstumsparametern, eine Zentrifuge, sowie als zentrales Element einen Handhabungsroboter (Sechsachsknickarmroboter an einem Gantry) für den Transport der Proben. Alle Geräte werden mittels eines zwischengeschalteten Geräteadapters, der eine einheitliche Kommunikation ermöglicht, an ein übergeordnetes Leitsystem angebunden [7]. Dieser flexible Ansatz der iCellFactory erfordert allerdings auch, dass die Erstellung von Prozessbeschreibungen zunächst ohne Kenntnis über die genaue Gerätekonfiguration erfolgt und daher unabhängig von dieser sein muss.

Ein zentrales Forschungsziel der iCellFactory ist die Entwicklung eines Konzeptes zur Transformation dieser Prozessbeschreibung in konkrete Prozeduren, die automatisiert ausgeführt werden können. Vorausgesetzt, die aktuelle Konfiguration lässt dies zu. Außerdem wird das Ausführen multipler paralleler Prozeduren angestrebt, was ein automatisiertes Scheduling von Anlagenressourcen erfordert. Für beides ist eine genaue Kenntnis sowohl der Fähigkeiten von Geräten als auch des gegenwärtigen Zustands der Gesamtanlage erforderlich. Zur Beschreibung des aktuellen Zustands der iCellFactory sowie derer Geräte und ihrer Fähigkeiten sind Ontologien und die mit ihnen einhergehende mathematisch rigorose Beschreibung von Datenobjekten und ihren Abhängigkeiten ein Enabler. Dadurch kann auch die aktuelle Prozessdurchführung im laufenden Betrieb validiert und beim Auftreten von unplanmäßigen Zuständen reagiert werden. [8]

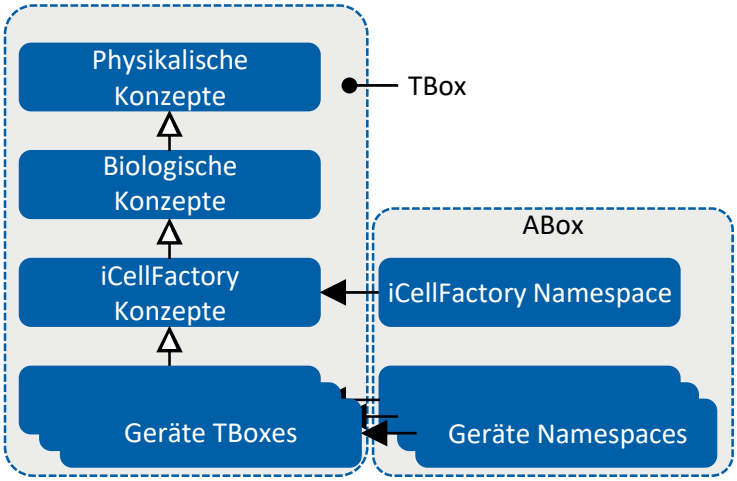



*Bild 2: Modellierung der Zustandsbeschreibung der iCellFactory*

Grundsätzlich gliedert sich die Zustandsbeschreibung in zwei Komponenten: Zum einen in die Beschreibung der verschiedenen Konzepte der Ontologie (TBox), die sich während des Anlagenbetriebs nicht verändern. Zum anderen in die konkreten Instanzen der definierten Konzepte (ABox), die sich während des Anlagenbetriebs häufig ändern können. Die TBox ist im Fall der iCellFactory eine Kette von drei oder mehr Ontologien, wobei ein Glied jeweils die Konzepte des Vorgängers erbt und erweitert. Somit bildet sich eine Menge von sukzessive spezialisierten Definitionen. Alle Instanzen der Konzepte, die einem Gerät zugeordnet werden, bilden die ABox dieses Gerätes, dieser ist dabei genau eine Ontologie aus der TBox zugeordnet und unter dem Begriff Namespace zusammengefasst (siehe Bild 2). Namespaces haben keinen Zugriff auf die Daten eines anderen Namespaces, außer mittels der öffentlichen Schnittstelle. Damit sind sie prinzipiell unabhängig voneinander. Dies ist zum einen notwendig, um eine Dezentralisierung des Datenmodells zu ermöglichen und zum anderen kleinere, jeweils voneinander abgegrenzte Bereiche im Datenmodell zu erzeugen und so Änderungen zu beschleunigen.

Die Ontologien der TBox sowie die vollständige ABox eines Namespaces sind dabei statisch anhand eines Universal Resource Identifiers (URI) auffindbar und in einem standardisierten Austauschformat (XML oder Turtle) mittels HTTP abrufbar. Konzeptinstanzen der ABox können mittels einer REST-Schnittstelle dynamisch erzeugt, geändert oder gelöscht werden.

Der Zustand von Anlagen ist dynamisch, zum Beispiel ändert sich die Belegung von Ablageplätzen stetig. Dabei existiert eine Kette von abhängigen Eigenschaften die sich mit einer Zustandsänderung anpassen müssen - es ändert sich nicht nur die Belegung, sondern auch die Position des vormals gelagerten Assets. Dieser Dynamik und diesen Abhängigkeitsketten muss und kann eine Modellierung von Anlagen mittels Linked Data Rechnung tragen. Dabei haben sich in der Umsetzung zwei Herausforderungen gezeigt: Zunächst muss die Zeit, die es braucht, um eine Zustandsänderung durchzuführen, beschränkt sein. Zum anderen muss gewährleistet sein, dass die Zustandsbeschreibung für die Prozessplanung zu jeder Zeit konsistent und (im Sinne der TBox) valide ist. Insbesondere bei Änderungen des Datenmodells kann dies eine schwierig einzuhaltende Bedingung sein und ist zu diesem Zeitpunkt zwar gut genug aber noch nicht vollständig gelöst.

Während der beschriebene Use-Case die Modellierung einzelner Produktionsstationen beschreibt, um das System flexibel nutzen zu können, beschäftigt sich der nächste Use-Case mit der Modellierung des Systemzustandes, der nicht die Systeme semantisch beschreibt, sondern die Daten des Prozesses modelliert.

## 4.2 OBDA für Werkzeugmaschinen

Der Zerspanprozess auf einer Werkzeugmaschine wird durch verschiedenste Faktoren wie bspw. Material, Prozessgrößen, Verschleißzustand oder Umgebungsbedingungen beeinflusst. Um die gewünschten Qualitätsanforderungen zu erfüllen und dabei möglichst effizient zu produzieren, ist umfangreiches Prozesswissen notwendig. Um dieses Wissen zu sammeln, werden während des Bearbeitungsprozesses sämtliche aus der Maschine verfügbare Daten aufgezeichnet und in einer Datenbank gespeichert. Auf dieser Datenbasis können Expert:innen Prozessgrößen ableiten, Ursache-Wirkungszusammenhänge analysieren oder Prognosen treffen.

Die Herausforderung ist es jedoch, die richtigen Daten für die individuelle Problemstellung zu finden. Einen Großteil der Zeit verbringen Expert:innen damit, passende Datenbankabfragen zu formulieren und die gewünschten Ergebnisse zu extrahieren. Problematisch ist dabei, dass Expert:innen auch Grundlagenwissen zur Arbeit mit Datenbanken benötigen und darüber hinaus die konkrete Datenbankstruktur kennen müssen. Diese wachsen oft über den Anwendungszeitraum hinweg und werden nach Bedarf ergänzt. Dies wird weiter erschwert, wenn mehrere Personen an der Entwicklung beteiligt sind, die wiederum auf Basis einer subjektiven Vorstellung des Informationsmodells arbeiten. So können beispielsweise die Tabellen in relationalen Datenbanken für ähnliche Anwendungsfälle ganz unterschiedlich gegliedert werden; die Bezeichnung der Spalten ist im besten Fall selbsterklärend für menschliche Entwickler:innen, kann aber in Abhängigkeit vom Kontext sehr unterschiedlich interpretiert werden: Der Name „Temp“ lässt bei der Kenntnis des Anwendungsfalls auf einen Temperaturwert schließen, jedoch könnten Abkürzungs-affine Entwickler:innen eine solche Spalte auch nur mit „T“ bezeichnet haben, was die Interpretation erheblich erschwert. Auch die verwendete Einheit der Messwerte ist oft nicht explizit beschrieben, was erneut Kontextwissen und Interpretation durch Fachkundige notwendig macht. Die semantische Bedeutung, bzw. das abgebildete Konzept, wird nicht eindeutig spezifiziert und ist darüber hinaus nur mit erheblichem Anpassungsaufwand maschinell nutzbar.

Diese Lücke adressiert die Idee des „Ontology-based Data Access“ (OBDA): Auf die Daten in der Datenbank wird das in einer Ontologie beschriebene Konzept aufgesetzt. Dafür wird die Spalte der Datenbank durch einen virtuellen Knoten im Graphen der Ontologie repräsentiert und über Relationen mit den Konzepten der Ontologie assoziiert (siehe Bild 3). So wird aus bspw. der Zeichenkette „Temp“ als Spaltenbezeichnung das Konzept Temperatur in der Ontologie. Zur weiteren Beschreibung kann dieses Konzept um die Label-Eigenschaften „Temperatur“ und „Temperature“ inklusive der Sprachzuordnung ergänzt werden. Weiterhin kann die Spalte mit dem Konzept Celsius durch die Beziehung Einheit assoziiert werden, welche wiederum in einer sog. Upper-Ontologie (z.B. „Ontology of units of Measure“ [9] oder „Semantic Sensor Network Ontology“ [10]) definiert sind und so das Konzept der physikalischen Größe über verschiedene Anwendungen hinweg beschreiben. [11, 12]

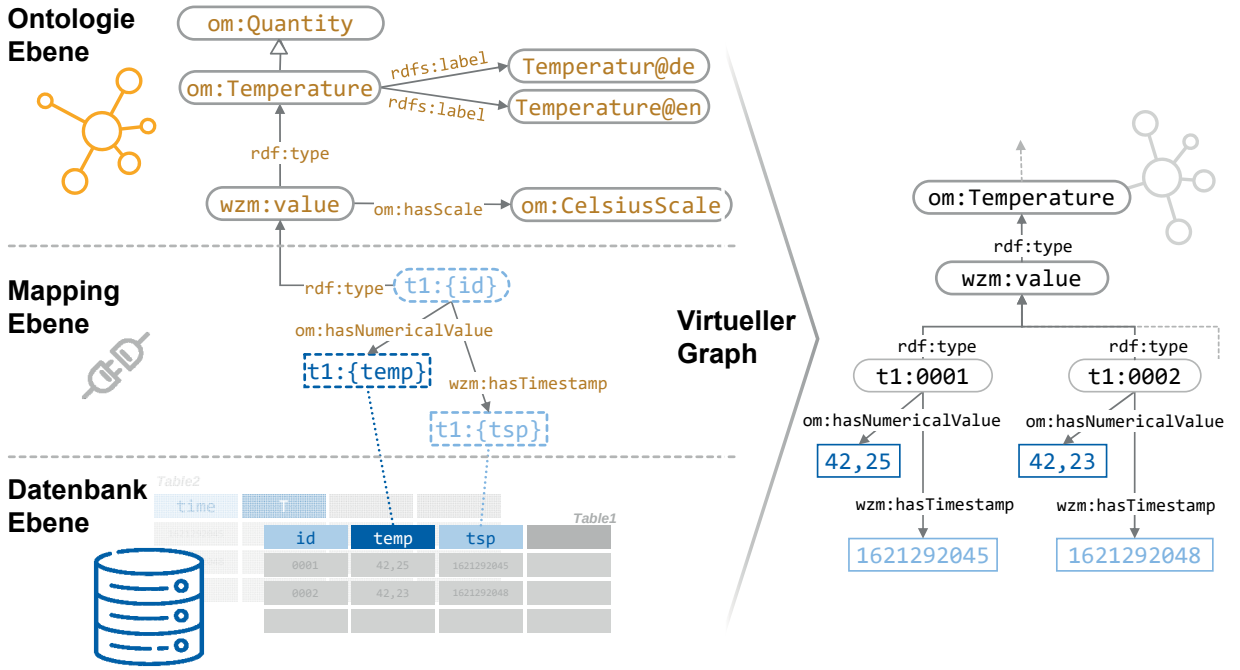



*Bild 3: Die Ontologie wird über die Definition von Mapping-Regeln mit den Spalten der Datenbank verknüpft, es entsteht ein virtueller Graph*

Für die Verknüpfung der Ontologie mit der Datenbank wird ein Mapping-Layer implementiert. Dieser bildet die Zuordnung zwischen den Konzepten und den konkreten Spalten ab. Expert:innen formulieren für die Datenabfrage dann die Kriterien auf Basis der allgemeinen Konzepte der Ontologie; technisch betrachtet in Form einer SPARQL-Abfrage, praktisch werden sie dabei jedoch durch eine grafische Bedienoberfläche unterstützt, in der sie gesuchte Kriterien an- bzw. abwählen können. SPARQL bezeichnet (in Anlehnung an die Datenbankabfragesprache SQL) eine Abfragesprache für Ontologien. Das OBDA-Framework (z.B. Ontop [13]) übersetzt diese Abfrage (bspw. nach Temperatur) durch das Mapping in eine technologie- und anwendungsspezifische Datenbankabfrage (z.B. per SQL an die Spalte „Temp“). So werden verschiedene konkrete Datenquellen miteinander verknüpft, unabhängig von der individuellen Darstellung.

Nutzer:innen können so mit der gleichen Abfrage verschiedene Quellen durchsuchen, ohne ihre konkrete Struktur kennen zu müssen. Die Semantik der Daten lässt sich eindeutig beschreiben und mit anderen Daten und Informationen in Beziehung setzen. So wird es weiterhin möglich, kompliziertere Abfragen zu formulieren und durch Schlussfolgerungen (sog. „Reasoning“) in den Daten enthaltenes implizites Wissen abzuleiten.

## 4.3 Verteilte flexible Montage

In diesem Anwendungsfall werden Teile der ersten beiden Anwendungsfälle kombiniert, um sowohl System- als auch Prozesswissen abbilden und nutzen zu können. Bei der verteilten, flexiblen Montage im Rahmen des Internet of Production wird das granulare,

kontext-abhängige Prozess- und Produktwissen entlang der Wertschöpfungskette bereitgestellt. Thematisch geht es um die Montage eines LKW, die an unterschiedlichen Standorten stattfindet. Die Montage besteht aus mehreren, im Folgenden beschriebenen Schritten, wobei die Standorte einen oder mehrere Schritte der Montage übernehmen (siehe Bild 4).

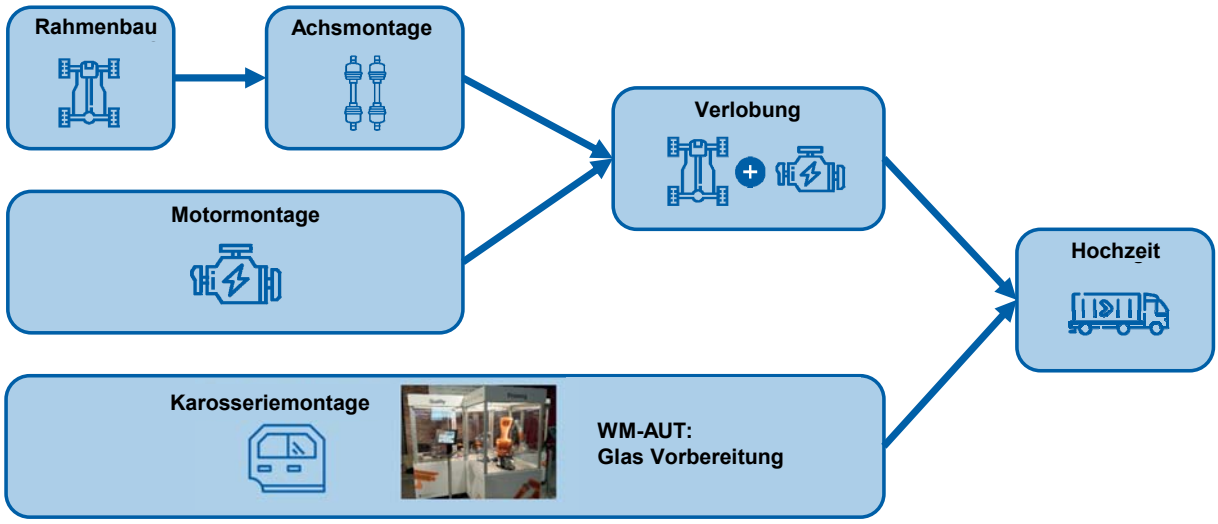



*Bild 4: Prozessschritte bei der Montage eines LKW*

Das Ziel des Projekts besteht darin, die Möglichkeiten einer flexiblen Prozessteuerung über die Grenzen der einzelnen Standorte hinweg zu analysieren. Zum einen ist dafür eine durchgängige Kommunikationsstruktur zum Datenaustausch notwendig, zum anderen ein umfassendes Informationsmodell, das als Grundlage der Prozessteuerung dienen soll. [14]

Die Kommunikation läuft nach dem Publish/Subscribe Muster ab. Einzelne Produktionsanalagen können Statusbenachrichtigungen an die übergeordnete Prozesssteuerung schicken (publish). Andere Produktionsanlagen oder Teilnehmende der Kommunikation können verschiedene Themen abonnieren (subscribe), um über Statusänderungen benachrichtigt zu werden (z.B.: `Engine Assembly:Done`). Für die Realisierung der Kommunikation kann entweder das Netzwerkprotokoll MQTT genutzt werden oder es wird das in das Robot Operation System (ROS) integrierte Kommunikationssystem verwendet.

Das Informationsmodell als Grundlage der Prozesssteuerung ist eine Domain-Ontologie. In dieser Ontologie werden die von den einzelnen Demonstratoren kommenden Informationen zusammengefasst, miteinander in Verbindung gebracht und basierend darauf der Prozess der Montage gesteuert. Die Ontologie bietet an der Stelle vor allem die Möglichkeit der Verknüpfung der Daten zur flexiblen Prozessorchestrierung, sodass die Reihenfolge der Prozessschritte nicht streng vorgegeben werden muss. Die Ontologie basiert dabei auf dem Konzept der Ressourcen-Fähigkeiten: Auf der einen Seite gibt es die Stufen des Prozesses, die alle gewisse Fähigkeiten brauchen. Auf der anderen Seite gibt es Ressourcen, die diese Fähigkeiten zur Verfügung stellen können. In dem Projekt ICECAT, welches ein Anwendungsfall aus der Automobilglasverarbeitung ist, wird eine Scheibe beispielhaft durch einen Roboter des Typs Kuka iiwa gereinigt. In der Ontologie wird dazu abgebildet, dass prozessseitig im ersten Schritt eine Reinigung der Scheibe zu erfolgen hat. Dieser Schritt wird in der Ontologie als „Schreibe reinigen“ angegeben. Auf der Seite

der Ressourcen muss die Fähigkeit der Reinigung zur Verfügung gestellt werden. Der Kuka iiwa stellt in diesem Fall die Fähigkeit „Scheibe reinigen“ zur Verfügung. Die prozesssteuernde Domain-Ontologie soll die beiden Seiten miteinander in Verbindung bringen und soll als Grundlage für Entscheidungen dienen, welche Ressource für den Prozessschritt die notwendige Fähigkeit besitzt. Dabei ist die Ontologie ähnlich der MARCO-Ontologie aufgebaut. Diese besteht aus vier verteilten Ontologien, die für eine effiziente Vermittlung zwischen Produkt Anforderungen und Ressourcen-Fähigkeiten benötigt werden [15]. Angelehnt an die MARCO-Ontologie wird die Ontologie für die verteile, flexible Montage durch Verknüpfung dreier Domänen Produkt-Prozess-Ressource realisiert. Dadurch ist eine ganzheitliche Betrachtung des Montageprozesses möglich, sodass dieser effizienter gestaltet werden kann und die übergeordnete Steuerung ermöglicht wird.

Insgesamt helfen Domain Ontologien dabei, die einzelnen Produktionsanlagen zu modellieren und damit die Fähigkeiten formal zu definieren. Linked Data kann somit einen Beitrag dazu leisten, Produktionsprozesse flexibler zu gestalten und Produkte geringer Losgrößen ohne großen Rüstaufwand produzieren zu können.

### 4.4 Interoperable und Menschzentrierte KI

Der zunehmend steigende Bedarf an Variantenvielfalt, Qualität und Nachhaltigkeit von Produkten stellt die Produktionstechnik deutscher Unternehmen vor immense Herausforderungen. Besonders die Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) versprechen, aus dem komplexen produkt- und produktionsspezifischen Datenangebot neue Mehrwerte und digitale Dienstleistungen zu generieren, um diese Herausforderungen zu beherrschen [16]. Fehlende Einführungskonzepte und Standards, geringe Interoperabilität sowie eine unzureichende Qualität und Quantität der vorliegenden Daten hemmen allerdings noch den breiten Einzug von KI in deutschen Produktionsunternehmen [17]. Insbesondere für KMU, abseits der Großserienfertigung, besteht eine hohe Einstiegshürde [18]. Hier basiert die Produktivität, Flexibilität und Robustheit von Fertigungsstandorten meist auf dem Prozesswissen von Expert:innen und Fachkräften. Es müssen daher Technologien erarbeitet werden, um Daten intelligent zu kontextualisieren, zu vernetzen, zu abstrahieren und durch die Expertise des Menschen anreichern zu können.

Ein Lösungsansatz liegt in der ganzheitlichen Berücksichtigung der Schlüsselfaktoren Mensch, KI und Produktionsausrüstung in übertragbaren, menschzentrierten KI-Applikationen. Durch die kombinatorische Betrachtung dieses Dreiklangs als lernendes Gesamtsystem können breite Wertschöpfungspotenziale gehoben werden (siehe Bild 5). Es entstehen hybride Intelligenz-Systeme, in denen die komplementären Stärken von Expert:innen und KI kombiniert werden. Dabei lernt einerseits die KI vom Menschen, indem dieser in die Trainingsprozesse der Modelle mit einbezogen wird und andererseits steigert sich die Prozesstransparenz durch die Aufbereitung der Daten in bedienerfreundlichen KI-Assistenzsystemen. Die Überführung der Erfahrung der Expert:innen in digitale Dienstleistungen verschiebt somit die Einstiegshürde zur Ausschöpfung der Produktivitätspotentiale von KI in Richtung kleinerer Losgrößen. Im geplanten Forschungsprojekt GeMeKI (Generalisierung von Menschzentrierten KI-Applikationen zur Produktionsoptimierung) soll dieser Ansatz untersucht und am Beispiel mehrerer Anwendungsfälle aus dem Fertigungskontext in realistischen Best Practices untersucht und in generische Einführungskonzepte überführt werden.

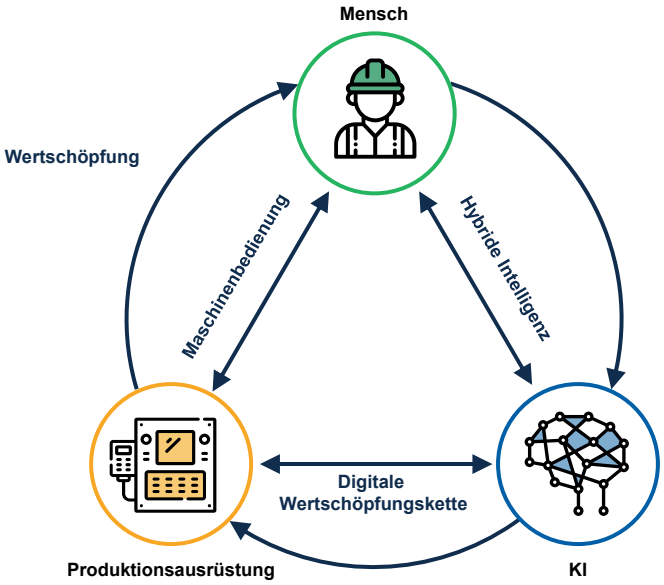



*Bild 5: Mensch, KI und Produktionsausrüstung als lernendes Gesamtsystem*

Um solche Systeme zu ermöglichen, ist es notwendig, dem Menschen intuitive Schnittstellen über die gesamte digitale Werkschöpfungskette von der Datenerfassung auf dem Shopfloor, über Middleware und Datenplattform bis hin zur KI-Applikation anzubieten. Dieser Ansatz ist in Bild 6 dargestellt. Es muss neben der reinen Prozessbedienung über HMI ermöglicht werden, mit Daten- und KI-Modellen zu interagieren. Daten müssen dabei durch Selektion, Modellierung, Kontextualisierung und Labeling nutzbar gemacht und aufbereitet werden. Der Mensch nimmt dabei je nach Interaktionsform und eingebrachter Expertise unterschiedliche Rollen ein. Die KI hingegen muss von der Blackbox zu einer erklärbaren KI weiterentwickelt werden, um zu verstehen, welche Daten zu welchen Ergebnissen führen. Darauf aufbauend müssen den Nutzer:innen Kommunikationskanäle angeboten werden, die ein Feedback auf die Erkenntnisse der KI erlauben. Durch diese Rückkanäle können KI-Modelle auf Basis kleinerer Losgrößen und mit weniger Trainingsiterationen effizient angelernt werden.

Die in die digitale Wertschöpfungskette eingebrachte Expertise des Menschen als generalisierendes Element reicht allein allerdings nicht zur Gewährleistung einer breiten Übertragbarkeit der Lösungen aus. Es muss zusätzlich eine hohe Interoperabilität der Daten und KI-Modelle hinsichtlich des Prozesses, der verwendeten Produktionsausrüstung, des gefertigten Produkts, der genutzten Middleware und Datenplattform sowie den interagierenden Bediener:innen angestrebt werden. Dadurch können entgegen den heutigen Insellösungen modulare, breit anwendbare und skalierbare Systeme entwickelt werden, welche neue Wertschöpfungspotentiale und Geschäftsmodelle eröffnen.

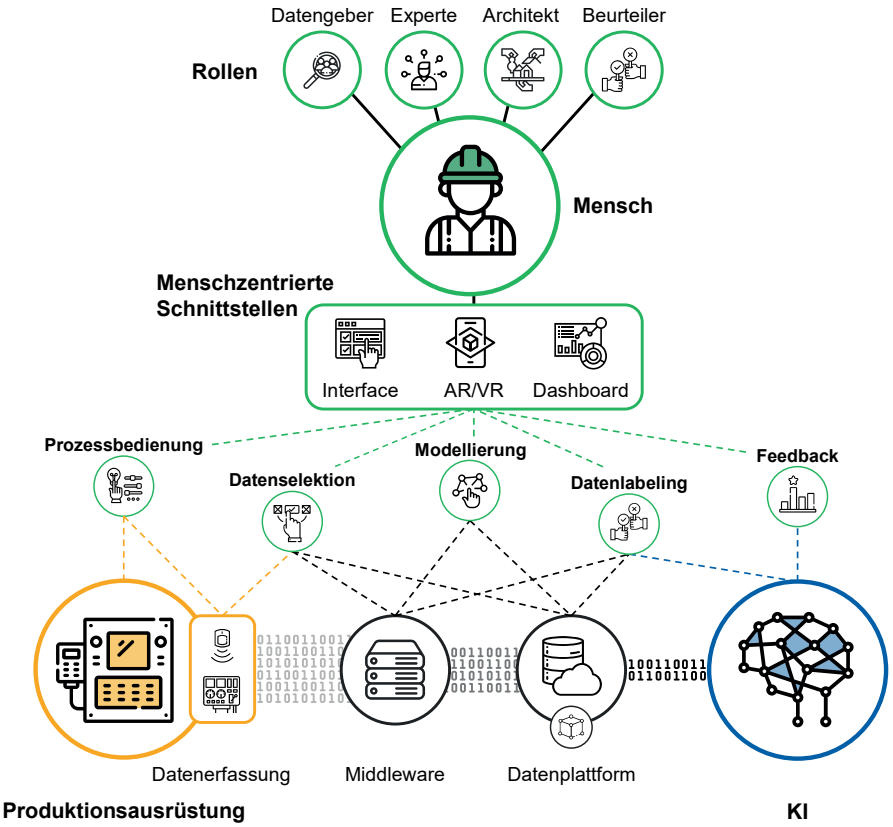



*Bild 6: Durchgängige Interaktionsmöglichkeiten von Expert:innen entlang der gesamten digitalen Wertschöpfungskette*

Die erforderliche Interoperabilität kann nur durch eine zusätzliche Modularisierung der Systemkomponenten erreicht werden. Damit diese Komponenten durchgängig vernetzbar sind, müssen einheitliche Standards für die Modellierung der Daten entlang der vertikalen Datenaufbereitung (siehe Bild 7) und für die Kommunikation zwischen den Komponenten entwickelt und angewandt werden. Der Einsatz von Ontologien hilft hierbei zum einen bei dem Labeln und Modellieren der Daten, indem diese Informationen den Daten direkt zugeordnet werden. Durch die Eingaben der menschlichen Expert:innen kann deren Wissen und Erfahrung mit den durch das Produktionssystem bereitgestellten Daten verbunden werden und ermöglicht so den Informationsgewinn und zuletzt das Sammeln von Erfahrung durch das technische System. Zum anderen ist die Abstraktion der Daten möglich, da prozessnahe Daten semantisch modelliert sind und damit eine Formalisierung gewährleistet ist. Die Abstraktion der Daten durch Ontologien führt zu einer Übertragbarkeit auf andere Anwendungsbereiche und hebt dadurch weitere Wertschöpfungspotenziale.

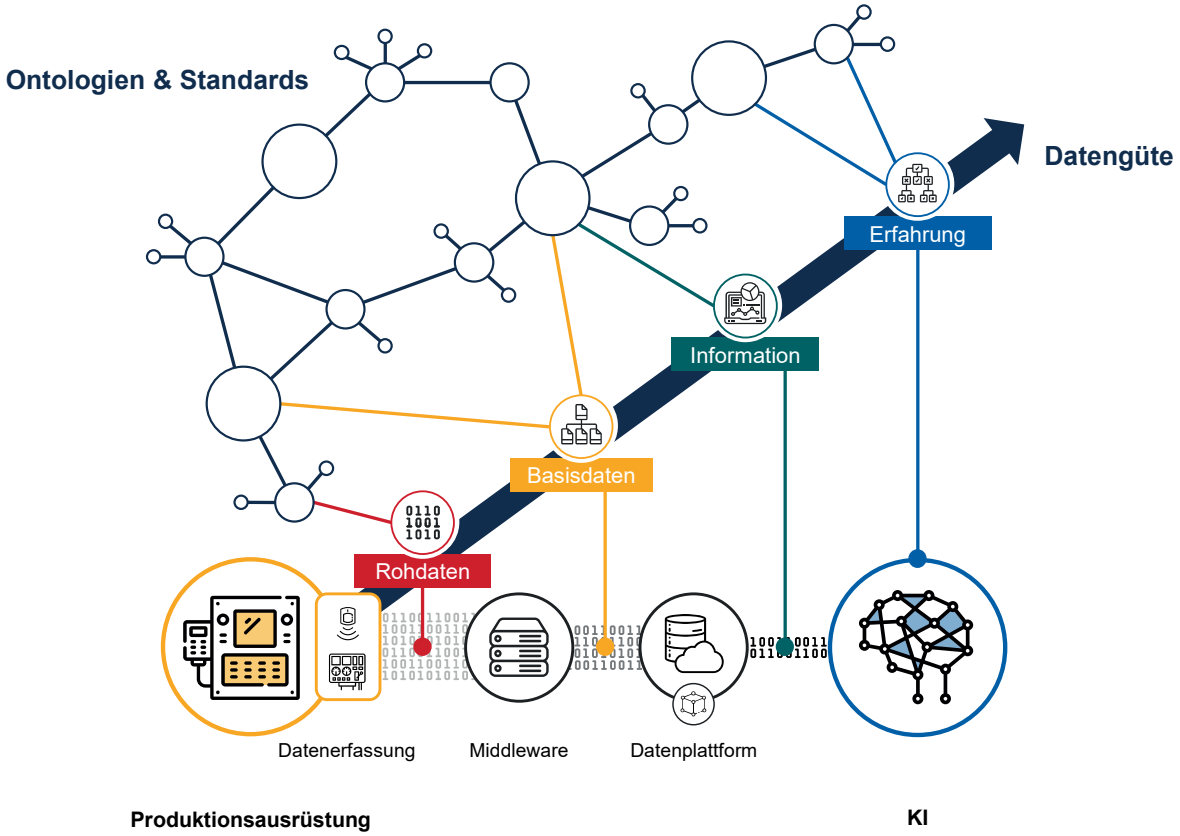



*Bild 7: Vertikale Aufbereitung der Daten entlang der Digitalen Wertschöpfungskette*

## 5 Zusammenfassende Leitfragen

Durch die im Folgenden Leitfragen wird aus der Perspektive eines Unternehmens beschrieben, welche Aspekte bei der Einführung semantischer Strukturen in die Daten betrachtet werden sollten. Die Fragen greifen einige Aspekte der Anwendungsfälle auf und gehen auf diese praxisnah ein.

1. Welche organisatorischen Schritte muss ich durchführen?

   Um Systeme und Prozesse erfolgreich semantisch modellieren zu können, sind nicht nur technische Schritte, sondern auch organisatorische Schritte notwendig. Dadurch, dass das Thema Semantik ein Querschnittsthema ist, bei dem sowohl thematische Expert:innen als auch Informatiker:innen zur Entwicklung der Datensysteme involviert sind, ist die Einstellung eines Knowledge Engineers von Vorteil. Dieser füllt die Lücke und beschäftigt sich mit der reibungsfreien Integration.

   Die im Anwendungsfall der iCellFactory beschriebene Modellierung der einzelnen Stationen soll flexible Produktionsprozesse gewährleisten. Diese Vorgehensweise ist für kleinere Prozesse durchführbar, bei verteilten und komplexen Produktionsprozessen aber nicht praktikabel.

Für diese ist die Modellierung des Systemzustandes sinnvoll, um Erkenntnisse über den bestehen Produktionsprozess zu gewinnen. Es sollte sichergestellt werden, dass die Daten, welche im semantischen Kontext abgespeichert werden, valide sind.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Beantwortung der Frage nach dem Zugriff auf die Daten. Während prozessnahe Arbeitskräfte prozessnahe Informationen erhalten sollen, sollte es für Arbeitskräfte des Managements möglich sein, prozessferne Analysen durchzuführen.

2. Wie bereite ich die Daten auf?

   In Bild 1 ist die Erzeugung der Daten am Übergang von der physischen Welt zur cyber-physischen Welt dargestellt. Die an dieser Stelle erfassten Daten sind zunächst Rohdaten der Sensoren. Diese Rohdaten sind in einem ersten Schritt zu filtern, um ausschließlich hochwertige und gleichzeitig valide Daten abzuspeichern. Je nach der Menge der abzubildenden Daten ist eine geeignete Struktur zu wählen. Für sehr große Datenmengen, wie sie typischerweise in der Produktion anfallen, ist die im Anwendungsfall OBDA für Werkzeugmaschinen beschriebene Vorgehensweise geeignet. Es wird eine Trennung zwischen der semantischen Modellierung sowie den eigentlichen Daten vorgenommen, um die Vorteile sowohl der Ontologien als auch der Speicherung in relationalen Datenbanken nutzen zu können. Nachdem die Daten gefiltert wurden und eine Struktur zu Speicherung gewählt wurde, ist die Verknüpfung der Daten mit ihrer semantischen Bedeutung nach der Filterung durchzuführen. Zu diesem maschinennahmen Datenstrom kommt das Wissen der Expert:innen hinzu. Bei der Formalisierung dieses Wissens ist eine geeignete Mensch-Maschine Schnittstelle vorzusehen, durch die Expert:innen ihr Wissen in das System einfließen lassen können, wobei gleichzeitig eine Verknüpfung zu den dazu passenden Maschinendaten hergestellt wird.

3. Wie kann ich den größten Mehrwert aus den Daten ziehen?

   Heute werden die Daten und das Wissen vornehmlich in Silos gehalten, welche nicht oder nur geringfügig miteinander verbunden sind. Der größte Mehrwert kann geschaffen werden, indem diese Silos aufgebrochen und die Daten und Informationen in einem gemeinsamen oder in interoperablen Modellen abgebildet werden. Dazu sind ein Öffnen und die Weitergabe des Wissens notwendig. Die Kollaboration zwischen den einzelnen Entitäten sollte den Austausch fördern und die Datenverfügbarkeit erhöhen, während gleichzeitig deren Kernkompetenzbereiche gewahrt bleiben. So kann sichergestellt werden, dass die Daten nur einmal existieren und Datenintegrität vorhanden ist.

# 6 Literatur


[1] J. Goldman, *How Companies Like Amazon and Google Turn Data Into a Competitive Advantage -- and How You Can Too: The key is to embrace deep learning and data-based decision making.* [Online]. Verfügbar: https://www.inc.com/jeremy-goldman/how-companies-like-amazon-google-turn-data-into-a-competitive-advantage-how-you-can-too.html (zugegriffen: Apr. 29 2021).

[2] Seagate Technology und IDC, “RETHINK DATA,” [Online]. Verfügbar: https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/rethink-data/files/rethink-data-report-2020-de-de.pdf (zugegriffen: Apr. 29 2021).

[3] C. Brecher, M. Buchsbaum, P. Blanke, N. Hoffmann, S. Storms, und K. Schilling, “Holistic Automation: Wertschöpfungspotentiale einer integrierten durchgängigen Vernetzung,” in *Internet of Production - Turning Data into Value: Statusberichte aus der Produktionstechnik 2020*.

[4] S. Wang, J. Wan, Di Li, und C. Liu, “Knowledge Reasoning with Semantic Data for Real-Time Data Processing in Smart Factory,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 18, Nr. 2, 2018, doi: 10.3390/s18020471.

[5] Y. Ye, D. Yang, Z. Jiang, und L. Tong, “Ontology-based semantic models for supply chain management,” *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 37, Nr. 11-12, S. 1250–1260, 2008, doi: 10.1007/s00170-007-1052-6.

[6] A. Dengel, Hrsg., *Semantische Technologien: Grundlagen - Konzepte - Anwendungen*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2012. [Online]. Verfügbar: http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10501466

[7] C. Brecher, S. Pieske, A. Malik, und S. Storms, “Modelling of devices in an adaptive and dynamic environment,” *Procedia CIRP*, Jg. 86, S. 210–215, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2020.01.046.

[8] C. Brecher, A. Malik, P. Blanke, und W. Herfs, “Dynamic integration of manual and automated biological process skills into MES,” in *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Zaragoza, Spanien, Sep. 2019 - Sep. 2019, S. 1069–1076.

[9] H. Rijgersberg, *OM - Ontology of units of Measure.* [Online]. Verfügbar: https://github.com/HajoRijgersberg/OM (zugegriffen: Mai 17 2021).

[10] R. Atkinson, R. García-Castro, J. Lieberman, und C. Stadler, *Semantic Sensor Network Ontology.* [Online]. Verfügbar: https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/ (zugegriffen: Mai 11 2021).

[11] H. Rijgersberg, M. van Assem, und J. Top, “Ontology of units of measure and related concepts,” *SW*, Jg. 4, Nr. 1, S. 3–13, 2013, doi: 10.3233/SW-2012-0069.

[12] H. Rijgersberg, M. Wigham, und J. L. Top, “How semantics can improve engineering processes: A case of units of measure and quantities,” *Advanced Engineering Informatics*, Jg. 25, Nr. 2, S. 276–287, 2011, doi: 10.1016/j.aei.2010.07.008.

[13] *Ontop: A Virtual Knowledge Graph System.* [Online]. Verfügbar: https://ontop-vkg.org/ (zugegriffen: Mai 18 2021).

[14] J. Lipp und K. Schilling, “The Semantic Web in the Internet of Production: A Strategic Approach with Use-Case Examples,” in *The Fourteenth International Conference on Advances in Semantic Processing SEMAPRO 2020*, 2020, S. 68–72.

[15] E. Järvenpää, M. Lanz, und N. Siltala, “Formal Resource and Capability Models supporting Re-use of Manufacturing Resources,” *Procedia Manufacturing*, Jg. 19, S. 87–94, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.01.013.

[16] F. Pagel, *Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von KMUs durch KI im Maintenance Management.* [Online]. Verfügbar: https://www.wfg-borken.de/wp-content/uploads/2020/09/IAS_MEXIS_GmbH_Falk_Pagel.pdf (zugegriffen: Mai 11 2021).

[17] T. Wangermann, *KI in KMU: Daten nutzen und teilen.* [Online]. Verfügbar: https://www.kas.de/documents/252038/11055681/KI+in+KMU+%E2%80%93+Daten+teilen+%28.PDF%29.pdf/b03c22c5-1723-69f5-08ea-7ac5c46e30ad?version=1.0&t=1618078092114 (zugegriffen: Mai 11 2021).

[18] B. Reder, J. Mauerer, und J. Hill, *Studie Machine Learning/Deep Learning.* [Online]. Verfügbar: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:58dacdc8-0b9d-4650-84ad-3632bd67b64e/machinelearning-study-twothousandandnine-teen.pdf (zugegriffen: Mai 11 2021).

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 1.1:

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT
Dr.-Ing. K. Bakarinow, Miele & Cie. KG Werk Euskirchen
M. Belke, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Dr.-Ing. T. Buchner, The Boston Consulting Group GmbH
Dr.-Ing. A. Kadelka, Deutsche Telekom AG
Dr.-Ing. J. Ottnad, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG
K. Schilling, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
S. Storms, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
E. Wahl, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG
C. Wiebus, NXP Semiconductors Germany GmbH

## 1.2 Value Capture – Datengetriebene Geschäftsmodelle erfolgreich in nachhaltig produzierenden Unternehmen implementieren

*G. Schuh, S. Breit, J. Echterfeld, T. Graberg, R. Kreutzer, S. Manz, M. Michaelis, M. Patzwald, T. Pieper, N. Schön, V. Volm*

### Gliederung

1 Ausgangssituation und Herausforderungen in der Praxis ....69

2 Value Concept – Das Wertversprechen einer datengetriebenen Innovation systematisch konzipieren....71

2.1 Nutzenpotenziale systematisieren und mit Wertversprechen adressieren ....72

2.1.1 Stakeholder identifizieren ....72

2.1.2 Bedürfnisse analysieren und Nutzen adressieren ....74

2.2 Datenströme strukturieren und Informationsbedarfe identifizieren ....76

2.2.1 Charakterisierung und Strukturierung von Datenströmen ....76

2.2.2 Informationsbedarf identifizieren ....77

2.3 Zwischenfazit ....78

3 Value Delivery – Das konzipierte Wertversprechen einer datengetriebenen Innovation erfolgreich umsetzen ....79

3.1 Implementierungsvehikel definieren ....79

3.2 Entwicklungsvorgehen gestalten ....82

3.3 Zwischenfazit ....83

4 Value Capture – Erfolgsfaktoren für die Implementierung von datengetriebenen Innovationen in produzierenden Unternehmen ....84

5 Zusammenfassung und Fazit ....85

6 Literatur ....87

## Kurzfassung

**Value Capture – Datengetriebene Geschäftsmodelle erfolgreich in nachhaltig produzierenden Unternehmen implementieren**

Die digitale Vernetzung hat heute einen signifikanten Einfluss auf die Lebensrealität von Privatpersonen. Seit der Einführung des ersten iPhones im Jahr 2007 ist bei digitalen Produkten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen eine rapide Marktdurchdringung zu beobachten. Produzierende Unternehmen erschließen die Potenziale, die mit der digitalen Vernetzung verbunden sind, jedoch nur langsam, obwohl insbesondere die Verwendung von Daten aus dem Nutzungszyklus von Produkten große Chancen zur Realisierung neuer Umsatzerlöse darstellt. Wesentliche Ursache dafür ist, dass die Unternehmen sich mit der Herausforderung aus erforderlicher Geschwindigkeit zur erfolgreichen Umsetzung von digitalen Innovationen und der Bindung durch ihre Produktionsassets konfrontiert sehen.

Dieser Beitrag soll produzierenden Unternehmen einen Impuls aufzeigen, wie sie zusätzlichen Kundennutzen generieren können und mit welchen Vehikeln dieser den Kundinnen und Kunden bereitgestellt werden kann. Anhand von fünf konkreten Fallstudien wird dargelegt, wie die theoretisch hergeleiteten und begründeten Ansätze in der Praxis bereits erfolgreich von produzierenden Unternehmen umgesetzt werden und welches dabei wesentliche Erfolgsfaktoren waren.

## Abstract

**Value Capture – How to implement data-driven business models successfully in sustainable manufacturing companies**

Digital, connected technologies have a major impact on people's private lives today. Since the introduction of the first iPhone in 2007, digital products, services and business models have spread rapidly and widely. However, manufacturing companies are only slowly tapping the potential associated with digital networking, although the use of data from the product's usage cycle in particular offers great potential for generating new revenues. The main reason for this is that companies are confronted with the challenges of the speed required for the successful implementation of digital innovations and the binding through their production assets. This article is intended to give manufacturing companies an impulse on how they can generate additional customer value and which vehicles can be used to make this value available to customers. By means of five case studies, it will be shown how the theoretically derived and justified elements have already been successfully implemented in practice by manufacturing companies and what essential success factors were.

# 1 Ausgangssituation und Herausforderungen in der Praxis

Mit der Einführung des ersten iPhones im Jahr 2007 begann eine kontinuierliche und schnelle Digitalisierung des Privatlebens. So wurden im Jahr 2019 knapp 700.000 Stunden Videos auf Netflix geschaut und durchschnittlich 3,8 Mio. Suchanfragen pro Minute bei Google platziert. Die digitale Transformation aus Unternehmenssicht ist jedoch erst 2011 mit der Vorstellung der Hightech-Strategie der Bundesregierung auf der Hannover-Messe verstärkt in den Fokus gerückt [1]. Mit dem Begriff Industrie 4.0 wurde die echtzeitfähige, intelligente, horizontale und vertikale Vernetzung von Menschen, Maschinen, Objekten und informations- und kommunikationstechnischen Systemen (IKT) zur dynamischen Beherrschung komplexer Systeme definiert [2]. Diese soll produzierende Unternehmen in Deutschland befähigen, eine Optimierung ihrer Produktionsprozesse, Produkte und Dienstleistungen durchzuführen und so die internationale Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen zu stärken.

Angesichts der durch die Nutzung von Industrie 4.0 erwarteten Potenziale, wie bspw. einem Anstieg der Unternehmensproduktivität um bis zu 40 %, beschäftigt die Gestaltung dieses Wandels das Technologiemanagement bereits seit längerer Zeit [3]. Dabei beziehen sich die Aktivitäten der Unternehmen nicht nur auf die Optimierung der eigenen Wertschöpfung, sondern auch auf die Verwendung von Daten aus dem Nutzerzyklus der Produkte, um neue Umsatzmöglichkeiten zu erschließen. Eine besondere Herausforderung bei dem Management von Technologien hat dabei schon immer die Transition von einer bestehenden Technologie auf eine neue, performantere Substitutionstechnologie dargestellt. Diese hat FOSTER bereits 1986 basierend auf dem Technologielebenszyklus nach LITTLE identifiziert [4]. Im Kontext der digitalen Vernetzung muss das klassische *S-Kurvenmodell* jedoch adaptiert werden. MOORE formulierte 1965 die später als *Mooresches Gesetz* betitelte Aussage, dass sich die Anzahl an Transistoren, die in einen integrierten Schaltkreis festgelegter Größe passen, alle zwei Jahre verdoppelt. Dies führt dazu, dass die im S-Kurvenmodell auf der Ordinate dargestellte Leistungsfähigkeit für digitale Technologien stärker exponentiell ansteigt als bei analogen Technologien. Dadurch wird die traditionelle Herausforderung eines Technologiewechsels durch den exponentiellen Charakter digitaler Technologien weiter verschärft (siehe Abbildung 1).

Die exponentielle Entwicklung digitaler Technologien ist aber nicht der einzige Faktor der den Handlungsdruck auf Unternehmen erhöht. Unternehmen agieren in einem dynamischen Umfeld mit verschiedenen, sich überlagernden Trends und Ereignissen, welche die Unternehmen aus unterschiedlichen Perspektiven zur Transformation treiben. Ausmaß, Geschwindigkeit und gegenseitige Abhängigkeiten sind dabei kaum zu prognostizieren. Während die Auswirkungen des Klimawandels sowie die Bedeutung von Nachhaltigkeit stetig an Stellenwert gewinnt, werden diese kontinuierlichen Entwicklungen durch Diskontinuitäten – wie bspw. die Corona-Pandemie – verstärkt. Diese zwingt noch immer einen Großteil der Unternehmen zu einem veränderten Handeln. Wenngleich die Pandemie nicht direkt die Entwicklung digitaler Technologien beschleunigt, so katalysiert sie deren Einsatz und steigert die Bedeutung digitaler Leistungen [5]. Gemäß der Pfadabhängigkeit und Pfadkreation nach SCHREYÖGG ET AL. sorgt diese disruptive Änderung für ein Aufbrechen etablierter Pfade und ermöglichte dadurch die rasche Steigerung des Digitalisierungsgrades vieler Unternehmen [6]. Langfristig werden nicht alle Veränderungen in vollem Maße bestand haben. Dennoch sind viele Entwicklungen auf Unternehmensebene unter anderem durch Lock-in-Effekte nicht umkehrbar, insbesondere die Adaption neuer Technologien.

Die aus diesen Rahmenbedingungen resultierende Geschwindigkeit stellt die Unternehmen dabei vor weitere Herausforderungen: Während in der Vergangenheit verpasste

Trends durch einen gesteigerten F&E-Aufwand aufgeholt werden konnten, ist das Aufschließen zu *First-Movern* oder der *Early-Majority* in Bezug auf die Technologie kaum noch möglich, sodass sich infolge signifikante Wettbewerbsnachteile ergeben. Insbesondere für produzierende Unternehmen gestaltet sich dieser Wandel als herausfordernd. Da sich Unternehmen im Zuge ihrer kontinuierlichen Unternehmensentwicklung häufig immer weiter auf ihre Kernkompetenzen fokussieren, tun sie sich historisch gesehen schwer damit, außerhalb ihres Kerngeschäfts zu innovieren. Bei produzierenden Unternehmen liegen diese Kernkompetenzen weiterhin in Fertigungs- und nicht Informations- und Kommunikationstechnologien begründet.

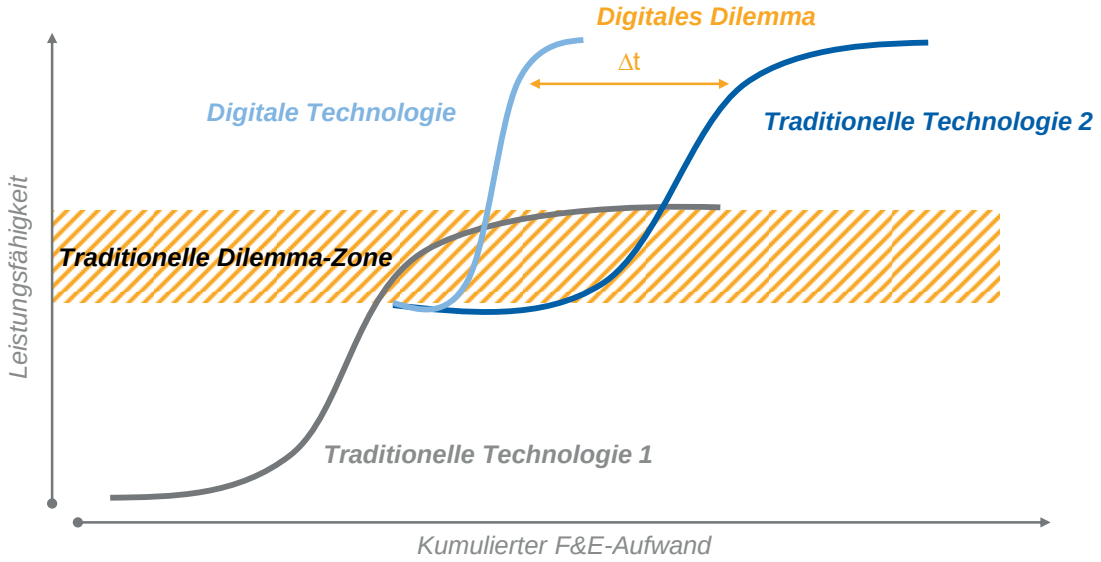



*Abbildung 1: S-Kurven der Leistungsfähigkeit von traditionellen und digitalen Technologien in [4]*

Im Vergleich zu Dienstleistungs- oder Softwareunternehmen kommt für produzierende Unternehmen erschwerend hinzu, dass sie aufgrund ihres Maschinenparks über eine hohe Kapitelbindung verfügen. Dies schränkt ihre Wandlungsfähigkeit ein und reduziert ihre Geschwindigkeit zur Exploration datengetriebener Innovationen. Letztere wird jedoch dringend benötigt, um nicht von den *First-Movern* des digitalen Wandels abgehängt zu werden. Abbildung 2 verdeutlicht den resultierenden Zielkonflikt zwischen Stabilität (für eine effiziente Organisation der Fertigungsbereiche) und Veränderung (für die Adaption neuer Technologien infolge der digitalen Transformation), den es für produzierende Unternehmen erfolgreich balancieren gilt.

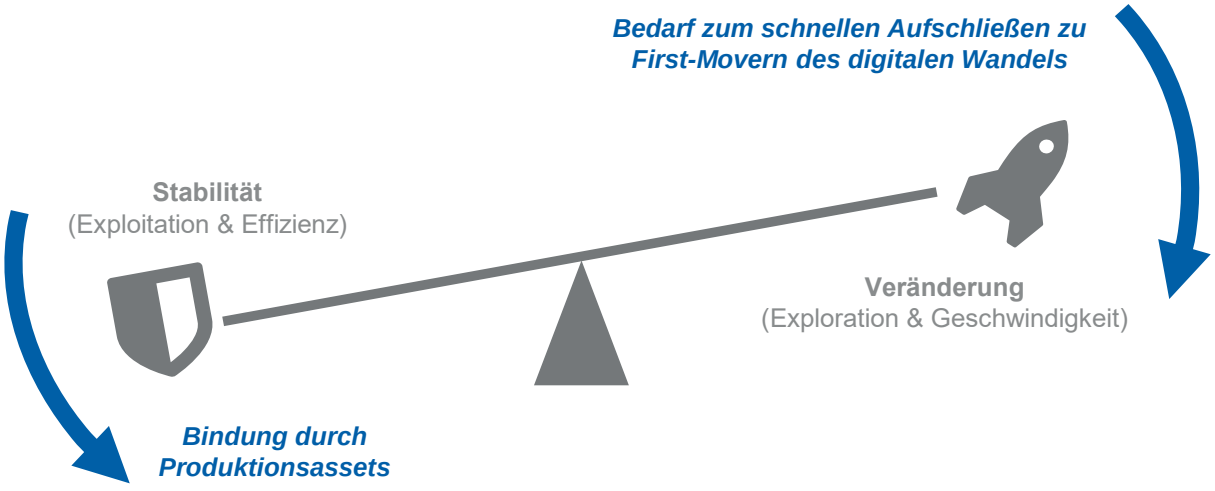



*Abbildung 2: Veranschaulichung des Zielkonflikts produzierender Unternehmen*

Um diesen Zielkonflikt zwischen Stabilität und Dynamik aufzulösen, wird von produzierenden Unternehmen derzeit häufig das Lösungskonzept der Agilität verfolgt – ablauf- sowie aufbauorganisatorisch. Dabei stammt die Praxis agiler Entwicklungsmethoden ursprünglich aus der Softwareentwicklung und beschreibt einen Ansatz, der die Transparenz und Flexibilität des Entwicklungsprozesses steigern soll. Hierbei wird mittels eines schnelleren Einsatzes der Software in Prototypenstadien in Verbindung mit iterativen Feedbackschleifen ein reduziertes Entwicklungsrisiko realisiert. Nach diesen Entwicklungsgrundsätzen steht die funktionierende Software über einer ausführlichen Dokumentation, die Kundenzusammenarbeit über den Vertragsverhandlungen und das Reagieren auf Veränderungen über dem Befolgen eines Plans. Wesentlicher Kern hierfür ist die inkrementelle Vorgehensweise, die schnelles Feedback und Anpassungen ermöglicht und Unsicherheiten reduziert [7]. Dieses Konzept wurde von GANGULY ET AL. auf produzierende Unternehmen übertragen. Sie bezeichnen Agilität als die Fähigkeit, sich schnell, effizient und effektiv an jede unerwartete oder unvorhergesehene Änderung anzupassen, ohne die Kosten oder die Qualität der Produkte und Prozesse zu beeinträchtigen [8]. Vor dem Hintergrund der hohen Entwicklungs- und Adoptionsgeschwindigkeiten digitaler Technologien und der einhergehenden Unsicherheiten, zeigt das Lösungskonzept der Agilität einen Zielzustand für produzierende Unternehmen auf – der Transfer von der Softwarebranche in das produzierende Gewerbe ist in der Praxis jedoch oftmals nur schwer möglich [9].

Es kann daher zusammenfassend festgestellt werden, dass sich für produzierende Unternehmen die digitale Transformation als besonders herausfordernd darstellt. Aufgrund der exponentiellen Geschwindigkeit der digitalen Transformation sind Unternehmen mit der Herausforderung konfrontiert, Trends frühzeitig zu erkennen und schnell zu handeln, da ansonsten der Vorsprung von *First-Movern* häufig nicht mehr einzuholen sein wird. Gleichzeitig existiert bisher nur begrenzt Kenntnis bezüglich der Konzeption und Umsetzung digitaler Innovationen in produzierenden Unternehmen, da es keine ganzheitlich zusammenhängenden Erfolgsbeispiele gibt und ein Transfer über Branchengrenzen hinweg eine weitere Herausforderung darstellt. Der vorliegende Artikel soll daher einen Beitrag zu dieser Problemstellung leisten, indem Modelle und Methoden zur Realisierung eines zusätzlichen Kundennutzens durch digitale Innovation vorgestellt sowie an cross-industriellen Best-Practice Fallstudien verdeutlicht werden. Hierzu wird die erfolgreiche Implementierung datengetriebener Innovationen (*Value Capture*) in zwei ineinandergreifende Aspekte differenziert: Konzeption (*Value Concept*) und Realisierung (*Value Delivery*). Im Folgenden wird detaillierter auf die beiden Aspekte „*Value Concept* und -*Delivery*" eingegangen.

## 2 Value Concept – Das Werteversprechen einer datengetriebenen Innovation systematisch konzipieren

Zur Konzeption datengetriebener Innovationen sind insbesondere zwei Perspektiven von Interesse: einerseits der Blickwinkel auf die Datenströme als Quelle von Informationen sowie andererseits der Blickwinkel auf den (Mehr)Wert, den die Innovation einer gewissen Zielgruppe stiften soll. Dabei lassen sich grundsätzlich zwei verschiedene Vorgehensweisen differenzieren, wie die beiden Blickwinkel in einem umsetzbaren Werteversprechen vereint werden können.

In dem *„Inside-out"*-Ansatz stellen Unternehmen sich zunächst die Frage, auf welche Daten sie Zugriff haben und welchen Nutzen sie damit potenziell stiften können. Dies ist erfahrungsgemäß oftmals der erste Schritt für Unternehmen in Richtung datengetriebener Innovationen. Gleichzeitig limitiert die Prämisse der eigenen Daten den potenziellen

Lösungsraum. In dem *„Outside-in“*-Ansatz stellen sich Unternehmen hingehen die Frage, welchen Nutzen sie stiften wollen und welche Daten es hierfür bedarf. Durch das prinzipielle Einbeziehen externer Datenquellen entsteht daher ein größerer Lösungsraum. Beide Vorgehensweisen können komplementär genutzt werden, um unterschiedliche Konzepte für datengetriebene Innovationen zu genieren.

## 2.1 Nutzenpotenziale systematisieren und mit Werteversprechen adressieren

Bei sich schnell und stark verändernden Randbedingungen sind Agilität, Flexibilität und Adaptivität der Schlüssel zum Erfolg. Merkmal der Agilität ist proaktives agieren. Dem gegenüber stellen Flexibilität und Adaptivität reaktive Charakteristika dar, welche im Kern auf zwei Fähigkeiten zurückzuführen sind: Wahrnehmung von Signalen und Reaktionsfähigkeit [10]. Unternehmen müssen in der Lage sein, tiefgreifende und dramatische Veränderungen der Kundenbedürfnisse und -stimmung zu verfolgen und zu messen. Nur wenn sie dies beherrschen, können Unternehmen darauf reagieren, indem sie schnell neu überdenken, wie sie ihren Kundenkreis weiterhin einen Mehrwert bieten [11].

Zur systematischen Konzeption dieses Mehrwerts für die Kundinnen und Kunden empfiehlt sich die Nutzung eines Ordnungsrahmens, welcher mögliche Nutzenpotenziale strukturiert. Nach KREUTZER werden hierzu in einem ersten Schritt mögliche Zielpersonen des Werteversprechens datengetriebener Innovationen identifiziert. Anschließend wird der Kontext der einzelnen Zielpersonen im Zusammenhang mit einer datengetriebenen Innovation näher beschrieben. Schließlich werden die Ziele der einzelnen Stakeholder abhängig von dem jeweiligen Kontext beschrieben. Da ein Nutzen im Allgemeinen durch die Befriedigung (latenter) Bedürfnisse generiert wird [12], können hieraus abschließend die konkreten Nutzenpotenziale datengetriebener Innovationen abgeleitet und zu einem Werteversprechen konfiguriert werden [13]. Nach PÜMPIN sind Nutzenpotenziale attraktive Konstellationen in der Umwelt, im Markt oder im Unternehmen selbst. Eine aktive Ausrichtung der Unternehmensfähigkeiten auf diese Nutzenpotenziale resultiert in nachhaltigen Wettbewerbsvorteilen. Die erforderlichen Ressourcen und Fähigkeiten für die Erschließung dieser Wettbewerbsvorteile bezeichnet PÜMPIN als strategische Erfolgspositionen [14].

### 2.1.1 Stakeholder identifizieren

Im Allgemeinen sind produzierende Unternehmen in gewachsenen Branchen entlang von Wertschöpfungsketten organisiert [15]. Zur ganzheitlichen Identifikation relevanter Interessengruppen für datengetriebene Innovationen bietet sich daher eine Betrachtung der Wertschöpfungskette an [13].

Als relevante handelnde Personen sind nach klassischer Betrachtung insbesondere jene zu identifizieren, welche an der Bereitstellung von kundenbezogenen oder direkt wertschöpfenden Leistungen beteiligt sind. Dies betrifft die Herstellerfirma, die Zulieferfirmen sowie den Kundenkreis des Produktes [16]. Nutzergruppen aus dem Geschäftskundenkreis (B2B) und aus dem Endkundenkreis (B2C) können als Abnehmerinnen und Abnehmer in Betracht gezogen werden.

Hierdurch ergibt sich neben der physischen auch eine digitale Wertkette: Die bei den Nutzergruppen erhobenen Daten fließen rückwärts zu der Herstellerfirma und den Zulieferfirmen. Vorwärts gerichtet werden diese in Form von datenbasierten Leistungsangeboten sowohl von den Zulieferfirmen und der Herstellerfirma als auch von Nutzerinnen

und Nutzern verwertet. **Abbildung 3** fasst die identifizierten Interessensgruppen zusammen, welche mit möglichen Nutzenpotenzialen digitaler Innovation adressiert werden können.

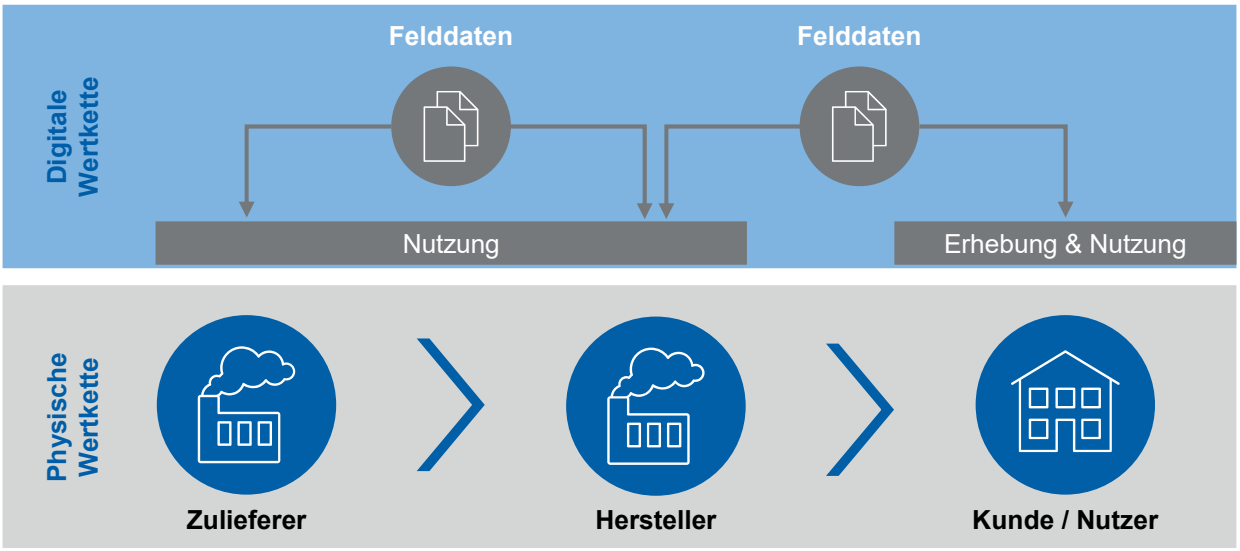



*Abbildung 3: Wertschöpfungskette Cyber-Physischer Systeme nach [13] in Anlehnung an [16]*

***Exkurs: Digitale Ökosysteme und deren Stakeholder***

*Im Kontext digitaler Innovation ist ein Wandel in Richtung interaktiver, kollaborativer Wertschöpfung zu beobachten. Dabei steigt gleichzeitig der Vernetzungsgrad der (wertschöpfenden) Akteurinnen und Akteure [17]. Diese Vernetzung wird mittels Industrieplattformen [1] in digitalen Ökosystemen realisiert, welche neuartige Geschäftsmodelle mit stärker individualisierten und komplexeren Leistungsangeboten ermöglichen [17, 19][2].*

*Im Zuge dieser Plattformisierung lassen sich neue Stakeholder in Ergänzung zur klassischen Betrachtung identifizieren. Zum einen ist an dieser Stelle das betreibende Unternehmen der Plattform zu nennen, dessen essentielle Tätigkeit in der Entwicklung und dem Management einer Plattform besteht. In der Praxis sind bei den Betreiberfirmen von Plattformen unterschiedliche Rollen und Strategien zu beobachten. Diese definieren sich unter anderem durch die Offenheit der Plattform sowie derer Schnittstellen. Allgemein ist festzuhalten, dass die meisten Typen von Plattform-Unternehmen ihren Wettbewerbsvorteil durch Economies of Scale kreieren (bspw. Amazon, eBay, Uber, …). Hiervon differenzieren lassen sich sogenannte Organizer oder Orchestratoren, welche sich durch Economies of Fit vom Wettbewerb differenzieren [22].*

*Auf entsprechenden Industrieplattformen werden ebenfalls komplementäre (digitale) Dienstleistungen und Services angeboten, welche über die Kernfunktionalitäten der Plattform hinausgehen. Diese Entwickler und Anbieter von Komplementärleistungen werden als Komplementoren bezeichnet. Je nach Ausgestaltung der Industrieplattform können, aber müssen nicht zwangsläufig, Komplementor und Plattform-Unternehmen der identische Stakeholder sein [13].*

[1] Für eine differenzierte Betrachtung verschiedener Plattformtypen siehe [18].
[2] Für eine detaillierte Erläuterung von Pipeline- und Plattform-Geschäftsmodellen bei linearen Wertschöpfungsketten sowie bei hochvernetzten Wertschöpfungssystemen sei auf [20, 21] verwiesen.

***Praxisbeispiel HOMAG: Tapio als Orchestrator der Holzindustrie***

*Die deutsche HOMAG Group AG verkauft Holzbearbeitungsmaschinen und Anlagen für die Möbel- und Holzbauindustrie. Als Tochter der HOMAG Group AG bietet tapio in Form einer IoT-Plattform ein offenes Ökosystem für die Wertschöpfungskette der Holzindustrie an. Dies beinhaltet insbesondere die Bereitstellung der Plattformtechnologie und Absicherung rechtlicher Randbedingungen für die datengetriebenen Innovationen von Komplementoren in Form von Services und digitalen Lösungen (vgl.* ***Abbildung 4****).*

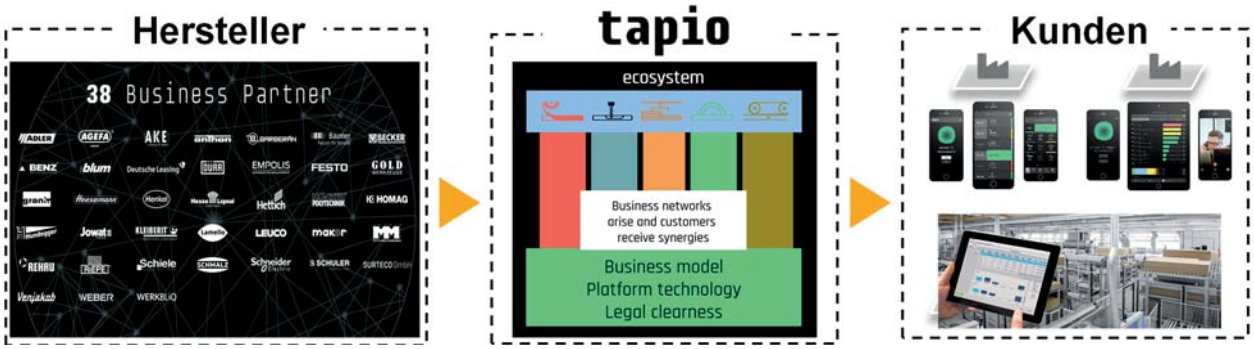



*Abbildung 4: Praxisbeispiel einer Rolle als Ökosystem-Orchestrator von tapio*

*Bezogen auf den Umgang mit den im Ökosystem der Holzindustrie auftretenden Daten nimmt tapio daher die Rolle eines Orchestrators ein. Erfolgskritisch hierbei ist insbesondere die neutrale Rolle und Offenheit von tapio gegenüber Drittanbieterfirmen, ohne welche eine kritische Masse und Vertrauen in die Plattform nicht zustande gekommen wäre.*

### 2.1.2 Bedürfnisse analysieren und Nutzen adressieren

Im zweiten Schritt gilt es, den Kontext der jeweiligen Stakeholder für datengetriebene Innovationen näher zu beschreiben, um die Ziele und (latenten) Bedürfnisse systematisieren zu können [12]. Eine Möglichkeit, diesen Kontext der Interessensgruppen in Bezug auf produzierende Unternehmen ganzheitlich zu beschreiben, bietet der Produktlebenszyklus digitaler Innovationen. Dabei sind aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht insbesondere die wertschöpfenden Phasen des Produktlebenszyklus relevant [13, 23].
Aus der Perspektive eines Unternehmens des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus können vier Phasen differenziert werden: Erstens die *Entwicklungs*- (umfasst Planung und Entwicklung), zweitens die *Fertigungs*-, drittens der *Service*- und viertens die *End-Of-Life-Phase*. Hierbei bildet die Servicephase die direkte Schnittstelle des produzierenden Unternehmens zum Kundenkreis. Für die Kundinnen und Kunden wiederum gliedert sich die *Servicephase* des produzierenden Unternehmens in die Phasen *Entscheidung und Kauf*, *Nutzung* und *End-Of-Life [23–25]*. Abbildung 5 fasst die relevanten Phasen der Stakeholder zusammen.

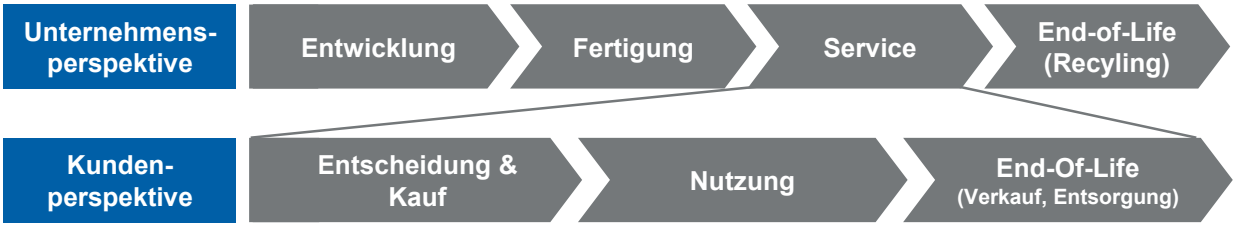



*Abbildung 5: Produktlebenszyklus nach [13] in Anlehnung an [23–25]*

Aufbauend auf dem Produktlebenszyklus können die Ziele und (latenten) Bedürfnisse der Stakeholder phasenspezifisch analysiert werden, um diese schließlich mit einem Werteversprechen durch eine datengetriebene Innovation zu adressieren. Im Folgenden wird

dies exemplarisch für den Kunden eines Herstellers von Werkzeugmaschinen in der *Entscheidungs- und Kaufphase* dargestellt.

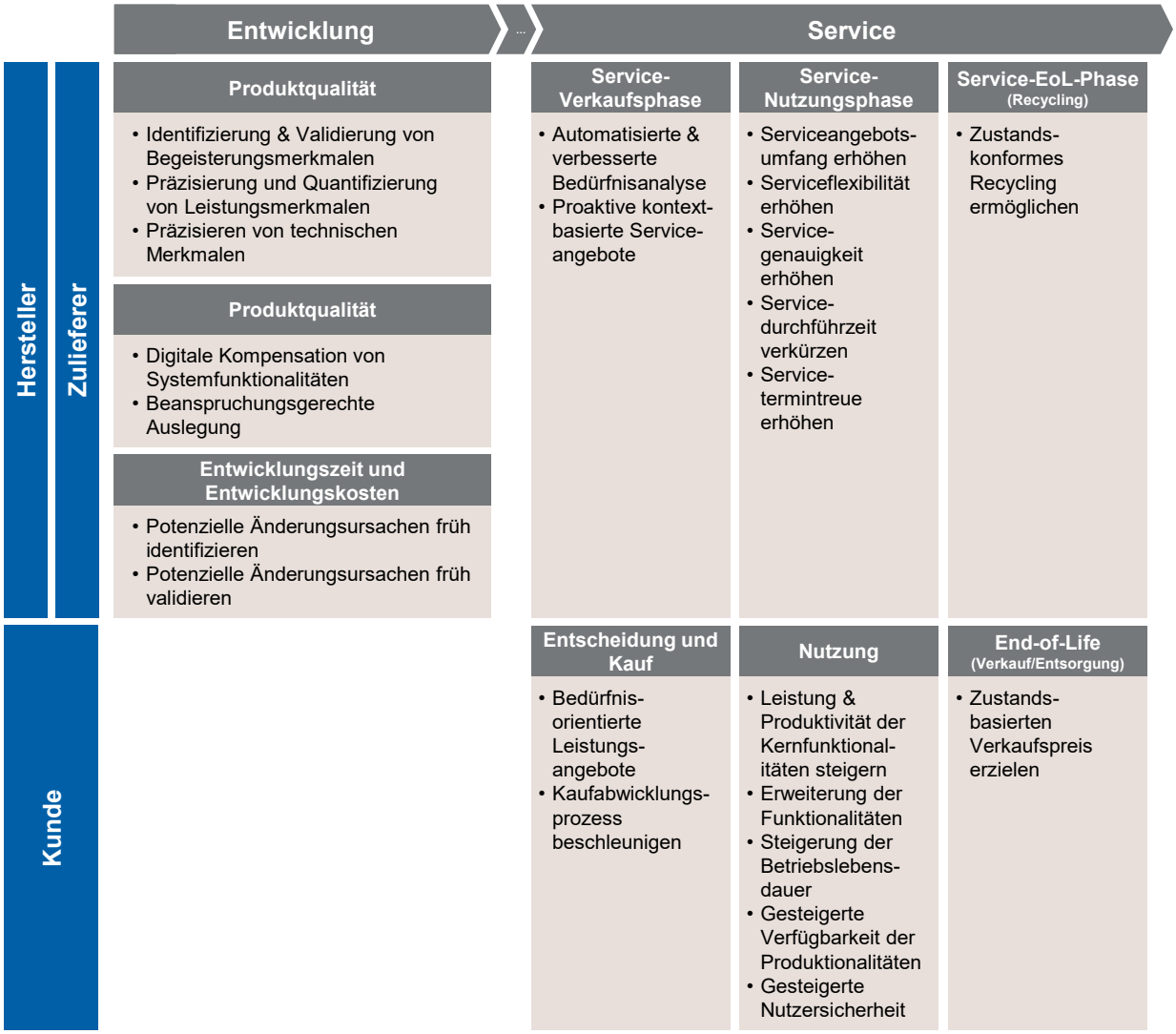



*Abbildung 6: Nutzenaspekte von Cyber-Physischen Systemen spezifisch in Bezug auf Stakeholder und Produktlebenszyklus nach [13]*

Bezüglich des Entscheidungsprozesses lässt sich zunächst feststellen, dass als Auslöser eines Kaufprozesses ein Bedürfnis steht. Zu dessen Befriedigung müssen sich die Kundinnen und Kunden in der Regel zwischen mehreren Handlungsalternativen entscheiden [26]. Eine bestmögliche Kaufentscheidung setzt voraus, dass der Kundenkreis sowohl die eigenen Bedürfnisse als auch den Anwendungskontext genau kennt. Dies ist aufgrund der eingeschränkten menschlichen Fähigkeit, Informationen aufzunehmen und zu verarbeiten jedoch kaum möglich. Liegen dem produzierenden Unternehmen allerdings Felddaten der Kundinnen und Kunden vor (vgl. Abschnitt 2.2 zu Nutzerdaten), lassen sich daraus Informationen über die exakten Bedürfnisse und den Anwendungskontext gewinnen. Betreiber von Werkzeugmaschinen können somit Nutzenpotenziale realisieren, indem sie den Kundinnen und Kunden auf ihre Bedürfnisse optimierte Produkte (beispielsweise Bearbeitungsstrategien) anbieten. In Bezug auf den Kaufprozess liegt demgegenüber eine möglichst effektive, schnelle Abwicklung im Kundeninteresse. Diesem Bedürfnis kann mittels einer Beschleunigung des Kaufabwicklungsprozesses entgegengekommen werden, welche zum Beispiel durch die Anbindung eines digitalen Bezahl- und Auftragsverwaltungssystems realisiert wird. [13]

Durch analoges Vorgehen können Nutzenaspekte für die einzelnen Stakeholder phasenspezifisch identifiziert und mit einem Werteversprechen durch datengetriebene Innovationen adressiert werden. **Abbildung 6** stellt einen Auszug möglicher Nutzenaspekte nach KREUTZER für ausgewählte Produktlebenszyklen und Stakeholder dar.

***Praxisbeispiel Miele: Miele und MChef***

*Die Miele Cie. & KG ist ein deutscher Hersteller von Haushalts- und Gewerbegeräten im Premiumsegment. Eine Innovation aus dem Bereich der Küchengeräte stellte Miele im Jahr 2017 mit dem Dialoggarer vor. Dieser kombiniert klassische Beheizungsarten eines Backofens mit elektromagnetischen Wellen. Hierdurch können verschiedene Gerichte mittels gezielter Energieeinbringung simultan zubereitet werden. Komplementär hierzu bietet Miele mit MChef einen Service an, welcher hochwertige Menüs zur frischen Zubereitung beim Kunden vor Ort liefert. Dazu wird zusammen mit der Auslieferung der Gerichte ein Parametersatz für den Dialoggarer übermittelt, sodass die Speisen mit Hilfe eines Automatik-Programms individuell perfekt zubereitet werden.*

*Abbildung 7: Konzept der Fallstudie Miele und MChef*

*Bezogen auf das Werteversprechen der datengetriebenen Innovation fokussiert Miele mit dem Dialoggarer in Kombination mit MChef primär die (End-)Nutzerinnen und Nutzer in der Entscheidungs- und Kauf- sowie in der Nutzungsphase. Die adressierten Nutzenpotenziale umfassen insbesondere eine kurzfristige Verfügbarkeit der Menüs, eine bequeme Lieferung in Verbindung mit einer perfekten Zubereitung der einzelnen Gerichte.*

## 2.2 Datenströme strukturieren und Informationsbedarfe identifizieren

Die wesentliche Grundlage für die zuvor abgeleiteten Nutzenaspekte bilden Daten als Träger von Informationen. Das Konzept einer datengetriebenen Innovation muss daher über die Frage des Werteversprechens hinaus auch Antworten zu den benötigten Daten und Informationsbedarfen geben. In diesem Zusammenhang empfiehlt es sich, zunächst relevante Datenströme zu identifizieren und zu strukturieren. Anschließend können die Informationsbedarfe der Nutzenaspekte ermittelt und mit dem Informationsangebot unternehmensinterner und -externer Datenströme abgeglichen werden.

### 2.2.1 Charakterisierung und Strukturierung von Datenströmen

Zur Charakterisierung von Daten existiert eine Vielzahl von Ansätzen, welche Datenströme bspw. nach ihrer Struktur, ihrer Herkunft oder ihrem Inhalt differenzieren [27–30]. Da im vorliegenden Anwendungsfall Daten zur Umsetzung von Nutzenaspekten untersucht werden, erscheint eine Charakterisierung nach Dateninhalt zielführend [13]. Basierend hierauf können drei Kategorien von Datenströmen differenziert werden: *Technische Messgrößen*, *Nutzerdaten* und *Systemdaten*.

Im Kontext datengetriebener Innovationen entstammen *technische Messgrößen* maßgeblich der Sensorik oder Aktorik smarter (oder smartifizierter) Produkte [13]. Da sich die Daten der Aktorik nur fallspezifisch untersuchen lassen, werden im Weiteren nur die Datenströme der Sensorik betrachtet. Technische Messgrößen aus der Sensorik lassen sich zunächst in mehrere Parametergruppen einteilen – Form- und Stoffgrößen, Funktions- und Prozessgrößen sowie Umwelt-Wechselwirkungsgrößen [31]. Im Sinne der Systemtechnik lassen sich diese Parametergruppen bis zu den einzelnen Messgrößen (bspw. Stoffkonzentrationen oder Beschleunigungen) detaillieren [32].

*Nutzerdaten* umfassen Informationen bezüglich der Nutzenden, ihres Kontexts sowie ihrer Interaktionen mit dem System. Sie spielen für Unternehmen eine entscheidende Rolle, da sie die Identifikation von Nutzerpräferenzen sowie -bedürfnissen und eine eindeutige Zuordnung zu einem Individuum ermöglichen. Analog zu den technischen Messgrößen existiert auch zur weiteren Gliederung der nutzerbezogenen Daten eine Vielzahl von Ansätzen [33, 34]. Neben den Informationen über die Nutzerinnen und Nutzer dienen Nutzerdaten ebenfalls dazu, charakteristische Nutzungsmuster in einem zugehörigen Kontext zu analysieren. Für den vorliegenden Fall ist eine Differenzierung in Persönlichkeitsdaten und Kontextinformation zielführend. Dabei beschreiben Persönlichkeitsdaten Ausprägungen von ausgewählten Attributen, die die Nutzerinnen und Nutzer selbst charakterisieren, während Kontextdaten das Umfeld des Nutzerverhaltens erfassen. [13]
Schließlich fallen unter *Systemdaten* Informationen mit einem systeminternen Bezug zum Produkt selber. Diese können sich entweder auf physische (bspw. Konstruktionsstand eines Produktes) oder digitale Teile (bspw. Versionsnummer eines Softwarereleases) des cyber-physischen Systems beziehen [35].

Abbildung 8 fasst die relevanten Datenströme und deren Gliederungsstruktur bis zur ersten Ordnung zusammen. Auf dieser Basis können Informationsangebot und -bedarf für eine datengetriebene Innovation konzeptionell erfasst werden.

*Abbildung 8: Strukturierung relevanter Datenströme von Felddaten smarter Produkte nach [13]*

### 2.2.2 Informationsbedarf identifizieren

Auf Basis der Nutzenaspekte und Datenstrukturierung kann der Bedarf an Felddaten analysiert werden. Nach KREUTZER müssen die beiden Aspekte dazu in einen Zusammen-

hang gestellt werden. Dieser kann entweder auf analytisch-deduktive Art mittels theoretischer Überlegungen oder empirisch-induktiv mithilfe von Beobachtung realer Anwendungsfällen erfolgen. Für theoretische Überlegungen müssen Nutzenaspekte generisch formuliert werden, wobei diese generische Formulierung einer handlungsleitenden Durchführung wenig dienlich ist [13]. Insbesondere im Kontext eines industrienahen Vortrags von Expertinnen und Experten ist daher eine empirisch-induktive Vorgehensweise auf Grundlage realer Anwendungsfälle vorzuziehen, um der Bestimmung dieses Felddatenbedarfes praxisorientiert zu begegnen. Für eine detaillierte Ausführung des Vorgehens zur Gegenüberstellung von Felddaten und Nutzenaspekten sei auf [13] verwiesen.

***Praxisbeispiel Syntegon: Data-Mining-as-a-Service***

*Die Syntegon Technology GmbH (ehemals Bosch Packaging) bietet weltweit Füll-, Prozess- und Verpackungstechnik an. Das Angebot reicht dabei von einzelnen Maschinen bis hin zu Komplettlösungen, die sich insbesondere an die Nahrungsmittel- und Pharmaindustrie richten. Komplementär hierzu bietet Syntegon einen auf Data-Mining basierenden Service zur Optimierung und Fehlerursachenanalyse der im Kundenkreis in Betrieb befindlichen Anlagen an. Dabei schaffen sie es ihr tiefgehendes Domänenwissen zu Verpackungsprozessen und -anlagen in Verbindung mit Kompetenzen im Bereich Data Science als zusätzlichen Umsatzstrom zu monetisieren und die Datenasymmetrie zwischen OEM und (B2B-)Kunde aufzuheben (vgl.* Abbildung 9*).*

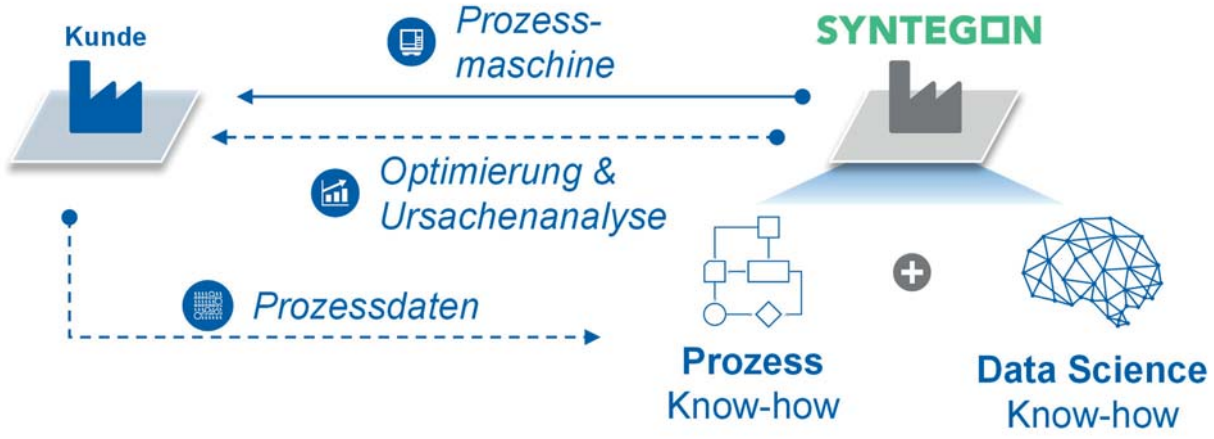



*Abbildung 9: Praxisbeispiel eines Data-Mining-as-a-Service Angebots von Syntegon*

*Um das aus mehreren Nutzenpotenzialen bestehende Werteversprechen umsetzen zu können, bedarf es seitens Syntegon insbesondere der technischen Messgrößen aus den bei den Kundinnen und Kunden befindlichen Anlagen. Aus der Aufbereitung und Analyse der technischen Messgrößen kann Syntegon in sehr kurzer Zeit Fehlerquellen (bspw. bei oder vor einem Stillstand der Prozessmaschine) identifizieren oder Empfehlungen zur Optimierung der Anlage geben.*

## 2.3 Zwischenfazit

Aus der Synthese der vorgestellten Nutzenaspekte, der Datenstrukturierung sowie deren Verknüpfung kann abschließend das *Value Concept Modell* abgeleitet werden (vgl. Abbildung 10). Im Sinne eines Ordnungsrahmens kann das Modell von Anwenderinnen und Anwendern aus der industriellen Praxis dazu genutzt werden, sich systematisch mit der Konzeption einer datengetriebenen Innovation auseinander zu setzen. Dabei zeigt es auf, mit welchen Fragestellungen sich Unternehmen fortlaufend kritisch auseinandersetzen

sollten, um ein überzeugendes und gleichzeitig realisierbares Leistungsversprechen zu kreieren.

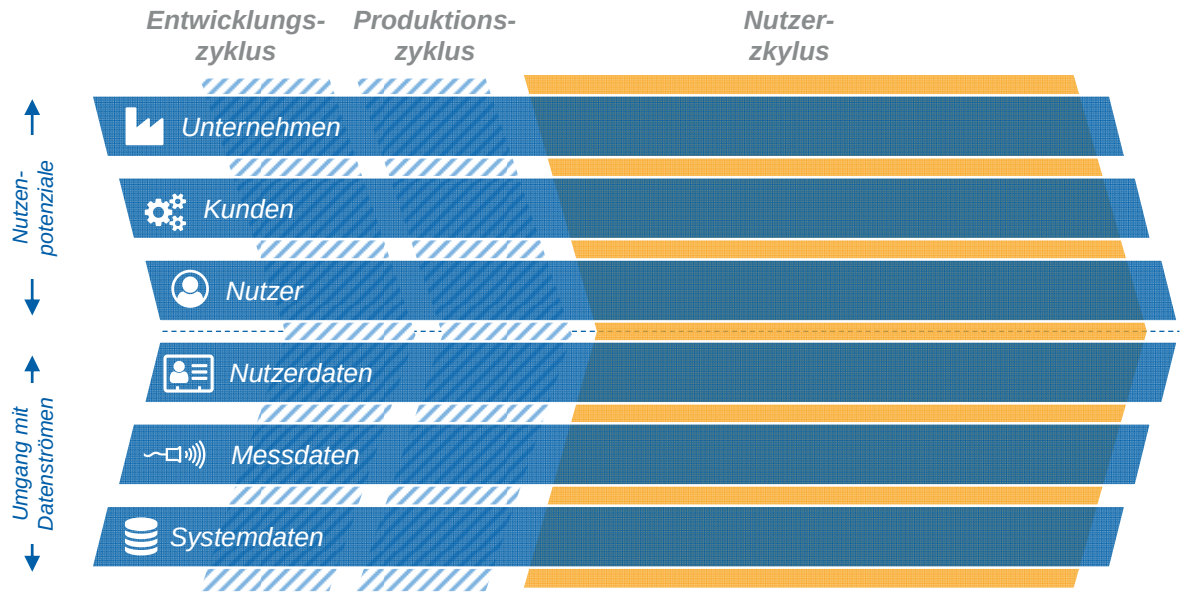



*Abbildung 10: Value Concept Model für produzierende Unternehmen*

# 3 Value Delivery – Das konzipierte Werteversprechen einer datengetriebenen Innovation erfolgreich umsetzen

Neben der Fragestellung nach dem Konzept einer datengetriebenen Innovation müssen produzierende Unternehmen sich mit der Fragestellung nach dessen Umsetzung (*Value Delivery*) auseinandersetzen. Hierfür sollen nachfolgend verschiedene Leistungssysteme vorgestellt werden, mit denen produzierende Unternehmen ihre Konzepte umsetzen können. Außerdem wird anhand verschiedener Fallstudien aus der Praxis aufgezeigt, welche unterschiedlichen Wege und Ausprägungen für eine erfolgreiche Umsetzung gangbar sind.

## 3.1 Implementierungsvehikel definieren

Für die Realisierung des im *Value Concept* definierten Nutzens müssen produzierende Unternehmen ein Vehikel zur Implementierung schaffen (bspw. als Produkt oder Dienstleistung), welches den Anwender- und/oder Kundennutzen erlebbar macht. Traditionell nutzen produzierende Unternehmen hierfür ihr physisches Produkt. Dieses kann im Kontext datenbasierter Geschäftsmodelle nach wie vor ein wesentlicher Bestandteil des *Value Delivery* sein. Darüber hinaus gehen Unternehmen zunehmend dazu über, zusätzlich zum physischen Produkt, komplementäre Dienstleistungen anzubieten und so ein zusammenhängendes Produkt-Service-System zu schaffen [36]. BELZ ET AL. haben dieses Zusammenspiel und den daraus resultierenden, zusätzlichen Kundennutzen bereits 1997 in ihrer Grundstruktur von Leistungssystemen beschrieben [37]. Das Produkt wird dabei in sieben Schalen von standardisierten und kundenindividuellen Dienstleistungen umgeben, welche einen monetarisierbaren Mehrwert schaffen (vgl. **Abbildung 11**).

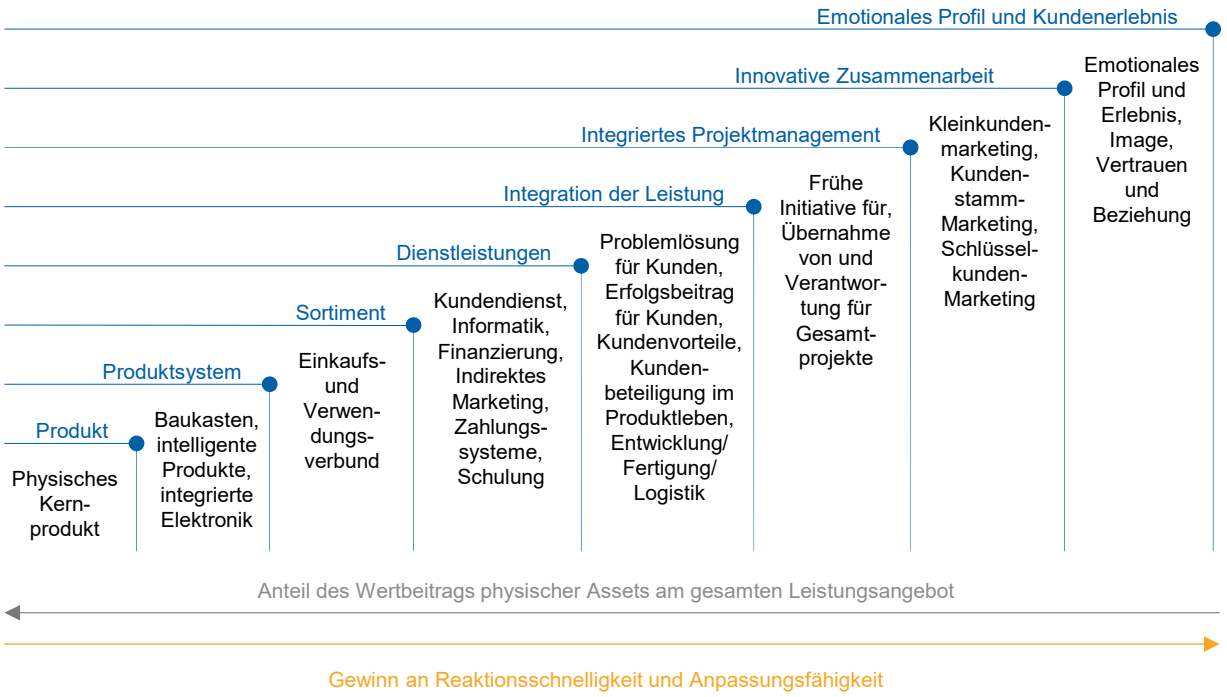



*Abbildung 11: Struktur von Leistungssystemen in Anlehnung an [37]*

Mit zunehmendem Abstand vom Kernprodukt sind die Inhalte der Schalen verstärkt für den Kunden zu individualisieren. Ziel der Konzeption eines Leistungssystems ist es, dass produzierende Unternehmen nicht eine beliebige Anzahl möglicher Dienstleistungen in ihrem Angebotsportfolio vorhalten, sondern ein kundenindividuelles Zusammenspiel aus physischem Produkt und komplementären Dienstleistungen schaffen. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass sich das Dienstleistungsangebot am Kundenmehrwert ausrichtet und monetarisierbar ist. In der Entwicklung digitaler Produkte oder Dienstleistungen muss daher das bestehende Leistungssystem und Geschäftsmodell kontinuierlich reflektiert werden. Überdies sinkt mit zunehmender Entfernung vom physischen Kernprodukt der Anteil des Wertbeitrags physischer Assets am gesamten Leistungsangebot. Dies bedeutet eine geringere Abhängigkeit vom Kernprodukt und damit einhergehend einen Gewinn an Reaktionsschnelligkeit und Anpassungsfähigkeit, da bei veränderten Kundenbedürfnissen digitale Leistungen schneller angepasst werden können und dazu zunächst keine neunen physischen Assets benötigt werden [38]. Darüber hinaus bedeuten substantielle Änderungen der Kundenbedürfnisse oftmals auch eine Anpassung des physischen Produktes. So können in bestimmten Fällen die entwickelten Neuprodukte und -services nicht mit dem bestehenden Geschäftsmodell eines Unternehmens vereinbar sein. In solchen Fällen bedarf es somit eines zusätzlichen Geschäftsmodells, welches konzeptioniert und validiert werden muss.

Auf diese Weise ergeben sich somit drei unterschiedliche Vehikel für produzierende Unternehmen, um das *Value Concept* für den Kundenkreis erlebbar zu machen. Wie in **Abbildung 12** dargestellt, sind dies ein physisches Produkt, eine Dienstleistung, die komplementär zu einem physischen Produkt angeboten wird oder ein ganzes Geschäftsmodell.

*Abbildung 12: Grundsätzlich mögliche Arten des Value Delivery*

Innerhalb dieser drei Kategorien kann darüber hinaus zwischen der Weiterentwicklung von bestehenden Angeboten sowie der Entwicklung von neuen Angeboten differenziert werden. Im Kontext datenbasierter Geschäftsmodelle bedeutet dies, dass entweder bereits bestehende Produkte, Dienstleistungen oder Geschäftsmodelle durch das Hinzufügen von Konnektivität und Intelligenz smartifiziert werden oder komplett neue Leistungen in den drei Dimensionen entwickelt werden. Aus der Synthese beider Perspektiven kann das *Value Delivery Modell* als ein zweiter Ordnungsrahmen aufgespannt werden *(vgl.* ***Abbildung 13****)*.

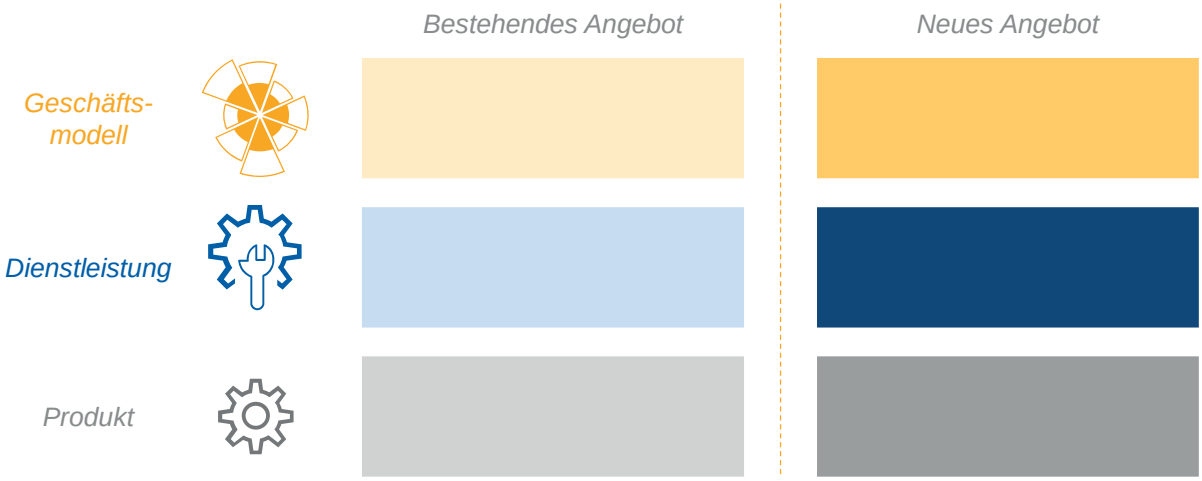



*Abbildung 13:Value Delivery Modell für produzierende Unternehmen*

In der Praxis zeigt sich, dass oftmals zunächst komplementäre Produkte und Services zu dem bestehenden Leistungsportfolio des Unternehmens entwickelt werden. Dabei ist festzuhalten, dass horizontale und vertikale Bewegungen durch das *Value Delivery Modell* unterschiedliche Impulse benötigen. In der Theorie werden im Kontext der digitalen Transformation sowohl *Top-down-* als auch *Bottom-up-Impulse* zur Identifizierung und Realisierung digital vernetzter Lösungen gefordert [2]. Im Rahmen der Fallstudien des Expertenkonsortiums hat sich jedoch gezeigt, dass *Bottom-up-Impulse* vor allem horizontale Veränderungen im *Value Delivery Modell* für produzierende Unternehmen auslösen. Zwischen den vertikalen Ebenen des Modells bestehen deutliche Resistenzzonen, die eine Überwindung durch reine *Bottom-up-Initiativen* sehr herausfordernd gestalten. Um die Transition zwischen zwei horizontalen Ebenen erfolgreich zu gestalten, ist daher in der Regel ein *Top-down Management* und *-Promotor* von besonderer Relevanz.

***Praxisbeispiel Körber Pharma: Komplementäre Services zu bestehendem Produkt***

*Körber Pharma ist ein Partnerunternehmen der internationalen Pharma- und Biotech-Industrie mit weltweiten Standorten. Das Unternehmen bietet Lösungen für sichere und effiziente Prozesse in der Herstellung, Inspektion und Verpackung pharmazeutischer Produkte. Aufbauend auf den durch Körber bereitgestellten Verpackungsmaschinen wurden unterstützende Dienstleistungen für die Nutzungsphase des Produkts entwickelt.*

*Durch Augmented Reality-Anwendungen werden Kunden bei ihren Umrüstvorgängen sowie der zugehörigen Dokumentation unterstützt (vgl.* Abbildung 14*).*

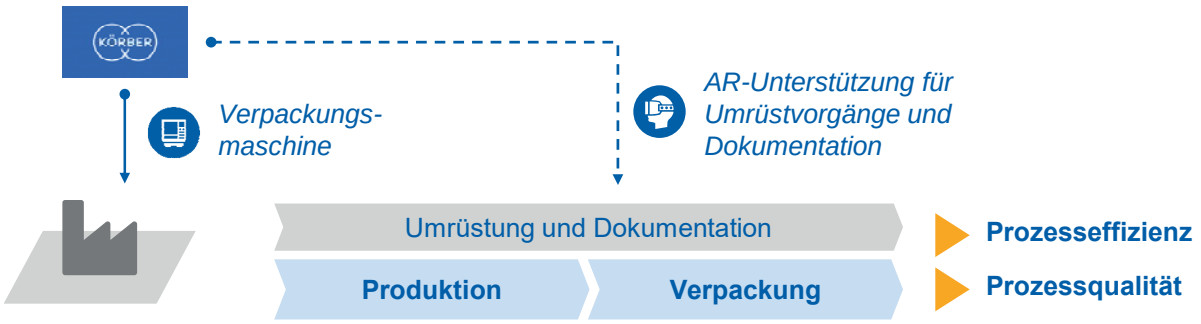



*Abbildung 14: Praxisbeispiel komplementärer Services zu bestehendem Produkt von Körber Pharma*

*Bezogen auf den Umsetzungspfad dieser datengetriebenen Innovation wurde ein bestehendes Produkt smartifiziert und darauf basierend ein neues Dienstleistungsangebot entwickelt. Zukünftig soll der Service durch eine vertikale Transition im Value Delivery Modell um neue Geschäftsmodelle zur aufwandsbasierten Abrechnung von Leistungen erweitert werden.*

## 3.2 Entwicklungsvorgehen gestalten

Bei der Entwicklung und Ausgestaltung des gewählten Umsetzungsvehikels für das *Value Concept* durchlaufen Unternehmen die drei Phasen der *Ideation, Exploration und Industrialisierung*, wie in Abbildung 15 dargestellt ist.

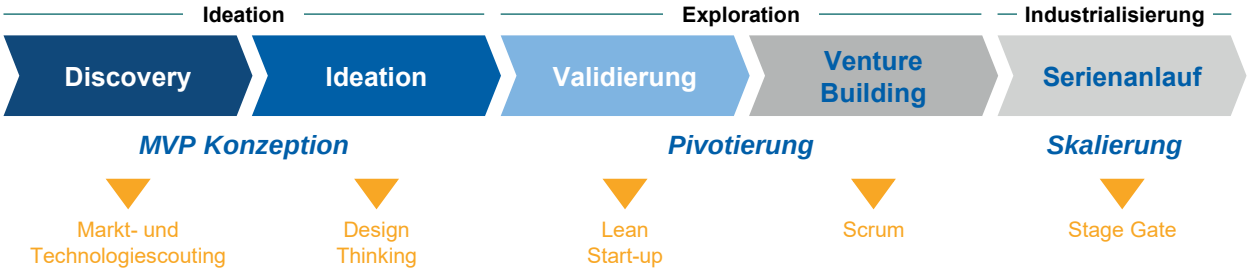



*Abbildung 15: Stadien und Gestaltungsmöglichkeiten für das Entwicklungsvorgehen*

Während traditionelle Entwicklungsprojekte in der Regel vollständig auf einem linearen *Stage Gate Prozess* beruhen, werden zur Umsetzung digitaler Transformationsprojekte aufgrund erhöhter Unsicherheiten oftmals iterative Entwicklungsmethoden genutzt. In Verbindung mit den im Kerngeschäft etablierten Entwicklungsmethoden unterstützt dies in produzierenden Unternehmen eine Balance zwischen Stabilität und Dynamik, (vgl. **Abbildung 2**). Bei den iterativen Lösungsansätzen liegt dabei der Fokus auf dem frühen Testen von Lösungshypothesen durch Minimum Viable Products (MVPs) und der schnellen Pivotierung des *Value Concepts*. Dem frühen Testen und Validieren, insbesondere von Kundenbedürfnissen, ist in Zeiten erhöhter Unsicherheit eine deutlich gesteigerte Bedeutung beizumessen. Die zugrunde gelegten Hypothesen über die Kundenbedürfnisse in der Ideation-Phase werden möglichst schnell validiert, bevor wertvolle Unternehmensressourcen verbraucht oder lange blockiert werden [39]. In Kombination mit dem etablierten Stage Gate Prozess für eine sichere und effiziente Industrialisierung können die erfolgreich getesteten und validierten Lösungen skaliert werden.

***Praxisbeispiel thyssenkrupp: carValoo als neues Geschäftsmodell***

*Die thyssenkrupp AG ist ein diversifizierter Industriekonzern mit traditionell hoher Werkstoffkompetenz und einem wachsenden Anteil an Industriegüter- und Dienstleistungsgeschäften. Das Geschäftsfeld „Automotive Technology" entwickelt und produziert Hightech-Komponenten und Anlagen für die Automobilindustrie. Dabei spielen eigenentwickelte mechatronische Lösungen mit Elektronik und Software für intelligente Fahrwerke eine zunehmend größere Rolle. Als Corporate Start-up von thyssenkrupp bietet carValoo einen datengetriebenen Service für Betreiberfirmen von Fahrzeugflotten an, welcher das bestehende Kerngeschäft des Geschäftsfelds „Automotive Technology" kompetenz- und marktseitig erweitert. Der Cloud-Service von carValoo ermöglicht die automatische Erkennung und detaillierte Beschreibung von Fahrzeugbeschädigungen. Mit Hilfe von carValoo können außerdem sämtliche fahrbedingte Zustände des Fahrzeugs im laufenden Betrieb erfasst werden, wodurch eine Einsicht in eine unabhängige und lückenlose digitale Nutzungshistorie für jeden gefahrenen Kilometer für Kunden ermöglicht wird. Der Service ist herstellerunabhängig und in Kombination mit etablierter Telematik-Hardware nachrüstbar.*

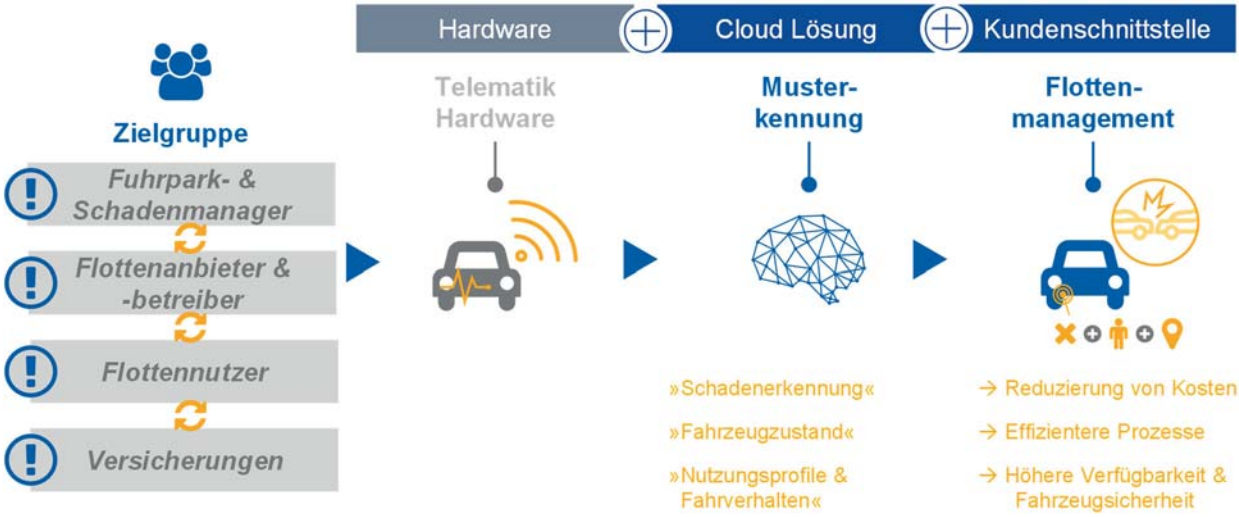



*Abbildung 16: Praxisbeispiel eines datengetriebenen Geschäftsmodells von thyssenkrupp und carValoo*

*Bezogen auf die Gestaltung des Entwicklungsvorgehens war ein wesentlicher Erfolgsfaktor von carValoo die schnelle Pivotierung des geplanten Produkts. Initial als smarte Lösung für Dämpfer konzipiert, wurde basierend auf dem vorhandenen Know-how im Bereich der Fahrwerksysteme der Zielmarkt breiter gedacht und ein neues Produkt für die Zielgruppe der professionellen Betreiberunternehmen von Fahrzeugflotten entwickelt. Um die Geschwindigkeit der Validierung von Lösungshypothesen zu erhöhen, wurde Value Concept und Delivery mehrfach pivotiert. So bietet carValoo mittlerweile einen Service mit eigenem Geschäftsmodell an, in dessen Mittelpunkt die Datenanalytik in der Cloud und nicht das smarte Produkt steht.*

## 3.3 Zwischenfazit

In Verbindung ergeben die beiden vorgestellten Modelle zum *Value Concept* und *Delivery* ein Rahmenwerk, welches Unternehmen dazu befähigt, eine monetarisierbare Implementierung datengetriebener Innovationen (*Value Capture*) systematisch zu durchdringen (vgl. Abbildung 17). Im Sinne einer Planung erlaubt das *Value Capture Modell* ebenfalls die Inkrementalisierung und Sequenzierung von Leistungsbestandteilen. So können seitens des *Value Concept* geänderte oder erweiterte Nutzenaspekte und seitens des *Value*

*Delivery* neue und bestehende Angebote über verschiedene Schalen des Leistungssystems zeitlich zu Implementierungspfaden verknüpft werden.

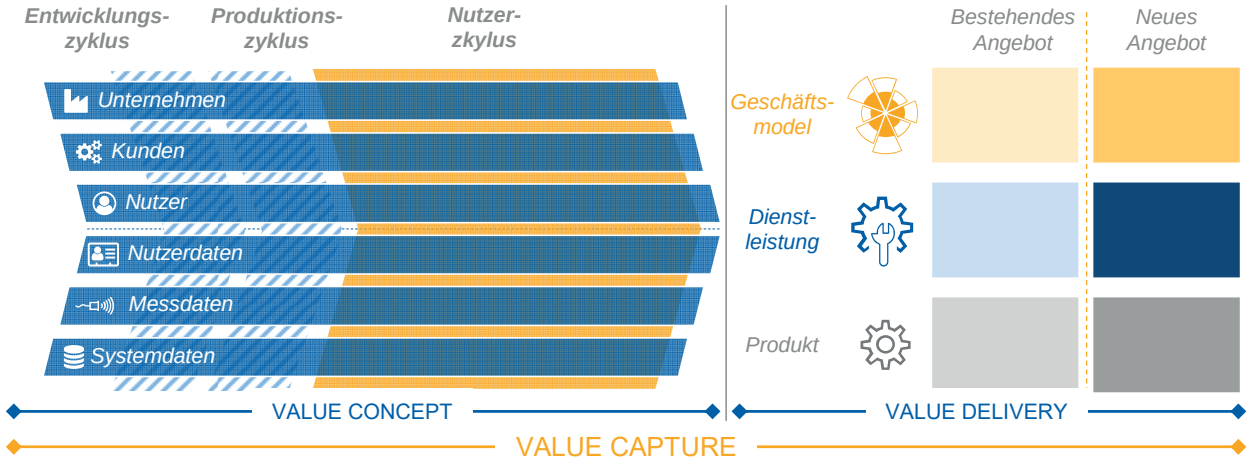



*Abbildung 17: Value Capture Modell für produzierende Unternehmen*

# 4 Value Capture – Erfolgsfaktoren für die Implementierung von datengetriebenen Innovationen in produzierenden Unternehmen

Übergreifend können die im Rahmen der Fallstudien gewonnenen Erkenntnisse zur Gestaltung des *Value Capture* in der Praxis in vier zentralen Handlungsempfehlungen zusammengefasst werden.

**Datengetriebene Innovationen stellen den Kundennutzen in den Mittelpunkt**

Ausgangspunkt für datengetriebene Innovationen muss der Kundennutzen sein. Es gilt daher zunächst im *Value Concept* den klaren Kundennutzen zu erarbeiten, welcher anschließend im Rahmen des *Value Delivery* implementiert und monetisiert werden kann. Dabei bedarf es keineswegs eines „finalen" Konzepts, sondern einer grundsätzlichen Lösungshypothese, welche mittels einer Markt- und Technologieexploration geschärft wird.

**Datengetriebene Innovationen in Ökosystemen organisieren**

Über Innovationen sollen neben anderen Zielen vor allem nachhaltige Wettbewerbsvorteile generiert werden. Um diese Wettbewerbsvorteile langfristig gegenüber einer bestehenden oder neuen Konkurrenz verteidigen zu können, müssen produzierende Unternehmen die datengetriebenen Produkte, Services oder Geschäftsmodelle auf einem „*Unfair Advantage*" aufbauen. Dieser liegt im Fall des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus häufig im spezialisierten Domänenwissen (bspw. Prozessverständnis oder Kundenzugang) begründet. Eine weitere Schutzebene gegen die Substitution ihrer Innovationen können Unternehmen erreichen, indem sie alle drei Ebenen des „*Value Delivery*" (Produkt, Service und Geschäftsmodell) gleichermaßen adressieren. Durch dieses Vorgehen in Ökosystemen erschaffen Unternehmen physische sowie digitale Eintrittsbarrieren, welche von branchenfremden konkurrierenden Unternehmen nur schwer überwunden werden können.

**Datengetriebene Innovationen benötigen Mut und Schnelligkeit**

Um eben diese Eintrittsbarrieren in einer schnelllebigen, digitalen Welt rechtzeitig erschaffen zu können bedarf es Geschwindigkeit. Hierbei entspricht das finale Lösungskonzept (*Value Concept*) in den seltensten Fällen der ersten Lösungshypothese (vgl. die Ausführungen zur Fallstudie thyssenkrupp & carValoo). Daher ist vielmehr ein kontinuierliches Pivotieren und Mut anstelle eines „*First-time Right*"-Ansatzes gefragt, um ein

monetarisierbares Werteversprechen zu entwickeln und die zugehörige Nische zu finden. Gleichermaßen ist der Mut des Top-Managements bei den Transitionen zwischen den Produkt-, Service- oder Geschäftsmodellphasen gefragt. „Bottom-up" werden datengetriebene Innovationen diese Phasensprünge ohne ein aktives Top-level-Management nicht überwinden können.

**Das Potenzial liegt oftmals in der Orchestration von B2B-Nischen**

Endkundenplattformen (B2C) im Sinne von „*Two & Multi-Sided Markets*" (Amazon, eBay, Uber, Airbnb, …) sind nicht die einzigen datengetriebenen Geschäftsmodelle, welche erfolgreich skalieren. Insbesondere der deutsche Maschinen- und Anlagenbau besitzt hervorragende Voraussetzungen für eine Rolle als branchenspezifischer *Orchestrator* in einer B2B-Nische. Hierfür bedarf es des spezifischen Domänenwissens, des Zugangs zu Kunden und Lieferanten sowie des Vertrauens relevanter Stakeholder entlang der Wertschöpfungskette, um die kritische Masse aufzubauen (vgl. die Ausführungen zur Fallstudie HOMAG Group & tapio).

# 5 Zusammenfassung und Fazit

Das Thema Industrie 4.0 bietet produzierenden Unternehmen eine Vielzahl von Potenzialen. Insbesondere die Verwendung von Daten aus der Nutzungsphase der angebotenen Leistungen bietet produzierenden Unternehmen die Chance, zusätzlich Umsatzströme zu realisieren und im selben Zug die Abhängigkeit vom physischen Kernprodukt zu verringern. Bei der Realisierung dieser datengetriebenen Potenziale sehen sich die Unternehmen jedoch mit einem Zielkonflikt aus Stabilität für eine effiziente Organisation und der erforderlichen Schnelligkeit zur erfolgreichen Partizipation an digitalen Marktpotenzialen konfrontiert. Die Forderung nach Schnelligkeit resultiert nicht allein aus einer starken Wettbewerbssituation, sondern wird durch die stetig höher frequenten Diskontinuitäten verstärkt. So hat sich die Corona Pandemie im Jahr 2020 geradezu als Katalysator für die Digitalisierung in weiten Bereichen der Industrie gezeigt. Infolge der sprunghaft gestiegenen Anwendung digitaler Technologien ist somit zu erwarten, dass sich hierdurch neue Potenziale zur Schaffung von Mehrwerten eröffnen.

Zur Erarbeitung eines Werteversprechens (*Value Concept*) datengetriebener Innovationen müssen deren Nutzenpotenziale erkannt und schließlich mit den zugrundeliegenden Daten in Verbindung gesetzt werden. Grundsätzlich sollten produzierende Unternehmen durch die komplementäre Anwendung der Ansätze „*Inside-Out*" und „*Outside-In*" überzeugende und gleichzeitig realisierbare Leistungsversprechen erarbeiten.

Aufbauend auf dem entwickelten *Value Concept* müssen produzierende Unternehmen das für ihren Anwendungsfall passende Umsetzungsvehikel definieren. Hierfür eignen sich die drei grundsätzlichen Typen Produkt, Dienstleistung und Geschäftsmodell. Zu unterscheiden ist dabei zwischen der Smartifizierung bestehender Leistungen und der Entwicklung vollständig neuer Leistungen.

Aus den dargestellten Praxisbeispielen lassen sich vier Erfolgsfaktoren identifizieren, um datengetriebene Innovationen erfolgreich zu implementieren. Hierzu gehört zunächst die Orientierung am Kundennutzen als zentrales Gestaltungskriterium der Innovation. Darüber hinaus kann ein langfristig nachhaltiger Wettbewerbsvorteil erzielt werden, wenn datengetriebene Innovationen in Ökosystemen eingebettet sind. Ein weiterer Faktor besteht im schnellen und mutigen Handeln, welches nicht zuletzt durch das Top-Management vorgelebt werden muss. Zudem kann festgestellt werden, dass für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau die Rolle des Orchestrators in B2B-Nischenmärkten besonderes Potenzial bietet.

Abschließend kann festgehalten werden, dass eine erfolgreiche Umsetzung digitaler Innovationen auf bestehenden Wettbewerbsvorteilen aufsetzen und diese ausbauen sollte. Erste monetarisierbare Ansätze fokussieren Kundenbedürfnisse in Ökosystemen, deren Mehrwert transparent aufgezeigt werden kann. Auf dem Weg dorthin sollten Unternehmen iterative Methoden nutzen, insbesondere um initiale Unsicherheiten zu überwinden und der erhöhten Veränderungsgeschwindigkeit der Umwelt gerecht werden zu können. Hierfür stellt das Konzept der Agilität einen zentralen Lösungsbaustein dar.

# 6 Literatur


[1] H. Kagermann, W. Wahlster, und J. Helbig, *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Frankfurt am Main: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., 2013. [Online]. Verfügbar: https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf

[2] G. Schuh *et al., Industrie 4.0: Implement it!: Ein Leitfaden zur erfolgreichen Implementierung von Industrie 4.0-Lösungen,* Aachen: Werkzeugmaschinenlabor der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2018.

[3] A. Behrendt, N. Müller, und C. Schmitz, *Mit Industrie 4.0 zu mehr Produktivität: Keine Revolution, sondern eine Weiterentwicklung.* [Online]. Verfügbar: https://www.handelsblatt.com/adv/newrealities/keine-revolution-sondern-eine-weiterentwicklung-mit-industrie-4-0-zu-mehr-produktivitaet/19303360.html?ticket=ST-840656-OmRfkQaTbEZnMRsEkQa0-ap3 (zugegriffen: Feb. 27 2020).

[4] R. N. Foster, *Innovation: Die technologische Offensive*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1986. [Online]. Verfügbar: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-83742-4

[5] L. LaBerge, C. O'Toole, J. Schneider, und K. Smaje, *How COVID-19 has pushed companies over the technology tipping point—and transformed business forever.* [Online]. Verfügbar: https://www.mckinsey.com/business-functions/strategy-and-corporate-finance/our-insights/how-covid-19-has-pushed-companies-over-the-technology-tipping-point-and-transformed-business-forever (zugegriffen: Feb. 10 2021).

[6] G. Schreyögg, J. Sydow, und J. Koch, “Organisatorische Pfade — Von der Pfadabhängigkeit zur Pfadkreation?,” in *Schreyögg, Sydow (Hg.) 2003 – Strategische Prozesse und Pfade*, S. 257–294.

[7] K. Beck *et al.,* “Agile Manifesto: Manifesto for Agile Software Development,” 2001. [Online]. Verfügbar: https://agilemanifesto.org/iso/en/manifesto.html (verfügbar: Feb. 27 2020).

[8] A. Ganguly, R. Nilchiani, und J. V. Farr, “Evaluating agility in corporate enterprises,” *International Journal of Production Economics*, Jg. 118, Nr. 2, S. 410–423, 2009, doi: 10.1016/j.ijpe.2008.12.009.

[9] R. T. Nishijima und J. G. Dos Santos, “The Challenge Of Implementing Scrum Agile Methodology In A Traditional Development Environment,” *International Journal Of Computer & Technology*, Jg. 5, Nr. 2, S. 98–108, 2013, doi: 10.24297/ijct.v5i2.3529.

[10] M. Reeves und M. Deimler, “Adaptability: The New Competitive Advantage,” *Havard Business Review*, Juli 2011, 2011. https://hbr.org/2011/07/adaptability-the-new-competitive-advantage (zugegriffen: Feb. 10 2021).

[11] B. Kanarick und L. Buchanan, *Are you agile enough to move with the changing consumer?* [Online]. Verfügbar: https://www.ey.com/en_gl/covid-19/are-you-agile-enough-to-move-with-the-changing-consumer (zugegriffen: Feb. 10 2021).

[12] N. Hohl, *Nutzen als Basis von Kaufentscheidungen: Die Bedeutung von Bedürfnissen und Ressourcen für das Konsumentenverhalten,* Frankfurt am Main: Peter Lang GmbH Internationaler Verlag der Wissenschaften, 2011. [Online]. Verfügbar: https://www.peterlang.com/view/product/15278?format=EPDF

[13] R. Kreutzer, “Methodik zur Bestimmung der Nutzenpotenziale von Felddaten cyber-physischer Systeme,” Dissertation, RWTH Aachen; IIF - Institut für Industriekommunikation und Fachmedien GmbH, Aachen, 2019.

[14] C. Pümpin, *Strategische Erfolgspositionen: Methodik der dynamischen strategischen Unternehmensführung*. Bern: Haupt, 1992.

[15] M. E. Porter, *Wettbewerbsvorteile: Spitzenleistungen erreichen und behaupten,* 8. Auflage. Frankfurt am Main: Campus-Verlag, 2014. [Online]. Verfügbar: http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=666111

[16] J. Rüegg-Stürm, *Das neue St. Galler Management-Modell: Grundkategorien einer integrierten Managementlehre ; der HSG-Ansatz,* 8. Auflage. Bern: Haupt, 2005.

[17] E. Geisberger und M. Broy, *agendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*. Berlin: Springer, 2012. [Online]. Verfügbar: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29099-2

[18] A. Gawer und M. A. Cusumano, “Industry Platforms and Ecosystem Innovation,” *J Prod Innov Manag*, Jg. 31, Nr. 3, S. 417–433, 2014, doi: 10.1111/jpim.12105.

[19] A. Schatz und T. Bauernhansl, “Geschäftsmodell-Innovationen,” in *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1*, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, und M. t. Hompel, Hrsg., Berlin: Springer, 2017, S. 245–260.

[20] M. v. Alstyne, G. Parker, und S. P. Choudary, “Pipelines, platforms, and the new rules of strategy,” *Havard Business Review*, Jg. 94, Nr. 4, S. 54–62, 2016.

[21] G. Parker, M. v. Alstyne, und S. P. Choudary, *Platform revolution: How networked markets are transforming the economy - and how to make them work for you*. New York: W.W. Norton & Company, 2016.

[22] S. Strongin, A. Hindlian, S. Lawson, S. Banerjee, und D. Duggan, “A Survivor's Guide To Disruption,” The Goldman Sachs Group, Inc., New York, 2019. [Online]. Verfügbar: https://www.goldmansachs.com/insights/pages/gs-research/survivors-guide-to-disruption/report.pdf (zugegriffen: Feb. 28 2020).

[23] H.-P. Wiendahl und H.-H. Wiendahl, *Betriebsorganisation für Ingenieure: Mit 279 Abbildungen,* 9. Auflage. München: Carl Hanser, 2019.

[24] J. C. Aurich und M. H. Clement, *Produkt-Service Systeme: Gestaltung und Realisierung*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. [Online]. Verfügbar: http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10363598

[25] M. Eigner und R. Stelzer, *Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management,* 2. Auflage Dordrecht: Springer, 2013.

[26] M. Scholz, “Die Conjoint Analyse als Instrument zur Nutzenmessung in Produktempfehlungssystemen,” Dissertation, Universität Passau, Passau, 2009.

[27] B. Dinter, T. Franz, S. Grapenthin, R. Konrad, S. Nienke, und C. Velten, “Big Data und Geschäftsmodell-Innovationen in der Praxis: 40+ Beispiele,” Berlin, 2015 [Online]. Verfügbar: https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/151229-Big-Data-und-GM-Innovationen.pdf (zugegriffen: Mai 11 2020).

[28] B. Otto, M. t. Hompel, und S. Wrobel, “Industrial Data Space,” in *Digitalisierung*, R. Neugebauer, Hrsg., Berlin: Springer, 2018, S. 113–133.

[29] T. Spitta und M. Bick, *Informationswirtschaft: Eine Einführung,* 2. Auflage. Berlin: Springer, 2008. [Online]. Verfübar: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-85116-5

[30] H.-W. Wohltmann, R. Lackers, und M. Siepermann, “Stichwort: Daten,” in *Gabler Wirtschaftslexikon*, Springer Gabler Verlag, Hrsg., Wiesbaden: Springer Gabler

Verlag, 2020. [Online]. Verfügbar: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/daten-30636 (zugegriffen: Mai 11 2020.)

[31] H. Czichos und W. Daum, “Meßtechnik und Sensorik,” in *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, K.-H. Grote und J. Feldhusen, Hrsg., Berlin: Springer, 2007, W1-W37.

[32] E. Hering und G. Schönfelder, *Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete,* Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. [Online]. Verfübar: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8635-4

[33] B. N. Schilit und M. M. Theimer, “Disseminating active map information to mobile hosts,” *IEEE Network*, Jg. 8, Nr. 5, S. 22–32, 1994, doi: 10.1109/65.313011.

[34] P. J. Brown, J. D. Bovey, und X. Chen, “Context-aware applications: from the laboratory to the marketplace,” *IEEE Pers. Commun.*, Jg. 4, Nr. 5, S. 58–64, 1997, doi: 10.1109/98.626984.

[35] Bitkom, VDMA, ZVEI, “Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0,” Berlin, 2015.

[36] O. Thomas, *Dienstleistungsmodellierung 2012: Product-Service Systems und Produktivität*. Wiesbaden: Springer, 2013. [Online]. Verfügbar: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-00863-5

[37] C. Belz, *Industrie als Dienstleister,* St. Gallen: Thexis, 1997.

[38] A. Tukker, “Eight types of product–service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet,” *Bus. Strat. Env.*, Jg. 13, Nr. 4, S. 246–260, 2004, doi: 10.1002/bse.414.

[39] D. S. Silva, A. Ghezzi, R. B. d. Aguiar, M. N. Cortimiglia, und C. S. ten Caten, “Lean Startup, Agile Methodologies and Customer Development for business model innovation,” *IJEBR*, Jg. 26, Nr. 4, S. 595–628, 2020, doi: 10.1108/IJEBR-07-2019-0425.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 1.2:

Prof. Dr.-Ing. G. Schuh, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT
Dr.-Ing. S. Breit, Miele & Cie. KG
Dr.-Ing. J. Echterfeld, Miele & Cie. KG
T. Graberg, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Dr.-Ing. R. Kreutzer, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
S. Manz, Syntegon Technology GmbH
Dr. rer. nat. M. Michaelis, Syntegon Technology GmbH
M. Patzwald, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Dr. rer. pol. T. Pieper, Körber Pharma GmbH
N. Schön, carValoo & thyssenkrupp AG
M. Volm, tapio GmbH & HOMAG Group AG

## 1.3 Individuelle Prozessketten im Werkzeugbau durch daten- und modellbasierte Prognosen

*T. Bergs, M. Wilms, O. Henrichs, S. Weber, G. Stepien, T. Dannen, M. Prümmer, K. Arntz*

### Gliederung

1 Einleitung ....93
1.1 Aktuelle Konjunkturlage ....93
1.2 Digitalisierung als Treiber für effizientere Prozesse ....94
2 Herausforderungen ....96
2.1 Hindernisse zur Implementierung von individuellen Prozessketten....96
2.2 Vorbild Routenplaner – Routing-Algorithmen in der Fertigung....97
3 Lösungsansätze zur Implementierung von individuellen Prozessketten ....100
3.1 Analyse von 3D-Modellen in der Konstruktion....100
3.2 Generierung und Bewertung von adaptiven Prozessketten in der Fertigung ....101
3.3 Integration von heterogenen Daten zur Erhöhung der Prognosefähigkeit....103
3.4 Technologieübergreifende Anpassung der Prozesskette....109
4 Ausblick....110
4.1 Ontologie zur Verknüpfung der Lösungsansätze ....110
4.2 Resilienz durch adaptive Prozessketten ....111
5 Zusammenfassung und Fazit....111
6 Literatur....113

## Kurzfassung

### Individuelle Prozessketten im Werkzeugbau durch daten- und modellbasierte Prognosen

Der deutsche Werkzeugbau steht vor der großen Herausforderung, sich weiterhin erfolgreich vom Wettbewerb zu differenzieren und die Produktion der Werkzeuge im internationalen Vergleich so kostengünstig wie möglich bei gleichbleibender Qualität zu gestalten. Wo in der Vergangenheit das Siegel »Made in Germany« als Alleinstellungsmerkmal ausreichend war, befindet sich die Branche heutzutage in einem brutalen Preiskampf. Ein Handlungsfeld zur Reduzierung der Fertigungskosten ist die Steigerung der Effizienz in der Werkzeugherstellung durch individuelle und adaptive Prozessketten. Die Individualisierung bringt die ursprünglich mit Hilfe von verschiedenen Methoden wie bspw. der Standardisierung, Taktung oder Prinzipien des Lean Management reduzierte Komplexität zurück in die Fertigung und nutzt deren Potenzial zur gesamtheitlichen Fertigungsoptimierung. Im Gegensatz zu in der Vergangenheit verfolgten Ansätzen ist der Werkzeugbau heutzutage dazu in die Lage, diese Komplexität mit Werkzeugen aus der Digitalisierung und neuen Erkenntnissen aus den Fertigungstechnologien zu beherrschen. Die dadurch entstandene erhöhte Transparenz aller wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Tätigkeiten ermöglicht es, die Leistungsfähigkeit der Fertigung besser zu evaluieren und schneller auf neue Anforderungen zu reagieren. Hier sei als Beispiel die Nachhaltigkeit der Produktion genannt, die derzeit eine rasant steigende Bedeutung erlebt. Jedoch bestehen für die erfolgreiche Umsetzung von individuellen Prozessketten noch diverse Herausforderungen. Hierzu werden Lösungsansätze vorgestellt, wie bspw. die automatisierte Analyse von 3D-Modellen und die darauffolgende Generierung und Bewertung von Prozessketten oder neue Methoden zur Erhöhung der Prognosefähigkeit in den Einzeltechnologien.



## Abstract

### Individual manufacturing process chains in tooling by data driven and model based forecast methods

The German toolmaking industry is facing a major challenge to continue to successfully differentiate itself from the international competition and to make the production of tools as cost-effective as possible while maintaining the same level of quality. In the past, the "Made in Germany" label was sufficient as a unique selling point, but today the industry is in a brutal price war. One field of action for reducing manufacturing costs is to increase the efficiency of tool production by means of individual and adaptive process chains. Individualization brings back the complexity that was originally reduced with the help of various methods such as standardization, takting or principles of lean management back into production and uses its potential for overall manufacturing optimization. In contrast to approaches followed in the past, toolmaking today is able to master this complexity with tools from digitization and new insights from manufacturing technologies. The resulting increased transparency of all value-adding and non-value-adding processes makes it possible to better evaluate production and orient it more quickly to new requirements, such as sustainability. Despite this, there are still a number of challenges to be met in order to successfully implement individual process chains. These challenges are described below with solutions such as the automated analysis of 3D models and the generation and evaluation of manufacturing process chains as a result, as well as new methods for increasing the prediction capability in the individual manufacturing technologies.

# 1 Einleitung

## 1.1 Aktuelle Konjunkturlage

Deutsche Werkzeugbaubetriebe haben im weltweiten Vergleich einen exzellenten Ruf, insbesondere aufgrund hoher Qualitätsstandards und der Realisierung komplexester Werkzeugprojekte. Nach Angaben des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e.V. (VDMA) gibt es in Deutschland rund 3.800 Werkzeugbauunternehmen mit rund 54.000 Beschäftigten [1]. Von diesen Werkzeugbaubetrieben beschäftigen 99 % weniger als 100 Mitarbeitende, demnach sind fast alle Werkzeugbaubetriebe den kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) zuzuordnen [2].
Neben der besonderen Branchenstruktur zeichnet sich der Werkzeugbau durch geringe Losgrößen und hohe Qualitätsanforderungen aus. Daher sind Werkzeugbaubetriebe gezwungen, stets an die Grenzen des technisch Machbaren zu gehen. Durch die Globalisierung und Individualisierung mit immer kürzeren Entwicklungszyklen, ist der deutsche Werkzeugbau in den letzten Jahren in einen Preiskampf geraten. War er in der Vergangenheit in der Lage, sich durch eigene Innovationskraft vom Weltmarkt zu differenzieren, so muss er sich heute durch Effizienzsteigerung der eigenen Produktion und Senkung der Produktionskosten stärker vom Markt abheben. [3]
Erschwerend kommen die aktuelle Corona-Krise und die sich bereits seit 2019 abzeichnende Automobilkrise hinzu. Das ganze Ausmaß dieser kombinierten Krisensituation ist aktuell noch nicht absehbar. Besonders deutlich werden die aktuellen Auswirkungen der Corona-Pandemie anhand deutlicher Kapazitätsüberschüsse von ca. 25 % und einem Rückgang der PKW-Neuzulassungen von ca. 19 % in 2020 [4]. Expertinnen und Experten prognostizieren für 2021 ein Produktionsplus von 2 % in Deutschland [5]. Das Vorkrisenniveau des Bruttoinlandsprodukts wird nach aktuellen Prognosen nicht vor dem Jahreswechsel 2021/2022 erreicht [6]. Diese Entwicklungen setzen Automobilzulieferfirmen und somit große Teile des Werkzeugbaus enorm unter Druck, insbesondere aufgrund der Unternehmensstrukturen der Werkzeugbaubetriebe und der Abhängigkeit von der Automobilbranche [7]. Entscheidende Kriterien zur Abgrenzung gegenüber Konkurrenzunternehmen sind neben der Erweiterung der klassischen Serviceangebote, wie bspw. die Anlaufbegleitung in der Serienfertigung, die hohen Qualitätsanforderungen, die zum Teil Form- und Lagetoleranzen kleiner 5 µm aufweisen. Gleichzeitig sind die Werkzeuge sehr komplex und können aus mehreren hundert Einzelkomponenten bestehen.

Der deutsche Werkzeugbau sieht sich somit einer Vielzahl technologischer und wirtschaftlicher Herausforderungen gegenüber. Bei genauerer Betrachtung der Umsatzentwicklungen der letzten zehn Jahre ist eine sehr positive Entwicklung bis zum Anfang des Jahres 2019 zu erkennen [8]. Bereits 2019 hat sich allerdings die Automobilkrise angebahnt. Im Rahmen der im Jahr 2020 veröffentlichten Studie »Tooling in Germany« wurde ermittelt, dass die Umsatzrendite im deutschsprachigen Werkzeugbau zwischen 2016 und 2019 durchschnittlich um 47 % gesunken ist. Die Umsatzrendite ist von 9 % auf 4,8 % gesunken und verdeutlicht den gestiegenen Wettbewerbsdruck in der Branche [2]. Die aktuell anhaltende Krise, ausgelöst durch die Corona-Pandemie, hat die wirtschaftliche Situation der Werkzeugbaubetriebe zusätzlich massiv verschlechtert.

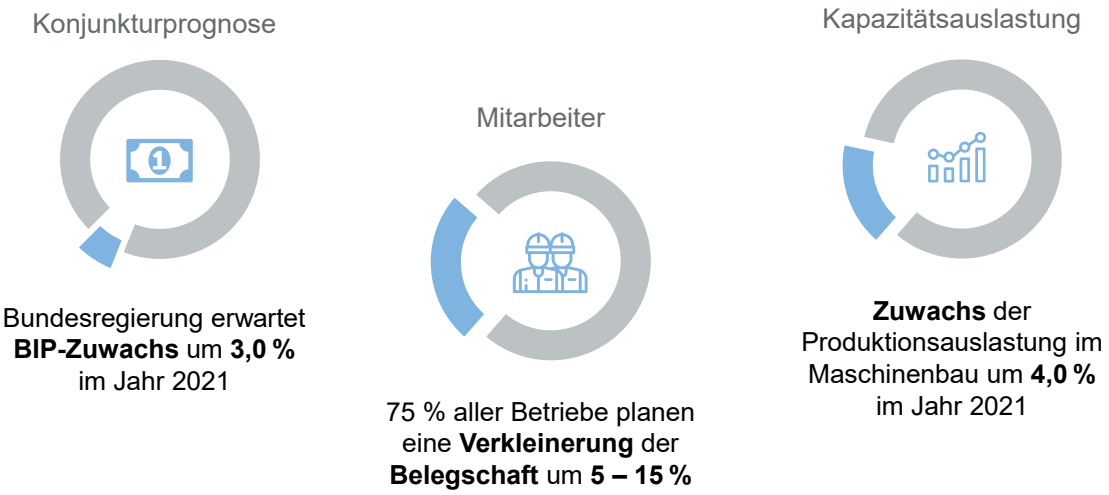



*Abbildung 1: Aktuelle konjunkturelle Lage in Deutschland [6, 9, 10]*

Abbildung 1 veranschaulicht diese Entwicklung und die Auswirkungen der anhaltenden Krise. Ein Großteil der befragten deutschen Herstellerfirmen des Maschinen- und Anlagenbaus in Deutschland plant eine Verkleinerung der Belegschaft und hat mit massiven Produktionsrückgängen zu kämpfen. Dies hat zur Folge, dass zukünftig nur diejenigen Betriebe Aussicht auf eine nachhaltige Entwicklung haben, die auch in der aktuellen Situation Wandlungs- und Verbesserungsfähigkeit beweisen.

## 1.2 Digitalisierung als Treiber für effizientere Prozesse

Zu den größten Herausforderungen im Werkzeugbau gehört die effiziente Nutzung der neuen Möglichkeiten digitaler Lösungen. Kompetenz und Know-how sind oft nur bedingt vorhanden und ein großer Teil der auf dem Markt vorhandenen Lösungen konzentriert sich auf die Optimierung von Warenflüssen oder Lagerhaltungssystemen in der Großserienfertigung. Die Verknüpfung von Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz und digitaler Lösungen von Leistungserstellungsprozessen in der Einzel- und Kleinserienfertigung weist aktuell eine geringe Technologiereife auf – sowohl im industriellen Umfeld als auch in der Forschung.
Mit Hilfe von Automatisierungsmaßnahmen, die bei Losgröße 1 besondere Herausforderungen darstellen, konnten in der Vergangenheit bereits Effizienzpotenziale in der Fertigung erschlossen werden. Aufgrund des Einsatzes vieler unterschiedlicher Fertigungstechnologien im Werkzeugbau und häufigen Umpriorisierungen sowie Eilaufträgen, ist die Feinplanung und Steuerung der mechanischen Fertigung sehr komplex und dynamischen Einflüssen unterlegen. Erforderliche Nacharbeiten werden zudem in der Regel nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt und beeinflussen die Planung und Steuerung zusätzlich. Unter Berücksichtigung der hohen Qualitätsanforderungen muss die Prozessplanung bei kurzfristig auftretenden Ausfällen und Kapazitätsänderungen im Produktionsnetzwerk unter hohem manuellem Aufwand laufend wiederholt werden. Dies beeinflusst sowohl die Qualität der jeweiligen Bauteile als auch die Termintreue des gesamten Werkzeugprojekts signifikant. [11]

In der Folge wird ein Großteil der Ressourcen nicht optimal genutzt und das Potenzial zur Kostensenkung im Werkzeugbau nicht voll ausgeschöpft. Laut einer durchgeführten Studie erfassen bereits 79,2 % der befragten Unternehmen Daten in der mechanischen Fertigung. 67,9 % setzen nicht näher spezifizierte Apps ein, allerdings werden bei 32,1 % der Unternehmen spezielle Apps in der Qualitätssicherung eingesetzt. [2]

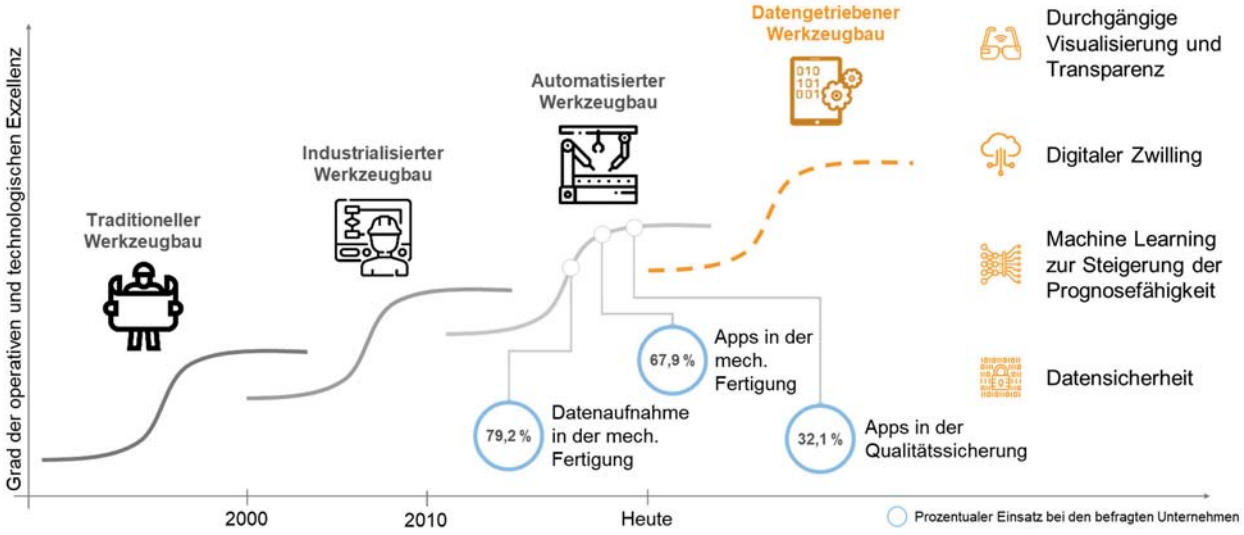



*Abbildung 2: Der Weg zum datengetriebenen Werkzeugbau [2, 12]*

Abbildung 2 verdeutlicht, dass Werkzeugbaubetriebe in den letzten Jahren mit der Datenaufnahme begonnen haben, darüber hinaus allerdings kaum Potenziale der Digitalisierung und Methoden der Datenanalyse, bis hin zum Einsatz von Machine Learning, genutzt werden. Es wird angenommen, dass bis 2025 durch eine konsequente interne Digitalisierung 126 Mrd. Euro an zusätzlicher Wertschöpfung in Deutschland erzielt werden könnte. Unternehmensübergreifend wird von einem zusätzlichen Wertschöpfungspotenzial von rund 30 Mrd. Euro ausgegangen. [13, 14]

Dies verdeutlicht, dass Unternehmen verstärkt digitale Technologien einsetzen müssen, um nachhaltig Produktivitätssteigerungen realisieren zu können. Neben der reinen Effizienzsteigerung aus rein wirtschaftlichen Gründen, spielen zunehmend Nachhaltigkeitsaspekte eine wichtige Rolle für Unternehmen. 2019 hat die europäische Kommission dazu den europäischen Green Deal verabschiedet und damit konkrete Ziele, wie die komplette Reduktion des $CO_2$-Ausstoßes bis 2050 zu gelingen hat. Maßgeblich für die Erreichung der Ziele ist damit unter anderem die Reduktion der Emissionen in Unternehmen. Im Schnitt emittiert eine durchschnittliche Fräsmaschine 5,5 t $CO_2$ pro Jahr. Im Vergleich dazu wird in Deutschland pro Person ca. 10 t $CO_2$ im gesamten Jahr emittiert, was die Relevanz und den großen Stellhebel der Einsparungen in Unternehmen darlegt. [15–17]

Ein mögliches ZielAbbildung stellen hochflexible und individuelle Prozessketten in der mechanischen Fertigung dar [18]. Die Idee der individuellen Prozessketten basiert auf der Funktionsweise moderner Routenplaner. Diese erheben verschiedenste Daten, um die zu erwartende Ankunftszeit zu prognostizieren. Störungen wie bspw. Unfälle und Straßensperrungen werden in Echtzeit berücksichtigt und alternative Routen vorgeschlagen. Wenn man diese Analogie auf die Planung komplexer Prozessketten in der industriellen Fertigung überträgt, so müssen neben der digitalen Abbildung von Maschinen und Peripherie auch deren aktueller Zustand und der Fertigstellungsgrad aller Aufträge bekannt sein. Zur Implementierung von individuellen Prozessketten müssen eine Vielzahl unterschiedlicher Herausforderungen gelöst werden, auf die nachfolgend näher eingegangen wird. [11]

# 2 Herausforderungen

## 2.1 Hindernisse zur Implementierung von individuellen Prozessketten

Die Idee von individuellen und flexiblen Prozessketten zur Schaffung von Adaptivität in der Fertigung zur Erhöhung der Produktivität in der Einzel- und Kleinserienfertigung ist nicht neu. Entscheidend ist jedoch, dass durch ein erhöhtes Verständnis der organisatorischen und technologischen Randbedingungen, gepaart mit den neuen Möglichkeiten der Digitalisierung, die Implementierung nun greifbarer wird. Für eine erfolgreiche Implementierung sind jedoch weiterhin verschiedene Herausforderungen zu meistern (s. Abbildung 3).

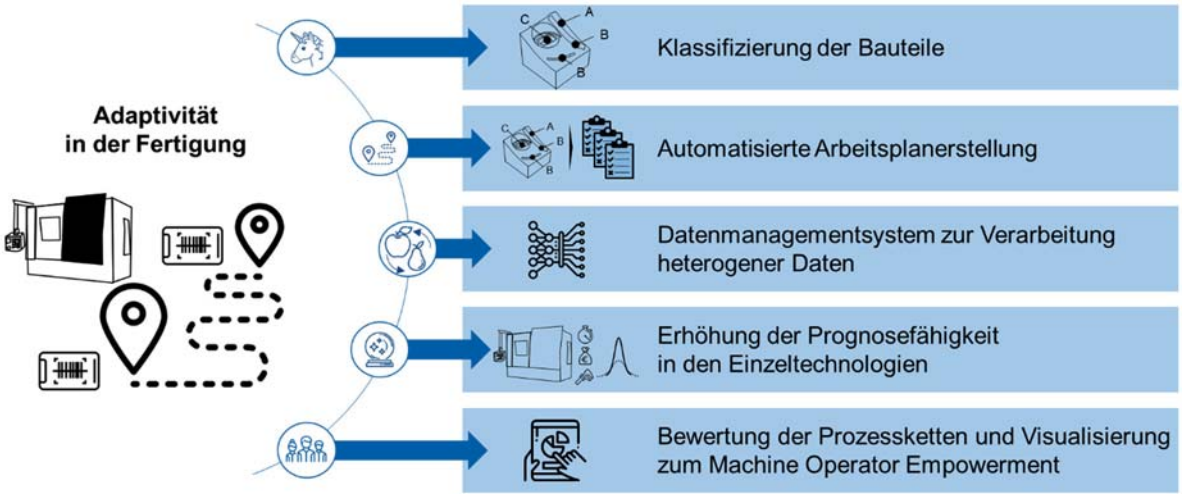



*Abbildung 3: Herausforderungen zur Implementierung von Adaptivität in der Fertigung*

Der Fertigungscharakter der Unikatfertigung im industriellen Werkzeugbau erfordert aktuell einen hohen Planungsaufwand für die Fertigung der einzelnen Werkzeugkomponenten. Jeder Komponente muss in der Arbeitsvorbereitung manuell eine Prozesskette zugeordnet werden. Prozessketten sind bereits in der Vergangenheit von einer hohen Komplexität geprägt gewesen. Die Herausforderungen des Werkzeugbaus mit dessen Unikatfertigung stellen in der Prozesskettengestaltung ein für die Menschen nicht zu überblickendes Problem dar. Ansätze der Prozesskettengenerierung versuchen daher, eine systematische Planung zu ermöglichen, unterliegen jedoch in der Mehrzahl einer unidirektionalen Vorgehensweise. Die Planung von Prozessketten beruht in der Regel auf dem Erfahrungswissen des Arbeitsvorbereitenden oder wird durch Standardprozessketten unterstützt. Durch die hohe Dynamik der Prozesssteuerung ist es nicht oder nur mit erheblichem manuellem Aufwand möglich, eine Anpassung der Prozessketten bei veränderten Randbedingungen vorzunehmen. Adaptive Prozessketten verfolgen daher das Ziel, sowohl eine transparente und effektive Prozesskettengestaltung zu ermöglichen als auch eine individuelle Anpassung dieser im Fertigungsdurchlauf zu schaffen. Hierdurch kann eine schnelle Reaktion auf veränderte Randbedingungen, wie dem Ausfall einer Maschine, bewirkt werden. Zur Realisierung dieser Flexibilität ist es jedoch notwendig, dass bei Eintritt einer Störung eine alternative Prozesskette zur Verfügung steht. Aus diesem Grund ist es ein wesentlicher Ansatz, bereits auf Basis des CAD-Modells verschiedene Prozessketten zu generieren und die Arbeitspläne automatisch abzuleiten.

Neben der Reihenfolge zur Prozesskettenplanung, stellt die Prognose der Eigenschaften einzelner Prozesskettenschritte eine weitere Herausforderung für die Realisierung von individuellen und adaptiven Prozessketten dar. Hierzu gehören bspw. die Bearbeitungszeiten, die Fertigungsqualität oder die Oberflächenbeschaffenheit. Betrachtet man die

einzelnen Fertigungstechnologien wie die Fräsbearbeitung oder Senkerosion, sind diese geprägt von einer Vielzahl verschiedener Einflussgrößen in Hinblick auf die Bearbeitungsdauer oder Fertigungsqualität. Es ist daher keine allgemeingültige Möglichkeit vorhanden, die Prognosefähigkeit für alle Fertigungstechnologien gleichermaßen zu erhöhen. Somit muss in den Einzeltechnologien entschieden werden, ob ein modellbasierter oder ein datenbasierter Ansatz vielversprechender ist. Innerhalb einer Technologie ist zusätzlich zu beachten, dass im Allgemeinen eine hohe Heterogenität der produzierenden Unternehmen von Maschinen-, Steuerungs- und Fertigungsmitteln besteht und somit eine weitere Herausforderung im Zusammenbringen von heterogenen Datenquellen zur Erhöhung der Prognosefähigkeit auf Basis von datenbasierten Methoden liegt.

Der Fachkräftemangel und der demographische Wandel zwingen Unternehmen dazu, ihr Wissen zu systematisieren und zu speichern. Das Prinzip der individuellen und adaptiven Prozesskette dient dazu, der Maschinenbedienerin und dem Maschinenbediener mögliche Prozessketten aufzuzeigen und somit bei der Entscheidung zu unterstützen. Solche Entscheidungsunterstützungssysteme werden auch unter dem Begriff »Machine Operator Empowerment« zusammengefasst. Für eine einfache Entscheidungsunterstützung ist im Kontext individueller Prozessketten eine anwenderspezifische Bewertung der verschiedenen Prozessketten wichtig. Neben den klassischen Bewertungsdimensionen Kosten, Zeit und Qualität, gewinnt im Zuge der Nachhaltigkeit der $CO_2$-Fußabdruck zunehmend eine bedeutende Rolle in Unternehmen. Kundinnen und Kunden verlangen immer häufiger nach umweltgerechten Produkten. Daher sollte auch der Werkzeugbau seinen $CO_2$-Fußabdruck nicht nur im Rahmen der Gesamtbilanzierung messen, sondern ebenfalls bei der Auslegung der Prozessketten berücksichtigen. In diesem Zusammenhang sollte die Nachhaltigkeit in das Konzept der adaptiven Prozesskette als weitere Bemessungsgröße integriert werden. Mit Hilfe von Simulationsmodellen können die innerbetrieblichen Fertigungsprozesse realitätsnah abgebildet werden und eine verursachergerechte Prognose des $CO_2$-Fußabdrucks erfolgen.

## 2.2 Vorbild Routenplaner – Routing-Algorithmen in der Fertigung

Routing-Algorithmen werden in der Industrie in vielen Bereichen eingesetzt. Ein sehr häufiges Einsatzgebiet von Routing-Algorithmen sind Navigationssysteme. Google Maps ist eine der beliebtesten Navigationsanwendungen des 21. Jahrhunderts. Der Google Maps zugrundeliegende Routing-Algorithmus ist der Dijkstra-Algorithmus. Dieser Algorithmus wird dazu genutzt, in einem Graphen mit Knoten und Kanten den kürzesten Pfad zwischen zwei beliebigen Knoten zu bestimmen. Die Berechnung des kürzesten Pfades erfolgt mithilfe von unterschiedlichen Kantengewichtsdefinitionen. Die Gewichtung der Kanten kann je nach Art des Graphen verschiedene Aussagen haben. Im Fall von Google Maps werden Kreuzungen in einer Stadt als Knoten und Straßen als Kanten definiert. Die Kantengewichtung kann dann beispielsweise die Abstände zwischen zwei Kreuzungen beschreiben oder die mittlere Wartezeit bei einem Stau. Die Vorgehensweise des Dijkstra-Algorithmus besteht darin, immer der Kante zu folgen, die den kürzesten Streckenabschnitt vom Startknoten aus verspricht. Andere Kanten werden nur dann verfolgt, wenn alle kürzeren Streckenabschnitte berücksichtigt worden sind. Dieses Verfahren stellt sicher, dass beim Erreichen des Zielknotens kein kürzerer Weg zu dem Knoten existieren kann. Nach Durchlauf des Algorithmus werden auf diese Weise auch die kürzesten Abstände zu allen anderen Knoten im Graph berechnet.

Neben dem Dijkstra-Algorithmus gibt es noch verschiedene andere Routing-Algorithmen, die auf verschiedenste Weise den kürzesten Pfad in einem Graphen kalkulieren können.

Der Bellman-Ford-Algorithmus berechnet genau wie der Dijkstra-Algorithmus die kürzesten Pfade von einem Startknoten zu allen anderen Knoten im Graph, kann allerdings sowohl positive als auch negative Kantengewichte berücksichtigen. Ein weiterer häufig angewendeter Routing-Algorithmus ist der Floyd-Warshall-Algorithmus, der die kürzeste Strecke zwischen allen Knotenpaaren in einem Graphen berechnet. Neben den typischen Einsatzgebieten wie Navigationssystemen und dem Internet, gibt es bereits erste Ansätze, Routing-Algorithmen in die Produktion zu integrieren. Am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover wurde in einem DFG-Transferprojekt ein Ansatz zur adaptiven Fertigungssteuerung mithilfe eines genetischen Algorithmus entwickelt. Der Algorithmus wurde dazu genutzt, zusammen mit aktuellen Betriebsdaten aus dem MES (Manufacturing Execution System), eine betriebsbegleitende Auswahl sowie Bewertung von Arbeitsplänen zu treffen. Der Ansatz soll den Aufwand im Bereich Planung und Steuerung, der vor allem in der Einzel- und Kleinserienfertigung sehr hoch ist, reduzieren und die Abläufe effizienter gestalten. [19, S. 655-721], [20]

Die Implementierung von Routing-Algorithmen in die Einzel- und Kleinserienfertigung bietet ein großes Potenzial zum effizienteren Umgang mit dem hohen Planungs- und Steuerungsaufwand. Genau wie eine Navigationsanwendung Routing-Algorithmen dazu nutzt, den Autofahrenden die schnellste Route zu einem beliebigen Punkt auf einer Landkarte zu zeigen, könnten sie einem zu fertigenden Werkstück in der Fertigung die beste Route durch verschiedene Fertigungsmaschinen in einer Fertigungshalle zeigen (s. Abbildung 4). Google Maps ermöglicht es, stark befahrene Straßen zu vermeiden, um die gesamte Fahrdauer möglichst gering zu halten. Genauso könnten sehr stark ausgelastete Maschinen in der Fertigung vermieden werden und stattdessen die Bearbeitungsreihenfolge kurzfristig geändert werden, um so die Durchlaufzeit zu verkürzen.

Um diesen Ansatz in die Realität zu überführen, müssen zuerst Anforderungen an einen potenziell geeigneten Routing-Algorithmus definiert und geprüft werden. Hierzu bietet sich ein mehrstufiges Verfahren zur Bewertung an. In verschiedenen Stufen wird der Nutzen des Algorithmus bewertet. Im ersten Schritt wird der zu bewertende Algorithmus bestimmt. In diesem Fall ein Algorithmus zur Bestimmung des kürzesten Weges, um so die bestmögliche Bearbeitungsreihenfolge zu ermitteln. Im zweiten Schritt wird der Zielfunktionswert, anhand dessen die Rechenzeit zur vollständigen Simulation eines Experimentlaufs kalkuliert wird, definiert. Zur Auswahl stehen hier beispielsweise die Zeit- oder Kostenoptimierung, die mithilfe des Algorithmus erzielt werden soll. Im dritten Schritt wird ein Referenzalgorithmus ausgewählt. Es bietet sich hier an, die vollständige Enumeration für eine reduzierte Anzahl an Bearbeitungsschritten zu wählen. Im vierten Schritt wird ein Simulationsmodell erstellt, das als Bewertungsmethode dient. Im fünften und letzten Schritt erfolgt die detaillierte Analyse des Algorithmus mittels umfangreicher Simulationsstudien. Der Experimentplan gliedert sich dazu, abhängig von der Definition des Zielfunktionswertes, in die Teile Zeit- und Kostenoptimierung, die wiederum aus mehreren Simulationsstudien bestehen. Für die statistische Absicherung der Ergebnisse werden jeder Simulationslauf fünf Mal wiederholt und die Ergebnisse gemittelt. [20, 21]

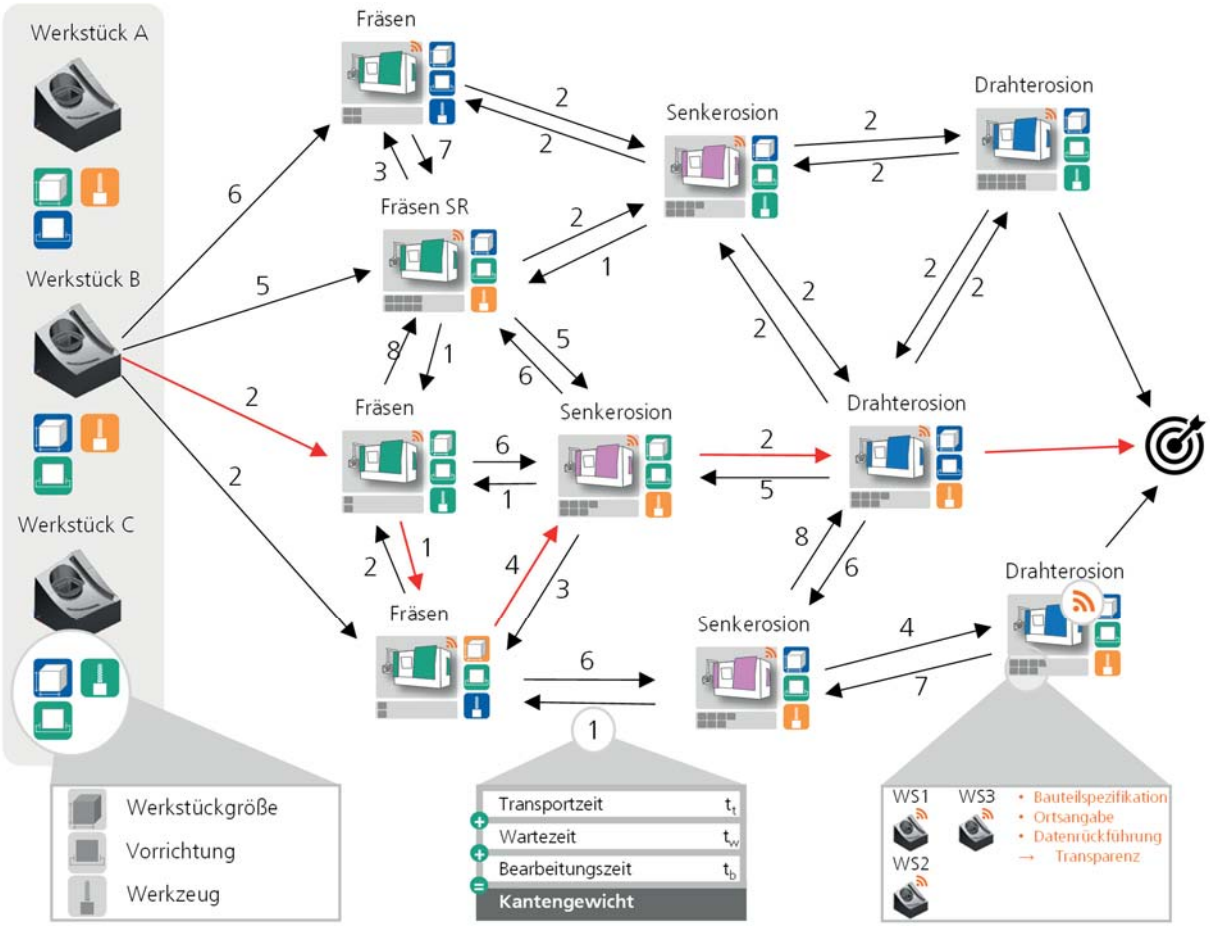



*Abbildung 4: Beispiel für Routing-Algorithmen im Werkzeugbau*

Die Einbindung von Routing-Algorithmen in die Einzel- und Kleinserienfertigung ist momentan noch nicht ohne weiteres möglich, da auf zu wenig Fachwissen auf diesem Gebiet zurückgegriffen werden kann. Die genaue Untersuchung von Routing-Algorithmen hinsichtlich der Implementierung in die Fertigung sowie die Durchführung von Simulationsstudien bieten jedoch ein großes Potenzial, scheitern aktuell jedoch noch an der notwendigen Problemreduzierung. Durch die flexible und kurzfristige Auswahl von effizienteren Bearbeitungsreihenfolgen mithilfe von Routing-Algorithmen kann die Durchlauf-, Liege- und Rüstzeit verkürzt werden. Dieser Ansatz bietet eine Möglichkeit, dem hohen Planungs- und Steuerungsaufwand in der Einzel- und Kleinserienfertigung entgegenzuwirken und die Auslastung zu erhöhen. Um die mehrdimensionalen Optimierungsprobleme zu lösen, liegt in dem Bereich der Quantencomputer Potenzial, dem hohen Planungs- und Steuerungsaufwand entgegenzuwirken. Die Technologie steht noch am Anfang, doch sie entwickelt sich seit dem steigenden Interesse am maschinellen Lernen und künstlicher Intelligenz rasant weiter. Unter Ausnutzung der quantenmechanischen Prinzipien sind die verwendeten Quantenalgorithmen exponentiell schneller als die effizientesten klassischen Algorithmen. Es gibt erste Ansätze zur Verwendung von Quantencomputern in der Produktion. BMW hat beispielsweise das Optimierungsproblem untersucht, ob es beim Versiegeln der Schweißnähte bei einem Auto einen Verfahrweg gibt, der kürzer ist als das aktuelle Optimum von 15 Minuten. Besonders die Reduzierung von notwendigen Rechenoperationen durch den Einsatz von Quantencomputing ermöglicht es, komplexe Optimierungsprobleme anwendungsorientiert zu lösen. [22]

# 3 Lösungsansätze zur Implementierung von individuellen Prozessketten

## 3.1 Analyse von 3D-Modellen in der Konstruktion

Die Entwicklung und Konstruktion von Werkstücken ist mit etwa 70 % Anteil der entscheidende Faktor für deren Produktkosten [23]. Daher ist insbesondere in der Serienfertigung die fertigungsgerechte, d.h. kosten- und anforderungsgerechte Konstruktion seit Jahrzehnten fester Bestandteil der vertikalen Prozesskette der Werkstückherstellung [24, 25].

Ein entscheidender Faktor für die Realisierung individueller Prozessketten in der Einzel- und Kleinserienfertigung ist die Analyse von 3D-Modellen in der Konstruktion. Sie ermöglicht es, bereits zu einem frühen Zeitpunkt Kosten und Qualität der zu fertigenden Werkstücke abzuschätzen und eventuell notwendige Anpassungen in der Konstruktion zu veranlassen. Da allerdings jedes Werkstück als Unikat oder in kleiner Stückzahl gefertigt wird, sind diese Abschätzungen nur bei großer Präzision ein deutlicher Mehrwert, da aufwändige Tests und Ausschussware unbedingt vermieden werden müssen.

Die Analyse von Standardbauteilen und -bauteilelementen (wie bspw. Bohrungen, Taschen oder Nuten) ist dabei in der Praxis schon weit vorangeschritten. So können Systeme wie das Programm *classmate* der Firma Simus System heute schon Kostenkalkulationen bereits in der Konstruktion für Werkstücke und komplexe Baugruppen, die Bohrungen, Taschen, Nuten und andere Konstruktionselemente beinhalten, mit geringer Abweichung durchführen [26]. Allerdings stoßen diese regelbasierten Systeme bei Freiformflächen – aufgrund der großen Vielfalt und der mathematisch komplexen Beschreibung – an ihre Grenzen.

Abhilfe schaffen könnten hier Klassifizierungsmethoden basierend auf ML-Verfahren, die feingranulare – nicht mehr durch Menschen semantisch erfass- und interpretierbare – Kategorisierungen erlauben. Dabei werden die Geometrien auf Basis eines Ähnlichkeitsmaßes einer Kategorie zugeordnet. Jede Kategorie bezeichnet darin ein Gebiet innerhalb des durch das Ähnlichkeitsmaß aufgespannten mathematisch beschreibbaren, hochdimensionalen Raums. Eine solche Klassifizierung weist ähnlichen Geometrien ähnliche Positionen innerhalb des Raums zu, beispielsweise mittels ihres euklidischen Abstands.

Um ML-basierte Klassifizierungsmethoden zu ermöglichen, müssen die zu klassifizierenden Werkstücke in eine Vektordarstellung überführt werden. Dazu ist die Technik der Voxelisierung geeignet. Ein Voxel ist das 3D-Äquivalent eines Pixels im Raum, also ein Quader mit definierten Kantenlängen. Die Voxelisierung unterteilt den Raum, welchen eine Geometrie – repräsentiert durch beispielsweise ein Dreiecksnetz – einnimmt, dementsprechend in Quader, welche entweder leeren Raum oder einen Teil der Geometrie repräsentieren. Voxelisierungstechniken unterscheiden sich dabei in Oberflächen- und Volumenvoxelisierung. Oberflächenvoxelisierung registriert nur die Quader, welche die Geometrie schneiden, während Volumenvoxelisierung auch Quader innerhalb der Geometrie registriert. Registration bedeutet hier, dass diese Voxel als Teil der Geometrie von den restlichen Voxeln unterschieden werden. Bei der Berechnung der Voxel können Fabinformationen und weitere Fertigungsinformation (eng. Product and Manufacturing Information (PMI)) aus den geschnittenen Oberflächen in den registrierten Voxeln gespeichert werden. Abbildung 5 zeigt ein Bespiel eines Werkstücks mit zugehöriger Oberflächen- und Volumenvoxelisierung. Nur registrierte Voxel werden dargestellt. Die Volumenvoxelisierung wurde darüber hinaus dünnbesetzt durchgeführt. In diesem Kontext bedeutet dies, dass gröbere Voxel, welche vollständig in den inneren Raum des Werkstücks passen, nicht genauer aufgelöst werden, da dies keine zusätzlichen Informationen bereitstellen, sondern nur den Speicherbedarf erhöhen würde.

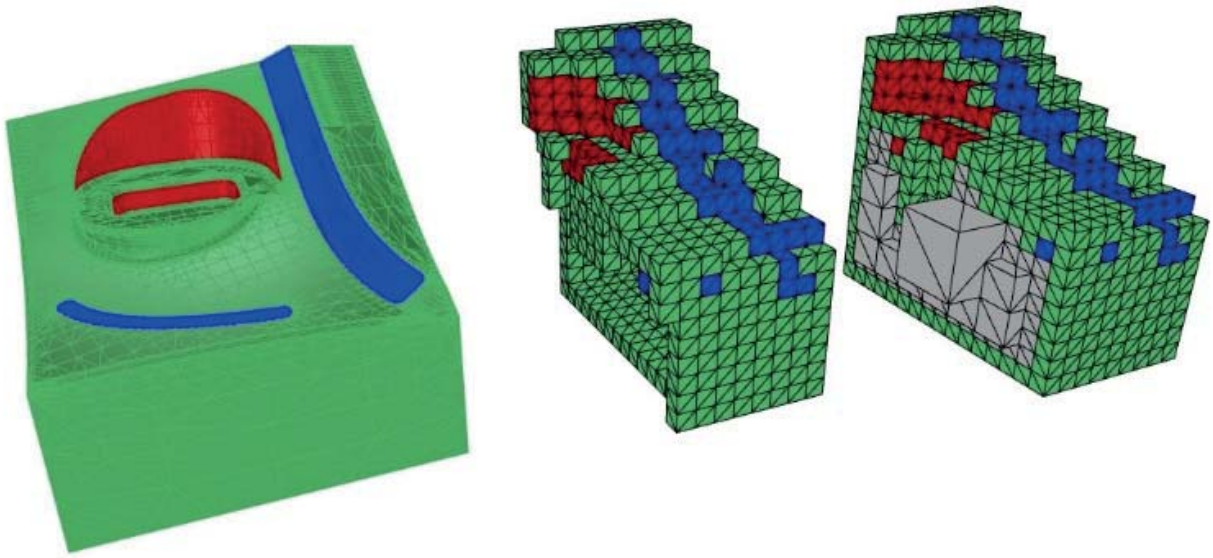


*Abbildung 5: Von links nach rechts: Originalbild, Oberflächen- und Volumenvoxelisierung (Bauteil geschnitten)*

Die Informationen in den Voxeln können nun normalisiert und in einen Vektor geschrieben werden, um eine ML-fähige Repräsentation eines Werkstücks zu erhalten.

Bei der Voxelisierung bleibt allerdings die Problematik, dass ein auf der Werkzeuggeometrie basierender ML-Inputvektor, der der Geometrie-Komplexität gerecht wird, eine sehr große Dimensionalität aufweist. Dies führt bei neuronalen Netzen zu einer großen Anzahl zu bestimmender Gewichte und damit zwangsläufig zu einer großen Menge erforderlicher Inputdaten, um diese Gewichte ausreichend zu trainieren.

Dennoch kann die Anwendung von ML-Analysen in der Konstruktion in folgende grundlegende Schritte unterteilt werden:

1) die Konstruktion selbst
2) die Überführung der Geometrie in eine PMI-behaftete Voxelisierung
3) die Generierung eines ML-Vektors mittels der voxelisierten Geometrie sowie
4) die Klassifizierung des Vektors durch den Vergleich mit bereits gefertigten Geometrien.

Der entstehende Workflow kann stark automatisiert werden und die abgeleiteten Informationen als Grundlage zur Entscheidungsfindung bezüglich Konstruktionsänderungen, der zu nutzenden Prozesskette oder zur Kostenschätzung verwendet werden.

## 3.2 Generierung und Bewertung von adaptiven Prozessketten in der Fertigung

Die adaptive Prozesskettengestaltung basiert grundlegend auf einem zweistufigen Vorgehen. Innerhalb der ersten Stufe werden verschiedene Prozessketten erstellt. Diese unterscheiden sich sowohl in der Auswahl der enthaltenen Technologien als auch in deren sequenzieller Abfolge. Im Anschluss findet innerhalb der zweiten Stufe eine Bewertung und Auswahl der geeignetsten Prozesskette auf Basis definierter Kennzahlen statt. Die Kennzahlen müssen eine unternehmensangepasste und objektive Bewertungsgrundlage schaffen. Insbesondere die Vielzahl der möglichen Prozessketten stellt ein Planungsdilemma zwischen Planungsaufwand und Nutzen dar. Lösungsansätze für die adaptive Prozesskettengenerierung müssen robust, flexibel und schnell auf geänderte Randbedingungen reagieren können, weshalb eine digitale Durchgängigkeit über alle Generierungsphasen unabdingbar ist.

Für die Erstellung praxistauglicher Prozessketten ist die systematische und formale Definition der Werkstückinformationen notwendig. Hierdurch werden die spezifischen Anforderungen der enthaltenen Bearbeitungselemente an die möglichen Fertigungstechnologien gestellt. Die Charakterisierung eben solcher Bearbeitungselemente enthält daher neben einer kinematischen Bestimmung die technologischen Eigenschaften. Ziel ist die voxelbasierte Ableitung dieser strukturierten Informationen ausgehend von der 3D-Konstruktion. Hierdurch können die zur Bearbeitung infrage kommenden Fertigungstechnologien in Prozesskettenelemente automatisiert abgeleitet und je Bearbeitungselement zu Teil-Prozessketten kombiniert werden. Ergänzend dazu sollte jedem Prozesskettenelement (z. B. Schruppfräsen) mindestens eine mögliche Spannsituation zugeordnet sein.

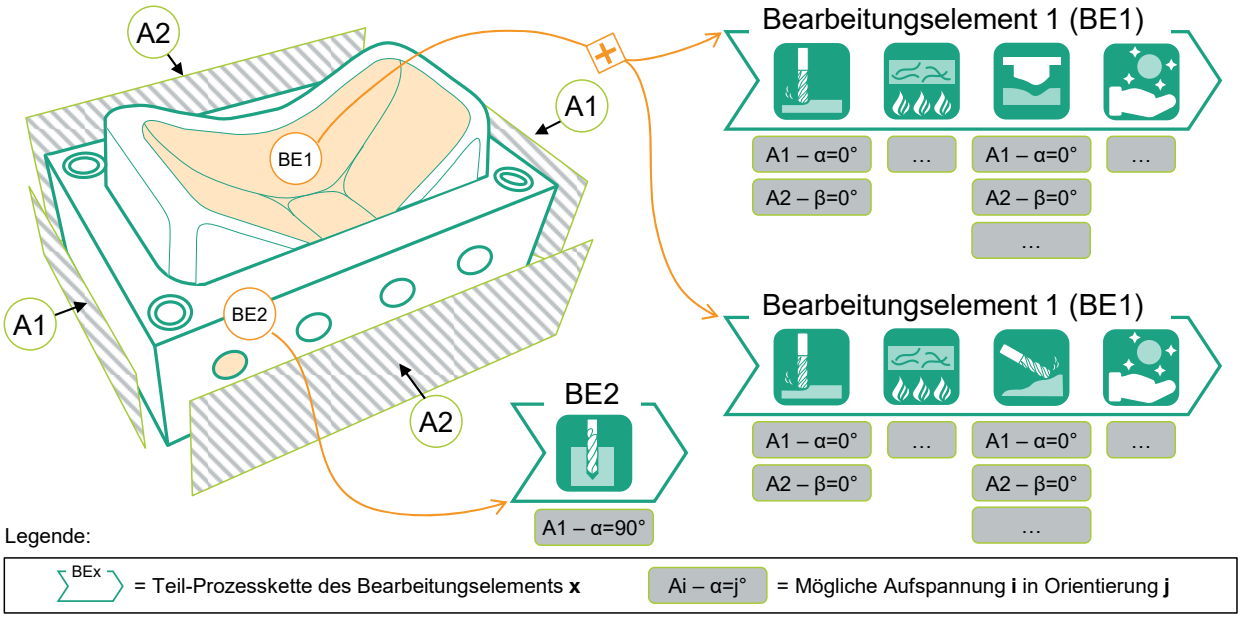



*Abbildung 6: Definition von alternativen Teil-Prozessketten je Bearbeitungselement*

Einem Bearbeitungselement sind folglich mehrere zur Bearbeitung mögliche Teil-Prozessketten mit darin enthaltenen Prozesskettenelementen zugeteilt. Zur erfolgreichen Werkstückfertigung muss je Bearbeitungselement eine konkrete Teil-Prozesskette zu einer Gesamt-Prozesskette vereint werden. An dieser Stelle entsteht eine Vielzahl unterschiedlicher Kombinationsmöglichkeiten in Abhängigkeit von der Bauteilkomplexität. Die Zusammenführung der Teil-Prozessketten erfordert jedoch weiterhin eine Bestimmung der Reihenfolge der darin enthaltenen Prozesskettenelemente. Prozesskettenelemente mit gleichen Fertigungstechnologien sollten derart zusammengefasst werden, dass eine sequenzielle Fertigung ermöglicht wird. In diesem Fall dürfen jedoch die kinematisch und technologisch bedingten Zwangsbeziehungen nicht verletzt werden (z. B. Gewindeschneiden vor Bohren). Es ergeben sich mit dem soeben beschriebenen Kombinationsvorgehen eine Vielzahl möglicher Prozessketten. Weiterführend muss für jede Fertigungstechnologie eine Entscheidung in Bezug auf das präferierte Fertigungsmittel getroffen werden.

Es ist bereits ersichtlich, dass eine systematische Bewertung zur Auswahl der geeignetsten Prozesskette unabdingbar ist. Die Bewertung muss daher eine möglichst umfassende Abbildung der zu erwartenden Ergebnisse ermöglichen. Die Zieldimensionen können neben den ökonomischen und qualitativen Kennzahlen weiterführende strategische Aspekte (z. B. Ökologie) beinhalten.

Adaptive Prozessketten ermöglichen eine dezidierte und systematische Gestaltung praxistauglicher individueller Prozessketten mit dem Ziel einer hohen Automatisierung. Bei

Veränderung der Randbedingungen sind diese in der Lage, eine Anpassung der Prozesskette vorzunehmen. Insbesondere in einem volatilen Umfeld stellen adaptive Prozessketten die Grundlage wirtschaftlichen Handelns dar.

### 3.3 Integration von heterogenen Daten zur Erhöhung der Prognosefähigkeit

Am Anfang eines jeden Datenanalyseprozesses steht die Datenintegration, also die Bereinigung und Vereinheitlichung relevanter Datenquellen hinter einer einheitlichen Schnittstelle. Anschließend werden über jene Schnittstelle Kenngrößen extrahiert, deren Zusammenhänge mathematisch analysiert und die Ergebnisse mit Bezug auf die untersuchte Entität semantisch interpretiert. Eine solche Entität kann im Fertigungskontext beispielsweise eine Maschine, ein Werkstück oder ein Auftrag sein. In der Regel handelt es sich hierbei um einen iterativen Prozess, da aus neuen Einsichten auch neue Fragestellungen entstehen können [27].

Die Vielfalt der in der Fertigung anfallenden Daten macht insbesondere den Schritt der Datenintegration zu einer nicht-trivialen Herausforderung [28]. Daten, die sich beispielsweise auf ein konkretes Werkstück beziehen, sind typischerweise in unterschiedlichsten Datenquellen wie Arbeitsplänen, CAD-Modellen sowie Meta-, Maschinenlog- und Sensordaten enthalten. Trotz der sich hierdurch ergebenden Komplexität der Datenintegration ist das Potenzial der Datenanalyse auch für KMUs signifikant [29].

Um den komplexen Prozess der Datenintegration im Bereich der Fertigung zu vereinfachen, hat das Fraunhofer IPT unter dem Projektnamen PyIntegrationNet (PIN) eine modulare, dem MapReduce-Paradigma folgende Methodik zur Datenintegration entwickelt und in der Programmiersprache Python implementiert. Die Implementierung baut auf dem ebenfalls unter dem Projektnamen PyProcessNet (PPN) entwickelten Framework zur nebenläufigen Datenverarbeitung auf. Diese Software-Architektur wird im Folgenden vorgestellt.

#### PyProcessNet (PPN)

Das in Abbildung 7 anhand einer Beispielinstanz skizzierte PPN ist ein Graph-basiertes Framework zur Definition von nebenläufigen Datenströmen zwischen verschiedenen Datenverarbeitungsknoten. Jeder Knoten verarbeitet einkommende Daten mit einer von der Nutzerin oder dem Nutzer zu definierenden Funktion und sendet die verarbeiteten Daten an seine Nachfolgeknoten. Der Grad an Nebenläufigkeit ist dabei feinkörnig einstellbar, d. h. für jeden Knoten kann individuell bestimmt werden, ob seine Funktion in einem eigenen Thread, einem lokalen Prozess oder Remote-Prozess auf einem anderen physischen Rechner ausgeführt werden soll. Die Erzeugung von Threads und Prozessen, die Datenübermittlung von einem Knoten zum nächsten sowie die Synchronisierung von nebenläufigen Datenzugriffen erfolgt transparent durch das PPN. Somit lassen sich vorhandene Hardwareressourcen mit wenig Aufwand optimal ausnutzen und auch große Datenmengen in vertretbarer Zeit verarbeiten.

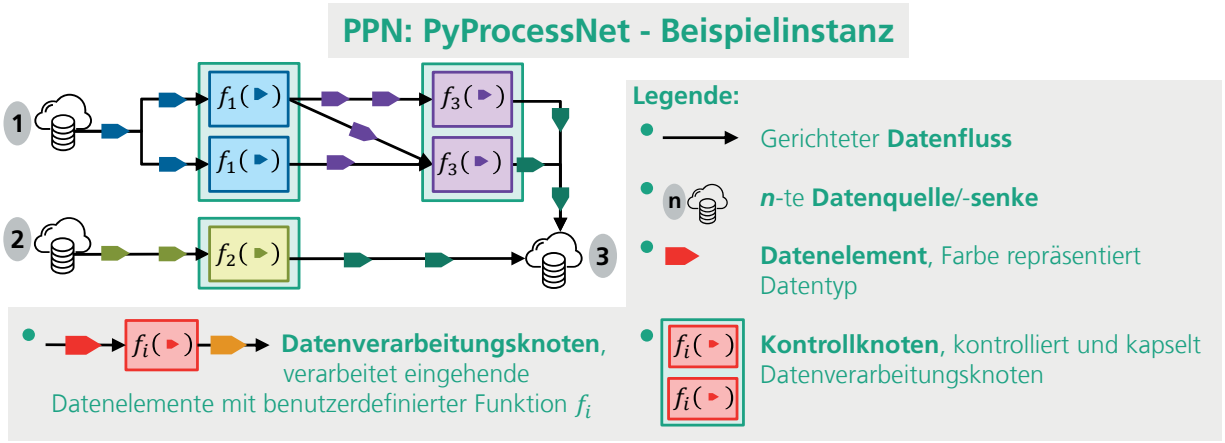



*Abbildung 7: PyProcessNet (PPN) – Asynchrone Datenflüsse und -verarbeitungsknoten*

### MapReduce

MapReduce ist ein von Google entwickeltes Programmiermodell zur nebenläufigen und verteilten Verarbeitung großer Datenmengen [30]. Motiviert wurde es durch die mangelnde Skalierbarkeit serieller Verarbeitung großer Datenmengen an einer einzelnen Maschine.

In MapReduce werden die vorhandenen Daten auf eine Anzahl Mapper-Knoten aufgeteilt. Jeder Mapper führt eine vom Benutzer definierte map-Operation aus, mit welcher der dem Mapper zugewiesene Datenteil vorverarbeitet wird. Diese Zwischenergebnisse werden hiernach anhand von benutzerdefinierten Schlüsseln gruppiert und auf Reducer-Knoten verteilt, welche die Endverarbeitung der Datengruppen vornehmen. Hierbei muss die Anwenderin und der Anwender sicherstellen, die Schlüsselvergabe so zu definieren, dass gemeinsam zu verarbeitende Daten denselben Schlüssel enthalten, um an denselben Reducer-Knoten gesendet zu werden. Möchte man beispielsweise Werkstückdaten zusammenfassen, liegt es nahe, eine eindeutige Werkstück-ID als Schlüssel zu verwenden.

### PyIntegrationNet (PIN)

Das PIN implementiert das MapReduce-Modell auf folgende Art und Weise: Jeder Mapper führt einen datenquellenspezifischen Parser auf den einkommenden Datenteilen aus. Als Parsing bezeichnet man in der Informatik den Vorgang der Umwandlung einer Eingabe in eine Datenstruktur, welche die syntaktische Struktur jener Eingabe explizit darstellt. Typischerweise handelt es sich dabei um einen sogenannten Syntaxbaum - eine hierarchische Darstellung, in der die einzelnen syntaktischen Elemente baumartig angeordnet sind. Als Parser bezeichnet man ein Programm, das eine konkrete Art des Parsings durchführt. Beim PIN sind die Parser dafür zuständig, aus den einkommenden Datenteilen Informationen zu extrahieren und diese als Teilbäume zu strukturieren. Jeder Baumknoten hat eine eindeutige ID, welche ebenfalls seine Position im späteren Gesamtbaum definiert. Baumknoten können außerdem mit Nutzdaten annotiert werden.

Die PIN-Reducer erhalten die Teilbäume nach Wurzel-ID gruppiert, wodurch gewährleistet ist, dass alle zum selben Gesamtbaum gehörenden Teilbäume von demselben Reducer verarbeitet werden. Letzterer integriert die Teilbäume zu einem Gesamtbaum, welcher eine einheitliche Schnittstelle zur Abfrage der Nutzdaten bietet und so die Datenzusammenführung vervollständigt. Abbildung 8 visualisiert die Arbeitsweise anhand einer beispielhaften PIN-Instanz.

Neben der Bereitstellung einer einheitlichen Schnittstelle, wird mit dieser Methode auch die Integration neuer Datenquellen deutlich vereinfacht. Hierfür muss innerhalb einer bestehenden PIN-Instanz lediglich ein zusätzlicher, Datenformat-spezifischer Parser-Mapper implementiert werden, welcher die neuen Daten in die bestehende Baumstruktur integriert. Dies ermöglicht ein nahtloses Einfügen neuer Datenquellen in bestehende Datenintegrations- und Verarbeitungspipelines.

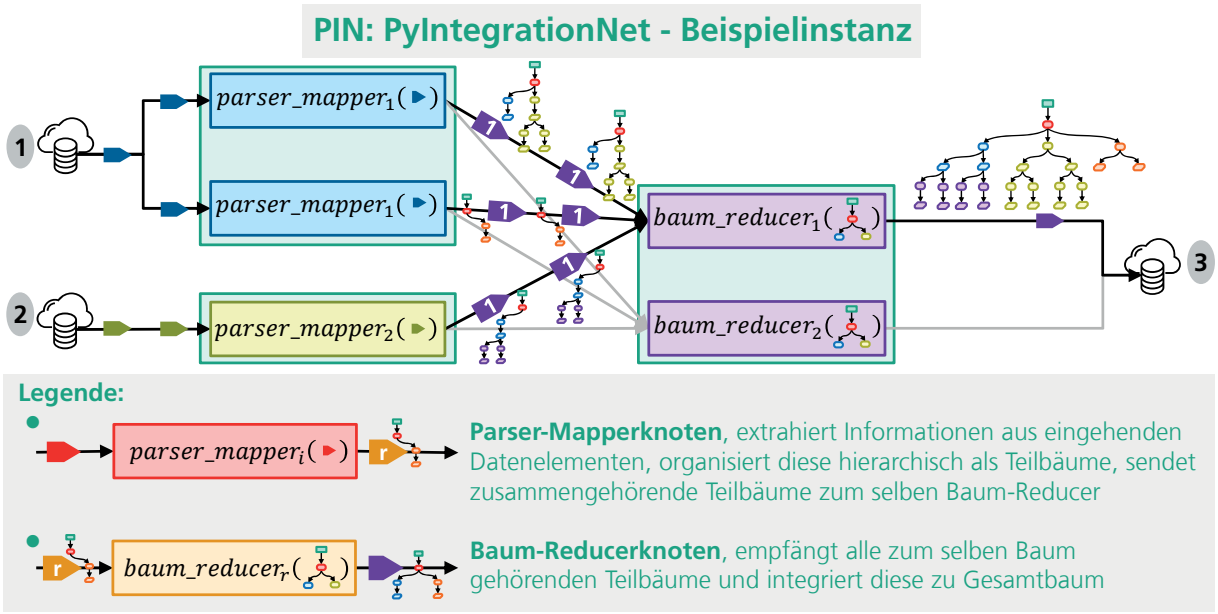



*Abbildung 8: PyIntegrationNet (PIN) – Methodik zur Datenintegration*

### Use Case: Steigerung der Prognosefähigkeit in der Senkerosion

Im Folgenden wird ein Anwendungsbeispiel aus der Senkerosion beschrieben. Als Datengrundlage dienen bei der Firma *Siegfried Hofmann GmbH* entstandene XML-Konfigurationsdaten aus der CAM-Programmierung von Senkerosionselektroden sowie die bei der Ausführung der jeweiligen CAM-Programme entstandenen Maschinenlogdateien. Dem betrachteten Datensatz liegen hierbei sowohl eine Menge häufig eingesetzter Standardelektroden als auch eine Reihe von Sonderelektroden zugrunde. Die Elektrodengeometrien weisen somit ein breites Spektrum an Größe, Form und Komplexität auf.

Die zu einer bestimmten Elektrode gehörenden Informationen liegen auf mehrere Dateien unterschiedlicher Dateiformate und innerhalb jeder Datei auf unterschiedliche, nicht immer aufeinander folgende Zeilen verteilt vor. Um alle zu einem Elektrodeneinsatz gehörenden Informationen zusammenzufassen, wurde je ein Parser-Mapper für die XML-Daten und die Logdateien implementiert. Der nach dem PIN-Durchlauf resultierende Gesamtbaum hat die in Abbildung 9 rechts vereinfacht dargestellte Struktur: Jeder Auftrag verweist auf die zu bearbeitenden Werkstücke, jedes Werkstück auf die einzusetzenden Elektroden und jede Elektrode auf die auf dem Werkstück auszuführenden Operationen. Jede Operation ist mit 16 Werten wie Elektrodenspaltbreite, Seiten- und Frontfläche, Material, Volumen, VDI-Klasse, Anzahl Schlicht- und Schruppelektroden und der Hauptzeit annotiert.

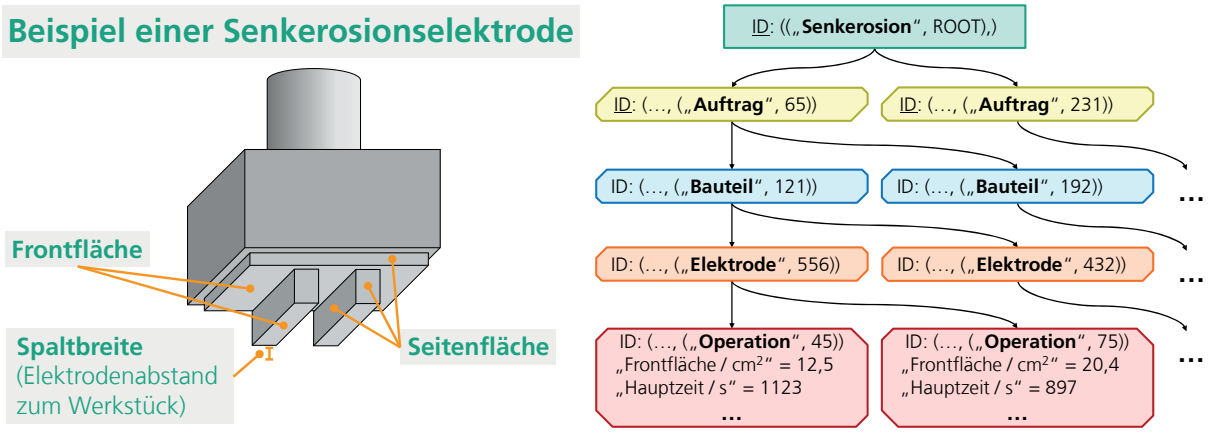



*Abbildung 9: Links: Beispiel einer Senkerosionselektrode; Rechts: Vereinfachter Ausschnitt der resultierenden PIN-Datenstruktur für Senkerosionsdaten*

Ziel ist es nun, die aus den Logdateien extrahierten Hauptzeiten mittels der aus den CAM-Konfigurationsdateien extrahierten Eingabegrößen vorherzusagen. Hierbei kam eine Reihe linearer und nicht linearer Regressionsmethoden zum Einsatz. Kategorische Werte wie das Elektrodenmaterial wurden hierbei in eine sogenannte One-Hot-Kodierung überführt. Für jede Methode wurde mittels 5-facher Kreuzvalidierung mit 10 Wiederholungen das Bestimmtheitsmaß $R^2 \in (-\infty, 1]$ ermittelt. Letzteres nimmt bei einer perfekten Vorhersage den Wert $1$ an und wird kleiner, je stärker die Ausgaben der Regressionsfunktion von den vorherzusagenden Hauptzeiten abweichen.

Im Use Case konnte die lineare Lasso Regression mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0{,}713$ ähnlich gute Vorhersagen treffen wie nichtlineare Regressionsmethoden wie bspw. Regression mittels Gauß-Prozess ($R^2 = 0{,}702$). Ein Vorteil des Lasso Verfahrens ist, dass Eingabedimensionen nach Korrelation mit dem Zielwert gewichtet und irrelevante Dimensionen ignoriert werden, was die Interpretierbarkeit des Ergebnisses vereinfacht [31]. Auf den vorliegenden Daten ergibt die Lasso Regression lediglich für 4 Eingabedimensionen von Null abweichende Gewichtungen, was in der folgenden Regressionsfunktion resultiert:

$$\begin{aligned} \text{Hauptzeit / s} = \quad & 597 \times \text{Seitenfläche}_z \\ + \quad & 500 \times \text{Frontfläche}_z \\ - \quad & 183 \times \text{Spaltbreite}_z \\ + \quad & 33 \times \text{Anzahl Schlichtelektroden}_z \\ + \quad & const \end{aligned}$$

Jede Eingangsgröße $X_z = (X - \bar{X})/s_X$ entspricht hier der bezüglich der Trainingsdaten standardisierten Größe $X$. $X_z$ hat also den Mittelwert $\overline{X_z} = 0$ und die Standardabweichung $s_{X_z} = 1$. Diese Standardisierung wird benötigt, um Unterschiede der einzelnen Dimensionen bezüglich Größenordnung und Einheit zu normieren und die Gewichtungsfaktoren somit vergleichbar zu machen. Die Seitenflächen, Frontflächen und der Betrag der Spaltbreite haben also mit Abstand den größten Einfluss auf die Hauptzeit (siehe auch Abbildung 9 links). Man beachte, dass die Spaltbreiten als negative Werte vorliegen, sodass die entsprechende Gewichtung ebenfalls negativ ist.

Abbildung 10 visualisiert die Abweichungen der tatsächlichen Hauptzeiten von den durch die Lasso Regressionsmethode vorhergesagten. Die geringere Datenpunktdichte oberhalb von 2000 Sekunden ist darauf zurückzuführen, dass sich diese Hauptzeiten auf den

Einsatz überdurchschnittlich großer und seltener angewendeten Sonderelektroden beziehen. Dennoch liegen die Abweichungen auch in diesen Fällen jeweils innerhalb der Größenordnung der tatsächlichen Hauptzeiten. Dies demonstriert, dass bereits einige wenige Eingabewerte ausreichend sind, um eine grobe Hauptzeitabschätzung automatisiert vornehmen zu können.

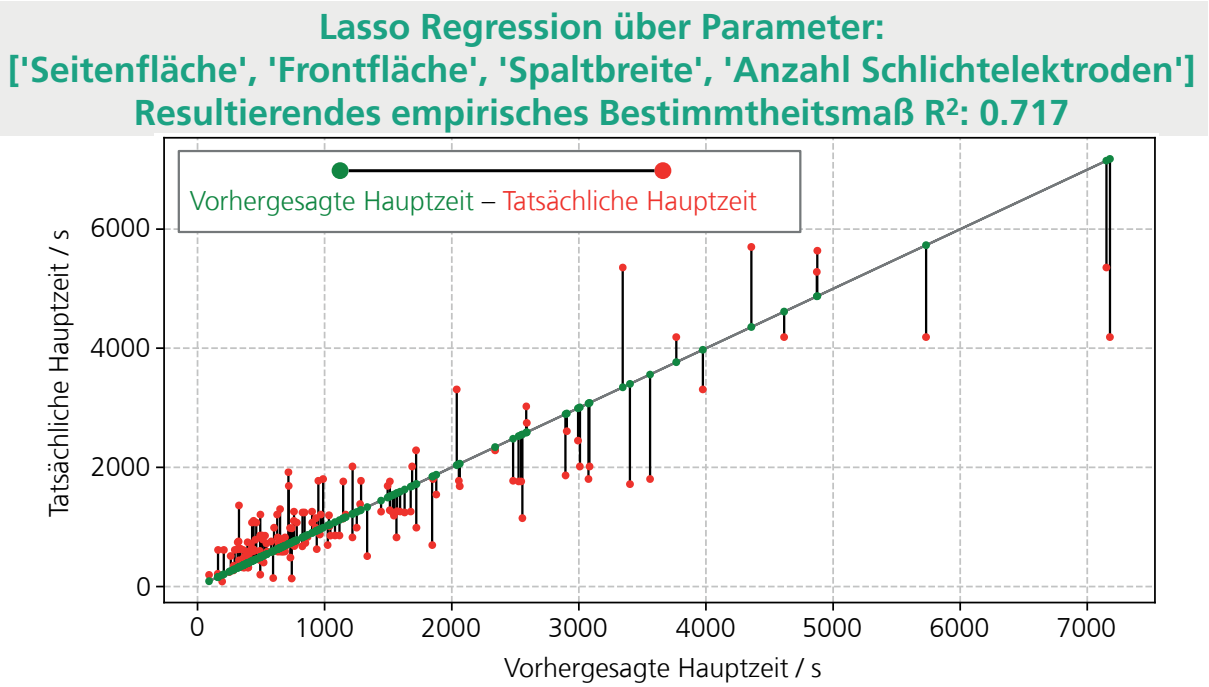



*Abbildung 10: Lasso Regression - Verbindungslinien zwischen roten und grünen Punkten entsprechen Abweichungen von Vorhersage und Messung*

**Use Case: Arbeitspläne aus der Fertigung**

Ein weiterer Use Case zur Veranschaulichung des Potenzials der Integration heterogener Daten im Kontext der hochflexiblen Prozessketten basiert auf Arbeitsplanungsdaten der Firma *Christian Karl Siebenwurst GmbH & Co. KG*. Datengrundlage sind aus dem MES-System *Tebis ProLeiS GmbH* exportierte Arbeitspläne. Diese liegen tabellarisch vor und umfassen einen Zeitraum von über drei Jahren. Jede Tabellenzeile entspricht einem konkret ausgeführten Prozess und enthält folgende Informationen:

- Die ID und Klasse des Prozesses. Die Prozess-ID ist eindeutig für jede Zeile.
- Die ID und Klasse des Bauteils, an dem der Prozess durchgeführt wurde.
- Die ID der Ressource, welche für die Prozessausführung verwendet wurde.
- Ob es sich um einen Personal- oder Maschinenprozess handelt. Ersteres bezieht sich auf vom Menschen durchgeführte Prozesse (bspw. CAM-Programmierung, etc.) und letzteres auf alle anderen Prozesse.
- Manuell geplante und tatsächliche Personalkapazität und Maschinenlaufzeit in Stunden.

Insgesamt ergeben sich aus den vorliegenden Daten 24024 individuelle Prozesse, 22 Prozessklassen, 7803 individuelle Bauteile und 16 Bauteilklassen.

Innerhalb des PIN Frameworks wurde ein Parser implementiert, der diesen Datensatz in eine Datenstruktur überführt, die unter Anderem einfache Abfragen der Art »*Gebe alle Prozesse der Prozessklasse X zurück, die an Bauteilen der Bauteilklasse Y durchgeführt wurden*« ermöglicht.

Im Folgenden werden die Abweichungen von tatsächlichen und geplanten Prozesszeiten analysiert. Um die signifikanten Größenordnungsunterschiede der Prozesszeiten innerhalb der Daten zu normieren, werden nicht die absoluten, sondern die relativen Zeitabweichungen betrachtet und in Prozent angegeben. Ein Wert von 0 % entspricht einer perfekten Vorhersage, bei größeren Werten liegt die tatsächliche Prozesszeit über der geplanten Zeit und bei negativen Werten liegt sie darunter.

Im Schnitt liegt die relative Zeitabweichung von Maschinenprozessen bei (0 ± 85) %. und von Personalprozessen bei (-17 ± 63) %. Die erste Zahl gibt hierbei den Mittelwert und die Zweite die Standardabweichung an. Hervorzuheben sind hier die hohen Standardabweichungen von 85 % und 63 %. Diese bedeuten, dass die Zeiten oft sowohl deutlich über- als auch unterschätzt werden, sich die positiven und negativen Abweichungen im Schnitt jedoch insbesondere bei den Maschinenzeiten weitestgehend ausgleichen.

Abbildung 11 visualisiert dieses Ergebnis exemplarisch für Maschinenprozesse. Für ein Zeitintervall von knapp drei Jahren sind dort die aufgetretenen relativen Zeitabweichungen aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass besonders viele Abweichungen auf die 0 %, ± 25 % ± 50 % und ± 75 % Linien fallen. Dies liegt daran, dass Stunden typischerweise in Zeitintervallen von 15 Minuten geplant und zurückgemeldet werden. Über die Farbverteilung der Punkte lässt sich zusätzlich ein Zusammenhang zwischen relativer Zeitabweichung und absoluter Planzeit erkennen. Maschinenprozesse mit einer kurzen geplanten Dauer (blau bis türkis) zeigen höhere relative Zeitabweichungen auf als solche mit längerer Planzeit (grün bis rot). Letztere kommen vermehrt nahe der 0 % Linie vor.

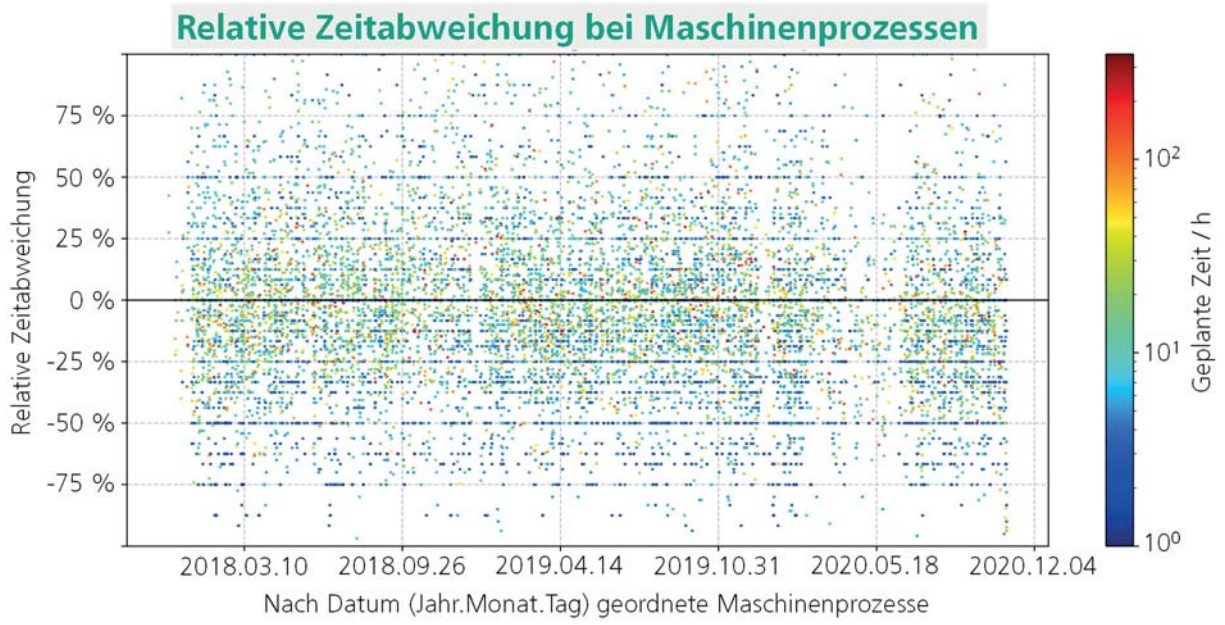



*Abbildung 11: Relative Maschinenzeitabweichungen über ein Zeitintervall von knapp 3 Jahren*

**Fazit**

Das PyIntegrationNet demonstriert den Mehrwert, den eine strukturierte, modulare und dadurch einfach um neue Datenquellen erweiterbare Datenintegrationsmethodik liefern kann. Hierbei können selbst vergleichsweise einfach strukturierte, täglich anfallende Daten wie XML- oder Logdateien relevante Zusammenhänge offenbaren und quantifizieren. Wie am Beispiel der Senkerosion gezeigt, können diese beispielsweise zur Vorhersage relevanter Größen wie der Hauptzeit genutzt werden und somit die Prognosefähigkeit einer Technologie gegenüber der manuellen Vorhersage signifikant verbessern.

Mit steigender Datenverfügbarkeit und der Integration neuer Datenquellen ist zu erwarten, dass sich die Genauigkeit solcher Vorhersagen in Zukunft noch weiter steigern lässt und prozessübergreifende Optimierungspotenziale gehoben werden können.

## 3.4 Technologieübergreifende Anpassung der Prozesskette

Ein Kernaspekt der Schaffung von Adaptiviät in der Fertigung in Form von individuellen Prozessketten ist die technologieübergreifende Anpassung der Prozesskette. Hierdurch wird dem Streben nach größtmöglicher Redundanz entgegengewirkt. Es wird ein größerer Lösungsraum für die Dynamik der Prozessregelung aufgestellt. Ein für den Werkzeugbau klassisches Beispiel der technologieübergreifenden Anpassung der Prozesskette ist die Wahl zwischen dem (Hart-)Fräsen und der Senkerosion. Bei formgebenden Elementen können beide Technologien oftmals alternativ eingesetzt werden. Vor allem wenn die Auslastung einer Technologie sehr hoch ist und somit die Durchlaufzeit der Werkzeugkomponenten steigt, kann die Alternativtechnologie einen Mehrwert bilden. In einem konkreten Use Case mit Unterstützung der Firmen *Hummingbird Systems GmbH*, *simus systems GmbH* und dem Werkzeugbau der *ZF Friedshafen AG* am Standort Schweinfurt wurde diese technologieübergreifende Anpassung beispielhaft an einem Pressunterteil durchgeführt (s. Abbildung 12).

*Abbildung 12: Adaptive Prozesskette am Beispiel eines Pressunterteils*

Der ursprüngliche (kostengünstige) Arbeitsplan hat für die Bearbeitung des formgebenden Elements des Pressunterteils die Senkerosion vorgesehen. Unvorhersehbare Eilaufträge und ein Maschinenausfall in der Senkerosion führten jedoch dazu, dass an der Senkerosionsmaschine ein hoher Arbeitsvorrat vorhanden war. Somit wäre die Wartezeit des Bauteils bis zur Bearbeitung so hoch gewesen, dass sie nachfolgend eine Verzögerung des Liefertermins verursacht hätte. Um die Durchlaufzeit des Pressunterteils zu optimieren, wurde die Prozesskette adaptiv angepasst und auf die Hartfräsbearbeitung ausgewichen. Dies ist nur möglich, da bereits im Vorfeld bekannt war, dass beide Technologien alternativ eingesetzt werden können. Im Hintergrund wird umgehend die CAM-Programmierung für die Hartfräsbearbeitung automatisiert durchgeführt. Über so genannte ESL-Tags (Electronic-Shelf-Labels) wird den Maschinenbedienerinnen und -bedienern

auf dem Shop Floor sofort die Umpriorisierung angezeigt und das Bauteil zur Fräsbearbeitung gebracht. Nach dem Umrüsten auf das Palettensystem kann die Fräsbearbeitung durchgeführt werden. Trotz der zusätzlichen CAM-Programmierung und dem Umrüsten war die Durchlaufzeit der gesamten Prozesskette kürzer, wodurch der Liefertermin eingehalten werden konnte. Der Use Case veranschaulicht die Möglichkeit, adaptiv auf (unvorhersehbare) Störungen zu reagieren. Im nächsten Schritt ist der Vorteil umso größer, wenn das Bauteil nicht erst in den »Stau« – im Use Case der hohe Arbeitsvorrat an der Maschine – hineinfährt, sondern bereits im Vorfeld die »Alternativroute« auswählt. Hierzu sind jedoch weitere Informationen zur Verfügbarkeit bzw. Ausfallquote der Maschinen notwendig sowie eine höhere Prognosefähigkeit der Bearbeitungsdauern der Bauteile im Arbeitsvorrat. Zur vollständigen Implementierung und wirtschaftlichen Nutzung dieses neuen Fertigungsparadigmas müssen alle oben genannten Handlungsfelder mit einem hohen Reifegrad integriert sein.

# 4 Ausblick

## 4.1 Ontologie zur Verknüpfung der Lösungsansätze

Es existieren zwei unterschiedliche Sichtweisen bezüglich des Begriffs Ontologie. Abgeleitet aus dem griechischen bedeutet er wortwörtlich »Lehre des Seienden« und ist in der theoretischen Philosophie beheimatet. Im Kontext der Computer Science werden unter Ontologien digitale Repräsentationen und wiederverwendbare Teile von Domänenwissen, die in einer maschineninterpretierbaren Sprache entwickelt werden, verstanden. [32, 33] Ontologien werden verwendet, um spezifisches Domänenwissen (z. B. Erfahrungswissen aus der Zerspanung) in digitalisierter Form zwischen Anwendungsprogrammen austauschen zu können. Durch eine sehr hohe semantische Ausdrucksstärke ermöglichen es Ontologien, über eine reine hierarchische Untergliederung (Taxonomie) von Inhalten hinaus, auch komplexeste Datenmodelle mit logischen Relationen darzustellen. In der Praxis werden sie vermehrt im Wissensmanagement, Natural Language Processing (NLP), E-Commerce und in der Informationsabfrage eingesetzt. [34]

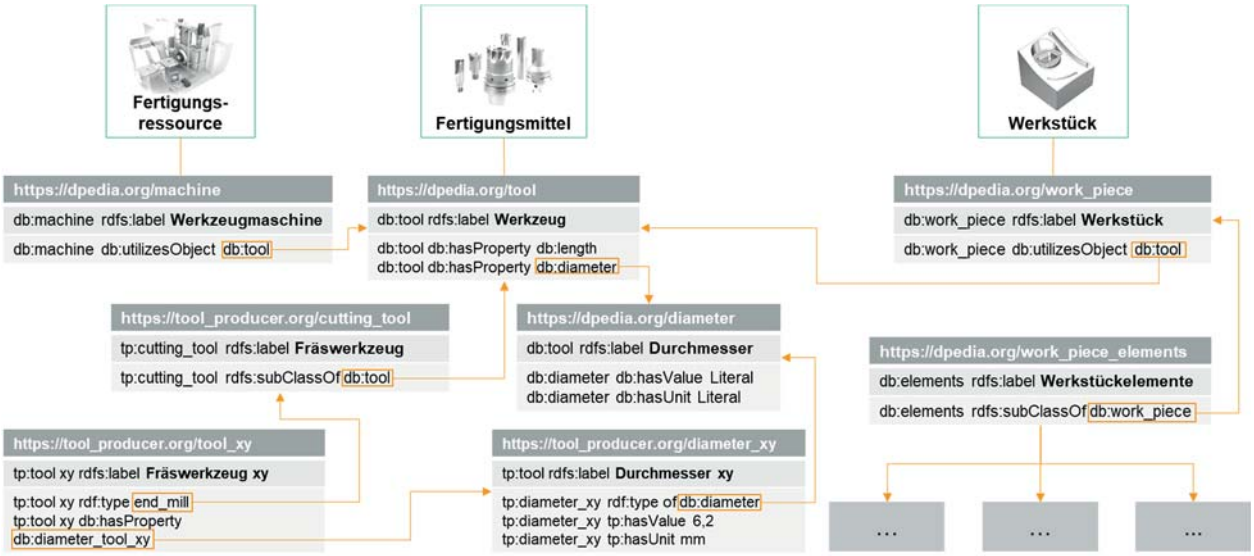



*Abbildung 13: Domänenspezifisches Wissensmodell*

Abbildung 13 veranschaulicht eine domänenspezifische Ontologie, wie sie zukünftig im Werkzeugbau zur Anwendung kommen könnte. Dieses Konzept ermöglicht es die in den vorangegangenen Kapiteln detailliert dargestellten Fallbeispielen umzusetzen, zu optimieren und zu erweitern. Zudem ermöglicht der Einsatz von Semantic Web Technologien,

konkrete Suchanfragen an das System zu stellen und bspw. die tatsächliche Leistungsfähigkeit von drei Fräsmaschinen mit der theoretischen Leistungsfähigkeit zu vergleichen. Neben den bereits beschriebenen Anwendungsszenarien bildet eine spezifische Ontologie die Grundlage zur Realisierung der beschriebenen adaptiven Prozessketten, da eine formalisierte Beschreibung aller relevanten Ressourcen, Prozesse und Daten ermöglicht wird. Die domänenspezifische Ontologie ermöglicht in diesem Kontext z. B. eine eindeutige Referenzierung von konkreten Fräswerkzeugen, die zur Bearbeitung eines Werkstücks verwendet wurden. Zudem können aufgenommene Prozessparameter direkt verknüpft und über geeignete Visualisierungstools Korrelationen zwischen unterschiedlichsten Parametern identifiziert werden. Darüber hinaus können Auftrags- und Arbeitsplandaten verwendet werden, um Prozessketten zu analysieren und Standardprozessfolgen in der Einzel- und Kleinserienfertigung abzuleiten. Daraus ergeben sich weitere Potenziale, wie bspw. gezielte Ähnlichkeitsanalysen zwischen Prozessketten und einzelnen Geometrieelementen. Einzelnen Geometrieelementen können die entsprechend zu deren Fertigung verwendeten Prozessketten zugeordnet werden und miteinander verglichen werden. Dieser Vergleich ermöglicht die zukünftige Berücksichtigung von alternativen Prozessketten. Die aufgeführten Beispiele verdeutlichen das große Potenzial von domänenspezifischen Ontologien für die Einzel- und Kleinserienfertigung und geben einen Ausblick auf zukünftige Anwendungsfelder.

### 4.2 Resilienz durch adaptive Prozessketten

Resilienz beschreibt die Fähigkeit eines Unternehmens schnell und flexibel auf inner- und außerbetriebliche Störungen zu reagieren [35]. Vor allem im Kontext der Ausbreitung von Covid19 wird dieser aus der Psychologie stammende Begriff präsenter denn je. Letztlich waren viele Unternehmen im März bzw. April 2020 mit einer nie zuvor dagewesenen Situation konfrontiert: Lieferketten sind zum Stillstand gekommen. Das Personal musste isoliert und mit (nicht verfügbarer) Schutzausrüstung versorgt werden. Die politischen und gesellschaftlichen Randbedingungen haben sich wöchentlich geändert. Neben diesen unternehmensinternen Herausforderungen ergab sich zudem eine komplette Neuausrichtung des Marktes. Bei Produkten, die am Vortag noch in hohen Stückzahlen gefragt waren, brach die Nachfrage dramatisch ein, sodass auch produzierenden Unternehmen ihre Fertigung für die Fertigung von Schutzausrüstung und Medizinprodukten ausrichteten. Genau bei dieser Neuausrichtung im Produktspektrum helfen individuelle Prozessketten schnell die Fertigung umzustellen. Durch das hohe Maß an Transparenz und Bewusstsein der eigenen technologischen Fähigkeiten entlang der kompletten Wertschöpfung sind somit Unternehmen in der Lage dynamisch auf solche Störungen zu reagieren. Dies gilt sowohl für den Umschwung im Produktspektrum von Werkzeugen für die Fertigung von Schutzausrüstung wie bspw. die Firma SK Industriemodell in kürzester Zeit ein Werkzeug für Mundschutz Ohr-Entlastungsbänder für medizinisches Personal gefertigt hat. Auf der anderen Seite haben Unternehmen die Möglichkeit, Bauteile, die in der Vergangenheit extern gefertigt wurden, intern zu fertigen und somit die Auslastung und damit Wirtschaftlichkeit ihrer Produktion sicherstellen können.

## 5 Zusammenfassung und Fazit

Die Wettbewerbssituation des Werkzeugbaus in Deutschland hat sich seit Ausbruch der Corona Pandemie weiter verschärft. Zu der ohnehin schon angespannten Situation aufgrund des Preisdrucks in der Automobilindustrie sind zusätzliche Herausforderungen durch stark schwankende Absatzmärkte und den Ausfall von Lieferketten hinzugekom-

men. Individuelle Prozessketten ermöglichen es dem Werkzeugbau dem Preisdruck entgegenzuwirken und die Durchlaufzeiten zu verkürzen. Im Sinne eines Routenplaners, passen sich individuelle Prozessketten in der Fertigung adaptiv in einem volatilen Produktionsumfeld an und kompensieren somit den Ausfall von Lieferketten oder Maschinenstillstände. Darüber hinaus bieten sie besonders im von Expertenwissen geprägten Werkzeugbau die Möglichkeit eigenes Knowhow zu systematisieren und für nachfolgende Generationen verfügbar zu machen.

Zum wirtschaftlichen und flächendeckenden Einsatz von individuellen Prozessketten sind heutzutage im Werkzeugbau jedoch einige Herausforderungen zu bewältigen und eine Wende im Fertigungsparadigma weg von der Standardisierung hin zur Flexibilisierung durchzuführen. Dies bringt zwar die mit Hilfe der Standardisierung ursprünglich reduzierte Komplexität zurück in die Fertigung, aber bietet hierdurch völlig neue Möglichkeiten der Optimierung hinsichtlich Bearbeitungszeiten, Fertigungskosten und zu erreichender Bauteilqualität. Mit Hilfe der Entwicklungen innerhalb der Digitalisierung ist es heutzutage möglich diese Komplexität zu beherrschen und für sich ausnutzen. Ausgehend von der automatisierten Analyse von 3D-Modellen mit Hilfe der Voxelisierung über die automatisierte Generierung und Bewertung von Prozessketten bis hin zur Verarbeitung und Analyse von heterogenen Daten im PyIntegrationNetwork (PIN) zur datenbasierten Erhöhung der Prognosefähigkeit wurden verschiedene Handlungsfelder im Beitrag adressiert. Verknüpft man alle Handlungsfelder miteinander, ist man in der Lage die Potenziale durch bspw. technologieübergreifende Anpassungen, wie im beschriebenen Use Case, zu nutzen und einen sowohl internen als auch externen Mehrwert zu generieren. Für eine erfolgreiche Verknüpfung bieten sich Ontologien an, um im Sinne des Semantic Web automatisierte Verknüpfungen zwischen den einzelnen (Teil-) Lösungsansätzen herzustellen und somit die Interaktion zwischen allen Beteiligten wie bspw. Technologien, Maschinen, Fertigungsmitteln und den Maschinenbedienenden sicherzustellen. Ein weiterer Vorteil von adaptiven Prozessketten liegt in ihrem Beitrag zur Schaffung von Resilienz im Werkzeugbau. Durch die Flexibilität entstehen neue Möglichkeiten hinsichtlich der Agilität im Produktionsumfeld und der Reaktionsgeschwindigkeit, mit der auf interne und externe Störungen wie bspw. dem Wegfall von Lieferketten oder Maschinenausfälle reagiert werden kann. Weiterhin besteht durch die hohe Transparenz auf Basis der Digitalisierung und Vernetzung die Möglichkeit, gezielt Optimierungen durchzuführen und Effekte schnell zu evaluieren. Ein für die Zukunft wichtiger Faktor wird dabei die Nachhaltigkeit eines Werkzeugbaus als Differenzierungsmerkmal im Wettbewerb sein.

Die vorgestellten Lösungsansätze und Use Cases haben das Potenzial von der Individualisierung und Flexibilisierung von Prozessketten im industriellen Werkzeugbau bei Losgröße 1 gezeigt. Für einen flächendeckenden Einsatz in der Industrie sind jedoch noch einige Herausforderungen vorhanden, die aktuell in der Forschung untersucht werden wie bspw. ein Framework zur automatisierten Prozesskettengestaltung. Zusätzlich gilt es die vorhandenen Einzelprojekte zur Erhöhung der Prognosefähigkeit auf weitere Technologien zu übertragen und der Industrie zur Verfügung zu stellen. Diesen Fragen widmen sich zukünftig das Team und der Beirat des Inkubators Werkzeugbau, der aus der Arbeitsgruppe des AWK-Expertenkreises Werkzeugbau mit Vertreterinnen und Vertretern aus Industrie und Forschung aus den Bereichen Werkzeugbau, Informatik und Data Science entstanden ist.

# 6 Literatur


[1] W. Boos, M. Salmen, C. Kelzenberg, L. Johannsen, J. Helbig, und C. Ebbecke, Studie Tooling in Germany, 2. Auflage. Aachen, 2018.

[2] W. Boos et al., Studie Tooling in Germany. Aachen, 2020.

[3] Werkzeug Formenbau, Produktivitätssprung bei Losgröße 1. [Online]. Verfügbar: https://www.werkzeug-formenbau.de/pressen-umformen/produktivitaetssprung-bei-losgroesse-1-217.html (zugegriffen: Jan. 27 2021).

[4] Kraftfahrtbundesamt, Pressemitteilung Nr. 02/2021 - Fahrzeugzulassungen im Dezember 2020 - Jahresbilanz. [Online]. Verfügbar: https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/Fahrzeugzulassungen/pm02_2021_n_12_20_pm_komplett.html (zugegriffen: Mai 12 2021).

[5] Industrie Anzeiger, Maschinenbau rechnet 2021 wieder mit kleinem Plus. [Online]. Available: https://industrieanzeiger.industrie.de/top-news/maschinenbau-rechnet-2021-wieder-mit-kleinem-plus/ (zugegriffen: Jan. 27 2021).

[6] Statista, Entwicklung des realen Bruttoinlandsprodukts (BIP) in Deutschland von 2008 bis 2020 und Prognose des DIW bis 2022. [Online]. Verfügbar: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/74644/umfrage/prognose-zur-entwicklung-des-bip-in-deutschland/ (zugegriffen: Mai 12 2021).

[7] N. Blechner, Autoindustrie droht Absatzeinbruch. [Online]. Verfügbar: https://www.tagesschau.de/wirtschaft/boerse/autoindustrie-coronakrise-101.html (zugegriffen: Jan. 27 2021).

[8] A. Zedtwitz, Präzisionswerkzeuge 2019: Sieben Prozent Produktionsrückgang. [Online]. Verfügbar: https://pwz.vdma.org/viewer/-/v2article/render/46641815 (zugegriffen: Jan. 27 2021).

[9] VDMA Präzisionswerkzeuge, Entwicklung der deutschen Maschinenproduktion. [Online]. Verfügbar: http://www.flt.vdma.org/documents/105628/57184549/Grafiken%20JPK%202020_1607419399759.pdf/dddbae16-ffd6-2365-9122-a0c09e8e9196 (zugegriffen: Mai 12 2021).

[10] A. Ringel, Maschinenbau: VDMA-Präsident befürchtet massiven Stellenabbau. [Online]. Verfübar: https://www.produktion.de/wirtschaft/maschinenbau-vdma-praesident-befuerchtet-massiven-stellenabbau-377.html (zugegriffen: Jan. 27 2021).

[11] M. Willrett, Forscher entwickeln System, das verschiedene Prozessketten vergleicht. [Online]. Verfügbar: https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/fertigung/forscher-entwickeln-system-das-verschiedene-prozessketten-vergleicht/ (zugegriffen: Jan. 27 2021).

[12] M. Prümmer, “Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem der Leistungsfähigkeit verketteter Fertigungssysteme in der mechanischen Fertigung des Werkzeugbaus,” Diss., RWTH Aachen, Aachen.

[13] K. Lichtblau et al., Studie Industrie 4.0-Readiness. Aachen, 2015. [Online]. Verfügbar: http://www.impuls-stiftung.de/documents/3581372/4875835/Industrie+4.0+Readniness+IMPULS+Studie+Oktober+2015.pdf/447a6187-9759-4f25-b186-b0f5eac69974

[14] N. Mohr, D. Morawiak, N. Köster, und B. Saß, Kurzstudie Die Digitalisierung des deutschen Mittelstands. [Online]. Verfügbar: https://www.digitexx.de/fileadmin/Magazin/mckinsey_digitalisierung_deutscher_mittelstand.pdf (zugegriffen: Jan. 27 2021).

[15] W. Boos, C. Kelzenberg, J. Helbig, M. Busch, T. Graberg, und J. Schweins, Studie Wettbewerbsfaktor Nachhaltigkeit. Aachen, 2020.

[16] Europäische Kommission, Für Klimaneutralität bis 2050: Kommission schlägt Europäisches Klimagesetz vor und startet Konsultation zum Europäischen Klimapakt. [Online]. Verfügbar: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_20_335 (zugegriffen: Feb. 19 2021).

[17] tagesschau, Wer wie viel CO2 ausstößt. [Online]. Verfügbar: https://www.tagesschau.de/faktenfinder/co2-emissionen-103.html (zugegriffen: May 12 2021).

[18] T. Bergs, K. Arntz, M. Prümmer, und M. Wilms, “Individuelle Prozessketten im Werkzeugbau durch daten- und modellbasierte Prognosen,” in Internet of Production - Turning Data into Value: Statusberichte aus der Produktionstechnik 2020, Fraunhofer IPT, Hrsg., Aachen: Fraunhofer-Gesellschaft, 2020, S. 57–79.

[19] T. H. Cormen und P. Molitor, Algorithmen - Eine Einführung, 3. Auflage. München: Oldenbourg, 2010.

[20] B. Denkena, S. Wilmsmeier, und F. Winter, “Machine Learning in der adaptiven Fertigungssteuerung: Genetischer Algorithmus zur Bewertung alternativer Arbeitspläne,” Fabriksoftware 24, 2019, S. 17–20, 2019.

[21] W. Boos, C. Kelzenberg, J. Wiese, C. Ebbecke, M. Busch, und H. Bernd, Studie Erfolgreich Planen und Steuern im Werkzeugbau. Aachen, 2019.

[22] K. N. Kostyszyn, “Quantencomputing in der Produktion: Chancen und Herausforderungen: Promotionsvortrag,” 2020.

[23] C. Hilleke, “Kosteneinsparungen durch fertigungsoptimale Konstruktion (mithilfe der konstruktionsbegleitenden Kalkulation),” in Best Practices im Value Management, T. Lingohr und M. Kruschel, Hrsg., Wiesbaden: Gabler, 2011, S. 211–234.

[24] S. Weinmeister und L. Junghanns, “Ein wissensbasiertes System für die fertigungsorientierte Konstruktion,” in Informatik aktuell, CAD ’92, W. Brauer, F.-L. Krause, H. Jansen, und D. Ruland, Hrsg., Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1992, S. 488–495.

[25] A. Kalweit, C. Paul, S. Peters, und R. Wallbaum, “Kostenreduzierendes Gestalten und Konstruieren,” in Handbuch für Technisches Produktdesign, A. Kalweit, C. Paul, S. Peters, und R. Wallbaum, Hrsg., Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 598–610.

[26] simus systems, classmate PLAN. [Online]. Verfügbar: https://www.simus-systems.com/produkte/classmate-plan/ (zugegriffen: Feb. 2 2021).

[27] U. Shafique und H. Qaiser, “A Comparative Study of Data Mining Process Models (KDD, CRISP-DM and SEMMA),” International Journal of Innovation and Scientific Research, Jg. 2014, Nr. 12, S. 217–222. [Online]. Verfügbar: http://www.ijisr.issr-journals.org/

[28] J. Krauß, B. M. Pacheco, H. M. Zang, und R. H. Schmitt, “Automated machine learning for predictive quality in production,” Procedia CIRP, Jg. 2020, Nr. 93, S. 443–448, doi: 10.1016/j.procir.2020.04.039.

[29] A. Gandomi und M. Haider, “Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics,” International Journal of Information Management, Jg. 2015, Nr. 35, S. 137–144, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007.

[30] JJ. Dean und S. Ghemawat, “MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters,” Commun. ACM, Jg. 2004, Nr. 51, S. 107–113, doi: 10.1145/1327452.1327492.

[31] R. Tibshirani, “Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso,” Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), Jg. 1996, Nr. 58, S. 267–288, doi: 10.1111/j.2517-6161.1996.tb02080.x.

[32] T. R. Gruber, “Ontolingua: A mechanism to support portable ontologies,” Veröffentlichung, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, Stanford, 1992.

[33] R. Studer, V.R. Benjamins, und D. Fensel, “Knowledge engineering: Principles and methods,” Data & Knowledge Engineering, Jg. 1998, Nr. 25, S. 161–197, doi: 10.1016/S0169-023X(97)00056-6.

[34] O. Corcho, M. Fernández-López, und A. Gómez-Pérez, “Ontological Engineering: What Are Ontologies and How Can We Build Them?,” in Semantic Web Services: Theory, Tools and Applications, 2007, S. 44–70.

[35] W. Boos, D. Trauth, M. Prümmer, P. Niemietz, M. Wilms, C. Lürken, und J. Mayer, Wettbewerbsfaktor Resilienz. Aachen: printclub, 2021.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 1.3:

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT
Dr.-Ing. K. Arntz, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Dr.-Ing. K. Born, Tebis ProLeiS GmbH
T. Dannen, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
A. Dunkes, Christian Karl Siebenwurst GmbH & Co. KG
Prof. Dr.-Ing. L. Gansauge, TH Deggendorf
S. Hofmann, Werkzeugbau Siegfried Hofmann GmbH
S. Krell, SK Industriemodell GmbH
L. Linnepe, SK Industriemodell GmbH
Dr.-Ing. M. Ohlenforst, IconPro GmbH
Dr.-Ing. M. Prümmer, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
G. Ringelmann, ZF Friedrichshafen AG
Dr.-Ing. M. Stautner, ModuleWorks GmbH
S. Stephan, Tebis ProLeiS GmbH
G. Stepien, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
S. Weber, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
S. Wegner, Christian Karl Siebenwurst GmbH & Co. KG
Dr.-Ing. J. Weißkopf, simus systems GmbH
M. Wilms, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
P. Wölfle, simus systems GmbH
H. Zwicker, Hummingbird Systems GmbH

# SESSION 2

## DER DIGITALE ZWILLING IM PRODUCTION CYCLE

# make a difference

Data driven solutions for industrial sustainability.

SENSEERING®
DECIDE BETTER. NOW!

We provide custom connectivity, data science and AI for your sustainability strategy.

# 2 Nachhaltige Produktion mit dem Digitalen Zwilling

*T. Bergs, S. Gierlings, T. Augspurger, P. Ganser, S. Barth, K. Fricke, T. Grünebaum*

**Gliederung**

1 Einleitung ....121

2 Nachhaltigkeit in der Produktion ....122
2.1 Grundlagen der Ökobilanzierung ....124
2.2 GHG-Protocol als Standard zur Bilanzierung von $CO_2$-Emissionen ....127

3 Digitalisierung als Kernelement einer nachhaltigen Produktion ....128
3.1 Definition Digitaler Schatten und Zwilling für die Fertigungstechnik ....129
3.2 Objekte und Systemgrenzen für den Digitalen Schatten und Zwilling ....130
3.3 Unsicherheit und Relevanz von Daten und Information ....132
3.4 Digital Framework als Architektur für die digitalisierte Fertigung ....134

4 Praxisbeispiele – Ökologische Nachhaltigkeit in der Fertigung ....135
4.1 Ökologische Nachhaltigkeitsbetrachtung am Beispiel Blisk ....136
4.2 Erweiterung der Nachhaltigkeitsbetrachtung um die Scope 3 Emissionen ....141

5 Zusammenfassung und Ausblick ....145

6 Literatur ....147

## Kurzfassung

### Mit dem Digitalen Zwilling die Basis für nachhaltige Produktion schaffen

Kaum eine Entwicklung hat die Arbeits- und Produktionswelt in den letzten Jahren so geprägt wie die Digitalisierung. Die konsequente und flächendeckende Konnektivität ist wesentlicher Treiber für den technologischen und gesellschaftlichen Wandel. Neben der Digitalisierung ist das aktuell zweite gesellschaftliche wie technische Trendthema die „Nachhaltigkeit“. Beide Themen werden im Zusammenspiel die zukünftige Entwicklung in der Produktionstechnik prägen. Der Digitale Zwilling ist dabei das zentrale Vehikel, welches die verfügbaren Daten und Informationen über den Lebenszyklus eines realen Objekts hinweg aggregiert, strukturiert und nutzbar macht.

Der vorliegende Beitrag definiert den Digitalen Zwilling für ein produktionstechnisches Umfeld und vertieft das Zusammenwirken von Daten, Digitalem Schatten, Modellen und dem Digitalen Zwilling anhand konkreter fertigungstechnischer Fragestellungen. Diese Aspekte werden dann in den Kontext der Nachhaltigkeit gesetzt und anhand von spezifischen Fallbeispielen wird gezeigt, wie Daten aus der Fertigung als Basis für Ökobilanzierungen nutzbar gemacht werden können.

## Abstract

### Overcoming Process Limitations Using the Digital Twin

In the recent years, hardly any other development has had such an impact on the worlds of work and production as digitization, and the consistent and comprehensive connectivity is a key driver of technological and social change. In addition to digitization, the second current social and technical trending theme is "sustainability". These two topics will have a huge impact on future developments in production technology. The Digital Twin is the central vehicle, aggregating, structuring and utilizing the available data and information over the life-cycle of a real object.

This article presents a definition for the Digital Twin for a production-technological environment and deepens the interaction of data, Digital Shadow, models and the Digital Twin based on specific use cases. These aspects are then put into context with the topic of “sustainability” and specific use-cases are presented to showcase how data from the production and manufacturing domain can be used as a basis for life cycle assessments.

# 1 Einleitung

Kaum eine Entwicklung hat die Arbeits- und Produktionswelt der letzten zehn Jahre mehr geprägt als die Digitalisierung: Das digitale Zeitalter oder die Ära „Industrie 4.0“ ist einer der großen Megatrends. Megatrends müssen nicht vorausgesagt werden, denn sie sind bereits da und markieren diejenigen Veränderungen in Gesellschaft und Umwelt, die uns jetzt schon prägen und die Zukunft direkt beeinflussen. Zu den großen Megatrends der 2020er Jahre zählen die Globalisierung und Urbanisierung, die Individualisierung, ein zunehmendes Gesundheits- und Sicherheitsstreben, eine sich verändernde Altersstruktur in der Gesellschaft sowie die Neo-Ökologie mit den Themen einer nachhaltigen ressourcenschonenden Produktion und Mobilität.

Insbesondere durch die Covid-19-Pandemie sind die Aspekte im Zusammenhang mit Gesundheit und Sicherheit seit Beginn 2020 noch einmal in den Vordergrund gerückt – dieser Trend prägt derzeit die globale Gesellschaft in hohem Maß und nimmt Einfluss auf das Mobilitätsverhalten sowie auf sämtliche Bereiche der Industrie. Gleichzeitig hat sich in der gesellschaftlichen Mitte in den letzten Jahren ein zunehmendes Bewusstsein für den mit hoher Geschwindigkeit voranschreitenden Klimawandel etabliert. Industrie und Politik arbeiten intensiv an Lösungen für einen nachhaltigeren und ressourcen-schonenderen Wohlstand in der Zukunft.

Das Thema Nachhaltigkeit weist neben dem ökologischen Gesichtspunkt auch ökonomische und soziale Komponenten auf, die zum Erreichen einer zukunftsfähigen Balance in Gesellschaft und Umwelt betrachtet werden müssen. Diese Aspekte erhöhen die Komplexität von produktionstechnischen Systemen erheblich: Über mehr als ein Jahrhundert hinweg bestimmte das „magische Dreieck“ aus Qualität, Kosten und Zeit die industrielle Produktion und damit die Wertschöpfung, die den globalen Kapitalmarkt stützt. Über den Fortschritt und die technologischen Entwicklungen in dieser Periode sind die Produktions- und Logistikketten weltweit derart effizient geworden, dass wir uns heute in einem nie zuvor dagewesenen globalen Wohlstand befinden. Die natürlichen Schranken der Erde setzen jedoch dem stetigen Wachstum und grenzenlosen Bedarf an Ressourcen ein klares Ende. Folglich muss die Optimierung unserer Systeme unter gleichberechtigter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit geschehen. Bildlich gesprochen muss das Dreieck aus Qualität, Kosten und Zeit um den Faktor Nachhaltigkeit mit all seinen Teilaspekten erweitert werden.

Die auf diesem Wege deutliche Steigerung der Komplexität ist nur mithilfe der Digitalisierung handhabbar. Die Digitalisierung ist selbst also nicht als ein Bedarf, sondern vielmehr als ein Mittel zum Zweck zu verstehen. Sie befähigt zur Organisation innerhalb einer komplexen Welt und ist sowohl Archiv als auch Quelle von Information und Wissen. Der Digitale Zwilling ist dabei das zentrale Vehikel, welches die verfügbaren Daten und Informationen zu einem realen Objekt in einer digitalen Umgebung abbildet und aggregiert – er ist das Bindeglied zwischen den Objekten der greifbaren Welt und dem, was wir über sie wissen. Er konserviert Informationen, schafft Transparenz und unterstützt das systematische Lernen aus Vergangenheit und Gegenwart [1].

Durch das verfügbare Wissen und die so vorhandene Transparenz bildet der Digitale Zwilling eine objektive Bewertungsgrundlage für Zusammenhänge, die zuvor nur implizit, ungenau vorhanden waren. Der Digitale Zwilling ist die Basis für Entscheidungen sowie die Optimierung von Systemen und verfolgt das Ziel einer präzisen Prognose in die Zukunft, um Prozesse besser vorhersagen oder Ressourcen planen zu können. In den Lebenszyklen von Produkten ist der Digitale Zwilling das zentrale Element, welches die Belastungen und Veränderungen über jeden Zyklusabschnitt dokumentiert, bilanziert und damit optimierte Produkte ermöglicht. Ein optimiertes Produkt ist dabei nachhaltiger und

gleichzeitig performanter: Es zeichnet sich durch geringsten Ressourceneinsatz und die höchstmögliche Funktionalität im Betrieb aus. Vereinfacht gesprochen strebt es über seinen gesamten Lebenszyklus einen Zustand geringster Verschwendung an und maximiert die Wertschöpfung. Um aber bei der Herstellung und beim Betrieb „Verschwendung“ bspw. in Form von unnötigen Sicherheitsreserven einsparen zu können, ist eine genaue Information über auftretende Beanspruchungszustände und die Veränderungen des Objekts als direkte Folge von dessen Herstellung und Einsatz von zentraler Bedeutung. Der Digitale Zwilling soll hier die Ambivalenz zwischen Sicherheit und Performanz auflösen, d.h. durch die Quantifizierung von Unsicherheiten Sicherheit schaffen. Nur durch exakte Vorhersagen ist die Einsparung von Ressourcen ohne einen realen Verlust von Sicherheit möglich. Der vorliegende Artikel soll mit seinen Gedanken, Definitionen und Beispielen veranschaulichen, wie mithilfe des Digitalen Zwillings in der Produktionstechnik die Grenzen von Prozessen und Produkten verschoben, optimierte und vor allem nachhaltige Produkte realisiert, und wie aus Daten reale Werte geschaffen werden können [1].

## 2 Nachhaltigkeit in der Produktion

Das mit den vergangenen industriellen Revolutionen eng verknüpfte kapital- und ressourcenintensive Produktivitätsdenken produzierender Unternehmen differenziert sich zunehmend vom Zukunftsbild einer ökologisch bewussten denkenden Gesellschaft. Der Begriff Nachhaltigkeit in den Dimensionen Ökologie, Sozialwesen und Finanzen gewinnt zunehmend an Bedeutung. In einer nachhaltigen Gesellschaft befriedigt die aktuell lebende Generation ihre Bedürfnisse in einer Weise, die die kommenden Generationen nicht darin beeinträchtigt, ihre Bedürfnisse auf dieselbe Weise zu erfüllen. Wie schon im vorherigen Abschnitt angesprochen weist die Nachhaltigkeit eine ökonomische, eine ökologische sowie eine soziale Komponente auf [2]. Die ökologischen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts umfassen insbesondere die Erderwärmung als Folge des Klimawandels, den zunehmenden Verbrauch von Ressourcen, die Zerstörung der globalen Artenvielfalt sowie die Gefährdung der menschlichen Gesundheit. Zu den Gefahren für die ökonomische Komponente der Nachhaltigkeit zählen Instabilitäten der Finanzmärkte, Staatsverschuldung in zu hohem Maß sowie negative Entwicklungen auf dem Arbeitsmarkt. Problemfelder auf dem Gebiet der sozialen Nachhaltigkeit sind unter anderem Armut, demografische Fehlentwicklungen, gewaltsame Konflikte und Chancenungleichheit [3].

Die Gewichtung der drei Dimensionen stellt einen kaum lösbaren Zielkonflikt dar. Sicher ist jedoch, dass ein intaktes Ökosystem erforderlich ist, um überhaupt in der Lage zu sein, zu wirtschaften und damit soziale Probleme lindern zu können. Der ökologischen Nachhaltigkeit wird daher oftmals die höchste Priorität zugeschrieben [4]. Der damit einhergehende gesellschaftliche Interessenwandel manifestiert sich in der politischen Meinung und fördert den Erlass von umweltbezogenen nationalen Abgaben sowie internationalen Nachhaltigkeitsversprechen wie dem European Green Deal als prominentes Beispiel aus dem Jahr 2019 [5]. Nach einer Umfrage der Unternehmensberatung Accenture aus dem gleichen Jahr [6] sind etwa die Hälfte der deutschen Verbraucher bereit, mehr Geld für nachhaltige Produkte auszugeben. Verbraucherinnen und Verbraucher erwarten, dass auch produzierende Unternehmen mehr Verantwortung übernehmen – für die Bevölkerung, die sie mit Waren beliefern und die Umwelt, die sie bisher mit Ressourcen versorgt. Für Unternehmen ist dies ein starkes Argument für ein Engagement in Richtung einer nachhaltigen Produktion.

In produzierenden Unternehmen ist die ökonomische Nachhaltigkeit in der Fertigung – als dem Bereich, in dem die Wertschöpfung erfolgt – naturgemäß von zentraler Bedeutung. Entsprechend wird ein Unternehmen, welches nicht nachhaltig wirtschaftet, im Laufe der Zeit vom Markt verschwinden. Die soziale Nachhaltigkeit, die sich unter anderem durch Elemente wie faire Lohnstrukturen, faire Arbeitsbedingungen entlang der Lieferkette sowie ein diskriminierungsfreies Arbeitsumfeld auszeichnet, wird maßgeblich durch die Unternehmensleitung beeinflusst; in diesem Bereich verfügt die Fertigung kaum über Stellhebel. Dennoch hat die Fertigung einen signifikanten Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit von produzierenden Unternehmen – nicht zuletzt da sie auf die Nutzung von Energie und den Verzehr von Ressourcen angewiesen ist, um eine Wertschöpfung zu erzielen. Folglich muss eine ökologische Fertigung darauf ausgelegt sein, schadhafte Folgen zu vermeiden, unvermeidbare Umweltwirkungen zu minimieren und schließlich zu kompensieren.

Bild 1 zeigt beispielhaft das Zusammenwirken unterschiedlicher Produktlebenszyklen – hier konkret ein integrales Verdichterbauteil aus der Triebwerksindustrie und ein Fräswerkzeug einer Werkzeugherstellerfirma im Abschnitt Produktion. In ähnlicher Weise interagieren an unterschiedlichen Schnittpunkten weitere Produktlebenszyklen, etwa der Zyklus der Werkzeugmaschine, auf welcher die Bearbeitung des Bauteils stattfindet. Für eine nachhaltige Produktion müssen daher die Kreisläufe aller beteiligten Produkte und Güter einbezogen werden. Die hier gezeigten Beispiel werden später in Abschnitt 4 noch einmal aufgegriffen und vertieft.

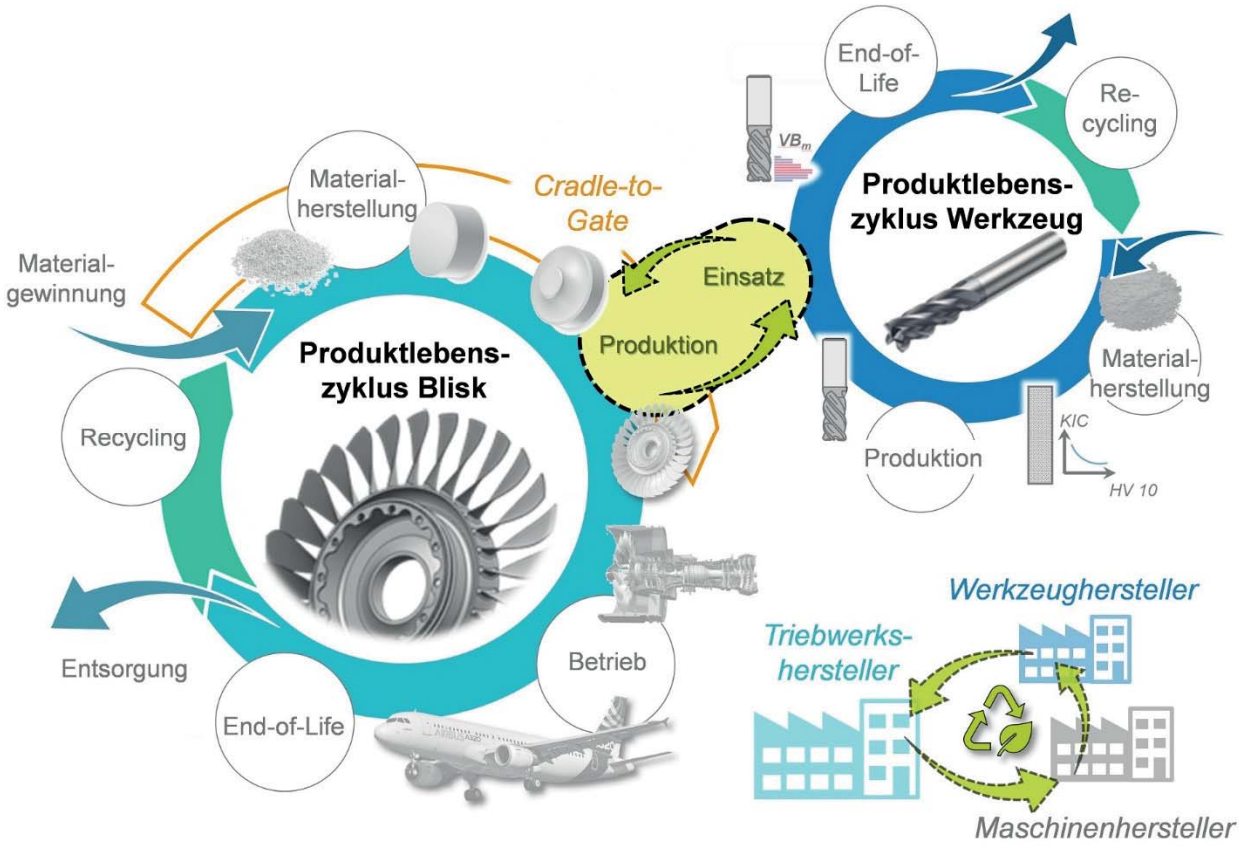



*Bild 1: Interagierende Produktlebenszyklen (hier: Integrales Verdichterbauteil und Fräswerkzeug in der Schnittstelle „Produktion-Einsatz“*

Nachhaltige Produktion bedeutet in diesem Zusammenhang aber auch die Herstellung von Produkten in einem fairen Arbeitsumfeld durch wirtschaftlich sinnvolle Prozesse, die negative Auswirkungen auf die Umwelt minimieren und gleichzeitig Energie und

natürliche Ressourcen schonen. Sowohl dieses Verständnis als auch die zunehmenden gesetzlichen Rahmenbedingungen erfordern zwangsläufig die Erfassung belastbarer nachhaltigkeitsorientierter Produktionsdaten zur Quantifizierung der eingesetzten Ressourcen, Energie und Betriebsmittel als einen der wesentlichen nächsten Schritte. Aus der Sicht von Unternehmen ergeben sich daraus fünf Gründe für ein Handeln im Sinne von Nachhaltigkeit. Diese sind:

- die Steigerung der langfristigen betrieblichen Effizienz durch die Reduzierung von Produktionskosten,
- die Kundengewinnung und Steigerung des Wettbewerbsvorteils durch eine nachhaltige Wertschöpfung,
- die Stärkung und der Schutz der Unternehmensmarke sowie die Vertrauenssteigerung gegenüber der Öffentlichkeit,
- der Aufbau einer langfristigen Rentabilität und eines langfristigen Erfolgs durch die Vermeidung kurzfristiger Profit-Strategien, und schließlich
- präventive Maßnahmen für regulatorische Beschränkungen und das Ergreifen der daraus resultierenden Chancen.

Der Erfassung belastbarer nachhaltigkeitsorientierter Produktionsdaten zur Quantifizierung der eingesetzten Ressourcen, Energie und Betriebsmittel sowie der Zuordnung dieser Daten zu einzelnen Produkten, Prozessen und ganzen Lebenszyklusabschnitten kommt somit zukünftig eine zentrale Rolle zu. Diese Herausforderung kann systematisch mithilfe des Digitalen Zwillings gelöst werden, der die Möglichkeit bietet, einen sogenannten “Sustainable Twin” abzuleiten. Mit dessen Hilfe kann die Quantifizierung der ökologischen Kennwerte von Produkten und Prozessen in der Fertigung gelingen.

Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen zur Quantifizierung der ökologischen Auswirkungen in der Fertigung vorgestellt. Daraufhin werden bestehende Herausforderungen für eine ökologisch nachhaltige Fertigung abgeleitet und ein Lösungsansatz skizziert. Die Umsetzung und Bewertung des Lösungsansatzes werden in Kapitel 4 anhand von Anwendungsbeispielen vorgestellt.

## 2.1 Grundlagen der Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung (engl.: Life Cycle Assessment, LCA) nach DIN EN ISO 14040/14044 [7,8] ist der wissenschaftliche Standard zur Bewertung der Umweltwirkungen von Produktsystemen, vgl. [9]. Sie beschreibt ein Vorgehen zur „*Zusammenstellung und Beurteilung der In- und Output-Flüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebenswegs*“ [8]. Das Vorgehen umfasst die Phasen

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens (engl. *Goal and Scope*),
- Sachbilanz (engl. *Life Cycle Inventory*, LCI),
- Wirkungsabschätzung (engl. *Impact Assessment*, IA) und
- Auswertung (engl. *Interpretation*) [7].

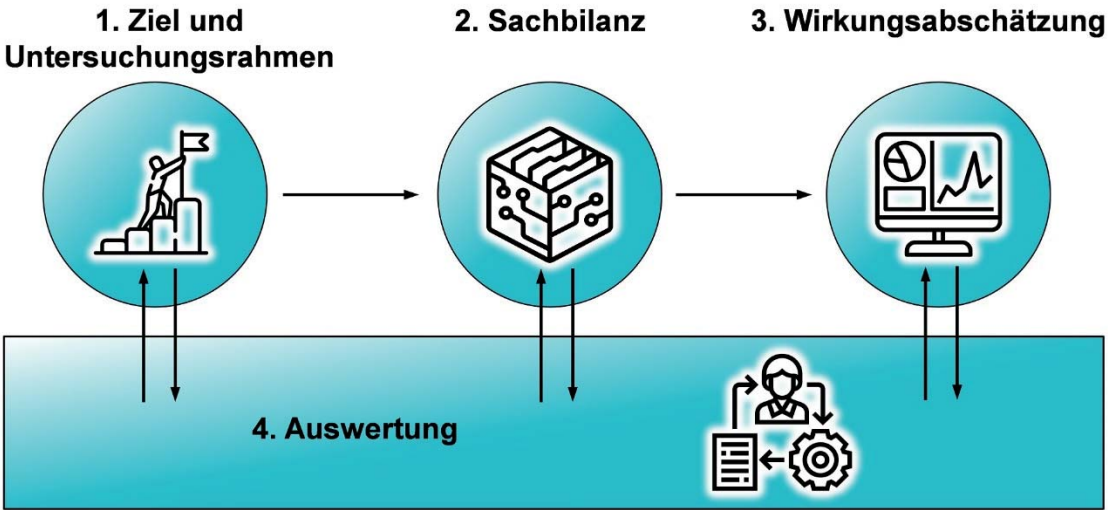



*Bild 2: Schritte der ISO 14040 [7]*

### Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen

Die Zieldefinition muss die beabsichtigte Anwendung, die Gründe für eine Durchführung und die Zielgruppe der Ökobilanzstudie umfassen. Falls geplant wird, die Ergebnisse der Ökobilanzstudie dazu zu nutzen, vergleichende Aussagen in einer Veröffentlichung zu treffen, ist in der Zieldefinition auf diesen Umstand hinzuweisen. Im Untersuchungsrahmen wird das zu untersuchende Produkt beschrieben, die Systemgrenzen werden definiert und Annahmen sowie Einschränkungen werden dargelegt. Für eine detaillierte Darstellung sämtlicher Bestandteile dieser Phase wird auf DIN EN ISO 14040 verwiesen [7]. Ein weiterer, wesentlicher Bestandteil der Phase "Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens" ist die Definition der funktionellen Einheit. Bei dieser handelt es sich um eine Bezugsgröße, auf die sämtliche erfassten In- und Outputs, zu beziehen sind. Somit wird es ermöglicht, Ökobilanzen verschiedener Produkte, die in der Definition ihrer funktionellen Einheit übereinstimmen, zu vergleichen. [7]

### Sachbilanz

Während der Sachbilanzierung werden die relevanten In- und Outputs des betrachteten Produktsystems quantifiziert und berechnet [7]. Die Daten sollten für die weitere Verarbeitung als Elementarflüsse modelliert werden [8]. Ein Elementarfluss ist "*Stoff oder Energie, der bzw. die dem untersuchten System zugeführt wird und der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen wurde, oder Stoff oder Energie, der bzw. die das untersuchte System verlässt und ohne anschließende Behandlung durch den Menschen an die Umwelt abgegeben wird*" [8]. Für die Modellierung von Elementarflüssen eignen sich Messtechnik, Abschätzungen und Simulationen [10]. Alternativ können die benötigten Daten aus Datenbanken wie ProBas [11], EcoInvent [12] oder der GaBI-Datenbank [13] entnommen werden. Derartige Datenbanken eignen sich häufig jedoch nicht für eine Sachbilanzierung von Fertigungsprozessen. In den generellen Angaben zu den Sachbilanzen werden häufig keine Unterschiede bezüglich der eingesetzten Werkzeugmaschinen, Rohstoffe und Einstellgrößen berücksichtigt [14]. Die praktischen Einschränkungen einer Sachbilanzierung müssen im Bericht der Ökobilanz erwähnt werden [7]. Für die Datenberechnung müssen die erhobenen Daten zunächst validiert und im Anschluss auf die funktionelle Einheit bezogen werden [7].

**Wirkungsabschätzung**

Die Wirkungsabschätzung umfasst die Errechnung von Umweltwirkungen auf Basis der Elementarflüsse, die während der Sachbilanzierung erfasst wurden [7]. Auslöser von Umweltwirkungen sind Ursache-Wirkungsketten (Bild 3). Am Anfang einer Ursache-Wirkungskette steht ein anthropogener Eingriff in die Umwelt, z. B. die Emission von Treibhausgasen. Dieser Eingriff resultiert entlang der Ursache-Wirkungskette in biologischen Veränderungen. Ein Beispiel für eine solche Veränderung ist ein Einfluss auf die menschliche Gesundheit. [15]

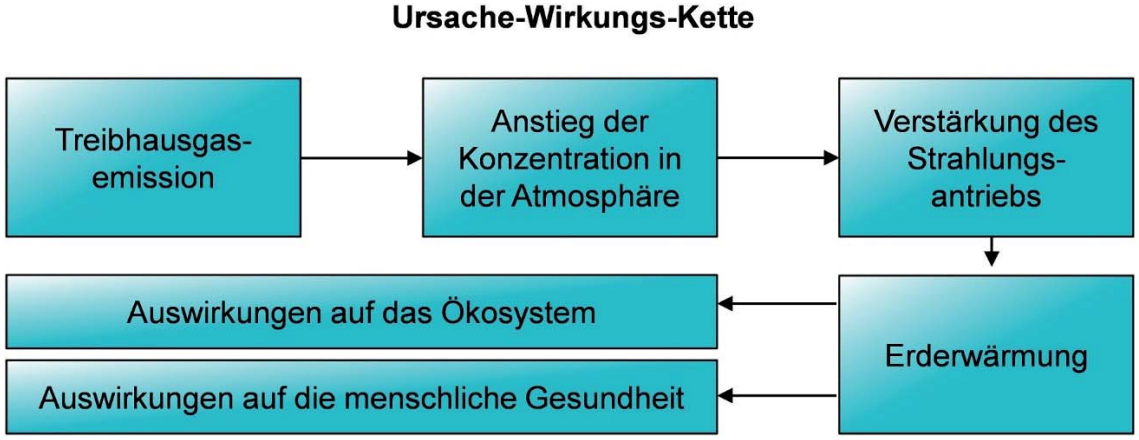



*Bild 3: Exemplarische Ursache-Wirkungskette i. A. a. [16]*

Während der Wirkungsabschätzung können Midpoint- und Endpointumweltwirkungen berechnet werden. Midpointwirkungen entstehen innerhalb der Ursache-Wirkungskette zwischen dem anthropogenen Umwelteingriff und der Endpointwirkung [15]. Beispiele für Midpointumweltwirkungen sind photochemische Ozonbildung in NOx-Äquivalenten oder die Bodenversauerung in H+-Äquivalenten [16]. Endpoints beschreiben Schäden, die am Ende der Ursache-Wirkungskette in der Umwelt verursacht werden. Die drei Endpoints sind Schäden an der menschlichen Gesundheit, an Ökosystemen und an natürlichen Ressourcen [17]. Die Wirkungsabschätzung umfasst die Schritte Klassifizierung, Charakterisierung sowie die Auswahl von Wirkungskategorien, Charakterisierungsmodellen und Wirkungsindikatoren. Wirkungskategorien sind zu betrachtende Midpoints und/oder Endpoints. [8] In der Klassifizierung müssen die Elementarflüsse aus der Sachbilanz mindestens einer Wirkungskategorie zugewiesen werden. Während der Charakterisierung werden die zugeordneten Elementarflüsse in sogenannte Wirkungsindikatoren umgerechnet. Wirkungsindikatoren können als quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie interpretiert werden. Zum Beispiel wird zur Darstellung des quantifizierten Beitrags eines Stoffes zur Midpointumweltwirkung Klimawandel die Treibhauswirkung dieses Stoffes in den Wirkungsindikator CO2-Äquivalent umgerechnet. Die Umrechnungsfaktoren (sog. Charakterisierungs-faktoren) werden wissenschaftlichen Berechnungsmodellen (sog. Charakterisierungs-modellen) entnommen.

**Auswertung**

Die abschließende Phase der Auswertung dient dazu, die Ergebnisse der Ökobilanzierung darzustellen. Die Ergebnisse müssen in sich schlüssig, verständlich und vollständig dargestellt werden. Sie müssen mit dem zu Beginn definierten Ziel

übereinstimmen [7]. Nach der Darstellung der Ergebnisse ist es möglich, Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Einschränkungen der Ökobilanz abzuleiten [8].

## 2.2 GHG-Protocol als Standard zur Bilanzierung von $CO_2$-Emissionen

Das Greenhouse-Gas (GHG) Protocol ist eine Methode zur Bilanzierung von Treibhausgasemissionen. Es ist die etablierte Grundlage für die Erstellung von Berichten zu $CO_2$-Emissionen in Unternehmen [18]. Die Ermittlung erfolgt in drei Bereichen, sogenannten Scopes, die die Entstehung von Treibhausgasemissionen hinsichtlich ihrer Nähe bzw. direkten Einflussnahme aus Sicht eines Unternehmens einordnen. Im Folgenden sind die drei Scopes näher beschrieben.

### Scope 1 – Direkte Emissionen

Zu Scope 1 zählen alle direkten Emissionen. Die Quellen direkter Emissionen sind innerhalb der Unternehmensgrenzen. Dazu gehören zum einen direkte Emissionen aus Verbrennungsprozessen stationärer Anlagen. Die dazu notwendigen Daten sind aus der eingesetzten Menge von Primärenergieträgern, Lieferbelegen und Rechnungen sowie Messungen der Verbrauchsmengen von Zählständen zu entnehmen. Zum anderen gehören zum Scope 1 direkte Emissionen aus Verbrennungsprozessen mobiler Anlagen wie etwa Transport und Geschäftsfahrzeuge. Die dazu erforderlichen Daten werden beispielsweise aus der Menge an Kraftstoffen oder gefahrenen Strecken ermittelt. Weitere Inhalte dieser Kategorie sind direkte Emissionen flüchtiger Gase sowie Emissionen aus Prozessen.

### Scope 2 – Indirekte Emissionen

Zu Scope 2 zählen indirekte Emissionen aus zugekauftem Strom, aus Fernwärme bzw. -kälte und gekauftem Dampf [19]. Bei der anfänglichen Bilanzierung von Treibhausgasemissionen haben sich Unternehmen auf direkte Emissionen (Scope 1) und indirekte Emissionen aus der Energiebereitstellung (Scope 2) fokussiert. Doch ein Großteil der Emissionen von Unternehmen entsteht außerhalb des eigenen Betriebs, also angefangen von der Beschaffung von Gütern bis hin zur Bereitstellung der finalen Produkte. Um auch diese indirekten Emissionen zu berücksichtigen, wurde der Corporate Value Chain (Scope 3) Standard entwickelt [20].

### Scope 3 – Emissionen aus Lieferkette und Dienstleistungen

Mit dem Corporate Value Chain (Scope 3) Standard wurde eine Grundlage geschaffen, um Emissionen der Lieferkette oder verbundener Dienstleistungen zu bilanzieren. Dies sind alle Emissionen, die nicht direkt durch das Unternehmen entstehen, sondern an anderen Stellen in der Lieferkette, etwa aus der Herstellung oder dem Transport eingekaufter Güter, der Entsorgung von Abfällen oder Geschäftsreisen [20]. Scope 3 wird unterteilt in die vor- und die nachgelagerte Wertschöpfungskette. Zu den Emissionen der vorgelagerten Wertschöpfungskette gehören zugekaufte Waren und Dienstleistungen, Produktionsmittel oder Anlagegüter und kraftstoff- und energiebezogene Emissionen, beispielsweise der Berufsverkehr der Mitarbeitenden. Zur nachgelagerten Wertschöpfungskette gehören Emissionen aus dem Transport von verkauften Produkten oder die Weiterverarbeitung verkaufter Zwischenprodukte, sowie der Gebrauch verkaufter Produkte. Der Scope 3 Standard ist die einzige international anerkannte Methode, um Emissionen in der Lieferkette zu bilanzieren. Zur Bilanzierung der

Treibhausgasemissionen bietet das GHG Protocol verschiedene branchenspezifische Werkzeuge und Handbücher, beispielsweise für die Aluminiumindustrie an [20].

# 3 Digitalisierung als Kernelement einer nachhaltigen Produktion

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten eingeleitet führt die zusätzliche Betrachtung der Nachhaltigkeit im Spannungsfeld aus Qualität, Kosten und Zeit zu einer deutlichen Komplexitätssteigerung, die lediglich über die Möglichkeiten der Digitalisierung transparent und handhabbar gemacht werden kann. Die Digitalisierung bildet ein Kernelement in der Nachhaltigkeitsbetrachtung von komplexen Systemen, da mithilfe der digitalen Vernetzung und Bereitstellung von Daten eine prozess- oder logistikkettenübergreifende Wirkungsabschätzung von Umweltfaktoren überhaupt erst möglich wird. Wesentliche Bausteine stellen dabei der Digitale Schatten und der Digitale Zwilling dar: Sie leisten die Verknüpfung sämtlicher Daten und Informationen zu einem Asset über Systemgrenzen sowie die gesamte Historie hinweg und ermöglichen damit die Bewertung von Verbesserungspotenzialen, die durch alternative Produktlebens-zyklen entstehen können.

Das Konzept und eine der frühesten Definitionen des Digitalen Zwillings (DZ) wurde von der University of Michigan bereits 2002 als sogenanntes "Mirrored Spaces Model" vorgeschlagen und bezeichnete ein elementares Werkzeug im Product-Lifecycle-Management. Neben dem realen physischen System wurde hier ein virtuelles System eingeführt, das alle Informationen über seine physische Spiegelung oder seinen Zwilling enthält [21], [22]. Damit ist der DZ weit mehr als nur ein reiner Datensatz, der mit einem Objekt verbunden ist; vielmehr kann der DZ als virtuelle Repräsentation eines physischen Objekts gesehen werden. Der DZ deckt idealerweise alle relevanten Phasen des Lebenszyklus eines Objekts ab, von der Planung und Konstruktion über die Produktion, den Betrieb, etwaige Reparaturzyklen und schließlich das Recycling [23]. Aus dieser Perspektive heraus umfasst der DZ Modelle, die einen zeitvariablen Datensatz auf die physische Ebene heben, um eine aktuelle Darstellung eines realen Assets im virtuellen Raum zu ermöglichen.

Erste Definitionen im Umfeld der Fertigungstechnik betrachteten den DZ als das virtuelle Gegenstück zu den Produktionsressourcen und damit nicht nur zum Produkt selbst. Diese Betrachtung löste eine Debatte über die Rolle des DZ in einer angestrebten Industrie 4.0-Umgebung aus [24], [25]: Einige Autorinnen und Autoren sehen den DZ im Lebenszyklus des Produktionssystems [26] oder des Produkts [27]. Andere wiederum lösen sich vollständig von einer Unterscheidung zwischen Produkt und Produktionssystem und wollen den technischen System-Lebenszyklus als Schwerpunkt betrachten: Das System wird hier sowohl als ein Produkt verstanden (etwa während der Designphase) als auch als ein Bestandteil des Produktionssystems (etwa während des Betriebs) [23], [28-29].

Die Internationale Akademie für Produktionstechnik CIRP sieht den DZ als virtuelles Abbild eines realen Geräts, Objekts, einer Maschine, einer Dienstleistung oder eines immateriellen Prozesses, das seine Eigenschaften und sein Verhalten mithilfe von Modellen, Daten und Informationen innerhalb seines Lebenszyklus beschreibt [30].

In der Diskussion um die Umsetzung einer vernetzten adaptiven Produktion im Kontext der Industrie 4.0 sowie des Internet der Dinge (IoT) von Produktionssystemen ist neben dem Konzept des Digitalen Zwillings der Digitale Schatten (DS) ein häufig verwendeter

Begriff. Nach Kritzinger et al. ist der DS ein Modell, welches durch einen einseitigen Datenfluss mit dem Zustand eines existierenden physischen Objekts gespeist wird. Dies bedeutet, dass eine Zustandsänderung des physischen Objekts zu einer Änderung des digitalen Objekts führt, jedoch nicht umgekehrt. Im Gegensatz dazu werden bei einem DZ die Datenflüsse zwischen dem physischen und dem digitalen Objekt in beide Richtungen vollständig integriert [31].

Eine weitere Definition des DS in Bezug auf die Produktionstechnik wurde von der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) eingeführt [32]: Hier wird der DS als ein hinreichend genaues Abbild der Prozesse in der Produktion, der Entwicklung und angrenzender Bereiche gesehen, um eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten zu schaffen.

Dieser kurze Überblick über den Stand der Forschung für das Konzept des DZ und DS zeigt die Dichotomie und einen deutlichen Mangel an einem umfassenden Verständnis der relevanten Begriffe, insbesondere innerhalb der Anwendung auf dem Gebiet der Fertigungstechnik [33]. Ein gemeinsames, transparentes Verständnis des Konzepts und seiner Anforderungen steht jedoch der flächendeckenden Umsetzung und Anwendung dieser leistungsfähigen Werkzeuge im Wege. In diesem Sinne versucht die folgende Definition die Begriffe „Digitaler Zwilling“ und „Digitaler Schatten“ für den Bereich der Fertigungstechnik zu klären und zeigt weiter deren konkrete Anwendung anhand unterschiedlicher Beispiele auf.

### 3.1 Definition Digitaler Schatten und Zwilling für die Fertigungstechnik

Im folgenden Kapitel sollen die Konzepte des Digitalen Schattens (DS) und des Digitalen Zwillings (DZ) sowie ihre Wechselbeziehung im Kontext von Produktionssystemen und --prozessen kritisch reflektiert werden, um ein allgemeines Verständnis und damit eine Basis für deren Anwendung zu schaffen. Hierzu werden die folgenden Fragen beantwortet:

- Wie sollen die Begriffe Digitaler Zwilling und Schatten verstanden werden und wie genau sind diese zu unterscheiden?
- Für welche Bereiche der Fertigung gilt das Konzept des Digitalen Zwillings und Schattens?
- Was ist die Rolle des Fertigungsprozesses und welchen Beitrag leisten der Digitale Zwilling und Schatten im Rahmen einer Prozesskettenbetrachtung?
- Welcher Mehrwert entsteht in der Fertigungstechnik durch die Verwendung eines Digitalen Zwillings und Schattens?

Zunächst stellen sich die Fragen nach der Definition sowie der Unterscheidung der beiden Begriffe Digitaler Zwilling und Schatten. Wie in Bild 4 dargestellt, kann der Digitale Schatten als eine Art Vorstufe zum Digitalen Zwilling gesehen werden. Der DS schafft gewissermaßen die Datenbasis für den DZ in Form von Roh- oder Metadaten, die einem bestimmten Objekt mit räumlichem oder zeitlichem Bezug zugeordnet werden. Der Schatten beschreibt in diesem Stadium jedoch noch nicht das physikalische Objekt mit seinen Eigenschaften selbst.

Der DS ist somit als eine reine Zuordnung von Daten zu einem bestimmten Objekt zu einem bestimmten Zeitpunkt zu verstehen. Diese können z.B. in-situ Messdaten aus dem Fertigungsprozess, Metadaten oder Qualitätsdaten sein. Über die individuelle Zuordnung der Daten wird ein Bezug des virtuellen Objekts zur Realität hergestellt, d.h. es erlangt im Zuge einer Instanziierung eine eigene Identität. Der DS hat jedoch keinen Anspruch

auf die Schaffung von Erkenntnissen aus wissenschaftlicher Sicht. Der DS kann lediglich die Grundlage für eine statistische Analyse zwischen verschiedenen Instanzen eines Objekts (z.B. unterschiedlichen Werkstücken in einer Serie) oder zwischen Schritten in der Prozesskette bilden. Es könnte so z.B. mit statistischen Mitteln untersucht werden wie bestimmte Messgrößen eines Merkmals entlang der Prozesskette miteinander korrelieren oder wie die Eigenschaften zwischen Objekten der gleichen Art variieren.

Der digitale Zwilling eines Assets ist das virtuelle Abbild seines physikalischen Zustands – Zustandsänderungen sind beschrieben durch Modelle und gestützt durch Daten.

Er hat Anspruch auf Wissensschaffung und die Beschreibung von Prozess-wirkungsmechanismen (Kausalität).

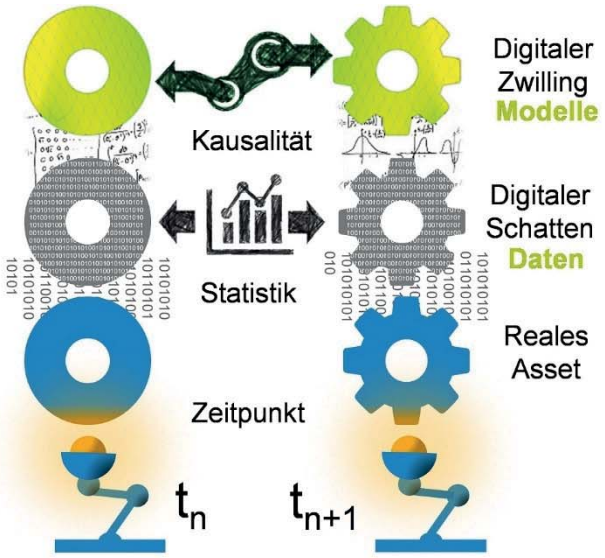



*Bild 4: Der Weg vom realen physikalischen Objekt (Asset) über den Digitalen Schatten zum Digitalen Zwilling.*

Demgegenüber steht der DZ eines Objekts als eine virtuelle Darstellung seines physikalischen Zustands: Zustandsänderungen werden hier durch Prozessmodelle beschrieben und weiter durch Daten gestützt. Der Datensatz in Form des DS wird auf die physikalische Ebene in Form des DZ durch Modelle oder Simulationen vertikal weiterentwickelt (vgl. Bild 4, rechts).

### 3.2 Objekte und Systemgrenzen für den Digitalen Schatten und Zwilling

Ein wesentliches Kernattribut des Konzepts „Digitaler Schatten und Zwilling“ ist die Möglichkeit einer zeitlich referenzierten Darstellung von physikalischen Zuständen realer Objekte in einer virtuellen Umgebung über den Lebenszyklus eines Objektes oder Assets. Der DS und der DZ beziehen sich also auf Objekte in der realen Welt, welche beschreibbare und üblicherweise auch veränderliche Eigenschaften entlang ihres Lebenszyklus besitzen. Ganz praktisch könnte dies aus der Sicht des Herstellers im Kontext der Produktionstechnik z.B. das zu fertigende Werkstück, ein Schneidwerkzeug die Werkzeugmaschine, oder auch ein ganzer Lebenszyklusabschnitt mit dem Ziel einer Nachhaltigkeitsbetrachtung eines Assets sein. Der genaue Betrachtungsrahmen definiert dabei die Stellen, an denen eine Abgrenzung unterschiedlicher Objekte in einem System erfolgen muss.

Für eine eher globale Betrachtung mag es daher ausreichen, ein gesamtes Produktionssystem, eine Maschinenhalle oder Produktionslinie zu betrachten. Speziell für die Fertigungstechnik ist aber eine deutlich feinere Granularität auf der Ebene Bauteil, Werkzeug und Maschine essentiell, vgl. Bild 5. In diesem Beispiel müsste aus Sicht des Bauteils eine Abgrenzung zwischen Maschine und Werkzeug nicht notwendigerweise erfolgen und das Fräswerkzeug könnte ebenso als Teil der Maschine definiert werden. Aus der Sicht von Ingenieurinnen und Ingenieuren ist jedoch eine getrennte Betrachtung

sinnvoll, da das Werkzeug im Vergleich zur Maschine einer deutlich höheren Verschleißrate unterliegt und somit der Einfluss auf die Nachhaltigkeit über den Produktionszyklus eines einzigen Bauteils nicht vernachlässigbar ist.

Die Wahl der Systemgrenzen hängt daher sehr stark davon ab, in welcher Weise und mit welcher zeitlichen und örtlichen Auflösung ein Lebenszyklus oder -zyklusabschnitt erfasst und betrachtet werden soll. Diese Problematik ist eng mit der Frage nach der Relevanz von Information und dem Wert von Daten verknüpft, der im weiteren Verlauf dieses Beitrags noch detaillierter diskutiert wird (vgl. Abschnitt 3.3).

Ein DS oder DZ lässt sich also für alle realen Objekte oder Systeme ableiten, welche prozessbedingte Zustandsänderungen erfahren. Der Fertigungsprozess selbst hat jedoch keinen Lebenszyklus und kann nicht als Objekt betrachtet werden. Folglich ist eine Beschreibung von Prozessen mit Hilfe eines DS oder DZ nicht möglich. Prozesse müssen vielmehr als die Übertragungsfunktion verstanden werden, welche eine Zustandsänderung interagierender Objekte herbeiführt, d.h. es existiert sehr wohl ein Prozessmodell, welches die Beziehung zwischen den DS und DZ in ihren unterschiedlichen Zuständen herstellt.

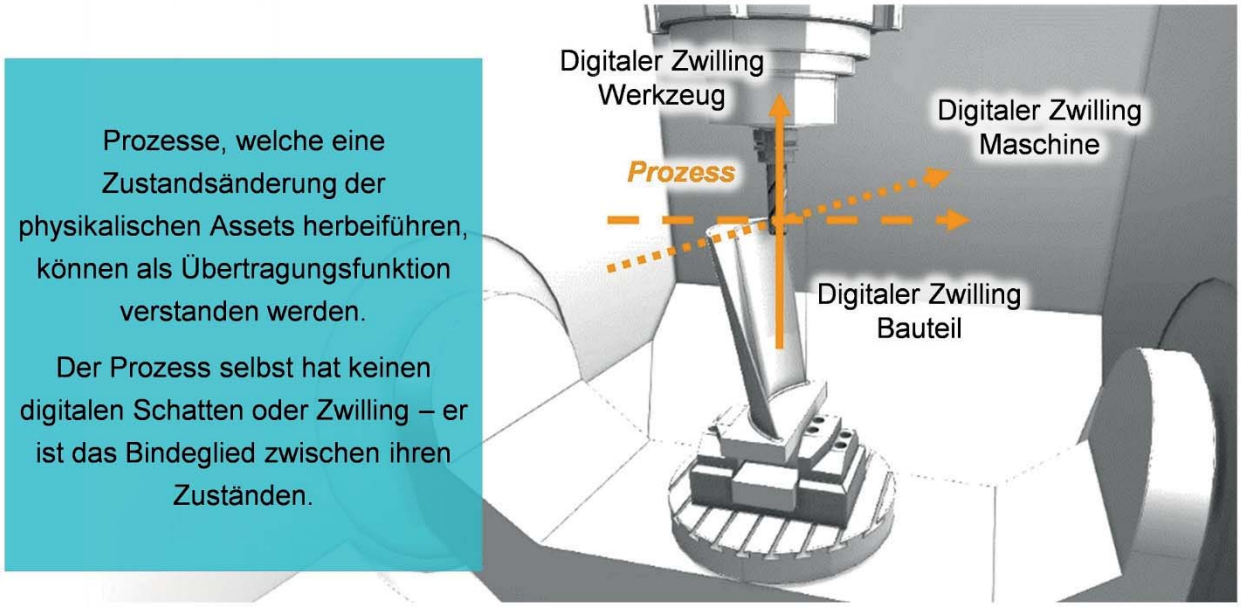



*Bild 5: Unterschiedliche Objekte eines Fertigungsprozesses und deren Interaktion in Form des Fertigungsprozesses.*

Im Gegensatz zum Idealbild, dass alle erfassbaren Daten im DS zeitlich referenziert abgelegt und dass über Modelle im DZ alle physikalischen Eigenschaften des Objekts abgebildet werden können, besteht in der Realität oft die Frage nach der Wirtschaftlichkeit der Datenhaltung sowie der Relevanz der repräsentierten Objekteigenschaften: Folglich müssen die Daten, die den zugehörigen DS bilden, durch objektspezifische Anforderungen festgelegt werden und der DZ diejenigen Eigenschaften repräsentieren, die im Sinne der weiteren Nutzung von Interesse sind. Struktur und Auflösung der zeitlichen Zustände im DZ sind also anwendungsorientiert zu betrachten und müssen nicht allgemein gültig sein. Die Relevanz einer Eigenschaft kann nur aus ingenieur- und naturwissenschaftlicher Sicht bewertet werden.

## 3.3 Unsicherheit und Relevanz von Daten und Information

Das Zielbild alle realen Objekteigenschaften möglichst gut in einer virtuellen Umgebung widerzuspiegeln, impliziert bereits, dass der DZ eine einzige Wahrheitsquelle beinhalten sollte: Es gibt demnach nur einen und keinen zweiten DZ eines realen Objekts, der alle für seine Zwecke relevanten Eigenschaften entlang des Lebenszyklus eines spezifischen Objekts enthält und kombiniert, vgl. Bild 6. Nur die Integration von physikalischen Eigenschaften in einer einzigen Domäne ermöglicht die Betrachtung ihrer gegenseitigen Wechselwirkungen.

Anders verhält sich dies bei den DS, welche verschiedenen Datenquellen entspringen können. Wie bereits in Abschnitt 3.2 angeführt geht es beim DS zunächst um eine reine Allokation von Daten sowie dem zugehörigen Metadatenstamm zu einem Objekt. Diese Zuordnung lässt eine Signifikanz in der Korrelation oder gar Kausalität in der Beziehung zwischen unterschiedlichen Ausprägungen noch völlig offen. Die einzelnen DS können weiter unterschiedliche, aber auch redundante Informationen über reale Objekteigenschaften enthalten, die entweder zu einer verbesserten Informationslage insgesamt oder einer höheren Konfidenz einer speziellen Information im DZ führen.

*Bild 6: Der individuelle digitale Zwilling beschreibt den Zustand eines eindeutigen physischen Objekts und kann durch Digitale Schatten unterschiedlicher Quellen gestützt werden.*

Die Frage nach der Unsicherheit oder Unschärfe von Daten und Informationen ist eine eigene Dimension des DS und DZ und daher getrennt von der Information an sich zu behandeln. Auf dem Weg vom DS zum DZ werden aus Daten mithilfe von Modellen sukzessive höherwertige Informationen erzeugt, die eine Aussage über die Objekteigenschaften eines Assets enthalten. Dabei können mit aufwändigen Modellen, die eine Vielzahl an Parametern und Annahmen beinhalten, oftmals Eigenschaften oder Zustände prädiziert werden, die einer direkten Messung am realen Objekt nicht ohne weiteres zugänglich wären. Trotz des hochwertigen Informationsgehalts ist die Frage nach der Validität der auf diese Weise generierten Aussagen immer noch ungeklärt. Diese kann nur durch eine durchgängige Quantifizierung aller Unsicherheiten erfolgen. Bei der Unsicherheitsquantifizierung müssen dabei alle in Bezug auf die Aussage stehenden Teilunsicherheiten berücksichtigt werden. Dies sind

- die Unsicherheiten bei der Datenerfassung, bspw. wie valide sind die einzelnen DS der unterschiedlichen Quellen ähnlich der Bewertung der Unsicherheit bei einer Messung (analog zur Prüfmittelfähigkeit in Qualitätssicherungsprozessen),
- die Unsicherheiten in den Modellen, die zur „Veredelung“ der Daten im DS verwendet werden, bspw. wie valide ist die Gültigkeit des Modells im relevanten Bereich (etwa wie genau kann ein analytisches Modell die reale Physik wiedergeben oder wie ist die statistische Basis bei Verwendung eines datengetriebenen Modells zu bewerten),
- und zuletzt die Unsicherheiten der Modelle, welche zur Prognose von Eigenschaften verwendet werden, bspw. bei Modellen, die zur Prädiktion von Objekteigenschaften, Zuständen und Erwartungswerten oder bei der probabilistischen Berechnung von Lebensdauerprognosen eines Bauteils eingesetzt werden.

Diese Punkte können direkt auf die Betrachtung von Nachhaltigkeitsaspekten, etwa im Rahmen der Modellierung von Prozessen oder Lebenszyklusabschnitten mit kommerziell verfügbaren Softwarelösungen und Datenbanken wie GaBi, Probas oder Ecoinvent zur Erstellung von Sachbilanzen übertragen werden. Die Prozessflüsse und Daten sind in diesen Fällen ebenfalls mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Abhängig von der Datenqualität unterscheidet Weidema beispielsweise zwischen fünf Qualitätskategorien [34]:

- *Reliability:* Zuverlässigkeit der Daten hinsichtlich der Art der Datenakquise (Schätzung vs. Messung)
- *Completeness*: Aussage über die Vollständigkeit des Datensatzes
- *Temporal Correlation*: Gibt Auskunft über die zeitliche Vergleichbarkeit der Daten
- *Geographical Correlation*: Qualitative Aussage über die geographisches Charakterisierung der Daten
- *Technological Correlation*: Aussage über die technologische Validität der Daten

Nachdem die Daten, Modelle, der resultierende Informationsgehalt sowie die Validität oder – reziprok – die Unsicherheit der Information diskutiert wurde, stellt sich abschließend die Frage nach ihrer Relevanz. Bereits in Abschnitt 3.1 wurde Boschert [23] angeführt, der den Digitalen Zwilling nicht als „Datenmonster“ verstanden wissen wollte, welches alle möglichen Informationen zu einem Objekt verbindet. Statt einer Vollständigkeit, sollte der DZ jede Information vor dem Hintergrund ihres Nutzens für das System betrachten und bewerten.

Die Relevanz der im DS oder DZ abgebildeten Zustände und Informationen sollte sich daher stark nach den Anforderungen an das betrachtete Objekt richten. Die Relevanz der Information unterliegt damit ihrer Bewertung vor dem Hintergrund eines „Lastenhefts“, d.h. der Gesamtheit der Anforderungen, die an das Objekt gestellt werden. In einem ingenieurwissenschaftlichen Sinne können dies etwa Grenzwerte oder Toleranzen sein, die eine Aussage darüber ermöglichen, inwieweit ein Produkt von seinem Nominal oder Idealzustand abweichen darf, sodass es immer noch ein Mindestmaß im Sinne seiner Spezifikation erfüllt – analog sind Spezifikationen, die die ökologische Nachhaltigkeit eines Produkts oder Lebenszyklusabschnitts betreffen vorstellbar.

Eine essentielle Eigenschaft des DS oder DZ ist hier, dass mit Hilfe einer digitalen Infrastruktur eine handhabbare Betrachtung eines Sets von individuellen Eigenschaften eines Assets möglich ist und diese nicht in Form von statistischen Häufigkeitsverteilungen

über eine Serie mehrerer Produkte angenommen werden muss. Es kann daher das „Individuum“ aus der Masse herausgelöst und im Weiteren als solches betrachtet werden. Dies gibt den „scharfen“ Blick auf die Performance von speziellen Eigenschaften im Verlauf von Prozessen frei, die andernfalls nur „verschwommen“ über Grundgesamtheiten und Stichproben möglich wäre.

### 3.4 Digital Framework als Architektur für die digitalisierte Fertigung

Um die Verarbeitung großer Datensätze systematisch zu realisieren, ist eine Big-Data Architektur innerhalb der Fertigungsdomäne unabdingbar. Im Folgenden wird ein Digital-Twin-Framework für die Fertigung dargestellt, welches die domänenspezifische Implementierung einer Big-Data-Lambda-Architektur mit der Definition der ISO 23247 (Automatisierungssysteme und Integration - Digital-Twin-Framework für die Fertigung) [35] kombiniert. Die Lambda-Architektur, welche ursprünglich von Nathan Marz [36] definiert wurde, umfasst zwei Arten von Datenflüssen und vier Hauptelemente:

- *Serving Layer*: Speicherung und Bereitstellung von verarbeiteten Daten für spezifische Dienste oder Nutzende
- *Batch Layer*: „Batchweise“/Nicht-Echtzeit-Verarbeitung großer Datenmengen (auch als "cold path" bezeichnet)
- *Stream Layer*: Latenzarme, echtzeitfähige oder echtzeitnahe Verarbeitung kleiner, schnell bewegter Datenmengen (auch als "hot path" bezeichnet)
- *Data Source*: Bereitstellung von Daten aus Datenbanken oder Datenströmen

Die Lambda-Architektur ist als Basisstruktur für die Fertigungsdomäne gut geeignet, da der Batch-Layer für die Verarbeitung großer Datenmengen etwa in der Zerspanung (z.B. Millionen von CNC-Datenpunkten während eines einzigen Bearbeitungsvorgangs) mit den komplexen Technologiemodellen der Zerspanungsdomäne (z.B. Dexel-basierte numerische Eingriffssimulation) ein zutreffendes Grundmodell bildet. Gleichzeitig ist der Stream-Layer in der Lage kleine und teils schnelllebige Datensätze für Überwachungs- und Steuerungszwecke zu verarbeiten; als Beispiele hierzu können Temperatur-, Schallemissions- oder Kühlmittelsensordaten genannt werden, die im Sinne der Prozessführung genutzt und kurz darauf wieder verworfen werden. Bei der Implementierung eines domänenspezifischen Digital-Twin-Frameworks für die Zerspanung muss der Big-Data-Technologie-Stack in der Lambda-Architektur mit den domänenspezifischen Ressourcen, Anwendungen und Diensten der Zerspanungs-domäne, sowie dem CAx integriert werden.

Das allgemeine Digital-Twin-Framework für die Fertigung nach ISO 23247 unterteilt die Fertigungsdomäne in vier Hauptbereiche: die Benutzerdomäne (eng. *User Domain*), die Kerndomäne (engl. *Core Domain*), die Datenerfassungs- und Gerätesteuerungsdomäne (engl. *Data Collection Domain*) sowie die beobachtbare Fertigungsdomäne (engl. *Observable Manufacturing Domain*):

- *User Domain*: Menschen, Geräte, Systeme, welche Anwendungen und Dienste aus der Kerndomäne nutzen
- *Core Domain*: Betrieb und Verwaltung des digitalen Zwillings (Bereitstellung, Überwachung, Optimierung etc.)
- *Data Collection Domain*: Überwachung und Sammlung von Daten aus sensorischen Geräten

- *Observable Manufacturing Domain*: Physische Fertigungsressourcen wie Personal, Ausrüstung, Material usw.

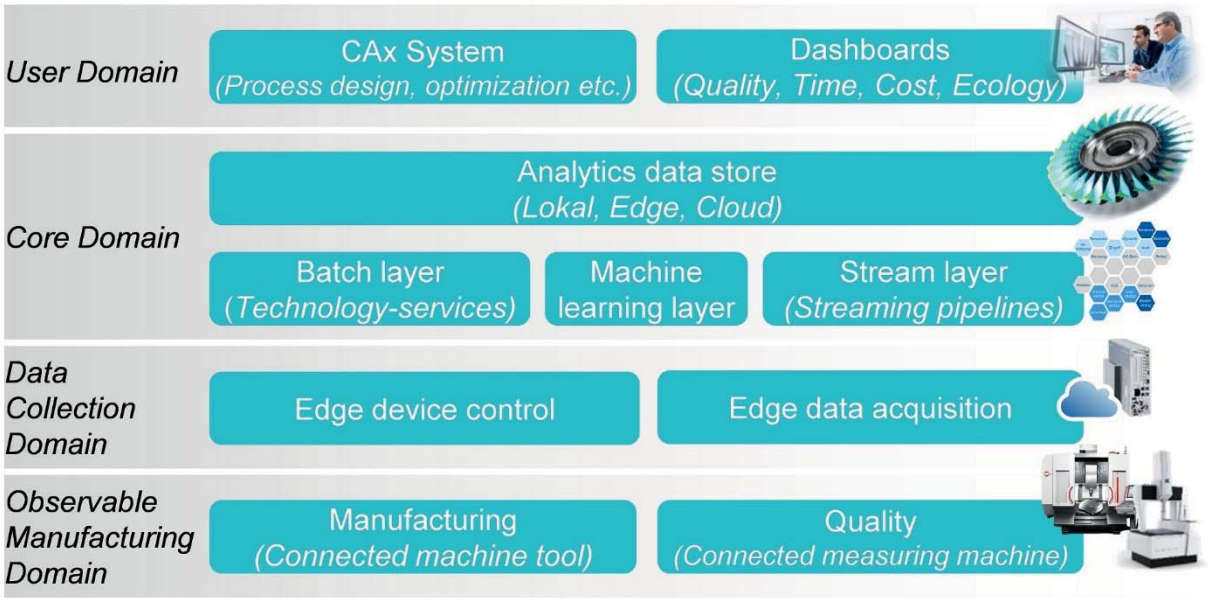



*Bild 7: Digital Twin Framework für die Fertigungsdomäne [37]*

Bild 7 veranschaulicht die Kombination der Lambda-Architektur mit dem domänenbasierten Referenzmodell der ISO 23247 sowie die Abbildung der spezifischen Ressourcen, Anwendungen und Dienste der Bearbeitungsdomäne auf das Framework.

## 4 Praxisbeispiele – Ökologische Nachhaltigkeit in der Fertigung

Nachdem nun in den vorangegangenen Abschnitten auf die Nachhaltigkeit in der Produktionstechnik und die Notwendigkeit nach einer digitalen Infrastruktur zur Schaffung von Transparenz und Handhabbarkeit der Komplexität eingegangen wurde, sollen im folgenden Abschnitt die Umsetzung der beschriebenen Ansätze und Konzepte anhand eines praxisnahen Beispiels vertieft werden. Das Beispiel bezieht sich dabei auf die fertigungstechnische Herstellung eines integralen Verdichterrotors, einer sogenannten Blisk (engl. Blade-Integrated Disk) im Triebwerksbau und geht mit einer detaillierten Analyse der Ressourcenverbräuche zur Herstellung eines Fräswerkzeugs als ein substantielles Element in der Bearbeitung der Verdichterbeschaufelung des Bauteils auch auf die Effekte von Scope 3 Emissionen ein.

Bliskbauteile im Hochdruckverdichter zählen zu den besonders sicherheitsrelevanten Bauteilen eines Flugtriebwerks. Im Betrieb sind diese extremen mechanischen und thermischen Belastungen ausgesetzt. Gleichzeitig müssen die Sicherheitsaufschläge auf die Komponenten so gering wie möglich gehalten werden, um die Bauteilmassen in einem Bereich zu halten, der höchste Leistungen und einen effizienten Betrieb erlauben. Ein hohes Maß an Sicherheit kann daher nur durch eine detaillierte Auslegung von Bauteil und Herstellprozesskette erfolgen sowie der anschließenden Überwachung aller sicherheitsrelevanten Prozessschritte in der Herstellung selbst. Im Kontext der Nachhaltigkeit sind diese Aspekte eher der monetären Wertigkeit des Produktes selbst innerhalb des Lebenszyklus zuzuschreiben.

Durch die hohen Anforderungen an die Qualifizierung, Validierung und Dokumentation aller Fertigungsschritte der gesamten Herstellprozesskette sind die Herstellerunternehmen von Triebwerken bereits seit Jahrzehnten in der Vorreiterrolle bei der industriellen Verwendung von Daten, Modellen und Simulationen zur Verbesserung ihrer Vorhersagefähigkeiten der Bauteileigenschaften über unterschiedliche Abschnitte des Produktlebenszyklus. Nur durch eine möglichst präzise Information über die tatsächlichen individuellen Komponenteneigenschaften können Bauteile nächster Generationen mit noch anspruchsvolleren Produktspezifikationen unter den geforderten Randbedingungen hinsichtlich Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit realisiert werden. Konkret bedeutet dies, dass Daten, die relevante Produkteigenschaften repräsentieren, nicht nur durch gelegentliche Messungen und selektive Qualitätssicherungszyklen gewonnen werden; vielmehr sollen diese ständig eine kontinuierliche Aussage über den aktuellen Produktzustand gewährleisten.

Das Beispiel der frästechnischen Bearbeitung der Verdichterbeschaufelung einer Blisk zeigt, wie eine prozessbegleitende Aussage über den Bauteilzustand sowie die Nachhaltigkeit der Prozesssequenz erfolgen kann. Nach aktuellem Stand der Technik liegt die Bearbeitungsdauer für Schaufelfräsprozesse für moderne Bauteildesigns im Bereich mehrerer zehn Stunden. Während dieser Sequenz liegt heute üblicherweise keine Information über den Bauteilzustand und Ressourcenverbrach vor, da eine direkte Messung in der Maschine nach aktuellem Stand der Technik nicht möglich ist. Dennoch werden von der Werkzeugmaschine während der Bearbeitung ständig Daten erzeugt, die zur Regelung der Maschinenachsen verwendet und gleich danach wieder verworfen werden. Dies gilt insbesondere auch für Daten, die Aussagen über den Energie- und Ressourcenverbrauch eines Prozesses treffen. Diese sogenannten LCI-Daten bilden wie zuvor erläutert die Basis für eine Ökobilanzierung des Prozesses. An dieser Stelle muss zwischen der datenbasierten Bewertung der Bauteilqualität und der ökologischen Bewertung des Fertigungsprozesses unterschieden werden, wobei beide Aspekte eine spezifische Aussage hinsichtlich der Nachhaltigkeit des Produkts insgesamt ermöglichen. Die datengestützte Bewertung der Bauteilqualität wurde bereits in einem eigenen Beitrag detailliert beschrieben [1]. Nachfolgend soll daher speziell auf die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit des Fertigungsprozesses eingegangen werden.

### 4.1 Ökologische Nachhaltigkeitsbetrachtung am Beispiel Blisk

Neben prozessbegleitenden Aussagen über technologische und qualitätsrelevante Aspekte von Produkten bietet die Digitalisierung die Möglichkeit Bauteile und Prozessketten auch auf Basis neuer Zielgrößen betrachten zu können, die neben den Produkteigenschaften oder monetären Werten von Interesse sind. Ein Beispiel hierzu ist der Einsatz von Ressourcen entlang der Wertschöpfungskette: Der Digitale Schatten und Zwilling müssen als „Enabler“ für eine objektive Nachhaltigkeitsbewertung unterschiedlicher, technisch machbarer Fertigungsszenarien für ein Produkt verstanden werden und bilden eine der wichtigsten Grundlagen für eine sowohl ressourcen-schonende, nachhaltige als auch effiziente Produktion. Dabei können sie insbesondere dazu beitragen, Produktionen auch für verschiedene Produkte mit geringen Stückzahlen über eine effiziente sowie schnelle Prozessauslegung hochflexibel zu gestalten. Nur so können Produktionsressourcen optimal und damit nachhaltig ausgenutzt werden. Mit der Information über die Energie- und Ressourcenverbräuche ist nicht nur eine detaillierte Bewertung der Fertigungskosten für jedes gefertigte Merkmal möglich – vielmehr erlaubt die Einbeziehung der Informationen über die Verbräuche im produzierenden System weiter eine Aussage über den tatsächlichen Energieeinsatz und die $CO_2$-Emissionen, die durch die Bearbeitung freigesetzt werden. Im Folgenden soll exemplarisch am Beispiel

der Fräsbearbeitung zur Blisk-Fertigung eine Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040 gezeigt werden.

**Ziel und Untersuchungsrahmen**

In einem ersten Schritt müssen ein Untersuchungsrahmen und eine konkrete Zielvorgabe hinsichtlich des zu untersuchenden Produkts als funktionelle Einheit bzw. der zu analysierenden Prozesse definiert werden. Die funktionelle Einheit ist im vorliegenden Fall eine Titanblisk. Die Blisk-Fertigung ist gekennzeichnet durch eine komplexe Prozesskette, welche grundsätzlich durch hier sieben generische Prozessschritte beschrieben wird (Bild 8, rechts) [38]. Das vorliegende Fallbeispiel fokussiert speziell auf die 5-Achs-Fräsbearbeitung der Blisk als primärer Schritt der Formgebung der Verdichterbeschaufelung innerhalb der Fertigungskette. Im weiteren Verlauf wird jedoch auch Bezug zu den übrigen Prozessschritten als Teil des Lebenszyklusabschnitt „Produktion“ genommen, um die prinzipielle Methodik zur Datenakquise für die gesamte Prozesskette und die entsprechende Qualität des Datenbestandes zu erläutern.

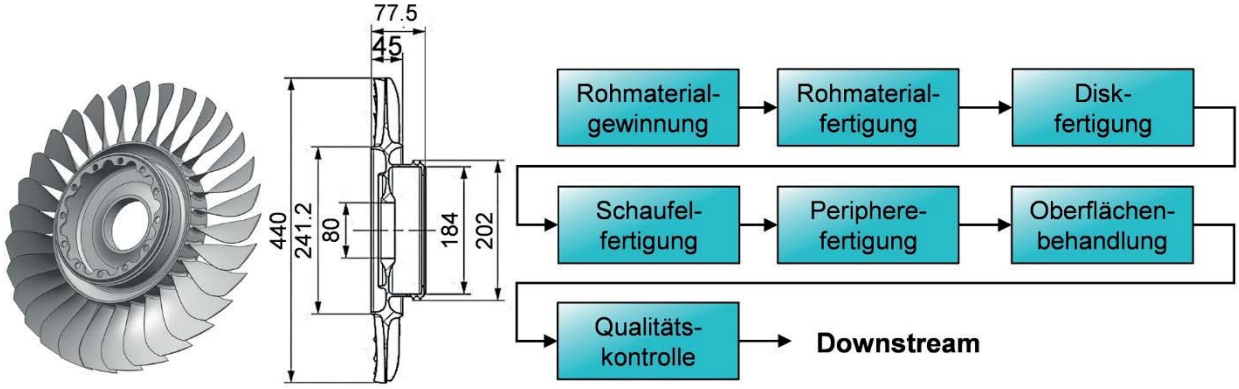



*Bild 8: Prozesskette zur Blisk-Herstellung [38]*

**Sachbilanz**

Wie zuvor beschrieben, können neben den klassischen Prozessdaten auch Daten zu Ressourcenverbräuchen aufgenommen und verarbeitet werden. Diese sogenannten LCI-daten (Life-Cycle-Inventory) bilden, wie zuvor in Kapitel 2 beschrieben, die zweite Säule einer Ökobilanz (Life-Cycle-Assessment). Diese Daten können entweder vorhandenen LCA-Datenbanken entnommen oder müssen während der jeweiligen Fertigungsschritte akquiriert werden. Speziell Daten zur elektrischen Energieerzeugung oder Rohmaterialgewinnung von beispielsweise Eisen und Titan können softwarebasierten Ökobilanzdatenbanken entnommen werden. Letztere umfassen die Prozesse, die zum Erzabbau, Transport und zur Aufbereitung der reinen Legierungselemente zählen. Die Rohteilfertigung umfasst Subprozesse wie etwa das Gießen, Wärmebehandlungsprozesse sowie das Schmieden des Rohteils. Die Daten zu den Ressourcenverbräuchen dieser Prozesse sind vornehmlich entsprechender Fachliteratur zu entnehmen oder basieren auf Expertenwissen.

Die Drehkontur- und Schaufelfertigung sind die zentralen Formgebungsprozesse bei der Blisk-Herstellung. Die Drehkonturfertigung wird mittels Dreh- und die Schaufelfertigung mittels 5-Achs-Fräsprozessen realisiert. Letztere sollen hier näher beleuchtet werden. Bei der Schaufelfertigung werden mittels 5-Achs-Fräsbearbeitung die Verdichterschaufeln zunächst vorgeschruppt, dann vorgeschlichtet und schließlich final geschlichtet.

Zu den primären Energie- und Stoffströmen bei der Fräsbearbeitung zählen hier:

- *Elektrischer Stromverbrauch*
- *Kühlschmierstoffverbrauch*
- *Druckluftverbrauch*

Die LCI-Daten für den Fräsprozess können sowohl intern über den NC-Kernel der Fräsmaschine als auch unter Einsatz externer Sensorik erfasst werden. Die Akquise und Verarbeitung der LCI-Daten werden gemäß des in Abschnitt 3.4 eingeführten Big Data Frameworks definiert und geordnet. Bild 9 zeigt beispielhaft die LCI-Datenketten zum Kühlschmierstoffverbrauch und Stromverbrauch innerhalb der eingeführten digitalen Infrastruktur.

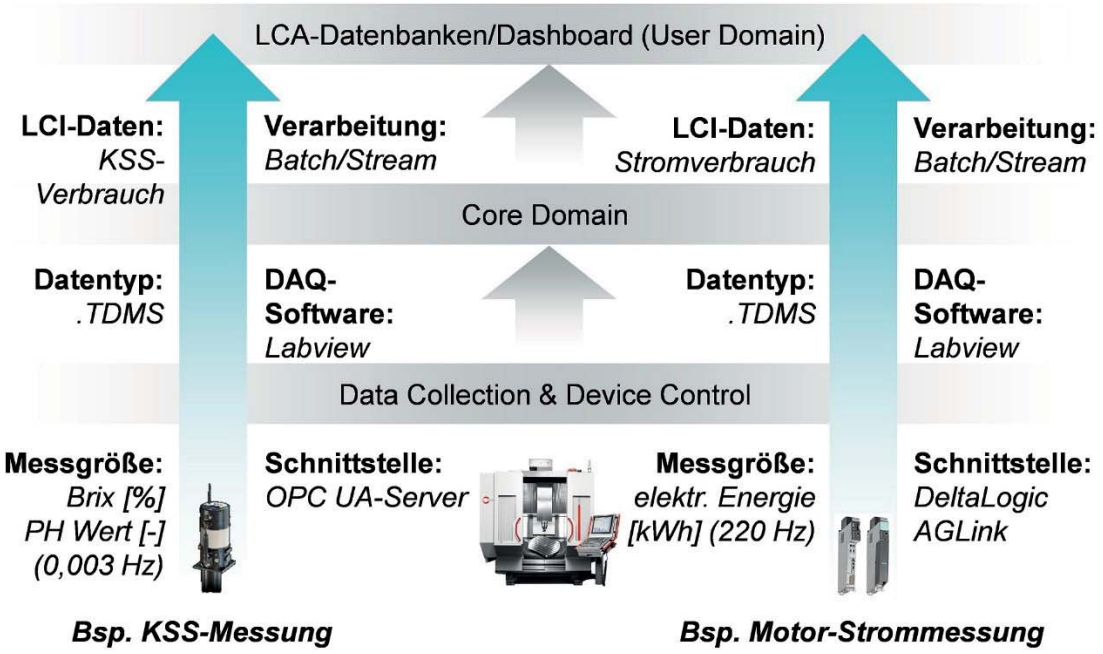
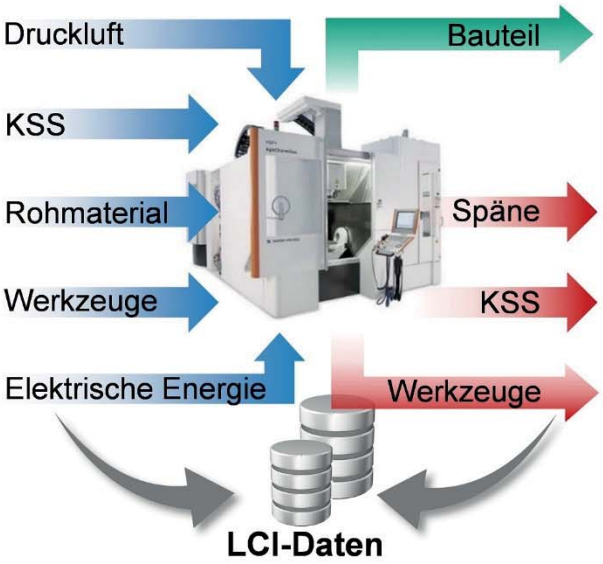



*Bild 9: LCI-Datenkette eingebettet in eine digitale Infrastruktur*

Da die Rohdaten mit unterschiedlichen Frequenzen über verschiedene Schnittstellen im „Data-Collection-Layer“ aufgenommen werden, müssen diese in der „Core Domain“ zunächst aufbereitet werden, um schließlich in der „User-Domain“ für die Benutzerinnen und Benutzer in Form von vollwertigen LCI-Daten bereitgestellt zu werden. Beim vorliegenden Beispiel der Fertigung einer Titanblisk mit einem Durchmesser von 440 mm und einer Anzahl von insgesamt 30 Verdichterschaufeln wurden folgende Werte während der Fräsbearbeitung gemessen (vgl. Bild 10) [39]. Neben elektrischer Energie, Druckluft und Kühlschmierstoff kommen als weiteres essentielles Verbrauchsgut Hartmetall-fräswerkzeuge aus Wolframkarbid mit Kobaltbinder zum Einsatz. Wolfram und Kobalt sind von Seiten der Europäischen Union als besonders „kritische“ Ressource gelistet. Dies hat sozio-ökonomische Gründe, da beispielsweise Kobalt als Rohstoff unter schwierigen Bedingungen in Zentralafrika abgebaut wird und der Rohstoff somit auch auf einer rein gesellschaftlich-sozialen Ebene als weniger nachhaltig eingestuft wird. [40]

Abhängig vom Rotordesign werden Scheibenelemente wie die sogenannten „Scallops“ oder auch Bohrungen nachfolgend zur Bearbeitung der Verdichterschaufeln gefertigt. Die Ressourcenverbräuche sind qualitativ vergleichbar mit denjenigen des Fräsprozesses zur Schaufelfertigung. Quantitativ fällt dieser Bearbeitungsschritt jedoch

im direkten Vergleich geringfügiger aus, da die Bearbeitungsdauer in der Regel deutlich kürzer ist.




| Flows | Wert | Einheit |
|---|---|---|
| Elektr. Energie | 1130 | kWh |
| Druckluft | 1350 | m³ |
| Rohmaterial | 17.8 | kg |
| Kühlschmier-stoff | 225 | l |
| Fräswerkzeuge | 16 | - |
| Späne | 14.1 | kg |
| Gefräste Blisk | 3.7 | kg |

*Bild 10: LCI-Daten der Fräsbearbeitung einer Ti-Blisk [39]*

Die folgenden Prozessschritte der Blisk-Nachbearbeitung sind stark von der Spezifikation des genauen Bauteils abhängig: Typische Prozessfolgen für Verdichterrotoren sind etwa Beschichtungen als Verschleißschutz, das Kugelstrahlen als ein spezifischer Prozess zur lokalen Verfestigung des Materials in besonders hoch belasteten Bauteilregionen oder das Gleitschleifen der Verdichterschaufeln zur Verbesserung der Oberflächenrauheiten und damit Strömungseigenschaften im Betrieb. Die Ressourcenverbräuche variieren hier somit je nach Anwendungsfall stark. Der ökologische Einfluss hier ist weniger abhängig von primären Energieverbräuchen, sondern insbesondere von Substanzen und Additiven wie beispielsweise Chromzusätzen bei Beschichtungen, welche als toxisch oder umweltbelastend gelten.

Die Qualitätskontrolle umfasst je nach Use-Case und Produktvorgaben unterschiedliche Schritte der Mess- und Prüfprozesse. Der Ressourcen- und Energieverbrauch ist vornehmlich durch die Klimatisierung der Messräume gegeben. Die reinen Energieverbräuche einer Koordinatenmessmaschine sind auch bei sehr langen Messzyklen von mehreren Stunden vergleichsweise klein.

**Wirkungsabschätzung und Interpretation**

Nach der Sachbilanzierung (LCI) folgt die Wirkungsabschätzung bzw. Interpretation der Ökobilanzierung. Die Daten zu den Energie- und Stoffströmen werden entweder händisch oder mittels entsprechender Software in Wirkungsfaktoren umgerechnet. Die wohl bekannteste und verbreitetste Kategorie ist in diesem Zusammenhang der $CO_2$-Fußabdruck auch kategorisiert als Global-Warming-Potential. Dieser Faktor wurde im vorliegenden Fallbeispiel mittels der sogenannten CML-Methode in der Softwareumgebung OpenLCA modelliert und berechnet. Die CML-Methode wurde 1992 an der Universität Leiden am Centrum vor Milieukunde (CML) entwickelt und ist im Bereich der Ökobilanzierung weit verbreitet [41]. Neben dem $CO_2$-Fußabdruck werden

auch Größen wie der “primäre Energieverbrauch” im Rahmen von Ökobilanzen häufig berechnet.

Bei einer Analyse einzelner Herstellungsprozesse spezifischer Legierungselemente zeigt sich, dass einige Metalle wie Molybdän einen deutlich höheren $CO_2$-Fußabdruck pro Masseeinheit aufweisen als beispielsweise Eisen (Bild 11, rechts). Somit führen einige Rohstoffe bereits einen deutlich höheren $CO_2$-Fußabdruck mit sich, ehe diese in den Lebenszyklusabschnitt des fertigungstechnischen Formgebungsprozesses hineintreten. Daten aus der Literatur zeigen deutlich, dass bei metallischen Werkstoffen tendenziell bereits recht hohe Energiebedarfe auf die Herstellung der Rohmaterialien entfallen, die je nach Quelle im Bereich von mehreren hundert Megajoule pro Kilogramm anzusiedeln sind. Jedoch ist die Datenlage hier je nach technischer Legierung relativ intransparent und ebenfalls stark von Recyclingquoten abhängig, die bei einer umfassenden Lebenszyklusbetrachtung (Cradle-to-Gate) eine entscheidende Rolle in der Gesamtbilanz spielen.

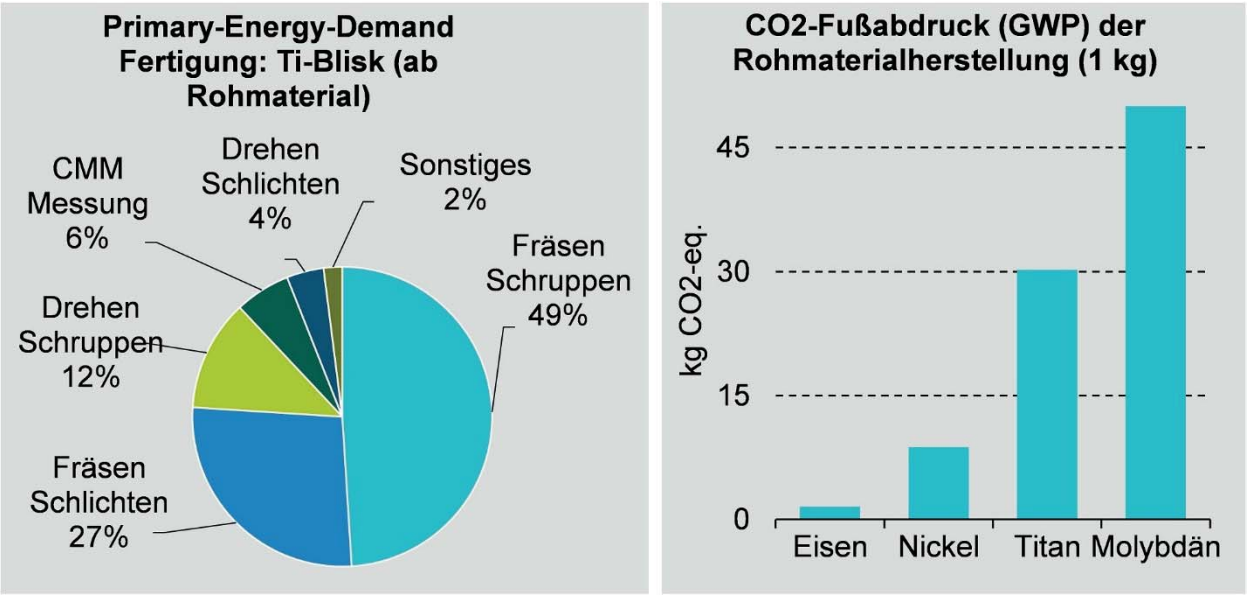



*Bild 11: Relative Anteile am Primärenergieverbrauch der einzelnen Fertigungsprozesse (links); CO2-Fußabdruck relevanter Legierungselemente (rechts)*

Eine Analyse aller Prozesse nach dem Abschnitt der Rohmaterialherstellung hinsichtlich ihres primären Energieverbrauchs zeigt, dass speziell die Fräsbearbeitung einen großen Anteil des Gesamtverbrauchs einnimmt (vgl. Bild 11 links). Bei individueller Analyse der Fräsbearbeitung einer Titan-Blisk fällt auf, dass eine grundsätzlich sehr hohe „Buy-to-Fly-Ratio“, d.h. effektives Zerspanvolumen, von ca. 80 % zum vorgedrehten Bauteil vorliegt (Bild 10, rechts). Der Kühlschmierstoff-, Druckluft- und elektrische Energieverbrauch verursachen außerdem umgerechnet einen $CO_2$-Fußabdruck von ca. 650 kg-$CO_2$ äquivalent (Scope 2). Zusätzlich zu diesen Energieverbräuchen ist der Gebrauch an Fräswerkzeugen nicht zu vernachlässigen. Diese weisen selbst eine komplexe Herstellungsvorkette, welche im folgenden Abschnitt detaillierter erläutert wird, auf.

## 4.2 Erweiterung der Nachhaltigkeitsbetrachtung um die Scope 3 Emissionen

Im vorherigen Kapitel wurde die Datenaufnahme für die Erstellung des digitalen Zwillings am Beispiel der Fertigung einer Blisk vertieft. Der digitale Zwilling beinhaltet unter anderem Daten zu Prozessgrößen, Qualitätsmerkmalen sowie energetischen und stofflichen In- und Outputs, die während der Fertigung eines Produkts erzeugt werden. Diese Daten ermöglichen es, die Qualität, die Herstellzeit und die Wirtschaftlichkeit der gefertigten Produkte zu prognostizieren. Essentielle Voraussetzungen dafür sind eine hohe Qualität und Vollständigkeit der aufgenommenen Daten sowie geeignete Analyseverfahren.

Für eine Bewertung der ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit sind die erfassten Daten jedoch nicht ausreichend. Während es für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung ausreicht, den Einkaufspreis und die Lebensdauer eines Werkzeugs zu kennen, so muss für eine Nachhaltigkeitsbewertung eine möglichst vollständige Transparenz entlang der Lieferkette hergestellt werden, um etwa Umweltbelastungen und Arbeitsbedingungen sichtbar zu machen. Die Digitalisierung beginnt also nicht mit dem ersten Fertigungsprozess der Fertigungsprozessfolge, sie muss über das gefertigte Produkt hinaus den gesamten Lebenszyklus (Vorkette) einbeziehen. Die Vorkette bezeichnet dabei die Produktion der Inputs in die späteren Fertigungsschritte.

Bei der Fertigung einer Blisk erfolgt ein Großteil der Wertschöpfung durch die Bearbeitung der Verdichterbeschaufelung mittels Fräsen. Die Zerspanung des Werkstoffs ist aufgrund der hohen Verschleißwirkung von hochwarmfesten Nickelbasislegierungen auf die eingesetzten Fräswerkzeuge sehr anspruchsvoll. Im Folgenden wird die Fertigung eines Fräswerkzeugs bilanziert, um das Vorgehen für die Ermittlung von Scope 3 Emissionen der Blisk-Fertigung exemplarisch aufzuzeigen. In Versuchen wurde dazu ein Modellwerkzeug gefertigt. Um in der Versuchsreihe Ressourcen einzusparen, wurde ein Modellwerkzeug hergestellt, das wesentlich kleiner als die Werkzeuge ist, die zur Blisk-Fertigung eingesetzt werden. Das Vorgehen stützt sich auf die vier Bestandteile einer Ökobilanzierung wie in Abschnitt 2.1 vorgestellt und schließt mit einem Fazit.

### Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel ist es, die $CO_2$-Emissionen, die durch die Produktion eines VHM-Schaftfräsers (VHM: Vollhartmetall) verursacht werden, zu quantifizieren. Hierzu wurde eine Studie durchgeführt, die es ermöglicht, die bei der BLISK-Fertigung durch den Fräsprozess verursachten $CO_2$-Emissionen im Scope 3 zu berücksichtigen. Das untersuchte Produktsystem umfasst die Herstellung eines typischen VHM-Schaftfräsers, wie dieser für die 5-Achs-Bearbeitung von Bauteilen wie Blisks verwendet werden kann, vgl. Bild 12.

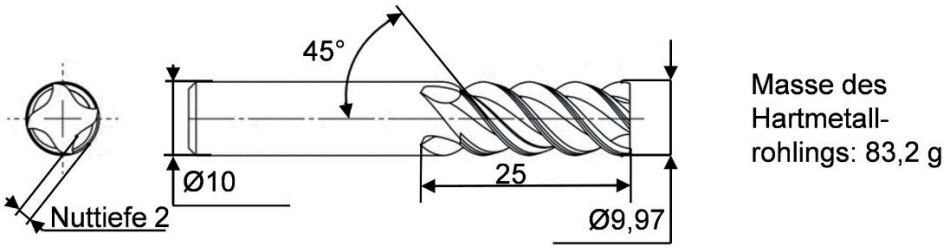



*Bild 12: Für das Fallbeispiel hergestellter VHM-Schaftfräser*

Der Untersuchungsrahmen beinhaltet die wertschöpfenden Prozessschritte der Fertigung eines VHM-Schaftfräsers. Diese sind die Herstellung des Hartmetallrohlings, das Schleifen, die Kantenpräparation sowie das Beschichten. Transport-, Handhabungs- und Lagerungsschritte wurden nicht berücksichtigt. Die Datengrundlage für die ökologische Nachhaltigkeitsbetrachtung wurde aus Versuchen gewonnen sowie teilweise aus wissenschaftlicher Literatur ermittelt. Die Produktion der eingesetzten Werkzeuge (Schleifscheiben, Abrasivmedia, Beschichtungstargets etc.) mussten aus dem Untersuchungsrahmen ausgeschlossen werden, da keine näheren Informationen zu ihrer Herstellung in Sachbilanzdatenbanken zur Verfügung standen. Um die in den Werkzeugen enthaltenen Rohstoffe und die mit ihrer Gewinnung einhergehenden Emissionen dennoch zu berücksichtigen, wurden die durch den Abbau der erforderlichen Rohstoffe verursachten Emissionen in den Untersuchungsrahmen eingeschlossen. Die funktionelle Einheit war hier die Herstellung eines VHM-Schaftfräsers.

**Sachbilanz**

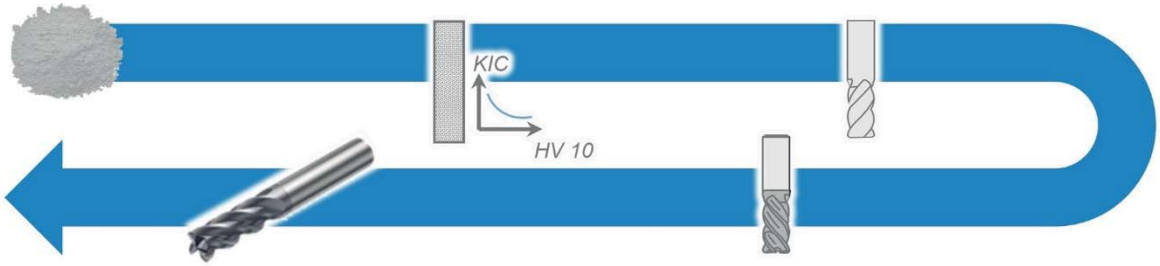
Die Herstellung des Fräsers erfolgte auf Basis eines zylindrischen Hartmetall-grundkörpers aus Wolframkarbid-Kobalt (WC-Co) mit einer Zusammensetzung aus 89,5 % Wolframkarbid, 10 % Kobalt sowie 0,5 % Zusatzkarbiden. Die Angaben wurden vom produzierenden Unternehmen des Hartmetalls zur Verfügung gestellt. Ein Experte gab an, dass es sich bei den Zusatzkarbiden vorwiegend um Niob-basierte Karbide handelt. Die wesentlichen Schritte zur Fertigung des Rohlings sind die Pulverherstellung, das Direktpressen, das Sintern sowie die mechanische Nachbearbeitung [42].

**Herstellung Hartmetallrohling**

| Energie/Stoffffluss | Größe | Quelle |
|---|---|---|
| El. Energie | 2,1 kWh | [KARP11, MA17] |
| Wolframcarbid | 0,0745 kg | Berechnung |
| Kobalt | 0,0083 kg | Berechnung |
| Niob | 0,0004 kg | Berechnung |
| Wasser | 0,1048 kg | [MA17] |
| Stickstoff | 0,0045 kg | [MA17] |
| Druckluft | 0,0088 m³ | [MA17] |

**Schleifen Makrogeometrie**

| Energie/Stoffffluss | Größe | Quelle |
|---|---|---|
| El. Energie | 0,7 kWh | Messung |
| Eisengeb. Diamantscheibe | 0,31 g | Messung |
| Phenolharzgebundene Diamantscheibe | ~ 0 g | Messung |
| Korund gebundene Korundscheibe (Abrichten) | 2,2 g | Messung |
| Kühlschmierstoff | 2,2 g | Messung |




**Beschichten Schneidenbereich**

| Energie/Stoffffluss | Größe | Quelle |
|---|---|---|
| El. Energie | 0,7 kWh | Messung |
| Beschichtungs-material AlCrN | 600 mg | Messung |
| Prozessgas Argon | 203 mg | [GASS16] |
| Prozessgas Helium | 9 mg | [GASS16] |

**Gleitschleifen Schneidkanten**

| Energie/Stoffffluss | Größe | Quelle |
|---|---|---|
| El. Energie | 0,008 kWh | Messung |
| Abrasivmedium SiC+Walnusschalen | 6,94 g | Messung |

*Bild 13: Sachbilanz der Herstellung eines VHM-Schaftfräsers*

Die Prozessführung für die spanende Bearbeitung von WC-Co Hartmetall ist besonders anspruchsvoll, da aufgrund der Werkstoffeigenschaften eine wirtschaftliche Bearbeitung zur Erzeugung der Schneidkanten sowie der Spanräume derzeit nur durch den Einsatz von Diamantschleifscheiben möglich ist [43]. Nach dem Schleifen weisen die Schneidkanten typischerweise eine inhomogene Oberfläche und geringe Schneidkantenradien auf, die z.T. noch mit Graten versehen sind. Um diese Radien zu vergrößern und die Schneiden zu homogenisieren, werden Kantenpräparationsverfahren wie das Gleitschleifen eingesetzt [44]. Abschließend erfolgt eine PVD-Beschichtung, um den Fräser vor Korrosion und Verschleiß zu schützen [45]. Auf das Beispielwerkzeug wurde eine Aluminium- (Al) Chrom- (Cr) Nitrid- (N) Schicht abgeschieden.

Die Werte der quantifizierten Energie- und Stoffflüsse sind in Bild 13 dargestellt. Die Zahlenwerte wurden auf Basis von Versuchen sowie mithilfe der angegebenen Literatur ermittelt. Die zugrunde liegende funktionelle Einheit ist die Fertigung eines VHM-Schaftfräsers im Rahmen der Studie. Um die mit dem Einsatz der Inputs einhergehende Abgabe von Elementarflüssen an die Umwelt zu quantifizieren, wurde auf verschiedene Informationsquellen zugegriffen. In Sachbilanzdatenbanken sind vergleichsweise umfangreiche Datensätze zu den durch die Gewinnung von elektrischer Energie oder von mineralischen Rohstoffen verursachten Emissionen verfügbar. Die durch die Bereitstellung von elektrischer Energie verursachten Emissionen wurden ausgehend von einem generischen europäischen Strommix mit der Datenbank ecoinvent quantifiziert [12]. Die durch den Abbau und die Weiterverarbeitung von mineralischen Rohstoffen verursachten Emissionen wurden der Datenbank ProBas entnommen [11]. Tabelle 1 zeigt eine detaillierte Auflistung der Rohstoffmengen, die im vorliegenden Fall bezogen auf ein Werkzeug eingesetzt wurden.

Bild 13 und Tabelle 1 enthalten alle Informationen, die zur Definition des Produktsystems VHM-Schaftfräser erforderlich sind. Das Produktsystem umfasst die Produkte bzw. Prozesse, die bereitgestellt bzw. durchgeführt werden, um einen VHM-Schaftfräser zu erzeugen.

*Tabelle 1: Stoffliche Zusammensetzung der Inputs der Fräserfertigung*

| Input | Stoff 1 | Stoff 2 | Stoff 3 |
|---|---|---|---|
| Wolframkarbid | Wolfram 70,03 g | Kohlenstoff 4,47 g | |
| Eisengebundene Diamantscheibe | Eisen 232,5 mg | 77,5 mg | |
| Abrasivmedium SiC+Walnusschalen | Silizium 1,596 g | Kohlenstoff 0,694 g | Walnussschalen 4,65 g |
| Beschichtungs-material AlCrN | Aluminium 174 mg | Chrom 336 mg | Stickstoff 90 mg |

**Wirkungsabschätzung und Interpretation**

Die Wirkungsabschätzung erfolgte mithilfe der Wirkungsabschätzungsmethode CML, die bereits in Abschnitt 2.1 vorgestellt wurde [41]. Tabelle 2 zeigt die berechneten Umweltwirkungen. Die Berechnung erfolgte mit der Open Source Software OpenLCA [46].

*Tabelle 2: Umweltwirkungen der Fertigung eines VHM-Schaftfräsers nach CML*

| Wirkungsindikator | Wert | Wirkungsindikator | Wert |
|---|---|---|---|
| Verzehr fossiler Rohstoffe | 6,31 MJ | Klimawandel GWP 100 | 2,36 kg $CO_2$-Äq. |
| Verzehr minarlischer Rohstoffe | 0,2 mg Sb-Äq. | Photochemische Ozonbildung | 1,9 g Ethylen-Äq. |
| Humantoxizität | 260,6 g 1,4-$C_6H_4Cl_2$-Äq. | Ozonschichtabbau | 0,2 mg CFC-11-Äq. |
| Süßwasser-ökotoxizität | 6,6 g 1,4-$C_6H_4Cl_2$-Äq. | Eutrophierung | 3,8 g $PO_4$-Aq. |
| Marine Ökotoxizität | 1,04 t 1,4-$C_6H_4Cl_2$-Äq. | Versäuerungs-potenzial | 55,2 g $SO_2$-Äq. |
| Terrestrische Ökotoxizität | 15 mg 1,4-$C_6H_4Cl_2$-Äq. | | |

Im Folgenden soll speziell der Beitrag zum Klimawandel noch einmal vertieft werden: Nach aktuellem Stand der Technik wird der Beitrag eines Stoffes zum Klimawandel durch sein Erderwärmungspotenzial (Global Warming Potential, GWP) quantifiziert. Der Indikator GWP100 beziffert dabei den Beitrag einer definierten Stoffmenge zum Klimawandel über einen Zeitraum von 100 Jahren relativ zu demjenigen Beitrag, den eine identische Menge CO2 verursachen würde. Die Einheit des Wirkungsindikators ist daher das CO2-Äquivalent (CO2-Äq.) [17]. Bild 14 zeigt, welche Energie- und Stoffflüsse den größten Beitrag zum Klimawandel leisten.

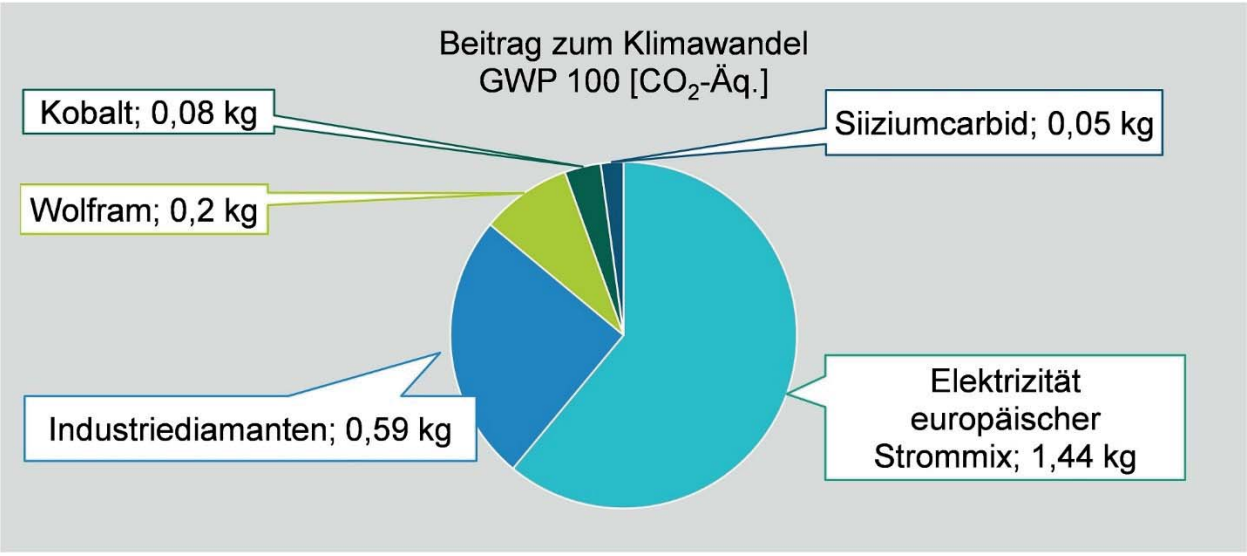



*Bild 14: CO2-Emissionen bei der Fertigung eines VHM-Fräsers*

An erster Stelle steht die Bereitstellung von elektrischer Energie (1,44 kg CO2-Äq.). Für die Berechnung wurde angenommen, dass die elektrische Energie aus einem generischen, europäischen Strommix bezogen wird. Die Daten stammen aus der ecoinvent-Datenbank. An zweiter Stelle folgen die Industriediamanten (590 g CO2-Äq.),

von denen eine Masse von 77,5 mg in der eisengebunden Diamantschleifscheibe verbraucht wurden, um die Nuten in das Fräswerkzeug einzubringen. Wolfram verursacht ca. ein Drittel der durch Diamanten verursachten Emissionen (200 g CO2-Äq.), obwohl die erforderliche Wolframmasse in Höhe von 70 g drei Größenordnungen über der Masse der eingesetzten Diamanten liegt.

Die Ergebnisse entsprechen dem Ziel einer exemplarischen Bilanzierung eines Fräswerkzeugs, um die Ermittlung der Scope 3 Emissionen bei der Fertigung eines Produkts wie etwa einer Blisk darzustellen. Für das beispielhaft verwendete Werkzeug wurden zwei Drittel der $CO_2$-Emissionen durch die Bereitstellung von elektrischer Energie verursacht. Hier bietet es sich an, durch den Bezug von erneuerbaren Energien in direkter Weise die Scope 2 Emissionen zu reduzieren. Die Reduktion der Scope 3 Emissionen stellt eine deutlich größere Herausforderung dar. Die erforderlichen Rohstoffe werden teilweise in Regionen abgebaut, in denen fossile Energieträger sehr verbreitet und zum Teil auch alternativlos sind. Für die Reduktion des Verbrauchs von Industriediamanten ist die Optimierung des Schleifprozesses ein vielversprechender Ansatz, über den der Verschleiß der Schleifscheiben beim Werkzeugschleifen reduziert werden kann. In der Nutzungsphase des Fräswerkzeugs sind die quantifizierten Umweltwirkungen auf eine neue funktionelle Einheit zu beziehen, etwa auf ein zerspantes Volumen. Je größer das Volumen ist, das die Fräswerkzeuge zerspanen, desto geringer sind die bezogen auf eine funktionelle Einheit verursachten Emissionen eines Fräsers. Weitere Ansätze sind die Wiederaufbereitung der Fräser sowie das Recycling der in den Fräsern und den Schleifwerkzeugen verwendeten Rohstoffe, welches jedoch sehr energieintensiv ist.

**Fazit**

In diesem Abschnitt wurden die vier Schritte einer Ökobilanz plakativ am Beispiel der Fertigung eines Vollhartmetall-Schaftfräsers veranschaulicht. Das Beispiel wurde gewählt, um an den vorherigen Abschnitt anzuknüpfen, in dem der Fräsprozess bei der Blisk-Fertigung vertieft wurde. Es wird deutlich, dass die systematische Quantifizierung der Scope 3 Emissionen mit einem Aufwand einhergeht, der ohne digitale Unterstützung nicht für die gesamte Lieferkette umzusetzen ist. Nur durch eine unternehmensübergreifende Erstellung von Sachbilanzen wird es möglich, die Scope 3 Emissionen eines Produkts vollständig, strukturiert und konsistent zu dokumentieren. Neben der Dokumentation stellt die automatisierte Auswertung aktuell eine Herausforderung dar, da erhobene Daten häufig manuell in Softwareumgebungen zur Ökobilanzierung übertragen werden müssen.

# 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im letzten Jahrzehnt hat das Bewusstsein für die Veränderung des Erdklimas und der Einfluss, den der Mensch mit seinem Konsum- und Mobilitätsverhalten, dem Verbrauch von Ressourcen sowie der Produktion von Gütern auf die Umwelt nimmt, besonders zugenommen. Diese Entwicklung sind manifestiert in dem Megatrend „Neo-Ökologie“, der neben weiteren Trends wie der stark zunehmenden Vernetzung von Menschen und Maschinen durch die Digitalisierung prägt. Im Zusammenhang mit den aktuellen

Entwicklungen durch die Covid-19-Pandemie und dem deutlichen Rückgang im weltweiten Handel sowie der globalen Mobilität besteht zum aktuellen Zeitpunkt ein hohes Potenzial mit der verstärkten Wiederaufnahme von wertschöpfenden und wirtschaftlichen Tätigkeiten nachhaltigere und ressourcenschonendere Ansätze zu implementieren. Die Politik sowie auch Forschungs- und Wirtschaftsförderung unterstützen diese Ansätze – etwa auf europäischer Ebene mit dem 2020 verabschiedeten „Green Recovery Plan“ im Rahmen des European Green Deal. Auch setzen sich große Unternehmen ehrgeizige Ziele für das Erreichen der Klimaneutralität für alle Unternehmensprozesse und geben diese Ziele entlang der Lieferkette an ihre zahlreichen Zulieferfirmen weiter. Die Industrie stellt sich damit ihrer gesellschaftlichen Verantwortung und sorgt sich aktiv um ihre Attraktivität für Investierende, die zunehmend mit der Einhaltung von ESG-Kriterien eine Voraussetzung für nachhaltige Investitionen definieren.

Beispiele sind die Reduktion des Einsatzes oder Verbrauchs gefährlicher Stoffe nach REACH (engl.: Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals) oder die Verknappung und Kontamination von Trinkwasser. Über eine systematische Erfassung des Ressourcenbedarfs sowie des Global Warming Potentials nach dem GHG-Protocoll (engl. Green-House-Gas-Protocoll) in den unterschiedlichen Scopes 1 bis 3 ist es möglich, den Verbrauch kritischer Rohstoffe sowie Emissionen zu quantifizieren. Durch die Betrachtung dieser Nachhaltigkeitsaspekte neben den Faktoren Qualität, Kosten und Zeit, die bereits seit mehr als einem Jahrhundert maßgeblich die industrielle Wertschöpfung prägen, steigt die Komplexität des Systems jedoch enorm, da eine Vielzahl von Parametern und Optimierungskriterien neben der technischen Machbarkeit und der wirtschaftlichen Komponente in die Betrachtung mit einbezogen werden müssen. Diese Komplexität benötigt die Digitalisierung als Hilfsmittel, um sowohl unternehmens- als auch wertschöpfungskettenübergreifend die Transparenz über die entstehenden Verbräuche zu schaffen und weiter die Optimierungspotenziale, die durch alternative Produktlebenszyklen möglich werden, handhaben zu können.

Im vorliegenden Beitrag konnte gezeigt werden, was die wesentlichen Komponenten einer Nachhaltigkeitsbewertung, angefangen von der Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen über die Sachbilanz und die Wirkungsabschätzung bis hin zur Analyse und Auswertung sind und wie diese im produktionstechnischen Kontext auf ein konkretes Produkt angewendet werden können. Hierbei konnte noch einmal gezeigt werden, welche Rollen der digitale Schatten und Zwilling bei der Zuordnung sämtlicher Daten zu einem bestimmten Asset oder Produkt im Fertigungsumfeld spielen und weiter welche Bedeutung eine geeignete digitale Infrastruktur und Big-Data-Architektur für die Umsetzung auf dem Shop-Floor besitzen. Es konnte weiter belegt werden, dass für eine fundierte und verlässliche Nachhaltigkeitsanalyse eine sehr feine Granularitätsebene benötigt wird, die ohne die Mittel der Digitalisierung nicht ohne weiteres zugänglich und handhabbar wären. Sowohl die objektive und valide Bewertung eines dezidierten Lebenszyklusabschnitts für ein anspruchsvolles technisches Produkt wie dem vorgestellten Triebwerksrotor, als auch die Optimierung in Bezug auf eine nach den vorgestellten Kriterien nachhaltigere und ressourcenschonendere Prozessketten-alternative ist zudem, ohne ein sehr detailliertes und fundiertes Domänenwissen nicht zu leisten. Der Schlüssel für die nachhaltigere Gestaltung von Prozessketten in der Produktionstechnik liegt daher in der interdisziplinären Zusammenarbeit der Bereiche Produktionstechnik, Nachhaltigkeitsbetrachtung und der technischen Informatik. In diesem Umfeld können dann aber hoch-performante Produkte entstehen, die gleichzeitig nachhaltig und ressourcenschonend hergestellt werden und die Produktionsressourcen optimal ausnutzen.

**Danksagung**

Die Autoren möchten sich ganz herzlich bei Dr. Kristian Arntz, Dr. Andreas Klink, Dr. Tim Grunwald und Daniel Schraknepper für die wertvollen Diskussionen und Anregungen in der Konzeptionsphase zur Definition des Digitalen Zwillings im Kontext Produktion und Fertigung bedanken. Für die Unterstützung bei der Ausgestaltung der Fallbeispiele mit Bezug zur ökologischen Nachhaltigkeit in der Produktion geht ein besonderer Dank an Dr. Martin Seimann und Torsten Moll. Die Arbeiten im Zusammenhang mit der ökologischen Betrachtung der Bliskbearbeitung entstanden im Rahmen der Projekttätigkeiten im WP 9.4 sowie der ecoDESIGN Transversal Activity im Rahmen des EU-geförderten Projekts „Clean Sky 2“ (Clean Sky 2 Joint Undertaking, Horizon 2020 Research and Innovation Programme Under Grant Agreement No807085 and No945541).

## 6 Literatur

[1] Bergs, T.; Gierlings, S.; Augsburger, T.: Mit dem Digitalen Zwilling Prozessgrenzen überwinden, *AWK 2020*; 2020

[2] United Nations General Assembly: Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, 2015. URL: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E.

[3] Rogall, H.: Nachhaltige Ökonomie. In: *Volkswirtschaftslehre für Sozialwissenschaftler*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013

[4] Grunwald, A.; Kopfmüller, J.: Nachhaltigkeit. Eine Einführung. 2. Auflage, Campus Verlag, Frankfurt, 2012

[5] Europäische Kommission: *Mitteilung Der Kommission. Der europäische Grüne Deal.* Brüssel, 2019; https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX:52019DC0640#document2

[6] Gupta, A.; The Decade to Deliver a Call To Business action; The United Nations Global Compact —Accenture Strategy CEO Study on Sustainability 2019; Accenture, 2019

[7] Norm DIN EN ISO 14040 (November 2009): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen

[8] Norm DIN EN ISO 14044 (Mai 2018): Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen

[9] Brundage, M. P.; Bernstein, W. Z.; Hoffenson, S.; Chang, Q.; Nishi, H.; Kliks, T.; Morris, K. C.: Analyzing environmental sustaina-bility methods for use earlier in the product lifecycle. In: *Journal of Cleaner Production*. 187. Jg., 2018, S. 877–892

[10] Döbbeler, B.: Entwicklung eines ressourceneffizienzorientierten Entscheidungsmodells zur Auswahl von Technologieketten in der Fertigungstechnik. Diss., 2016

[11] ProBas: *Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme*, 2000. URL: http://www.probas.umweltbundesamt.de/. [Stand: 07.01.2020

[12] ecoinvent: *Ecoinvent Database Version 3.5*, 2018. URL: https://www.ecoinvent.org/home.html. [Stand: 31.05.2021]

[13] GaBi: *GaBi Software Suite*, 2019. URL: http://www.gabi-software.com/deutsch/software/

[14] Moldavska, A.; Welo, T.: On the Applicability of Sustainability Assessment Tools in Manufacturing. In: *Procedia CIRP*. 29. Jg., 2015, S. 621–626

[15] Finnveden, G.; Hauschild, M. Z.; Ekvall, T.; Guinée, J.; Heijungs, R.; Hellweg, S.; Koehler, A.; Pennington, D.; Suh, S.: Recent developments in Life Cycle Assessment. In: Journal of environmental management. 91. Jg., 2009, 1, S. 1–21

[16] Bare, J.; Young, D.; Hopton, M.: Tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts (TRACI). Washington, D.C.: US Environmental Protection Agency, 2012

[17] UNEP/SETAC United Nations Environment Programme/Society of Environmental Toxicology and Chemistry Life Cycle Initiative: Global guidance on environmental life cycle impact assess-ment indicators. Volume 1. : United Nations Environment Programme, 2016

[18] IAS Plus: *Neue Standards für die Berichterstattung über Treibhausgasemissionen*, 2011. URL: https://www.iasplus.com/de/news/2011/October/neue-standards-fuer-die-berichterstattung-ueber-treibhausgasemissionen

[19] EnergieAgentur.NRW: *Emissionskategorien nach dem Greenhouse Gas Protocoll*. URL: http://www.ccf.nrw.de/navi/downloads/emissionsquellen/Emissions_Kategorien_Scopes.pdf, Zugriff: 30.06.2021

[20] Greehouse Gas Protocoll: *Corporate Value Chain (Scope 3) Standard*, 2011. URL: https://ghgprotocol.org/standards/scope-3-standard.

[21] Grieves, M.; Vickers, J.: Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, F.-J.; Flumerfelt, S.; Alves, A. (Hrsg.): *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. New Findings and Approaches. Cham: Springer, 2017, S. 85-113.

[22] Glaessgen, E.; Stargel, D.: The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles: Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located Conferences. In: *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures*, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu, 23.-26. April 2012. Red Hook, NY: Curran, 2012. DOI: https://doi.org/10.2514/6.2012-1818.

[23] Boschert, S.; Rosen, R.: Digital Twin—The Simulation Aspect. In: Hehenberger, P.; Bradley, D. (Hrsg.): *Mechatronic Futures. Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*. Cham: Springer, 2016, S. 59-74.

[24] Garetti, M.; Rosa, P.; Terzi, S.: Life Cycle Simulation for the design of Product–Service Systems. In: *Computers in Industry 63*. Jg., 2012, Nr. 4, S. 361–369.

[25] Lee, J.; Lapira, E.; Bagheri, B.; Kao, H.-a.: Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. In: *Manufacturing Letters 1*. Jg., 2013, Nr. 1, S. 38–41.

[26] Rosen, R.; Wichert, G. von; Lo, G.; Bettenhausen, K. D.: About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. In: *IFAC-PapersOnLine 48*. Jg., 2015, Nr. 3, S. 567–572.

[27] Schroeder, G. N.; Steinmetz, C.; Pereira, C. E.; Espindola, D. B.: Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange. In: *IFAC-PapersOnLine 49*. Jg., 2016, Nr. 30, S. 12–17.

[28] Canedo, A.: Industrial IoT lifecycle via digital twins. In: *Proceedings of the Eleventh IEEEACMIFIP International Conference on HardwareSoftware Codesign and System Synthesis*. Pittsburgh, PA, USA, 2.-7 Oktober 2016. New York, NY: ACM 2016. DOI: https://doi.org/10.1145/2968456.2974007.

[29] Negri, E.; Fumagalli, L.; Macchi, M.: A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. In: *Procedia Manufacturing 11*. Jg., 2017, S. 939–948.

[30] Stark, R.; Damerau, T.: Digital Twin. In: Chatti, S.; Tolio, T. (Hrsg.): *CIRP encyclopedia of production engineering*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2019.

[31] Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihn, W.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. In: *IFAC-PapersOnLine 51*. Jg., 2018, Nr. 11, S. 1016–1022.

[32] Abele, E. (Hrsg.): *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*. URL: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-4024512.pdf [Stand: 27.04.2020].

[33] Schleich, B.; Dittrich, M.-A.; Clausmeyer, T.; Damgrave, R.; Erkoyuncu, J.; Haefner, B.; de Lange, J.; Plakhotnik, D.; Scheidel, W.; Wuest, T.: Shifting value stream patterns along the product lifecycle with digital twins. In: *Procedia CIRP 86*, 2019, S. 3-11

[34] Weidema, Bo & Bauer, Christian & Hischier, Roland. (2013). Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. [R]. Overview and Methodology Ecoinvent. Report 1 St. Gallen: The Ecoinvent Centre. S. 76-84.

[35] ISO23247; Automation systems and integration - Digital Twin framework for manufacturing. Publication date: 2020-07 (draft)]

[36] Marz, N., Warren, J., Big Data. Manning, New York, 2015. ISBN 9781617290343]

[37] P. Ganser, T. Venek, V. Rudel, T. Bergs; DPART – A DIGITAL TWIN FRAMEWORK FOR THE MACHINING DOMAIN; *MM Science Journal*, 2021, zur Begutachtung eingereicht

[38] Fricke, Kilian; Gierlings, Sascha; Ganser, Philipp; Venek, Tommy; Bergs, Thomas (2021): Geometry Model and Approach for Future Blisk LCA. In: *IOP Conf*. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1024, S. 12067. DOI: 10.1088/1757-899X/1024/1/012067.

[39] Fricke, Kilian; Gierlings, Sascha; Ganser, Philipp; Seimann, Martin; Bergs, Thomas (2021): A CRADLE TO GATE APPROACH FOR LIFE-CYCLE-ASSESSMENT OF BLISK MANUFACTURING. In: *Proceedings of ASME Turbo Expo* 2021.

[40] Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability, Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions; EU Commission; 2020; https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474

[41] Institute of Environmental Sciences (CML): CML-IA Characterisation Factors, 2016 URL: https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors

[42] Karpuschewski, B.; Kalhöfer, E.; Joswig, D.; Rief, M.: Energiebedarf für die Hartmetallherstellung. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. 106. Jg., 2011, 7-8, S. 496–501

[43] Eyrisch, T.: Optimierung der Herstellung von Vollhartmetallwerkzeugen. Strategie zur Vermeidung von Oberflächenschädigungen. Diss. TU Kaiserslautern Kaiserslautern, 2009

[44] Cortes, C.; Tikal, F.: Schneidkantenpräparation. In: Tikal, F.; Bienemann, R. (Hrsg.): Schneidkantenpräparation. Ziele, Verfahren und Messmethoden; Berichte aus Industrie und Forschung. Kassel: Kassel Univ. Press, 2009, S. 3–11

[45] Friemuth, T.: Herstellung spanender Werkzeuge. Zugl.: Hannover, Univ., Habil.-Schr., 2002. (Reihe: Fortschritt-Berichte / VDI Reihe 2, Fertigungstechnik, Bd. 615). Als Ms. gedrAufl. Düsseldorf: VDI-Verl., 2002

[46] OpenLCA: *OpenLCA modelling suite*, 2019. URL: http://www.openlca.org/.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 2.0:

Prof. Dr. Ing. T. Bergs, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT

Dr.-Ing. S. Gierlings, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Dr.-Ing. T. Augspurger, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Dr.-Ing. P. Ganser, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Dr.-Ing. S. Barth, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

K. Fricke, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

T. Grünebaum, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

## 2.1 Die digitale Ökonomie der Dinge

*G. Schuh, A. Becker, A. Britz, G. Hegener, U. Hermann, M. Kuhn, S. Wlecke*

### Gliederung

1 Status Quo in der heutigen Entwicklung physischer Produkte .....153

2 Steigerung der Nachhaltigkeit durch die Paradigmen der digitalen Ökonomie der Dinge.....154

3 Vier Handlungsfelder zur Realisierung einer digitalen Ökonomie der Dinge.....157

3.1 Monitor – Turning Operation into Smart Data .....160

3.2 Evaluate – Turning Smart Data into Potential .....162

3.3 Adapt – Turning Potential into Adaptions .....163

3.4 Release – Turning Adaptions into Sustainability .....164

4 Zusammenfassung.....166

5 Literatur .....168

## Kurzfassung

### Die digitale Ökonomie der Dinge

Die Entwicklungsaktivitäten produzierender Unternehmen basieren heute oftmals auf den Charakteristika einer analogen Ökonomie der Dinge. Diese zeichnet sich insbesondere durch die Steigerung des Produktabsatzes aus. So basiert der Umsatz der Unternehmen nicht auf einer langen Lebensdauer der Produkte, sondern auf ihrem möglichst frühzeitigen Ersatz durch ein neues Produkt. Der Wettbewerb definiert sich hierbei vornehmlich über das Angebot neuer Funktionalitäten, weshalb diese häufig überladen sind und vom Kundenkreis nicht ausgenutzt werden. Dies steht zunehmend im Konflikt mit einem ökologischen Ressourceneinsatz und den Nachhaltigkeitszielen der Gesellschaft. Ein neues Ökonomiedenken wird daher erforderlich. In der digitalen Ökonomie der Dinge definieren sich die Geschäftsmodelle im Wesentlichen über die Nutzung und nicht den Absatz von Produkten. Eine lange Lebensdauer sowie eine gezielte Funktionalität in der Nutzung sind daher entscheidende Faktoren, die es durch schnelle Releases und Anpassungen während der Produktnutzung zu realisieren gilt. Die Fähigkeit der digitalen Ökonomie, Nutzungsdaten der Produkte zu erfassen und zu analysieren sowie als produzierendes Unternehmen die Produktnutzung zu verstehen, ist hier ausschlaggebend. Dazu werden in diesem Beitrag vier Handlungsfelder vorgestellt. Diese umfassen die Definition und Aufnahme von Nutzungsdaten entlang des gesamten Wertschöpfungssystems („Monitor“), das Ableiten von Anpassungspotenzialen („Evaluate“), ihre Überführung in Entwicklungsmaßnahmen („Adapt“) sowie die Einbringung in die Nutzung („Release“). Diese Handlungsfelder leisten in Summe einen wesentlichen Beitrag zum nachhaltigen Handeln produzierender Unternehmen. Der Beitrag liefert in anschaulicher Weise einen Handlungsleitfaden für ihre Umsetzung.



## Abstract

### The Digital Economy of Things

The development activities of manufacturing companies today are often based on the characteristics of an “analogue economy of things”. This is characterized in particular by the increase in product sales. Thus, the turnover of companies is not based on a long life cycle of the products, but on their replacement by a new product as early as possible. Competition is defined primarily by the offer of new functionalities, which is why these are often overloaded and not utilized by the customer. This is increasingly in conflict with the ecological use of resources and the sustainability goals of society. A new of economy thinking is therefore required. In the digital economy of things, business models are essentially defined by the use rather than the sale of products. A long product life cycle and targeted functionality in use are therefore decisive factors that must be realized through rapid releases and adjustments during product use. The ability of the digital economy to collect and analyse product usage data and to understand product usage as a manufacturer is crucial here. To this end, four fields of action are presented in this article. These include the definition and recording of relevant usage data along the entire value creation system (“Monitor”), the derivation of adaption potentials (“Evaluate”), their transfer into development measures (“Adapt”) and the introduction into usage (“Release”). Taken together, these fields of action make a significant contribution to sustainable action by manufacturing companies. The article provides a practical guideline for their implementation.

# 1 Status Quo in der heutigen Entwicklung physischer Produkte

Die Entwicklung physischer Produkte steht gegenwärtig vor vielfältigen Herausforderungen. Der Wandel klassischer Verkäufermärkte hin zu vornehmlich von Kaufenden geprägten Märkten mit zunehmend heterogenen Kundenwünschen erfordert einen stärkeren Kundenfokus in der Produktentwicklung. [1] Gleichzeitig erhöhen kürzer werdende Innovationszyklen den Druck, Kundenbedürfnisse schneller zu realisieren, um die Time-to-Market reduzieren zu können. [2] In diesem Kontext steigen Entwicklungskosten vor allem für Produkte mit vielfältigen Funktionalitäten, welche in der Nutzungsphase jedoch nur selten verwendet werden, enorm an. Es ist dennoch festzustellen, dass die Zielrichtung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in produzierenden Unternehmen oftmals noch dem „Höher, schneller, weiter“-Prinzip folgt. Dies soll ausdrücken, dass bei der Planung und Entwicklung der Produkte eine möglichst umfangreiche Funktionalität angestrebt wird, da sich hierüber der Wettbewerb definiert. Meist wird dabei kein Fokus auf eine hohe Auslastung der Produkte gelegt. Dies spiegelt sich ebenso auf der Kundenseite wider, [3] Demnach werden Produkte aus Kundensicht gekauft, damit sie für den Fall der häufig ungeplanten und schwer vorhersehbaren Nutzung zur Verfügung stehen. Gleichzeitig verlieren Herstellerfirmen häufig die Verbindung zu den Produkten, sobald diese von den Kundinnen und Kunden erworben wurden. Somit ist das produzierende Unternehmen nicht in der Lage zu verstehen, wann und in welchem Anwendungsfall die Produkte genau genutzt werden. In diesem Fall besitzen hierüber nur die Kundinnen und Kunden eine Kenntnis, weshalb sie die „absolute Verfügungshoheit“ über ihre Produkteforcieren [3] Es scheint, als würde dem Kundenkreis erst mit der Verfügbarkeit der Produkte ein Nutzen entstehen, für den dieser bereit ist zu zahlen. Es steht somit der Besitz der Produkte für den Kundenkreis im Vordergrund, wobei eine ungenutzte Kapazität einzelner Produkte akzeptiert wird. So wird gewissermaßen für das Nicht-Nutzen der Produkte gezahlt, um einen uneingeschränkten Zugriff auf die Produkte [3] In der Konsequenz äußert sich dies durch eine geringe Auslastung der erworbenen Produkte. Führt eine Kundin oder ein Kunde beispielsweise einen Druckereibetrieb, so wird dieser nicht nur mit einer Druckmaschine geführt, obwohl diese ggfs. ausreichend wäre, um bei voller Auslastung den gesamten Umfang der Druckaufträge abdecken zu können. Stattdessen führt das beschriebene Verfügbarkeitsdilemma dazu, dass zusätzliche Druckmaschinen erworben werden, welche weitere Druckkapazität bieten und so einen möglichen Ausfall der ersten Druckmaschine kompensieren können. Das Bedürfnis nach einer uneingeschränkten Nutzung im akuten Bedarfsfall wird somit zufrieden gestellt.

Des Weiteren liegt eine lange Lebensdauer der Produkte häufig nicht im Fokus der produzierenden Unternehmen. Dies ist vornehmlich den Charakteristika klassischer Geschäftsmodelle wie bspw. Transaktionsmodellen geschuldet, welche sich herstellerseitig durch den Absatz möglichst zahlreicher Produkte definieren. Dieser beschriebene Status Quo sowie die resultierenden Konsequenzen werden an dieser Stelle unter dem Begriff der *„analogen Ökonomie der Dinge“* zusammengefasst. Bei der analogen Ökonomie der Dinge stehen demnach die Produkte im Fokus. Die Gewinnerwirtschaftung im entsprechenden Geschäftsmodell ist hierbei rein auf die Steigerung des Absatzes von Produkten und nicht auf eine effizientere Nutzung der vorhandenen Produkte ausgerichtet. [3]

## 2 Steigerung der Nachhaltigkeit durch die Paradigmen der digitalen Ökonomie der Dinge

Die zuvor beschriebene analoge Ökonomie der Dinge steht in der Praxis im Widerspruch zu den zentralen Säulen der Nachhaltigkeit, welche heute zunehmend an Bedeutung gewinnen. Neben dem wachsenden Bewusstsein für nachhaltiges Handeln in der Gesellschaft und der steigenden Nachfrage an nachhaltigen Produkten, sind auch rechtliche Vorgaben für Unternehmen Treiber für die stärkere Fokussierung von Nachhaltigkeit. So werden Unternehmen beispielsweise durch die Vorgaben des Bundesimmissionsschutzgesetzes, des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetztes und des Lieferkettengesetzes dazu aufgefordert, ihr Handeln nachhaltig zu verändern und transparent darzulegen. Ein weiterer entscheidender Treiber für die künftige Entwicklung der Industrie und Wirtschaft ist der Ende 2019 von der EU-Kommission vorgestellte „European Green Deal“. Dieser gibt als neue Wachstumsstrategie der Europäischen Union eine Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 vor, was den Übergang zu einer modernen, ressourceneffizienten und wettbewerbsfähigen Wirtschaft und Gesellschaft in der Europäischen Union fördern soll. [4] Die notwendigen Handlungsfelder für Unternehmen lassen sich anhand der drei Säulen der Nachhaltigkeit zusammenfassen (vgl. Bild 1).

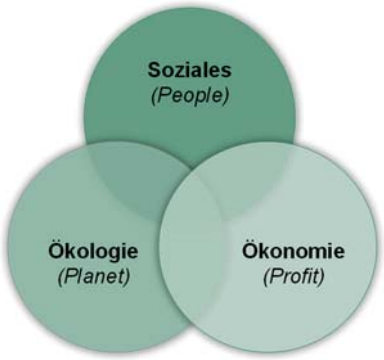



*Bild 1: Die drei Säulen der Nachhaltigkeit*

Die *soziale Nachhaltigkeit* stellt den Menschen in den Mittelpunkt und basiert auf der Würde des Menschen und der freien Entfaltung der Persönlichkeit. Sie adressiert damit beispielsweise eine faire Bezahlung von Arbeitnehmenden sowie Möglichkeiten zur individuellen Fort- und Ausbildung. Darüber hinaus muss jedes Mitglied der Gesellschaft entsprechend seiner Leistungsfähigkeit einen solidarischen Beitrag zur Gesellschaft leisten, erhält jedoch auch von dieser Gesellschaft Leistungen zurück. Die damit erzeugten sozialen inter-, wie auch intragenerativen Sicherungssystemen können nur im Einklang mit dem wirtschaftlichen Leistungspotenzial wachsen. Dieser Aspekt wird von der *ökonomischen Nachhaltigkeit* adressiert. Während auch nachhaltige Unternehmen ausreichende Gewinne erzielen müssen, um beispielsweise in moderne Produktionsanlagen investieren zu können, darf die Profitmaximierung nicht die einzige Zielgröße dieser Unternehmen sein. Stattdessen müssen Unternehmen langfristige Umsatzstrategien verfolgen und einen fairen Handel entlang der gesamten Wertschöpfungskette forcieren. Nur langfristig funktionsfähige Märkte ermöglichen die Anpassung an zukünftige Erfordernisse und ermöglichen eine Befriedigung der inter- und intragenerativen Bedürfnisse. Dabei sollte sich die Knappheit von Ressourcen in den Marktpreisen widerspiegeln und diese Preise sollten als dauerhafte Lenkfunktion der Märkte dienen. Die *ökologische Nachhaltigkeit* ist mutmaßlich der geläufigste Aspekt von Nachhaltigkeit. Sie fokussiert die Schonung der

Umwelt und insbesondere der erneuerbaren sowie nicht-erneuerbaren Ressourcen. Unternehmen sollten sich hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit für einen bewussten Umgang mit den von ihnen genutzten Ressourcen, wie beispielsweise Wasser, Energie und endlichen Rohstoffen einsetzen. Darüber hinaus sollten auch jegliche Stoffeinträge in die Umwelt wohlüberlegt vorgenommen werden, ohne dabei Gefahren oder unvertretbare Risiken für die menschliche Gesundheit in Kauf zu nehmen. [5] Hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit rief im Jahr 2020 das Unternehmen Microsoft das Ziel aus, bis zum Jahr 2030 kohlenstoffnegativ zu sein und bis zum Jahr 2050 den (quantitativ) gesamten Kohlenstoff aus der Umwelt zu entfernen, welchen das Unternehmen seit seiner Gründung im Jahr 1975 emittierte. Die Reduktion des emittierten Kohlenstoffs beschränkt sich dabei nicht nur auf die direkten Emissionen des Unternehmens, sondern bezieht auch Emissionen entlang der gesamten Liefer- und Wertschöpfungskette ein. [6] Für diese umfassende Aufnahme von Daten zu Kohlenstoffemissionen nutzt Microsoft die Einteilung von Emissionen anhand von drei Kategorien, sogenannter Scopes. Emissionen des Scope 1 sind Emissionen, welche direkt durch die Aktivitäten des jeweiligen Unternehmens verursacht werden, bspw. durch Generatoren, die betrieben werden müssen. Als Emissionen des Scope 2 werden Emissionen bezeichnet, welche bei der Erzeugung der vom Unternehmen genutzten Energie, bspw. Elektrizität oder Wärme, entstehen. Emissionen des Scope 3 sind alle weiteren indirekten Emissionen, an denen das jeweilige Unternehmen beteiligt ist. Für Unternehmen können diese Emissionsquellen sehr umfangreich sein und müssen über die gesamte Liefer- und Wertschöpfungskette berücksichtigt werden. Insbesondere zur Aufnahme von Emissionen des Scope 3 ist eine Ausweitung der Betrachtung auf den gesamten Lebenszyklus der Produkte relevant, da auch Emissionen berücksichtigt werden müssen, welche bspw. durch den Strom entstehen, der benötigt wird, wenn die Kundinnen und Kunden das Produkt nutzen. Dies führt dazu, dass Scope-3-Emissionen weitaus größer sind als die Emissionen von Scope 1 und 2 zusammen. Microsoft betont daher, dass es von höchster Relevanz ist, eine Transparenz über diese drei Scopes herzustellen. Aufbauend auf der Auswertung von Daten zu Kohlenstoffemissionen will Microsoft ab Juli 2021 neue Beschaffungsprozesse implementieren, welche Anreize für die Lieferanten schaffen, auch ihre eigenen Emissionen aus den drei Scopes zu reduzieren. [6]

Bei der Betrachtung der drei Säulen der Nachhaltigkeit wird der Widerspruch deutlich, in welchem diese zu den Charakteristika der analogen Ökonomie der Dinge stehen. Es ist daher ein neues Denken in produzierenden Unternehmen erforderlich, welches an dieser Stelle unter dem Begriff *„digitale Ökonomie der Dinge“* eingeführt werden soll. Die digitale Ökonomie der Dinge zeichnet sich durch drei grundsätzliche Paradigmenwechsel aus.

Die Geschäftsmodelle der digitalen Ökonomie der Dinge zeichnen sich dadurch aus, dass sie im Wesentlichen für die Nutzung der Produkte im Lebenszyklus abrechnen und nicht für ihre Entstehung. Das bedeutet, dass Unternehmen der digitalen Ökonomie über die vermehrte Nutzung ihrer Produkte wachsen und nicht über den Produktabsatz. Somit sind erstens eine lange Lebensdauer der Produkte sowie zweitens ihre gezielte Funktionalität relevanter, wenn die Nutzungshäufigkeit steigen soll, an der sich der ökonomische Erfolg der Produkte in der digitalen Ökonomie misst. Statt möglichst umfangreiche Funktionalitäten in den Produkten vorzusehen, gilt es daher, die Produkte gezielt mit den tatsächlich benötigten Funktionalitäten entsprechend der realen Produktnutzung auszulegen. Drittens wird zudem eine maximale Produktnutzung bzw. Auslastung der Produkte beispielsweise im Sinne einer hohen OEE („Overall Equipment Effectiveness“, deutsch: Gesamtanlageneffektivität) im Maschinen- und Anlagenbau sowie einer möglichst langen Lebensdauer der Produkte angestrebt. Bei der digitalen Ökonomie der Dinge wandelt sich der Fokus vom Besitz der Produkte, der in der analogen Ökonomie der Dinge im

Vordergrund steht, hin zu einer ausschöpfenden Nutzung der Produkte. So wandelt sich die Wertschöpfungsorientierung von einer produktzentrischen hin zu einer kundenzentrischen Sicht. [3] Die Charakteristika der analogen Ökonomie der Dinge werden in Bild 2 den Charakteristika der digitalen Ökonomie der Dinge gegenübergestellt.

*Bild 2: Gegenüberstellung der analogen und digitalen Ökonomie der Dinge*

In Kapitel 1 wurde dargestellt, dass in einer analogen Ökonomie der Dinge produzierende Unternehmen meist die Verbindung zu ihren Produkten verlieren, sobald diese von den Kundinnen und Kunden erworben wurden. Gegenteilig hierzu gilt es zur Adressierung der Paradigmen der digitalen Ökonomie der Dinge, diese Verbindung zum Produkt auch nach dem Absatz des Produktes aufrecht zu erhalten. Erkenntnisse aus der Produktnutzungsphase sind zu generieren und gezielt in die Produktentwicklung zurückzuführen. Bild 3 stellt dar, dass die Nutzungsdaten, welche erst während der tatsächlichen Produktnutzung und somit nach der eigentlichen Entwicklung und Fertigung des Produktes generiert werden, einen großen Erkenntnisgewinn in Bezug auf das Produkt ermöglichen. Gleichzeitig nimmt die Verwendung und Einbindung der Erkenntnisse über ein Produkt üblicherweise mit dessen Markteinführung stark ab. Der Status Quo in produzierenden Unternehmen zeichnet sich heutzutage häufig noch dadurch aus, dass kaum Kenntnisse über die tatsächliche Produktnutzung bestehen. Da solche Kenntnisse damit nicht in die Produktentwicklung einbezogen werden, basieren Auslegungen und Aktivitäten in der Produktentwicklung oft auf dem eingangs ausgeführten „Höher, schneller, weiter“-Prinzip.

Das Potenzial des Erkenntnisgewinns aus der Produktnutzungsphase gilt es daher aktiv auszuschöpfen. Die dazu notwendige Verbindung zum Produkt nach dem kundenseitigen Erwerb wird heute durch die Transformation rein physischer Produkte zu cyber-physischen Produkten zunehmend ermöglicht. Cyber-physische Produkte beschreiben mechatronische Produkte, die durch digitale Komponenten sowohl untereinander als auch in Netzwerken verbunden sind. [7] Der Anteil von verbauten digitalen Komponenten nimmt dementsprechend stetig zu [8], weshalb auch die Erlangung von Kompetenzen im Bereich der Softwareentwicklung zukünftig ein zentraler Erfolgsfaktor für Unternehmen der produzierenden Industrie sein wird. Dies erkannte auch Herbert Diess, Vorstandsvorsitzender der Volkswagen AG, und ließ im Herbst 2019 verlauten: „Wir beginnen, uns vom reinen Autohersteller zum softwaregetriebenen Unternehmen zu wandeln.“ [9] Dabei zielt diese Aussage weniger darauf ab, dass produzierende Unternehmen selbst zum Herstellerunternehmen von Softwareprodukten werden. Vielmehr verdeutlicht dieser

Satz, dass auch Unternehmen in der produzierenden Industrie ihre Arbeitsweise an denen der Softwarebranche orientieren müssen. Wie in der Softwareentwicklung müssen sich damit die Produktentwicklungsprozesse in der digitalen Ökonomie der Dinge zugunsten kurzer Zyklen, schnellen Releases und Anpassungen verändern. [3]

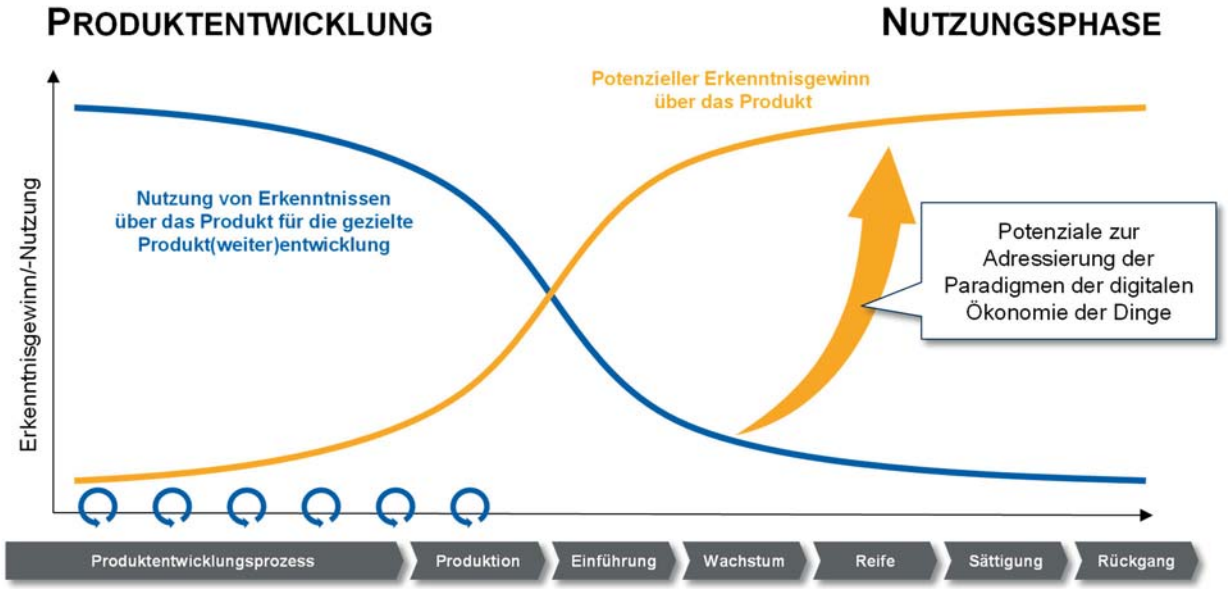



*Bild 3: Integration von Erkenntnissen aus der Produktnutzung in die Produktentwicklung*

Aus dem gegenläufigen Verlauf der Kurven in Bild 3 ergeben sich bedeutende Potenziale hinsichtlich der Adressierung der Paradigmen der digitalen Ökonomie der Dinge. Durch die Rückführung und Analyse von Daten aus der Produktnutzungsphase können gezielt Erkenntnisse über den realen Bedarf an Funktionalitäten gewonnen werden. Insbesondere im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus können zudem Potenziale zur Steigerung der Produktauslastung in der Anwendung im Sinne einer OEE-Steigerung sowie zur Verlängerung der Produktlebensdauer identifiziert werden. In Summe ergeben sich hieraus Potenziale zur gezielten Weiterentwicklung des Produktes während seines gesamten Produktlebenszyklus entsprechend der Paradigmen der digitalen Ökonomie der Dinge. Diese Potenziale tragen in Summe zu einem nachhaltigen Handeln produzierender Unternehmen bei.

## 3 Vier Handlungsfelder zur Realisierung einer digitalen Ökonomie der Dinge

Zusammenfassend wurde im vorigen Kapitel beschrieben, dass zur Realisierung einer digitalen Ökonomie der Dinge Erkenntnisse aus der Produktnutzungsphase gewonnen werden müssen. Hierfür gilt es, Daten aus der Produktnutzung in die Entwicklung zurückzuführen, um diese zu analysieren und das Produkt entsprechend den Paradigmen der digitalen Ökonomie der Dinge weiterzuentwickeln. Eine Rückführung von Daten aus der Produktnutzung zur gezielten Weiterentwicklung des Produktes ist in der Softwarebranche unter dem Begriff „DevOps“ bereits weit verbreitet. Mit dem Ziel, diesen Begriff auf den Bereich cyber-physischer Produkte zu übertragen, werden zunächst die Grundlagen von DevOps im Folgenden näher beleuchtet.

DevOps ist ein Kunstwort aus der Verbindung der beiden Begriffe „Development“ (dt.: Entwicklung) und „Operations“ (dt.: Betrieb). Damit vereint DevOps zwei Organisationseinheiten des IT-Bereichs, welche in traditionellen IT-Organisationen getrennt und mit

unterschiedlichen Zielsetzungen arbeiten. [10, 11] DevOps ist als eine „Sammlung von Techniken, Prozessen und Tools“ anzusehen, die „darauf abzielt, typischen Problemen in der Zusammenarbeit von Entwicklung und Betrieb entgegen zu wirken.“ [12] Durch ihre Anwendung soll die Kundenzufriedenheit während der Produktnutzung gesteigert werden. DevOps verbindet dazu bekannte Techniken aus der Softwareentwicklung mit Prinzipien zur Förderung der Zusammenarbeit von Betrieb und Entwicklung im Release Management. Erste Ideen zur Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Entwicklung und Betrieb kamen bereits im Jahr 2009 unter der Bezeichnung „Agile System Administration“ auf. Die Abkürzung DevOps selbst entstand im Jahr 2009 auf einer gleichnamigen Konferenz in Gent, Belgien. [12] Bereits zwei Jahre später verkündete das Unternehmen Amazon, dass es mittels DevOps in der Lage sei, alle 11,6 Sekunden ein Release zu implementieren. [13]

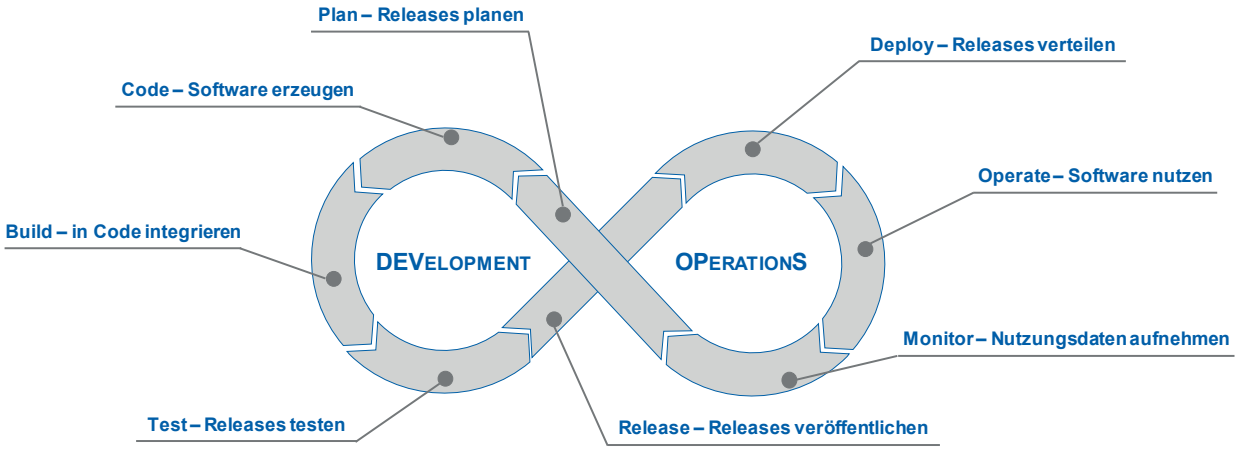



*Bild 4: Verbindung von Entwicklung und Betrieb durch DevOps*

Wie in Bild 4 dargestellt wird, vereint DevOps die Schritte der Entwicklung, also „Plan“, „Code“, „Build“ und „Test“, mit den Schritten des Betriebs, „Release“, „Deploy“, „Operate“, und „Monitor“. [14] Die Form der Darstellung drückt aus, dass sich daraus ein durchgehender Zyklus ergibt, welcher während der gesamten Produktnutzungsphase kontinuierlich durchlaufen wird. Dafür werden aus dem Betrieb Nutzungsdaten aufgenommen und in den Entwicklungszyklus zurückgeführt. Auf die Datenaufnahme folgend werden Änderungen in Form von Releases geplant, indem von der Änderung betroffene Komponenten, Unternehmensbereiche, Ressourcen und Abnahmekriterien identifiziert werden. Die Releases werden anschließend von der Entwicklung in neue Software-Inkremente umgesetzt und in den bestehenden Code integriert. Die Kombination der neuen Software und des bestehenden Codes wird hinsichtlich Kriterien wie Funktionalität und Stabilität getestet, bevor die Software in die Nutzung übergeben wird. Dadurch werden wieder neue Daten aus der Produktnutzung generiert, weshalb sich, wie oben dargestellt, an die „Operate“-Phase wieder die „Monitor“-Phase anschließt. Durch die methodische Verbindung von Entwicklung und Betrieb bietet DevOps zahlreiche Vorteile. So können Releases schnell bereitgestellt werden, um die Software gezielt weiterzuentwickeln. Neue Funktionen können kurzfristig hinzugefügt und Fehler behoben werden, was Entwicklungsaufwand reduziert und zu langfristigen Wettbewerbsvorteilen führen kann. [15]

Eine Übertragung von DevOps auf den Bereich cyber-physischer Produkte erfordert eine systematische Verbindung der Produktentwicklung und der Produktnutzung durch eine adäquate datentechnische und organisationale Infrastruktur. Das *Internet of Production (IoP)* als Exzellenzcluster der RWTH Aachen University bietet hierbei eine geeignete

Grundlage. Das IoP stellt eine ganzheitliche Referenz-Infrastruktur dar [16] und ist als die Weiterentwicklung des Internet of Things (IoT) zu verstehen, in welchem die Idee des Internets als globales sozio-technisches Netzwerk auf die physische Welt übertragen worden ist. [17] Weiter wird das IoT weltweit als Begriff für die horizontale Vernetzung cyber-physischer Produkte geprägt und ermöglicht die Nutzung von Felddaten wie bspw. Nutzungsdaten. [18] Dafür ist insbesondere der domänenübergreifende Datenzugriff notwendig, um die bestehende Lücke zwischen der vertikalen Integration der einzelnen Domänen und der domänenübergreifenden horizontalen Zusammenarbeit zu schließen. Diesen Datenzugriff adressiert das IoP mit dem Ziel, eine neue Ebene der domänenübergreifenden Zusammenarbeit durch die Bereitstellung semantisch adäquater und kontextbezogener Daten aus Produktion, Entwicklung sowie Nutzung in Echtzeit und in angemessener Granularität bereitzustellen. [16] Bild 5 veranschaulicht schematisch die datenbasierte Integration des Produktions-, Entwicklungs- und Nutzungszyklus im IoP. Durch diese Integration und domänen- und lebenszyklusweite Kollaboration werden schnelle und agile Entscheidungen ermöglicht. Dazu ist die Erzeugung situationsbezogener digitaler Schatten notwendig, welche die große Menge an heterogenen Daten mit entscheidungsunterstützenden Modellen verbinden. Im Gegensatz zum digitalen Zwilling benötigt das Konzept des IoP für den digitalen Schatten keine hochauflösende Datenbank, sondern aggregiert die Daten aus allen relevanten Bereichen auf ein aufgabenspezifisch sinnvolles Granularitätsniveau. Dabei ermöglicht der digitale Schatten eine domänenübergreifende Zusammenarbeit und weitreichende Analysen für konkrete Fragenstellungen, die sowohl rückwärts gerichtet die Erstellung von Berichten und Diagnosen als auch vorwärts gerichtet Vorhersagen und Empfehlungen ermöglichen. [16, 19]

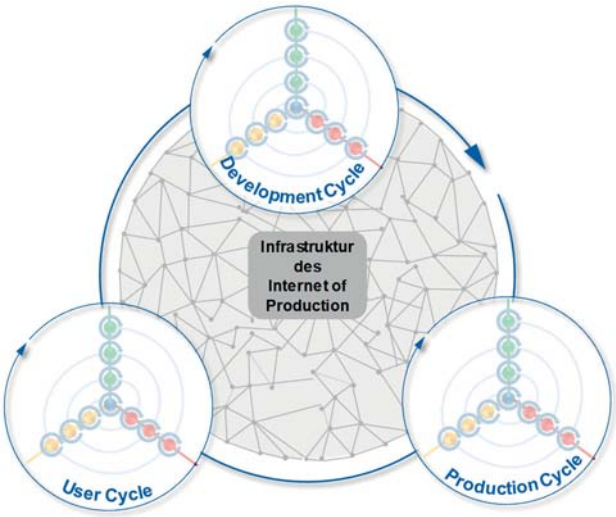



*Bild 5: Produktions-, Entwicklungs- und Nutzungszyklus im Internet of Production*

Die Übertragung von DevOps auf cyber-physische Produkte wird durch die datenbasierte Verbindung der in diesem Kontext relevanten IoP-Zyklen ermöglicht. Dafür ist die Verwendung der IoP-Infrastruktur sowie die Anpassung des aus der Softwareentwicklung bekannten DevOps erforderlich. Durch die Kombination beider Ansätze wird die Brücke zwischen Produktentwicklungs- und Nutzungsphase geschlagen. Für die Verbindung des Entwicklungs- mit dem Nutzungszyklus wird DevOps adaptiert. Dafür werden zunächst aus den acht Schritten von DevOps die relevanten Schritte für die Übertragung auf die (Weiter)-Entwicklung cyber-physischer Produkte identifiziert. Letztlich werden vier Handlungsfelder in Form aufeinander aufbauender Phasen abgeleitet, welche in Summe dazu dienen, die Paradigmen der digitalen Ökonomie der Dinge zu adressieren. Während der

Nutzung des Produktes werden in der *Monitor-Phase* zunächst Daten aufgenommen. Die aufgenommenen Daten gilt es in der *Evaluate-Phase* hinsichtlich möglicher Potenziale zu bewerten. Diese Potenziale werden anschließend im Rahmen der *Adaption-Phase* in konkrete Entwicklungsmaßnahmen überführt. Sobald die möglichen Maßnahmen konzeptionell umgesetzt sind, gilt es diese in der *Release-Phase* in die Nutzung zu implementieren. Nach dem Release werden die Daten während der Nutzungsphase erneut in der nächsten Monitor-Phase aufgenommen, weshalb die Handlungsfelder als vier iterierende Phasen angesehen werden können (vgl. Bild 6).

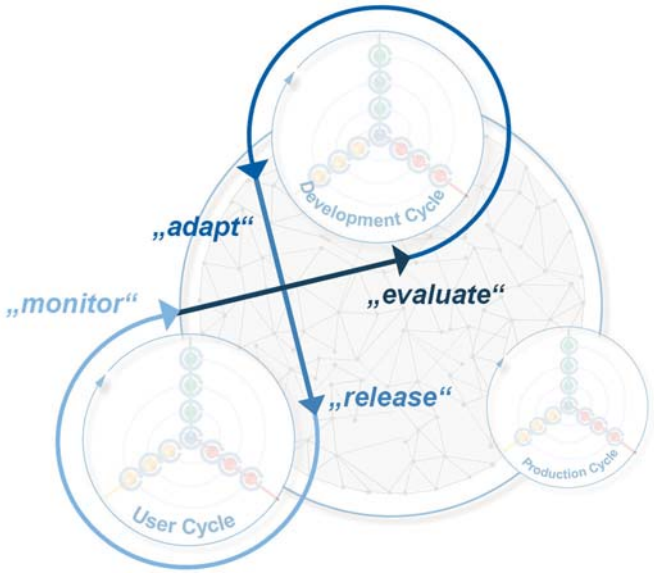



*Bild 6: Verbindung des User Cycle und des Development Cycle durch vier Handlungsfelder*

Die vier Handlungsfelder werden im Folgenden detailliert beschrieben. Dabei wird jeweils aufgezeigt, wie diese Handlungsfelder auf die Realisierung der digitalen Ökonomie der Dinge einzahlen und damit einen Beitrag zur Steigerung der Nachhaltigkeit produzierender Unternehmen leisten.

### 3.1 Monitor – Turning Operation into Smart Data

Die vorgestellten vier Handlungsfelder beginnen mit der Monitor-Phase. In dieser Phase werden relevante Daten aus der Produktnutzung identifiziert und aufgenommen. Dabei gilt es zunächst, Daten aus der Nutzung der Produkte sowie vor- und nachgelagerten Prozessen in einer Smart Data Ebene zu speichern. Soll darauf aufbauend der Hersteller Zugriff auf diese Smart Data Ebene erhalten, ist sowohl Vertrauen und Transparenz zwischen produzierendem Unternehmen und Kundenkreis als auch insbesondere die Kontrolle der Kundinnen und Kunden über die Speicherung und Abgabe dieser Daten essentiell. In Bild 7 wird dargestellt wie dieser Aspekt durch das Unternehmen EMAG, Herstellerfirma für Werkzeugmaschinen, in der Praxis des Maschinen- und Anlagenbaus umgesetzt wird. Der Anwendungsfall des Unternehmens EMAG wird im Folgenden näher beschrieben.

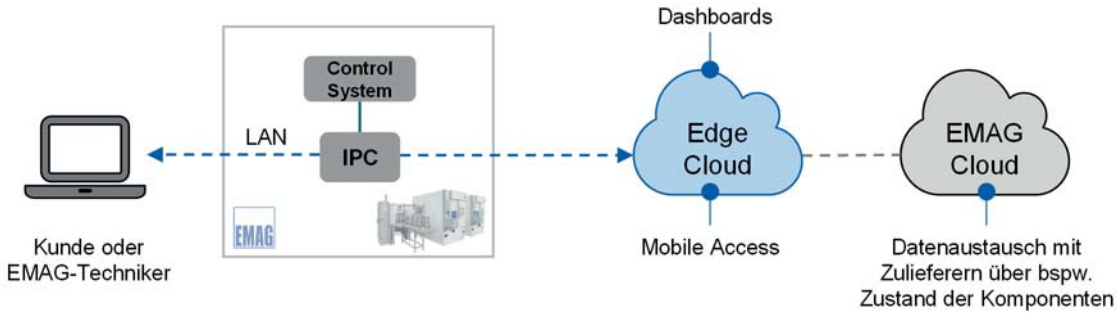



*Bild 7: Implementierung des Monitorings bei EMAG*

Zunächst werden Maschinendaten wie Taktzeiten, Betriebsmodi, Gut- und Schlechtteile sowie Fehler- und Warnmeldungen im Kontrollsystem der Maschine erzeugt und gespeichert. Um diese Daten aufnehmen und weiterverwenden zu können, wird das Kontrollsystem mit einem Industrie-PC (IPC) verbunden. Dieser ermöglicht die Zugänglichkeit und das Management von Maschinendaten. Abhängig von der Masse der Daten können diese zwischen einem Tag und mehreren Wochen auf dem IPC gespeichert werden. Zusätzlich zu den Daten des Kontrollsystems können Daten verschiedener anderer Quellen dem IPC zugeführt werden. An diesem Punkt besitzt das Unternehmen EMAG noch keinerlei Zugriff auf die Maschinendaten der Kundinnen und Kunden. Sie hingegen können über eine LAN-Verbindung einen Laptop an den maschineninternen IPC anschließen. Durch eine geeignete Nutzeroberfläche werden im IPC gespeicherte Maschinendaten bedarfsgerecht aggregiert und visualisiert. Wurde eine adäquate Vertrauensbasis zwischen Kundenkreis und EMAG etabliert, können Kunden EMAG-Servicetechnikern kontrolliert Zugriff auf den IPC gewähren oder selbst relevante Datensätze per Email an EMAG versenden. Sollen größere Datenmengen einer Maschine oder die Datensätze mehrerer EMAG-Maschinen bei Kunden gespeichert und verarbeitet werden, können die Maschinen mit der sogenannten Edge-Cloud verbunden werden. Diese weist dieselben Funktionalitäten wie eine gewöhnliche Cloud auf, ist aber nicht mit dem Internet verbunden, sondern nur in der lokalen IT-Architektur von Kunden verankert. Aufgrund des größeren Speicherplatzes können in der Edge-Cloud die Datensätze mehrerer EMAG-Maschinen über einen längeren Zeitraum gespeichert werden. Über die Edge-Cloud kann der Kundenkreis jederzeit mobil aus dem lokalen Firmennetzwerk auf die Daten der verbundenen Maschinen zugreifen. Über eine Dashboard-Oberfläche kann beispielsweise angezeigt werden, wie zuverlässig die Maschinen arbeiten und an welcher Maschine kurzfristig ein Werkzeug gewechselt werden muss. Ist in der jeweiligen Kundenbeziehung ein Transparenz- und Vertrauensverhältnis etabliert, kann können Kunden der EMAG den Zugriff auf die Daten der Edge-Cloud über VPN gewähren. Wird die Maschine nun mit dem Internet verbunden, können Daten in die sogenannte EDNA („EMAG DNA“-)Cloud geladen werden. Erst mit diesem Schritt werden die Maschinendaten des Kundenkreises in IT-Strukturen außerhalb des Unternehmens transferiert. Dadurch wird es Kunden ermöglicht, auch außerhalb des Unternehmensnetzwerks jederzeit die Zustände ihrer Maschinen überprüfen zu können. Darüber hinaus dient die EDNA-Cloud zum gezielten Datenaustausch mit Zulieferfirmen für die Werkzeugmaschinen der Kunden, sodass diese Zulieferfirmen Auskunft über die Zustände ihrer in den Maschinen verbauten Komponenten geben können. Zukünftig soll der Austausch über die EDNA-Cloud auch dazu dienen, eine Service-Plattform aufzubauen, sodass jeder auffällige Zustand der Maschine unmittelbar an einen EMAG-Servicetechniker kommuniziert wird, welcher bei Bedarf entsprechende Maßnahmen einleiten kann. Dieses Beispiel verdeutlicht, wie

insbesondere in der frühen Aufbauphase einer gemeinsamen Smart Data Ebene verbindlich definierte Strukturen und Genehmigungen dazu dienen, die Transparenz und das Vertrauen bezüglich des Umgangs mit Nutzungsdaten zwischen produzierendem Unternehmen und Kundenkreis zu fördern.

Der oben beschriebene Datenaustausch mit Unternehmen aus dem Wertschöpfungssystem von Kunden wird abstrahiert in der Ausweitung der Smart Data Ebene in Bild 8 dargestellt. Demnach werden nicht nur die Daten rund um Prozesse an der Maschine selbst, sondern auch Daten wie Rüst- und Liegezeiten aufgenommen. Sind in diese vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsprozesse andere Unternehmen involviert, sind diese in einem nächsten Schritt in die Smart Data Ebene mit einzubeziehen. In dem beschriebenen Beispiel werden die Zulieferunternehmen der Maschinenkomponenten dadurch befähigt, den Maschinennutzerinnen und -nutzern regelmäßige Berichte über den Zustand ihrer verbauten Komponenten bereit zu stellen.

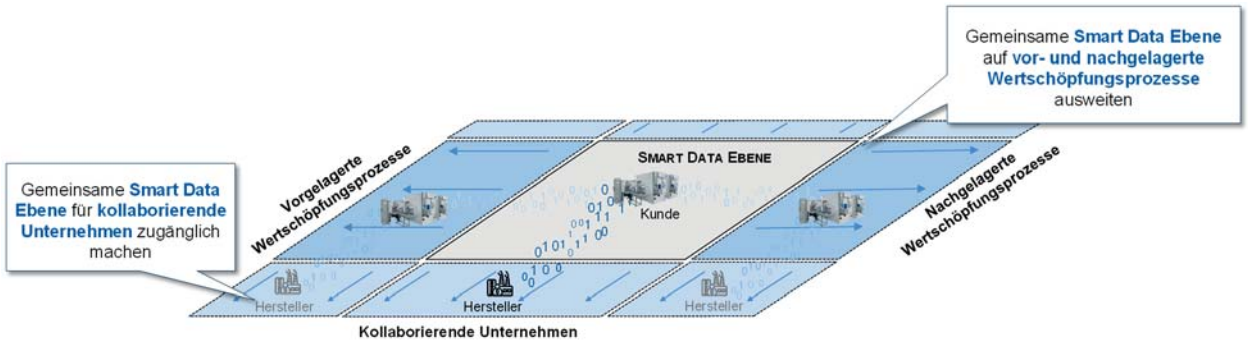



*Bild 8: Vernetzung von Daten der Produktnutzung in Form einer gemeinsamen Smart Data Ebene*

## 3.2 Evaluate – Turning Smart Data into Potential

Wie zuvor beschrieben werden in der Monitor-Phase Daten aus der Nutzungsphase aus sämtlichen Bereichen des Wertschöpfungssystems aufgenommen. Dadurch wird eine Echtzeit-Datenbasis gebildet, welche die Grundlage für die Evaluate-Phase bietet.

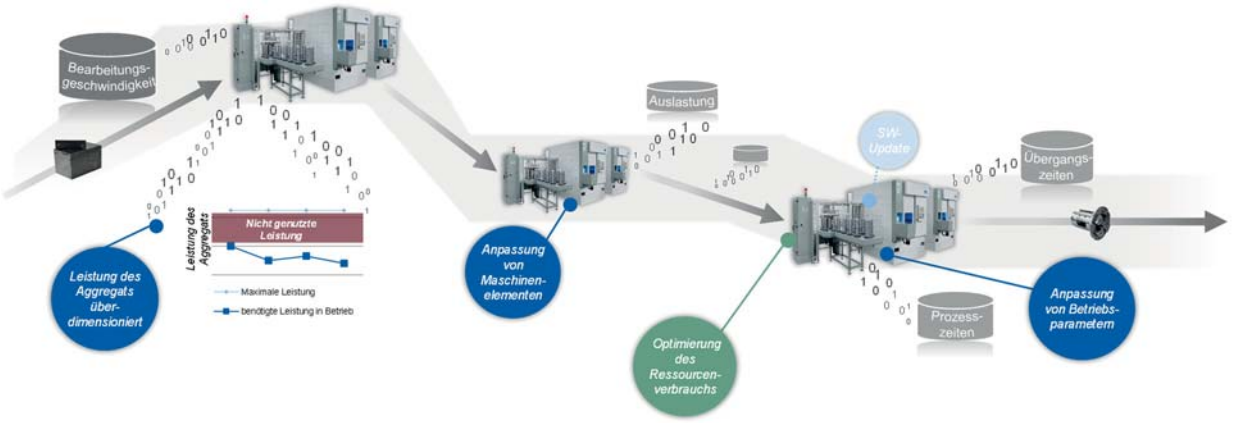



*Bild 9: Identifizierung von Potenzialen entlang der Wertschöpfungskette*

In Bild 9 werden beispielhafte Daten aus der Produktnutzung dargestellt, welche aufgenommen werden können. An den Maschinen selbst sind das die Bearbeitungsgeschwindigkeit, unterschiedliche Prozesszeiten sowie die Auslastung. Aus diesen ergeben sich in der Evaluate-Phase verschiedene Potenziale, die sich aus den Paradigmen der digitalen Ökonomie der Dinge ableiten lassen. So verdeutlicht das dargestellte Beispiel, dass

die maximale Leistung eines in der Maschine verbauten Aggregats weit über der tatsächlich benötigten Leistung im Betrieb bei Kunden liegt. Das Aggregat erweist sich damit als überdimensioniert. Hinsichtlich der Paradigmen der digitalen Ökonomie der Dinge ergeben sich aus dieser Analyse zwei Potenziale. Zunächst kann die Funktionalität des Aggregats durch einen Austausch dieses Moduls gezielt angepasst werden, was sich positiv auf den Ressourcenverbrauch, insbesondere den Energiebedarf, auswirkt. Zusätzlich kann durch einen Austausch des Moduls positiv auf die Produktlebensdauer eingewirkt werden, da ein solches Aggregat häufig eine kritische physische Komponente innerhalb der gesamten Maschine darstellt.

In vor- und nachgelagerten Prozessen können zusätzliche Daten wie Übergangs- und Liegezeiten aufgenommen werden. Eine Kennzahl, die spezifisch im Maschinen- und Anlagenbau bei der Ermittlung weiterer Potenziale unterstützt, ist die bereits eingangs genannte OEE. Die OEE stellt ein Maß für die Wertschöpfung einer Maschine oder Anlage dar. Die Kennzahl setzt sich aus dem Verfügbarkeits-, dem Leistungs- und dem Qualitätsfaktor zusammen. Der Verfügbarkeitsfaktor ist das Verhältnis aus der Zeit bis zum Auftreten eines Fehlers und der Zeit des Ausfalls der Funktion. Der Leistungsfaktor beschreibt ein Maß für Verluste, die durch Leerläufe und kleinere Ausfälle entstehen. Der Qualitätsfaktor beschreibt Verluste, die auf defekte oder zu überarbeitende Teile zurückzuführen sind. [20] Die Analyse der OEE anhand der Daten, welche entlang der gesamten Wertschöpfungskette aufgenommen werden, ermöglicht es, Potenziale zur besseren Ausnutzung vorhandener Produktionsressourcen zu identifizieren. Potenziale ergeben sich hierbei zum Beispiel aus der Optimierung der Logistikkette und der Liegezeiten sowie Anpassungen von Maschinensoftware und Betriebsparametern.

Als Ergebnis der Evaluate-Phase ergibt sich damit eine Vielzahl von Potenzialen zur Adressierung der Paradigmen der digitalen Ökonomie der Dinge. Die Analyse von Kennzahlen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, wie die OEE, deckt Potenziale zur Steigerung der Auslastung je Produkt in der Produktnutzung auf. Die Auswertung von Nutzungsdaten, wie jene des Aggregats, ermöglicht die Identifizierung von Modulen, welche im Sinne einer gezielten Funktionalität angepasst werden können. Der gezielte Austausch solcher Module trägt letztlich auch zur Verlängerung der gesamten Produktlebensdauer bei.

### 3.3 Adapt – Turning Potential into Adaptions

Nachdem in der Evaluate-Phase die wesentlichen Potenziale zur Anpassung der Produkte identifiziert wurden, gilt es in der Adapt-Phase, diese Potenziale durch konkrete Maßnahmen zu erschließen. Um bei einer Vielzahl identifizierter Potenziale und abgeleiteter Maßnahmen eine Priorisierung vornehmen zu können, bietet sich bspw. die Verwendung einer Technologie-Portfolio-Analyse an. Diese dient dem Ziel der strategischen Bewertung möglicher neuer Produkt- und Prozesstechnologien. Damit liefert das Technologieportfolio eine Planungs- und Informationsunterstützung als Basis für strategische Investitionsentscheidungen. Die zwei Dimensionen des Portfolios bestehen aus der von der Umwelt induzierten Technologieattraktivität sowie der unternehmensinternen Ressourcenstärke. Die Technologieattraktivität kann dabei durch bspw. die mögliche Anwendungsbreite bewertet werden. Auch in dem in diesem Beitrag beschriebenen Anwendungskontext wäre die Anwendungsbreite ein passender Indikator dafür, ob die durch die Maßnahme angestrebte Produktanpassung für einen größeren Kundenkreis Sinn ergeben würde. Hierbei sollte ein möglichst breiter Einsatzbereich der Anpassung angestrebt werden. Indikatoren für die interne Ressourcenstärke sind bspw. der Beherrschungsgrad der technisch-wirtschaftlichen sowie der qualitativen Machbarkeit oder die mögliche Um-

setzungsgeschwindigkeit. [21] Auf diese Weise werden mögliche Anpassungsmaßnahmen, welche aus den Potenzialen abgeleitet wurden, übersichtlich im Portfolio aufgetragen und priorisiert.

Im dargestellten Beispiel in Bild 10 wurde während der Evaluate-Phase erkannt, dass die maximale Leistung des eingesetzten Aggregats weit über der benötigten Leistung liegt. Als konkrete Entwicklungsmaßnahme ist damit ein Austausch des Aggregats durch ein Aggregat mit geringerer Leistung möglich.

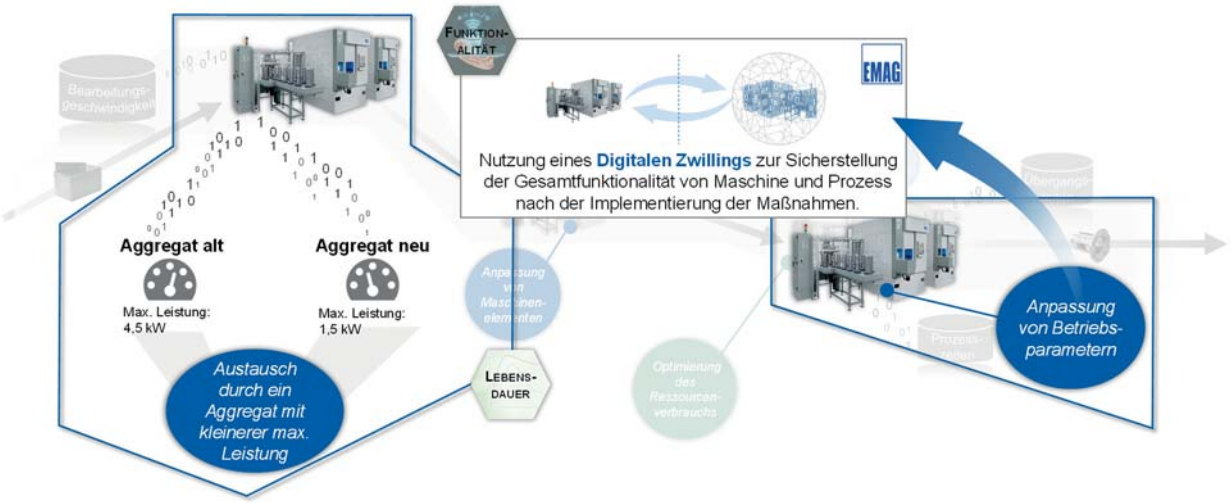



*Bild 10: Ableitung von Entwicklungsmaßnahmen aus identifizierten Potenzialen*

Ein Aspekt, welcher dabei von entscheidender Relevanz ist, ist die Sicherstellung der Funktionalität des Gesamtprozesses der Maschine nach dem Austausch von physischen Modulen oder der Anpassung von Parametern. Wenn die Änderung direkt an der Maschine vorgenommen werden soll, ist es zwingend erforderlich, bereits im Vorfeld der Änderung die Einflüsse auf den Gesamtprozess zu evaluieren. Potenzielle Gefährdungen der Gesamtfunktionalität müssen vor der Umsetzung einer Änderung, soweit möglich, ausgeschlossen werden. Ein Hilfsmittel hierzu ist der digitale Zwilling. Ein digitaler Zwilling ist das virtuelle Abbild einer physischen Maschine oder eines realen Prozesses. Er bündelt alle verfügbaren Daten der Maschine bzw. des Prozesses und macht diese „intelligent für verschiedene Anwendungsfälle nutzbar“ [22]. Die Firma EMAG hat einen ganzheitlichen digitalen Zwilling ihrer Maschinen entwickelt. Bei einem geplanten Austausch von Modulen oder einer Anpassung von Betriebsparametern wird dies zunächst mit dem digitalen Zwilling simuliert und die Einflüsse auf den Gesamtprozess werden untersucht. Basierend auf dieser Simulation können die Änderungen anschließend in die reale Maschine und den Prozess überführt werden, mit der Gewissheit, dass die Funktionalität des Gesamtprozesses erhalten bleibt.

Dies bedeutet, dass jede Entwicklungsmaßnahme, die aus den Potenzialen der vorherigen Phase abgeleitet wurde, zunächst eingehend überprüft wird, bevor sie in die nächste Phase „Release“ übergeben werden kann. In diesem Fall wird die Gesamtfunktionalität der Maschine mit einem neuen Aggregat, welches eine geringere maximale Leistung aufweist, im digitalen Zwilling simuliert und validiert.

## 3.4 Release – Turning Adaptions into Sustainability

In der vorigen Adapt-Phase wurden konkrete Entwicklungsmaßnahmen aus den identifizierten Potenzialen abgeleitet. Nach eingehender Priorisierung und Validierung werden

ausgewählte Maßnahmen in der Release-Phase in die Nutzung eingebracht. In dem beschriebenen Beispiel wird das neue Aggregat während der Nutzung der Maschine bei Kunden implementiert. Die Funktionalität der Maschine wird dadurch an die tatsächliche Produktnutzung angepasst, was zu einer Schonung der Ressourcen während der Maschinennutzung beiträgt.

Um Releases während der Produktnutzungsphase realisieren zu können und dabei nicht nur für den Kundenkreis, sondern auch der Herstellerfirma einen Mehrwert zu bieten, gilt es, ein geeignetes Geschäftsmodell zu etablieren. So endet im Rahmen traditioneller Transaktionsmodelle, in denen Kundinnen und Kunden ein Produkt im Zuge einer einmaligen Investition erwerben und nach Auslauf der Garantie für Betrieb und Instandhaltung dafür selbst verantwortlich sind, das Verhältnis zwischen Kundenkreis und Herstellerfirma mit Übergabe des Produkts. [23] In einem solchen Geschäftsmodell sind kontinuierliche Anpassungen am Produkt für das Herstellerunternehmen nicht von Interesse, da dieses dafür nicht entlohnt wird. Einen gegenteiligen Ansatz dazu bieten *Subskriptions-Geschäftsmodelle*. Subskriptionsmodelle zeichnen sich dadurch aus, dass Kunden nicht einmalig für ein Produkt zahlen, sondern in vertraglich geregelten Abständen. Kunden erwerben nicht das Produkt, sondern insbesondere die mit dem Produkt verbundene und zu erbringende Leistung („pay per use“). [24, 25] Da mit höherer Leistung des Produktes auch die Einnahmen des produzierenden Unternehmens steigen, wird diesem so ein Anreiz zur Weiterentwicklung des Produktes während der Produktnutzungsphase geboten. Zudem verbleibt der Besitz des Produktes in einem Subskriptionsmodell zumeist auf Seiten der Herstellerfirma, was einerseits zu einem geringeren Risiko auf Kundenseite führt und andererseits dazu führt, dass die Herstellerfirma ein Interesse an einer möglichst langen Lebensdauer des Produktes hat. [26]

Auch das Unternehmen Next e.GO Mobile SE als deutscher Kraftfahrzeughersteller für Elektroautos setzt ein solches Subskriptionsmodell ein, um durch gezielte Produktanpassungen die Potenziale der digitalen Ökonomie der Dinge zu erschließen. Bei den entwickelten Elektroautos des Unternehmens sollen mehrere Aspekte zur Steigerung der Nachhaltigkeit der Fahrzeuge beitragen. So wird beispielsweise eine robuste Polymer-Außenhaut eingesetzt, welche bei Bedarf leicht zu erneuern ist. In der Folge kann diese inkrementelle Erneuerung eine Verlängerung des Lebenszyklus des gesamten Fahrzeuges unterstützen. Soll eine Außenhaut während der Nutzungsphase ausgetauscht werden, ist es notwendig, dass das Unternehmen den Fahrzeugrestwert im Rahmen eines Subskriptionsmodells kontrollieren kann.

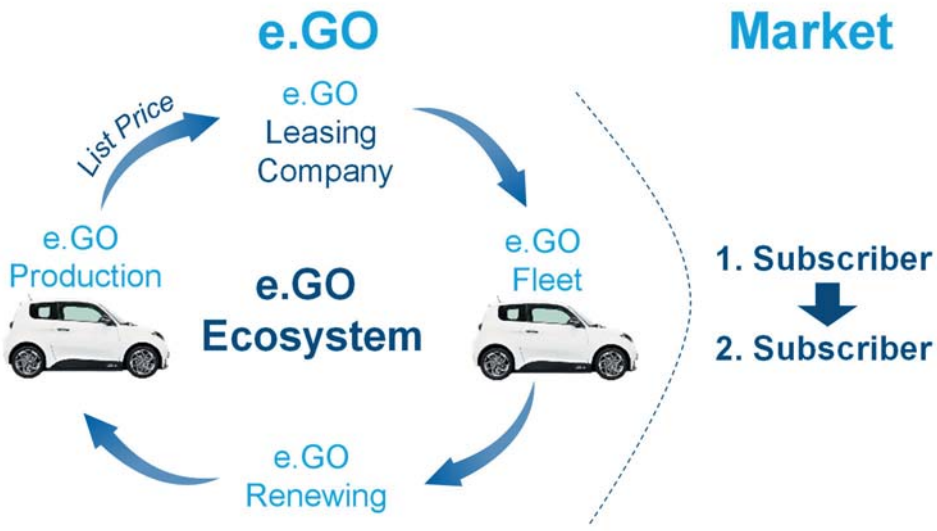



*Bild 11: Realisierung von Releases innerhalb des e.GO Ecosystems*

So hat die Next e.GO Mobile ein sogenanntes *e.GO Ecosystem* aufgebaut, welches sich aus der Produktion der Fahrzeuge und der sogenannten e.GO Fleet zusammensetzt (vgl. Bild 11). Die e.GO Fleet wird dabei durch geleaste Fahrzeuge aus der e.GO Produktion gespeist. Kundinnen und Kunden, welche ein Subskriptionsmodell nutzen, mieten bei Bedarf ein Fahrzeug aus der e.GO Fleet. Da die e.GO Fleet als Teil des e.GO Ecosystems eine Transparenz über den Zustand der Fahrzeuge in der Flotte bietet, kann eine strukturierte und gezielte Erneuerung der Fahrzeuge realisiert werden. Diese werden dafür in die Produktion zurückgeführt, durch beispielsweise den Austausch der Polymer-Außenhaut bei Bedarf erneuert und wieder in die e.GO Fleet zurückgeführt. Durch ein solches Modell werden nicht nur Anpassungen während der Produktnutzungsphase realisiert, sondern es wird auch die Auslastung jedes Fahrzeugs während seiner Nutzung maximiert, da die Fahrzeuge nur im Bedarfsfall von den Kundinnen und Kunden aus der e.GO Fleet gemietet werden. Darüber hinaus können Daten von der Nutzung der Fahrzeuge im Subskriptionsmodell aufgenommen werden und dazu dienen, weitere Potenziale zur Anpassung der Funktionalitäten oder zur Verlängerung des Fahrzeuglebenszyklus zu identifizieren. Diese können in der e.GO Produktion durch gezielte Maßnahmen erschlossen werden. So können aus aufgenommenen und ausgewerteten Daten sowie abgeleiteten Maßnahmen in der Release-Phase neue Wertschöpfungsmodelle im Sinne der digitalen Ökonomie der Dinge realisiert werden. Durch die Generierung von Erkenntnissen über den tatsächlichen Einsatz der Produkte können dem Kundenkreis neue, bedarfsgerechte Nutzungsangebote bereitgestellt werden.

Mit der Implementierung der Entwicklungsmaßnahmen in die Produktnutzung wurden die vier Phasen von der Datenaufnahme über die Identifizierung von Potenzialen und die Ableitung von konkreten Maßnahmen durchlaufen. Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 3 enden diese vier Phasen damit jedoch nicht. Da die Produktnutzungsphase stets neue Potenziale zur Adressierung der Paradigmen einer digitalen Ökonomie der Dinge und damit zur Erreichung nachhaltiger Ziele bietet, bilden die vier Phasen einen iterierenden Zyklus. An die Einbringung der Maßnahmen in die Produktnutzung schließt sich daher die erneute Datenaufnahme im Sinne der Monitor-Phase an.

## 4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden die Charakteristika einer analogen Ökonomie der Dinge vorgestellt, welche heutzutage oftmals handlungsleitend für zahlreiche produzierende Unternehmen sind. Die Charakteristika zeichnen sich durch möglichst umfangreiche Produktfunktionalitäten sowie eine kurze Lebensdauer der Produkte aus. Eine möglichst hohe Auslastung des Produktes während der Nutzung wird nicht fokussiert. Da diese Charakteristika im Widerspruch zu den Säulen der Nachhaltigkeit stehen, wird die Notwendigkeit eines neuen Ökonomiedenkens, der sogenannten digitalen Ökonomie der Dinge, dargestellt. Diese zeichnet sich durch einen Paradigmenwechsel aus, wonach Produktfunktionalitäten der tatsächlichen Produktnutzung angepasst sowie eine hohe Auslastung und maximale Lebensdauer der Produkte angestrebt werden. Diese Paradigmen zahlen damit wesentlich auf die Realisierung von Nachhaltigkeitszielen, insbesondere der ökologischen Nachhaltigkeit, ein. Zur Realisierung der Potenziale einer digitalen Ökonomie der Dinge werden, durch die Übertragung der Prinzipien von DevOps aus der Software-Branche auf die Infrastruktur des IoP, vier wesentliche Handlungsfelder in Form von iterierenden Phasen identifiziert. Diese vier Phasen werden im Beitrag vorgestellt. In der Monitor-Phase gilt es, Nutzungsdaten zielgerichtet aus einer erweiterten Smart Data Ebene aufzunehmen. Diese Nutzungsdaten werden in der Evaluate-Phase hinsichtlich

Potenzialen zur Adressierung der Paradigmen der digitalen Ökonomie der Dinge analysiert. In der Adapt-Phase werden diese Potenziale in konkrete Entwicklungsmaßnahmen übersetzt und durch geeignete Simulationen validiert. Die Maßnahmen werden in der letzten Phase, der Release-Phase, in das Produkt eingebracht. Dazu wird am Beispiel von Subskriptionsmodellen ein geeigneter Rahmen vorgestellt, welcher ebenso für das produzierende Unternehmen Anreize für solche Maßnahmenimplementierungen bietet.

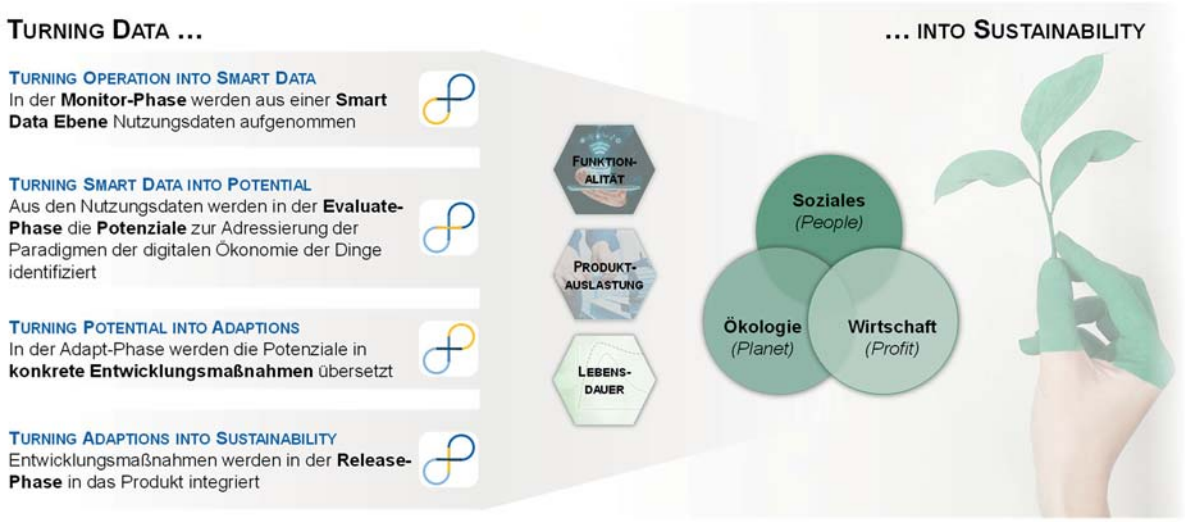



*Bild 12: Steigerung der Nachhaltigkeit durch den Paradigmenwechsel der digitalen Ökonomie der Dinge*

Durch das kontinuierliche Durchlaufen dieser vier Phasen werden schlussendlich die Paradigmen der digitalen Ökonomie der Dinge adressiert (vgl. Bild 12). An den vorgestellten Beispielen wird aufgezeigt, wie die Funktionalitäten des Produktes gezielt an die tatsächliche Nutzung des Produktes angepasst werden können. Die Lebensdauer der Produkte wird durch den Austausch physischer Module oder durch die Anpassung von Betriebsparametern verlängert. Die maximale Auslastung der Produkte in der Nutzung wird im Rahmen der vorgestellten Subskriptionsmodelle forciert. Die Adressierung dieser Paradigmen leistet damit einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Nachhaltigkeit. Durch einen gezielteren und effizienteren Einsatz der Produkte sowie durch die Verlängerung des Produktlebenszyklus wird insbesondere die ökologische Nachhaltigkeit durch die Schonung natürlicher Ressourcen und endlicher Rohstoffe adressiert.

# 5 Literatur


[1] G. Schuh, “Lebenszyklusorientierte Produktentwicklung,” in *Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation*, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, S. 195–210.

[2] K. Ehrlenspiel und H. Meerkamm, I*ntegrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*, 5. Auflage. München: Hanser, 2013.

[3] U. Hermann, *Digitalisierung im Industrieunternehmen: Die Chancen der digitalen Ökonomie der Dinge erkennen, entwickeln und erfolgreich umsetzen*: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2020.

[4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU, Green-Tech made in Germany 2021: *Umwelttechnik-Atlas für Deutschland*: dot.blue – communication & design, 2021.

[5] G. Walther, *Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke: Überbetriebliche Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus*, Wiesbaden: Gabler, 2010.

[6] B. Smith, *Microsoft will be carbon negative by 2030*. [Online]. Verfügbar: https://blogs.microsoft.com/blog/2020/01/16/microsoft-will-be-carbon-negative-by-2030/ (zugegriffen: Mai 4 2021).

[7] Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, *Cyber-Physical Systems: Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion*. Berlin: Springer, 2011.

[8] M. Herterich, F. Uebernickel, und W. Brenner, “Nutzenpotentiale cyber-physischer Systeme für industrielle Dienstleistungen 4.0,” HMD, Jg. 52, Nr. 5, S. 665–680, 2015.

[9] B. Mayer, “Digitalisierung bei Volkswagen,” 28 Sep., 2010. https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/mobilitaetsservices/volkswagen-software-entwicklung/ (zugegriffen: Apr. 20 2021).

[10] M. Hüttermann, *DevOps for Developers*. Berkeley, CA: Apress, 2012.

[11] E. Wolff, *Continuous Delivery: Der pragmatische Einstieg*, 2. Auflage. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2016.

[12] R. Alt, G. Auth, und C. Kögler, I*nnovationsorientiertes IT-Management mit DevOps: IT im Zeitalter von Digitalisierung und Software-defined Business*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2017.

[13] J. Jenkins, “Velocity Culture,” Santa Clara, CA, USA, Jun. 14 2011.

[14] P. Fassbinder und Siemens AG, “Continuous Delivery and DevOps: in industrial environments,” 2019.

[15] Amazon Web Services, Inc., *DevOps and Amazon Web Services (AWS).* [Online]. Verfügbar: https://aws.amazon.com/de/devops/ (zugegriffen: Apr. 20 2021).

[16] G. Schuh, J.-P. Prote, A. Gützlaff, K. Thomas, F. Sauermann, und N. Rodemann, “Internet of Production: Rethinking production management,” in *Production at the leading edge of technology*, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019, S. 533–542.

[17] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, und M. Palaniswami, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,” *Future Generation Computer Systems*, Jg. 29, Nr. 7, S. 1645–1660, 2013.

[18] M. E. Porter und J. E. Heppelmann, “How smart, connected products are transforming competition,” *Harvard Business Review*, 2014.

[19] G. Schuh et al., “Effizientere Produktion mit Digitalen Schatten,” *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Nr. 115, S. 105–107, 2020.

[20] M. Focke und J. Steinbeck, *Steigerung der Anlagenproduktivität durch OEE-Management,* Wiesbaden: Springer Gabler, 2018.

[21] U. Lindemann, Hrsg., Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser, 2016.

[22] R. Klostermeier, S. Haag, und A. Benlian, *Geschäftsmodelle digitaler Zwillinge: HMD Best Paper Award 2018,* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer Vieweg, 2020.

[23] N. ach, W. Buchholz, und B. Eichler, “Geschäftsmodelle für Wertschöpfungsnetzwerke — Begriffliche und konzeptionelle Grundlagen,” in *Geschäftsmodelle für Wertschöpfungsnetzwerke*: Gabler Verlag, 2003, S. 1–20,

[24] H. Kagermann, “Chancen von Industrie 4.0 nutzen,” in *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4*: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017, S. 237–248.

[25] M. Ott, A*pps effektiv managen und vermarkten: Die eigene App erfolgreich veröffentlichen: von der Konzeption bis zur Vermarktung*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.

[26] D. Benček, L. Ceni-Hulek, A. Wambach, und J. Weche, “Wettbewerb in Zeiten der Pandemie,” *Wirtschaftsdienst*, Jg. 100, Nr. 11, S. 876–884, 2020.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 2.1:

Prof. Dr.-Ing. G. Schuh, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT
A. Becker, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
A. Britz, Microsoft
Dr.-Ing. G. Hegener, EMAG Maschinenfabrik GmbH
Prof. Dr. U. Hermann, Next e.GO Mobile SE
M. Kuhn, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
S. Wlecke, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

## 2.2 Biologische Transformation in der Produktion

*C. Brecher, A. Broos, B. Essig, B. Hofmann, G. Mallmann, T. Muecke, M. Queins, M. Streichfuss, A. Tavakolian, D. Zontar*

### Gliederung

1 Einleitung und Motivation ..... 173

2 Systematik der Biologisierung ..... 174

3 Beispiele und übergeordnete Anwendungsfälle in der biologischen Transformation ..... 177

3.1 Kreislaufwirtschaft ..... 177

3.2 Vielfalt in der Produktion ..... 180

3.3 Konvergenz Mensch Maschine ..... 184

4 Blick in die Zukunft ..... 189

5 Literatur ..... 191

## Kurzfassung

### Biologische Transformation in der Produktion

Die Ressourcenknappheit und der Klimawandel zwingen die Produktionstechnik über ihre klassische Wertschöpfung nachzudenken. Die biologische Transformation setzt an dieser Stelle an. Sie nutzt die Natur als Vorbild und kann daher als nächster notwendiger Technologiesprung nicht nur in Richtung nachhaltige, sondern auch resiliente Produktion gesehen werden. Durch die Verschmelzung von Technik, Bio- sowie Informationstechnologie wird ein biointelligentes System geschaffen, dass das Herzstück der biologischen Transformation ausmachen wird. Die Produktion von Morgen wird wie das natürliche Ökosystem autonom und ohne explizit programmierte Abläufe auf Änderungen reagieren, ihre Stoffe und Energien möglichst lange und sinnvoll nutzen sowie menschliche Bedürfnisse berücksichtigen. Für eine erfolgreiche Umsetzung ist ein interdisziplinärer Wissenstransfer zwingend notwendig. Zudem stehen Politik und Wirtschaft in der Verantwortung, eine Akzeptanz innerhalb der Bevölkerung zu schaffen und ethische Fragestellungen offen zu diskutieren.



## Abstract

### Biological transformation in manufacturing

The shortage of resources and climate change are forcing production technology to think about its traditional value creation. This is the starting point for biological transformation. It uses nature as a model and can therefore be the next necessary technological leap not only towards sustainable but also resilient production. The fusion of technology, biotechnology and information technology will create a bio-intelligent system that will be the heart of biological transformation. Like the natural ecosystem, tomorrow's production will react autonomously and without explicitly programmed processes to any changes, will use its materials and energies as long and sensibly as possible and will take human needs into account. For successful implementation, interdisciplinary knowledge transfer is essential. In addition, politics and economy are responsible for creating acceptance within the population and discussing ethical questions openly.

# 1 Einleitung und Motivation

Der globale Ressourcenverbrauch ist insbesondere in den letzten 30 Jahren um 118 Prozent gestiegen und wird mit wachsender Weltbevölkerung weiter zunehmen. Die industrielle Wertschöpfung als Herz der deutschen Volkswirtschaft und größter Motor für Innovationen in Deutschland, trägt einen signifikanten Teil dazu bei und wirkt sich auf unsere Umwelt aus. Der Klimawandel wird durch ineffiziente Produktionsprozesse und unbedachtem Konsum weiter befeuert. Dies stellt nicht nur eine Bedrohung für unsere traditionelle Wertschöpfung, sondern auch für unsere eigene Existenz dar. Daher ist die notwendige Konsequenz, die heutige Produktion einem Wandel zu unterziehen, da nur durch eine Änderung dieser gleichzeitig unsere Lebensstandards aufrechterhalten und natürliche Ressourcen geschont werden können. Dieser Wandel soll in Zukunft das wirtschaftliche Wachstum vom Ressourcenverbrauch entkoppeln und zur Entlastung der Umwelt beitragen. [1], [2], [3]

Deutschland ist mit seiner exzellent aufgestellten Wirtschaft und Forschungslandschaft in der Lage, relevante Lösungsbeiträge zur Bewältigung der großen gesellschaftlichen Herausforderungen zu entwickeln und bildet den Ausgangspunkt für eine an nachhaltigen Lösungen ausgerichtete Forschungsstrategie. Daher stellen Fraunhofer und Kooperationen dem digitalen Wandel einen biologischen Wandel an die Seite und schaffen mit der biologischen Transformation den nächsten notwendigen Technologiesprung in Richtung nachhaltiger Produktion. Die biologische Transformation bringt ein neues Denken mit sich und nutzt die Natur als Vorbild, ein resilientes Produktionssystem zu schaffen. Die Produktion der Zukunft soll nicht länger durch lineares Denken und einseitige Output-Optimierung geprägt sein, sondern sich wie die Natur als ganzheitliches und vernetztes System organisieren. Daher ist es von großem Interesse, die Idee der Kreislaufwirtschaft in die Produktion zu integrieren, sodass das Naturprinzip der Ressourceneffizienz und der Stoffkreisläufe genutzt werden kann. Die Natur zeichnet sich durch Vielfalt und Diversität aus, die es ihr erlauben, auf Änderungen in der Umgebung ohne zentrale Steuerung robust zu reagieren. Eine Adaption dieser Eigenschaften in Produktionssysteme bergen großes Potenzial. Eine flexible, sich selbstregulierende vollautonome Produktion wird möglich, die Störungen eigenständig identifiziert, behebt und als Potenzial für ihre eigene Optimierung sieht. Dabei wird nicht auf einen oft zeitlich begrenzten Hauptzweck hin maximiert, sondern es findet wie in der Natur eine Anpassung an mehrere Randbedingungen gleichzeitig statt. [2], [4], [5]

Die folgende Aussage des Autors Yuval Noah Harari beschreibt diese zukünftige Entwicklung sehr zutreffend:

„*Vier Milliarden Jahre lang war alles Leben auf der Erde organisch und entwickelte sich durch natürliche Selektion. Jetzt verlassen wir den organischen Pfad und begeben uns ins Unorganische. Wir erschaffen unorganische Lebensformen, die keiner Evolution durch natürliche Selektion unterworfen sind. Die Evolution wird mehr und mehr durch intelligente Konstruktionen ersetzt*.“ [7]

In diesem Zusammenhang wird es auch eine stärkere Konvergenz von Maschine und Mensch geben. Während der Mensch durch externe Geräte (z.B. Exoskelette) maschinentypische Eigenschaften wie ausdauernde Kraft übernimmt, adaptiert die Maschine menschliche Charakteristiken. So kann durch die Verschmelzung von Technik, Bio- sowie Informationstechnologie ein biointelligentes System geschaffen werden, dass das Herzstück der biologischen Transformation ausmachen wird. [1], [2]

Im Weiteren werden die Anwendungsfälle „Kreislaufwirtschaft“, „Abweichung als Potenzial“ und „Konvergenz Mensch Maschine“ in Bezug auf das AWK Motto „turning

data into sustainability“ näher betrachtet. Mit der biologischen Transformation und dessen Zielausrichtung auf nachhaltige Denkansätze fügt sich dieser Beitrag in die übergeordnete Fragestellung der Konferenz auf besondere Weise ein.

## 2 Systematik der Biologisierung

Die biologische Evolution zeigt uns ein äußerst effizientes System auf, wie verschiedene Agierende mit ihrer Umwelt interagieren, im Einklang leben und auf Veränderungen reagieren können. Hauptmerkmal ist dabei die genetische Variabilität, die ein erfolgreiches Individuum definiert. Durch die Fortpflanzung (Rekombination) dieser erfolgreichen Individuen können sich Arten über lange Zeiträume an einen vorliegenden Selektionsdruck anpassen (z.B. Klimaveränderungen oder die Erschließung einer ökologischen Nische) und so ihre Existenz sichern. Die Übertragung dieser evolutionären Prozesse und Prinzipien der Natur auf die Technik stellt einen Lösungsansatz für die nachhaltige Produktion von morgen dar. Aufgrund der Unterschiede in der Beschaffenheit der Systeme ist keine unmittelbare Adaption, sondern lediglich eine Annäherung biologischer Mechanismen möglich. [6]

Diese Postulierung einer Konvergenz ist damit begründet, dass Informationen sowohl bei Lebewesen als auch in technologischen Entwicklungen auf logischen Grundlagen beruhen und sich Erkenntnisse aus den jeweiligen Bereichen gegenseitig inspirieren können. Das natürliche Ökosystem, in der die vorhandenen Lebewesen im Gleichgewicht miteinander interagieren, kann auf ein digitales Ökosystem in der Produktion übertragen und erweitert werden (vgl. Bild 1). Dieses besteht genau wie das natürliche Ökosystem aus heterogenen Systemen, die miteinander vernetzt sind und dessen Akteure mit der Umgebung kommunizieren. Das übergeordnete Ziel und damit der Wert des digitalen Ökosystems ist es, das Potenzial zu schaffen, Gewinne zu erzielen und vergleichbar zum lebenden Organismus als Organisation zu überleben. [22]

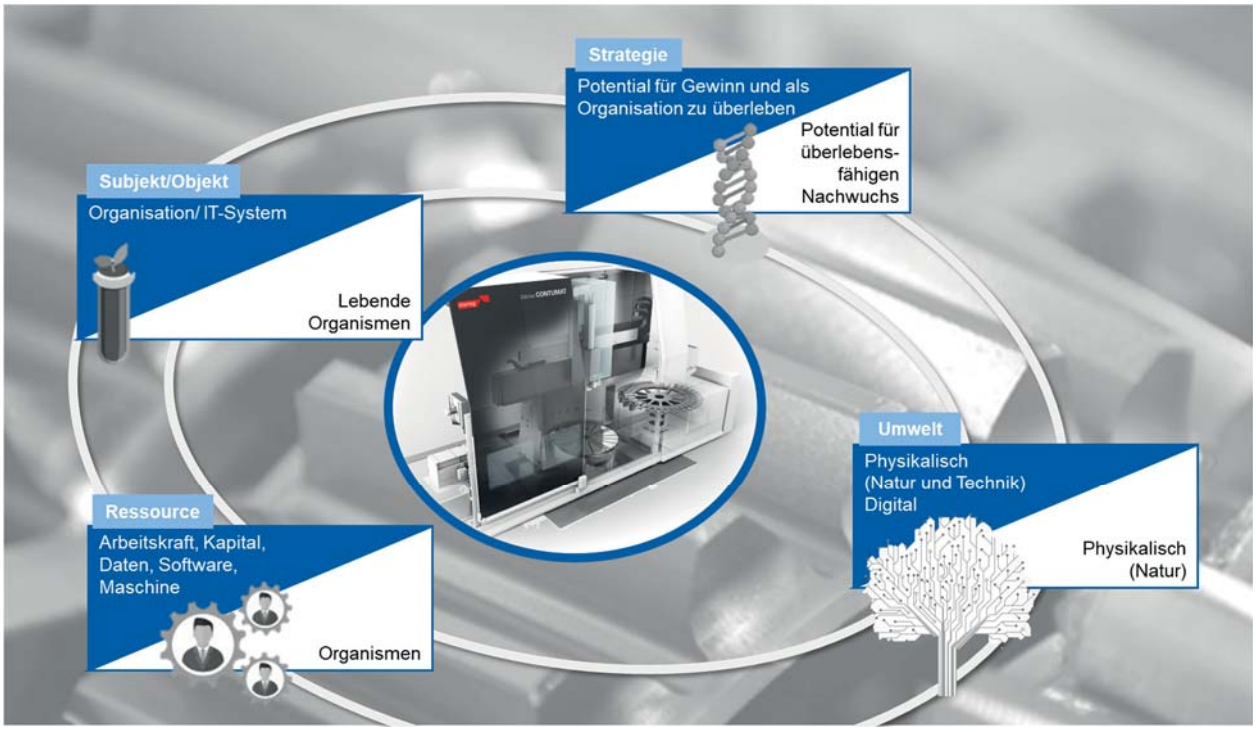



*Bild 1: Gegenüberstellung von natürlichem und digitalem Ökosystem bezogen auf die Produktion nach [22]*

In diesem Zusammenhang ist die Unterscheidung zwischen dem Top-down und dem Bottom-up Prinzip zu nennen. Beim Top-down-Prinzip ist ein technisches Problem vorhanden, für das bislang keine Lösung existiert und daher in der Biologie nach potenziellen Ansätzen gesucht wird, die wiederum technisch zu interpretieren sind. Der Bottom-up-Ansatz beginnt mit der Analyse von Naturphänomenen, gefolgt von einer Abstraktion der biologischen Prinzipien und einer Suche nach einer technischen Anwendung. [8]

Um diese noch sehr abstrakte Darstellung greifbarer zu machen und für die Produktion weiter zu konkretisieren, kann die biologische Transformation in drei Entwicklungsstadien unterteilt werden: Inspiration, Integration und Interaktion (vgl. Bild 2). [1], [2]

Im ersten Entwicklungsmodus, der Inspiration, werden Konzepte der Natur und evolutionsbiologische Prozesse auf Wertschöpfungssysteme übertragen. Dies ermöglicht die Entwicklung von neuartigen Materialen und Strukturen (z.B. Leichtbau), Funktionalitäten (z.B. Biomechanik) sowie Organisations- und Kooperationslösungen (z.B. Schwarmintelligenz, künstliche neuronale Netze, Algorithmen erleichterter Variation). Zu der bioinspirierten Wertschöpfung zählen sowohl Techniken, die bereits seit Jahrzehnten existieren und bereits Einzug in die Produktion und den Konsumentenmarkt gefunden haben, als auch Technologien, die noch aktuelles Forschungsthema sind. Zu den bekannten und bereits eingesetzten Techniken gehört beispielsweise der Lotus-Effekt, der auf den Blättern der gleichnamigen Pflanze entdeckt wurde. Bei dieser sind die Adhäsionskräfte zwischen den Wassertropfen und der Oberfläche der Pflanze so klein, dass diese von der Oberfläche abperlen. Mittels der Imitierung der Nanostrukturen der Lotusblätter werden in der Technik Beschichtungen für Bauteile entwickelt, die beispielweise das Anlagern von Bakterien vermeiden. Dies ist ein klassisches Beispiel für den Bottom-up-Ansatz. Ein zurzeit hoch aktuelles Beispiel sind künstliche neuronale Netze, die in der Lage sind, aus Daten nichtlineare Zusammenhänge zu abstrahieren. In der Neurowissenschaft wird von der Hypothese ausgegangen, dass die mentale Aktivität des menschlichen Gehirns hauptsächlich aus elektrochemischer Aktivität in Netzen von Gehirnzellen, den sogenannten Neuronen, besteht. Diese Vorstellung wurde von der Informatik adaptiert, um künstliche neuronale Netze zu entwickeln. [2], [9]

Die beiden vorgestellten Beispiele divergieren in ihrer Funktionsweise sehr stark und zeigen das breite Anwendungsspektrum. Weitere klassische Beispiele sind in Tabelle 1 abgebildet.

*Tabelle 1 Von natürlichen Prozessen inspirierten Technologie-Bespielen nach [2]*

| **Natürliches System** | **Technisches System** |
|---|---|
| ressourcenschonender Rindenbau | Additive Fertigung |
| Exoskelett von Insekten | Exoskelett |
| Knochenstruktur | Leichtbau |
| Vogelscharm | Schwarmintelligenz für Organisationen |
| Fotosynthese in Pflanzen | Künstliche Fotosynthese |

Im zweitem Entwicklungsschritt, der Integration, findet das Wissen über die Biologie Anwendung in Form einer Integration biologischer Systeme in traditionelle Produktionssysteme (z.B. Substitution chemischer durch biologische Prozesse). Dies geschieht über die Biotechnologie als Enabler, die nach Definition der OECD

(Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) „die Anwendung von Wissenschaft und Technik auf lebende Organismen, Teile von ihnen, ihre Produkte oder Modelle von ihnen zwecks Veränderung von lebender oder nichtlebender Materie zur Erweiterung des Wissensstandes, zur Herstellung von Gütern und zur Bereitstellung von Dienstleistungen ist“ [10]. Dabei wird sich die Symbiose, ein Schlüsselprinzip der Evolution, zunutze gemacht. Beispiele für diese Synergiepotenziale von industrieller Wertschöpfung und Natur sind biotechnisch hergestellte Pharmazeutika, Funktionalisierung von Polymeren, die Rückgewinnung von Biokunststoffen aus $CO_2$-Abfallströmen oder die Gewinnung von Methan aus Industrieabwässern. [1], [3]

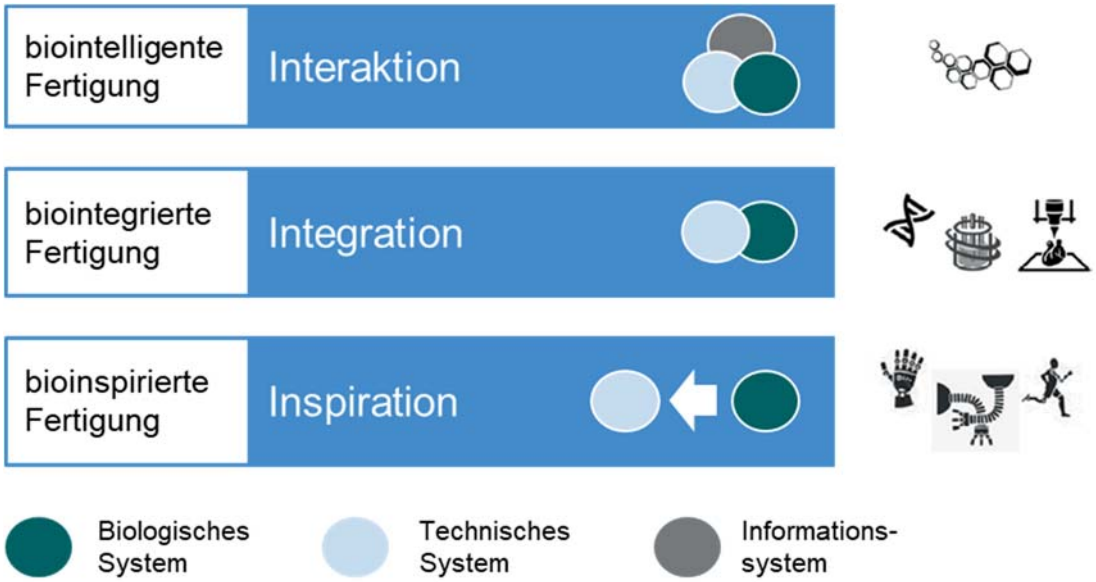



*Bild 2: Entwicklungsschritte der biologischen Transformation [1]*

Der letzte Schritt, die Interaktion, stellt den ausschlaggebendsten Punkt für die zukünftige Produktionstechnologie dar. Hier wird durch eine umfassende Interaktion von technischen, biologischen und informationstechnischen Systemen eine autarke Wertschöpfungsstruktur, das sogenannte biointelligente Wertschöpfungssystem geschaffen. Dabei wird ein wertschöpfendes System als biointelligent angesehen, wenn es mindestens eine biologische Komponente im Produkt oder Produktionsprozess gibt. Dieses biointelligente System ist nach den Eigenschaften von Lebewesen konzipiert, welche die zelluläre Organisation, den Metabolismus, die Homöostase, die Stimulation und Kommunikation, die Reproduktion, die Vererbung und Entwicklung sowie die Bewegung und Entwicklungsfähigkeit mit einschließen. [1], [2]

Bei genauer Betrachtung der Natur kann deutlich beobachtet werden, dass die Dynamik vieler biologischer Systeme und die Gesetze, die sie regeln, auf einer überraschend kleinen Zahl einfacher allgemeiner Regeln beruhen, die ohne eine externe Kontrollinstanz ausgeführt werden. Mit Hilfe dieser Fähigkeiten können zum Beispiel Milliarden von Blutzellen, die das Immunsystem bilden, den Organismus vor den Krankheitserregern schützen, ohne dass eine zentrale Steuerung des Gehirns erforderlich ist. In ähnlicher Weise wird ein ganzer Organismus autonom über die Homöostase in einem relativ stabilen Gleichgewichtszustand gehalten. Der Prozess der Aufgabenverteilung in den Insektenkolonien wird kollaborativ entschieden und entsprechend der Bereitschaft eines Individuums so durchgeführt, dass die Gesamtaufgabe mit einer globalen Intelligenz, die sich aus einfachen individuellen Aktionen zusammensetzt, optimiert wird. [2]

Biointelligente Produktionssysteme zeichnen sich nicht durch einzelne Eigenschaften aus, sondern aus der Summe all ihrer Eigenschaften. Das System ist nicht länger als abgegrenzte Einheit, sondern als lokal vorhandene Ressource zu verstehen. [2]

Somit bietet eine gesamte biointelligente Wertschöpfung die Möglichkeit, Produktionsverfahren mit selbstlernenden Algorithmen zu koppeln, um eine Symbiose lokaler Ressourcen mit ihrer Umgebung zu realisieren. Aufgrund zunehmender Rechenleistungen und Fortschritte in der Informationstechnologie kann dies virtuell über digitale Zwillinge geschehen. So kann ein vernetztes, sich selbst regulierendes digitales Ökosystem geschaffen werden, das genauso wie das natürliche Ökosystem von den lokalen Rahmenbedingungen beeinflusst wird. [1], [2], [22]

# 3 Beispiele und übergeordnete Anwendungsfälle in der biologischen Transformation

Im Folgenden werden drei explizit mögliche Anwendungsfälle für eine biologische Transformation in der Produktion dargestellt. Ausgehend von der Thematisierung der Kreislaufwirtschaft, wird anschließend die Verwendung selbstlernender Algorithmen näher erläutert, um final die Konvergenz von Mensch und Maschine zu konkretisieren.

## 3.1 Kreislaufwirtschaft

Die Idee der Kreislaufwirtschaft, die sich den Stoffkreislauf der Natur zum Vorbild nimmt, findet trotz seines großen Potenzials noch keine breite und standardisierte Verwendung in deutschen Produktionsketten. Der Stoffkreislauf der Natur umfasst alle Prozesse der Produzenten und Konsumenten, die den Auf-, Um- und Abbau von Stoffen einschließen wie z.B. Fotosynthese, Atmung und Gärung. Wird dies auf die Kreislaufwirtschaft übertragen, kann durch eine intelligente, kaskadische Nutzung, Stoffe und Energie möglichst lange und sinnvoll genutzt werden, ohne Abfälle und Emissionen zu produzieren. [12]

Die Etablierung einer nachhaltigen Herangehensweise gewinnt stetig an strategischer Relevanz in der betrieblichen Leistungserstellung, was auch in den Sustainable Development Goals (SDG) wiederzufinden ist.

„*Die Substitution fossiler Ressourcen durch nachwachsende biologische Materialien und Chemikalien sowie die Organisation in geschlossenen Stoffkreisläufen leisten einen signifikanten Beitrag zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks der Wirtschaft. Über die Nutzung biologischer Prozesse und biomimetischer Ansätze können Produktionsprozesse effizienter und somit rohstoffschonender gestaltet werden. Die Nutzung biologischer Prinzipien (z.B. Schwarmintelligenz als digitaler Prozess) kann logistischen Aufwand und industrielle Konzentration an besonders belasteten Standorten reduzieren*.“ [3]

Insbesondere die deutsche Industrie befindet sich in der Position dieses Ziel zu erfüllen, da ihre Produkte als robust, funktionell, leistungsstark und langlebig gelten und das Label „Made in Germany“ zunehmend mit Nachhaltigkeit assoziiert wird. [1], [3]

Die gesamte Wertschöpfungskette der Produktion innerhalb kurzer Zeit simultan zu einer Kreislaufwirtschaft zu transformieren ist nicht realistisch, jedoch bietet die Werkzeugmaschinenbranche Potenzial, um heutige und zukünftig mögliche Konzeptionierungen zu evaluieren. Zurzeit wird die Entscheidung zur Überholung einer Maschine bzw. Wiederverwendung von Werkzeugen oder Maschinenbauteilen aus rein ökonomischer Sicht analysiert und getroffen. Wie in Bild 3 verdeutlicht wird, rentiert sich die Überholung (Retrofit) der Maschine erst mit steigendem Investitionsvolumen. Um ein

besseres Verständnis für die Modernisierungsentscheidung zu erlangen, werden die Maschinenteile mit Gebrauchsgegenständen verglichen. Selbst für bereits sehr komplexe Bauteile, wie das der Spindel, werden zurzeit kaum Wiederverwendungsmaßnahmen angedacht. Anhand des Vergleichsprodukts „Mobiltelefon“ ist allerdings deutlich zu erkennen, dass dies nicht nur ein Problem der Produktion, sondern auch das der Konsumierenden ist. Die Bauteile eines Telefons werden in der Regel nicht wiederverwertet oder repariert, sondern entsorgt. Dabei sind Werkzeugmaschinen generell technisch für eine Überholung von Verschleißkomponenten und Steuerungstechnik nach einer Gebrauchsdauer von 10 bis 20 Jahren geeignet bzw. gestaltet.

*Bild 3: Wirtschaftlichkeit als bisherige Entscheidungsgrundlage für Retrofit*

Es ist bei weitem nicht ausreichend, das Verhältnis aus notwendiger Arbeitsleistung und Neuteilen zum Wert der wiederverwendbaren Komponenten als Entscheidungskriterien zu verwenden. Über den Retrofit der Maschine wird eine wertsteigernde Maßnahme an einer vertrauten, verlässlichen Maschine durchgeführt, wodurch ein technisches Risiko minimiert wird, welches bei einer Neuinvestition anfallen kann. Anschließend besitzt die Maschine einen neuartigen Charakter und kann nochmals die komplette Zeitspanne verlässlich genutzt werden. Aufgrund bekannter Maschinenperipherie und -performance ist der Anfahrprozess der Produktion nach einer Modernisierung häufig enorm steil, sodass Qualitäts- oder Produktivitätseinbußen verschwindend gering sind. Die Wirtschaftlichkeit ist zudem nochmals dadurch gegeben, dass im Schnitt eine vergleichbare Neumaschine (dieselbe Steifigkeit und Lebensdauer) mit entsprechendem Fundament und Aufstellung sowie Inbetriebnahme zu höheren Kosten und höheren Lieferzeiten führt. Folglich kann bereits heute ohne die Einführung biointelligenter Systeme durch die einfache Wiederverwertung von „alten“ Teilen ein gewisses Maß an Nachhaltigkeit und besserer Ökobilanz erzielt werden.

Die ursprüngliche Auffassung von der Maschine ist die eines mechanischen Gebildes, das eine bestimmte Aufgabe erfüllt und durch konkrete konstruktive Eigenschaften definiert ist. Dabei war die Definition der Maschine immer mit dem technologischen Entwicklungsstand der jeweiligen Zeit verbunden und ist somit nicht statisch, sondern passt sich den technologischen Möglichkeiten an. Die Verschmelzung von Informationstechnik mit dem Ansatz der biologischen Transformation zu einem biointelligenten System bietet die Vorlage, viele Teile der Werkzeugmaschine neu zu denken und in Bezug auf technologische, ökologische und wirtschaftliche Punkte zu optimieren. [13]

Dabei ist ein wesentlicher Gegenstand der Betrachtung das Material, aus der die Maschine gebaut ist. Die Verwendung von Metall als Konstruktionsmaterial kann in Zukunft zunehmend von alternativen Ansätzen ergänzt werden, die aus bioinspirierten oder sogar aus biointelligenten Materialien bestehen. Die insbesondere aus der Luftfahrt bekannten faserverstärkten Verbundwerkstoffe (mit thermoplastischer Matrix) könnten bereits eine Alternative darstellen, da sie gute Festigkeitswerte aufweisen und aufgrund zunehmender Nachfrage sowie besseren Simulationsmöglichkeiten immer günstiger werden. Des Weiteren bietet biologisch abbaubarer Kunststoff sowohl für sich alleingestellt, als auch in Kombination mit faserverstärkten Verbundwerkstoffen vielversprechende Möglichkeiten. Biointelligente Materialien, die sich bereits in Forschung befinden oder erst im Zuge der biologischen Transformation entwickelt werden, stellen besonders in Bezug auf den Recyclinggedanken innerhalb der Kreislaufwirtschaft großes Potenzial dar. Denn diese verursachen keine Abfälle oder irreversible Schäden am Ökosystem, sondern ganz im Gegenteil, säubern und bereichern dieses. Somit bieten biologische Strukturen bei minimalem Einsatz von Materialien und Energie eine breite Palette von Eigenschaften. Darüber hinaus wurden biologische Materialien in der Natur so „hergestellt“, dass sie innerhalb des Lebens operieren und daher hohe Temperaturen, hohen Druck oder stark verschmutzendes Material vermeiden. Dies erleichtert in der späteren synthetischen Herstellung dieser Materialien den Fertigungsprozess. [3], [8]

Um den Einsatz biologischer Materialien bei gleichzeitigem Beibehalten der vorherigen Maschineneigenschaften zu beschleunigen, muss sich auch das Maschinendesign ändern. Abhilfe kann hier die Idee von modularen, rekonfigurierbaren Produktionssystemen schaffen, nach denen aufgrund der Individualisierung des Produktangebots und der kleineren Losgrößen ohnehin verlangt wird. Diese Modularität bietet die Möglichkeit, dass zunächst nur einzelne Teile der Maschine aus alternativen Werkstoffen oder neuentwickelten biointelligenten Systemen bestehen. Die additive Fertigung zusammen mit dem 3D/4D Bioprinting, mit Zeit als vierter Komponente, ermöglicht die Produktion von biobasierten sowie biohybriden Materialen und damit neuer komplexer Maschinenteile. Hierbei reagieren die gedruckten Biomaterialstrukturen auf unterschiedliche Stimuli und reifen bzw. transformieren entsprechend. So können neue Generationen von Werkzeugmaschinen entwickelt werden, bei denen ökologische Gesichtspunkte unmittelbar mit einfließen können, ohne vorab etablierte Konzepte neu zu denken. Eine Lösung, die die Industrie heute bereits übernehmen könnte, ist eine Verlagerung von ölbasierten auf biobasierte Metallbearbeitungs-flüssigkeiten. In Industriearbeitskreisen des Fraunhofer IPT wird insbesondere im Bereich der UP-Maschinen am Einsatz von CFK-Komponenten in Werkzeugmaschinen gearbeitet. So bieten die Eigenschaften Steifigkeit, Eigendämpfung und thermisches Verhalten ein hohes Potenzial in diversen Baugruppen. Einige konkrete Beispiele stellen Sleeves für hochdrehende Spindeln, sowie der Einsatz für Fast-Tools und in Strukturbauteilen dar. Durch das thermische Verhalten von CFK lassen sich messtechnisch thermische Verformungen integral durch ein Skelett aus CFK-Komponenten erfassen, die andernfalls über Temperatursensoren und aufwendige FE-Modelle approximiert werden müssten. [25], [2], [8]

Wird nicht nur die Werkzeugmaschine, sondern die gesamte Produktionsfabrik betrachtet, wird sich dem Maßstab des Stoffkreislaufs aus dem natürlichen Ökosystem weiter angenähert. Der ursprüngliche Grund für den Bau von gegenwärtigen Fabriken war die Möglichkeit, eine große Anzahl von Maschinen mit einem Antriebssystem zu betreiben, weil diese energieliefernden Geräte kostspielig waren. Mit der Einführung der Computersteuerung und des Internets, die die Herstellung von individualisierten

Produkten innerhalb flexibler Versorgungsnetze und On-Demand-Logistik ermöglichen, sinkt der Bedarf an zentralisierten Fabriken. Dies ändert die Art und Weise der Fabrikplanung und ermöglicht der biologischen Transformation in der Wertschöpfungskette Einzug zu finden. Ein Beispiel wie ein solches System biointelligent gestaltet werden kann und die Idee der Kreislaufwirtschaft im vollen Maß adaptiert, ist in Bild 4 dargestellt. [23], [8]

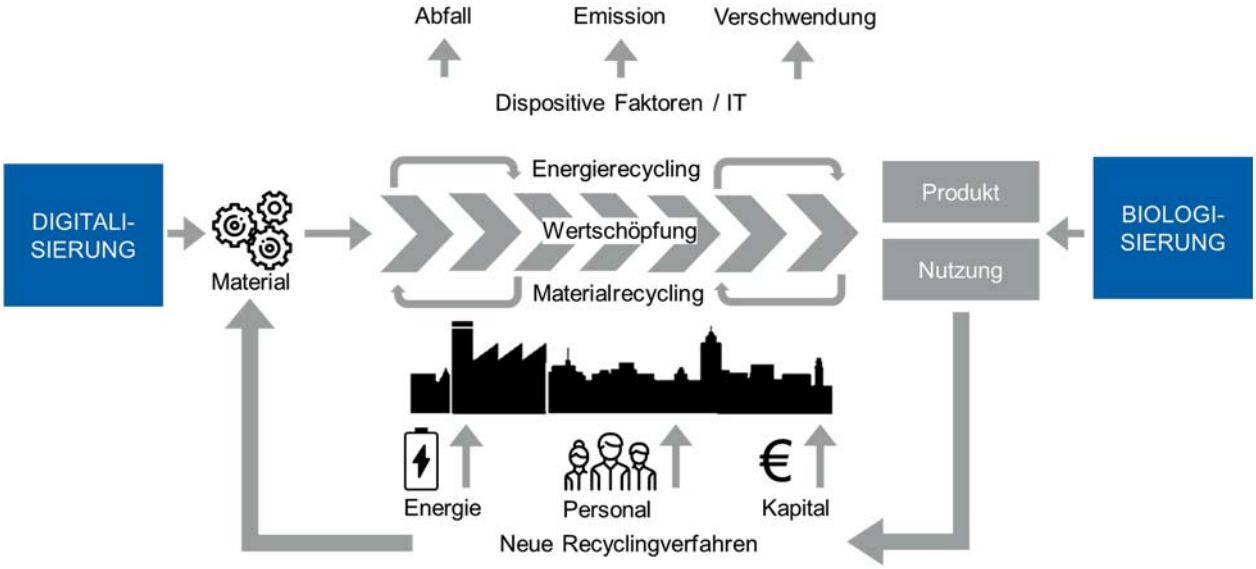



*Bild 4: Produktion der Zukunft in der Ultraeffizienzfabrik [23]*

Hier wird versucht, eine große Anzahl von möglichen Faktoren miteinander in Einklang zu bringen, um eine ressourcenschonende, energieeffiziente und emissionsarme Produktion zu erreichen, in der eine Überproduktion vermieden und zudem die biologischen Bedürfnisse der Menschen berücksichtigt werden. Sauer beschreibt die Möglichkeit, dass in Zukunft durch die Verschmelzung von Nano- und Biotechnologie biologische oder biobasierte Materie mit technischen Komponenten kommunizieren. So können industrie-4.0-fähige Fertigungstechnologien mit wiederverwertbaren Kunststoffen interagieren. Insgesamt entsteht eine Produktion, die in einem symbiotischen Verhältnis zu ihrer Umgebung ist. [23] Die Fähigkeit Produktionskapazität flexibel über Standorte hinweg bedarfsgerecht verlagern zu können, gehört zu den Erkenntnissen über Wettbewerbsvorteile, die sich durch die Coronapandemie besonders deutlich für kritische Güter, wie beispielsweise die Produktion von Medizingütern, gezeigt hat. Dabei steigert die lokale Produktion nicht nur die Nachhaltigkeit durch reduzierte Transportwege, sondern in gleichem Maße auch die notwendige Resilienz, wenn globale Lieferketten in ihrer Zuverlässigkeit angeschlagen sind.

## 3.2 Vielfalt in der Produktion

Eine wesentliche Charakteristik für ein biointelligentes System, das sich selbst entwickeln und regulieren soll, ist dessen Robustheit. Folglich ist die Realisierung von robusten Produktionsstrukturen ein wesentlicher Faktor, um die Resilienz in der gesamten Wertschöpfungskette zu steigern. Die generischen Regeln aus der Natur, die die im Ökosystem vorhandenen Entitäten ohne externe Aufsicht regulieren und sich durch Vielfalt und Variation auszeichnen, müssen mithilfe der Informationstechnik mathematisch übersetzt und der Produktion verfügbar gemacht werden. Im Folgenden wird ein kurzer Einblick gegeben, wie diese Regeln weiter konkretisiert und in mathematischer Form auf die Produktion bezogen werden können.

In der Biologie wird unter Robustheit eine Eigenschaft verstanden, die es einem System ermöglicht, seine Funktion gegen interne und externe Störungen aufrechtzuerhalten. Dies wird durch Fail-Safe-Mechanismen, einer Modularität sowie Entkopplung des Systems erreicht. Mit den Fail-Safe-Mechanismen werden Redundanzen erschaffen, die eine generell höhere Diversität und Heterogenität vorsehen und somit ausgefallene Komponenten leicht ersetzt werden können. Durch die Modularität können Störungen lokal gehalten werden, um Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu minimieren und über die Entkopplung können Variationen auf niedriger Ebene von Funktionalitäten auf hoher Ebene isoliert werden. Diese Eigenschaften sind aktuell in den meisten Softwarearchitekturen grundsätzlich etabliert und umgesetzt. Für die Produktion ergeben sich deutlich komplexere Anforderungen, weshalb es zum einen schwierig ist, die Bedeutung von Diversität und Heterogenität zu definieren und zum anderen eine Umsetzung verschiedener Produktionsstrategien häufig weder ökonomisch noch technisch umsetzbar ist. Dies würde bedeuten, alle potenziellen Störeinflüsse vorab zu kennen und dementsprechend Lösungen zu implementieren. [8]

Daher muss mit adaptiven, selbstlernenden Algorithmen Abhilfe geschaffen werden, die die klassischen Methoden ersetzen sollen. Diese Algorithmen können sich an einem dem lebenden Organismus zugeschriebenem Prinzip bedienen, dem bekannten Trial & Error Verfahren. Bei diesem Verfahren werden solange zulässige Lösungsmöglichkeiten versucht, bis das gewünschte Resultat gefunden wurde. Ein bekanntes Beispiel dieses Optimierungsproblems ist das Reinforcement-Learning. Es besteht aus einem Agenten, der mit seiner Umgebung in definierten Zeitschritten interagiert. An jedem Zeitschritt beobachtet der Agent seinen Zustand, führt basierend auf diesem eine Aktion aus, landet in einem Folgezustand und erhält dafür eine Belohnung. Dieser Vorgang wird fortgesetzt bis das gewünschte Ziel erreicht ist. In Bild 5 wird diese Idee auf ein in Zukunft mögliches Anwendungsfeld in der Produktion dargestellt. [13]

Zurzeit wird die Steuerung der Maschine in Abhängigkeit des auszuführenden Prozesses vorab fest definiert und implementiert. Dies erlaubt nur eingeschränkten Spielraum, um auf potenziell auftretende Störsignale zu reagieren. Ein im Sinne der Natur nachhaltig besserer Ansatz wäre, wenn die Maschine basierend auf ihren eigenen Erfahrungen lernt und eine daraus resultierenden Steuerung den Prozess robust ausführt. Beispielsweise könnte die Optimierung technologischer Parameter im Zerspanungsprozess eigenständig optimiert werden, die einerseits die Produktivität steigern und andererseits kritische Zustände wie beispielsweise Rattern zuverlässig vermeiden. So könnten aufgrund geringerer Fertigungszeiten die Produktionskosten enorm gesenkt werden. Vor allem jedoch ermöglichen die kontinuierlichen Erfahrungswerte des Systems auf individuelle und sich über die Lebenszeit ändernde Maschineneigenschaften zu reagieren. [8], [19]

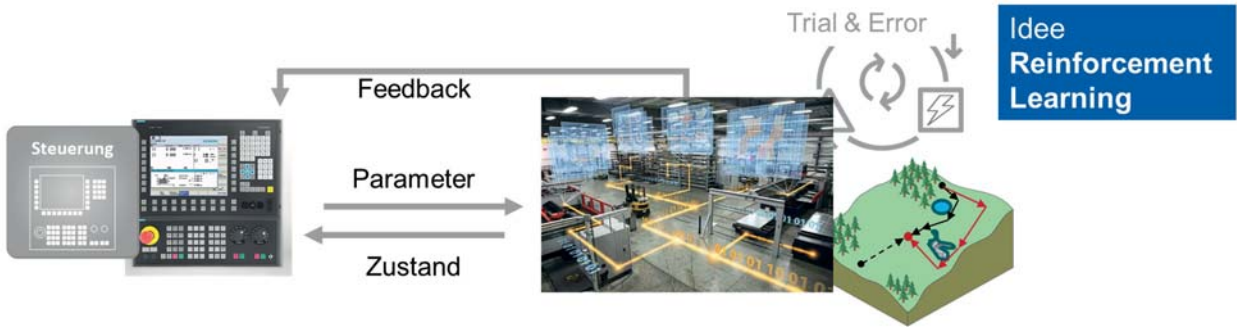



*Bild 5: Anwendung eines adaptiven Algorithmus*

In der Natur bergen Mutationen, die anfangs scheinbar keinen Nutzen haben oder sogar für das Überleben im vorhandenen Ökosystem hinderlich sind, ein großes Potenzial, da unter anderem durch diese Vielfalt erzeugt wird. In der Produktion auftretende Störungen können in gewisser Weise mit solchen Mutationen verglichen werden. Bislang werden Störungen ausschließlich als Beeinträchtigung angesehen, ohne deren Potenzial zu hinterfragen. Denn sie bieten adaptiven Algorithmen die Chance, auf ein sich veränderndes System zu reagieren und eine völlig neue Herangehensweise zu finden, die sich evtl. von der eines Menschen stark unterscheiden würde.

Dass sich die Natur einem limitierten generischen Regelwerk bedient, ist auch an den sich immer wiederholenden Kernbausteinen in den natürlichen Organismen zu erkennen. So besteht beispielsweise jeder Organismus aus DNA oder jeder Mensch aus der grundsätzlichen gleichen Physiologie. Diese Erkenntnis kann sich in den selbstlernenden Algorithmen zu Nutze gemacht werden. Folge ist, dass Entscheidungen nicht auf der offensichtlichen, sondern auf der zugrundeliegenden Struktur getroffen werden und dadurch robuster gegenüber Änderungen sind. Darüber hinaus kann durch identifizierte Kernbausteine des einen Prozesses eine Generalisierung auf andere Produktionsprozesse stattfinden. Vergleichbar zur DNA können hier allgemeingültige Regeln gefunden werden. Um für die bislang erarbeiteten Punkte ein besseres Verständnis zu bekommen, werden diese in Bild 6 anhand des Beispiels der Bliskfertigung verdeutlicht. Das Design einer Blisk wird durch eine große Vielzahl von Parametern bestimmt, die sich aus optimalen aerodynamischen und fertigungstechnischen Rahmenbedingungen ergeben und sich zudem gegenseitig beeinflussen. Somit ist die Wahl des idealen Parametersatzes die Lösung eines komplexen Optimierungsproblems, das mit zurzeit klassischen Verfahren nicht innerhalb kurzer Zeit effizient gelöst werden kann. Daher ist dieser Anwendungsfall ein gutes Beispiel für den Einsatz von biointelligenten Systemen. Die Parameter werden von biologisch inspirierten Algorithmen ausgewählt, die ihre Bewertung und anschließende Wahl an neuen Parametern anhand von identifizierten, zugrundeliegenden Kernbausteinen durchführen. Diese Bausteine können entweder bestimmte physikalische Strukturen in der Beschaffenheit der Blisk sein oder auch abstrakte mathematische Zusammenhänge, die für den Menschen nicht interpretierbar sein müssen. Die so gefertigten Bliskbauteile erlauben nicht nur aufgrund der kürzeren Entwicklungszeit eine Kostenreduktion, sondern auch ein nachhaltigeres Handeln. Denn zum einen wird weniger Ausschuss produziert und zum anderen wird aufgrund des optimalen Bliskdesigns ein höherer Wirkungsgrad und damit ein geringerer Emissionsgrad im Endprodukt erreicht. Der beschriebene Ansatz wird am Fraunhofer IPT im Leitprojekt Evolopro für die Bliskfertigung sowie die Optikmontage erforscht.

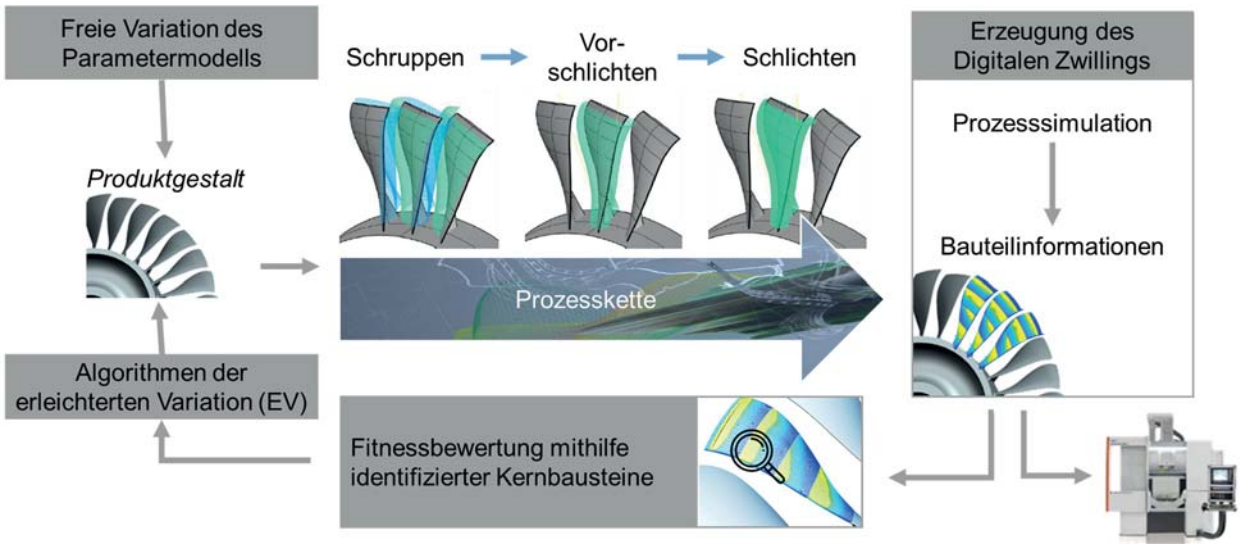



*Bild 6: Effiziente Designphase in der Bliskfertigung mithilfe transferierter biologischer Ideen*

Der Einsatz eines biointelligenten Systems verlangt zwingend nach einem digitalen Zwilling, in dem die (evolutions-) biologischen Vorgänge initiiert werden können. Dabei übernimmt der digitale Zwilling als Abbild der Planungsinformation die Funktion des Genotyps, dessen 'Fertigungs-Genpool' sich durch die Simulationsergebnisse und Algorithmenzyklen erweitert. Im Allgemeinen kann in der Produktion mit diesem digitalen Modell eine kostengünstige Rekonfiguration bestehender Produktionssysteme erzielt werden, die mit zunehmender Produktvielfalt und der Verkürzung der Produktlebenszyklen erforderlich wird. Es wird unterschieden zwischen dem digitalen Zwilling des Produkts, das die Simulation und Validierung von Produkteigenschaften in der Designphase ermöglicht (z.B. Blisk-Design), dem digitalen Zwilling der Produktion, der Maschinen und Anlagensteuerungen bis hin zu ganzen Fertigungsstraßen virtuell abbildet und dem digitalen Zwilling der Performance, mit dem die kontinuierlichen Zustandsdaten aus dem Betrieb verfolgt werden können. Folglich kann das digitale Modell selbst die Anforderungen und Statusinformationen der Wertschöpfungskette darstellen. Dadurch wird die Generierung von alternativen Lösungen möglich, um zu einem funktionsfähigen Produkt zu gelangen. Wird dieses mit der Idee eines digitalen Ökosystems verbunden, in der die Entitäten miteinander interagieren und sich selbst regulieren, ergeben sich neue Möglichkeiten und Systeme, die beliebig erweiterbar sind. [15], [16]

In der Optikmontage des Fraunhofer IPT werden bereits selbstlernende Algorithmen für hochkomplexe Montageaufgaben eingesetzt, die über herkömmliche Ansätze nur mit hohem Aufwand und Fachwissen durchführbar sind. Ein Beispiel hierfür ist in der folgenden Abbildung aufgezeigt. Für die Montage eines LED-Scheinwerfermoduls muss die Leistung des Gesamtsystems während der Montage evaluiert werden, um die bestmögliche optische Funktion der Gesamtbaugruppe und damit eine erhöhte Qualität zu realisieren. Dies wird auch als aktiver oder funktionsorientierter Justageprozess bezeichnet, bei der die Bauteiltoleranzen hochgenau kompensiert werden können. Dabei wird das von einer Lichtquelle emittierte Licht über ein Abbildungssystem auf einen Sensor (z.B. Kamera) übertragen, an dem es eine Lichtverteilung erzeugt, die für eine bestimmte Position der auszurichtenden optischen Komponente charakteristisch ist. Das Systemverhalten wird durch eine unbekannte (nichtlineare) Funktion bestimmt, die ausschließlich abhängig von der Pose des Manipulators ist. Der notwendige Stellbefehl wird in klassischen Ansätzen über manuell ausgewählte Merkmale der Lichtverteilung wie z.B. Massenzentren, Punkte maximaler Intensität, Iso-Linien oder Summen von Iso-

Flächen innerhalb eines Optimierungsverfahrens (z.B. Gradientenverfahren, Brute-Force) ausgewertet und bestimmt. Aufgrund von starken Nichtlinearitäten im Suchraum ist der Einsatz effizienter Suchstrategien sehr schwierig. Hinschwerend kommt hinzu, dass die jeweiligen Kenngrößen nicht immer von Beginn an definiert sind, von Produkt zu Produkt variieren und wie in der Abbildung erkennbar ist, sehr abstrakt sein können.

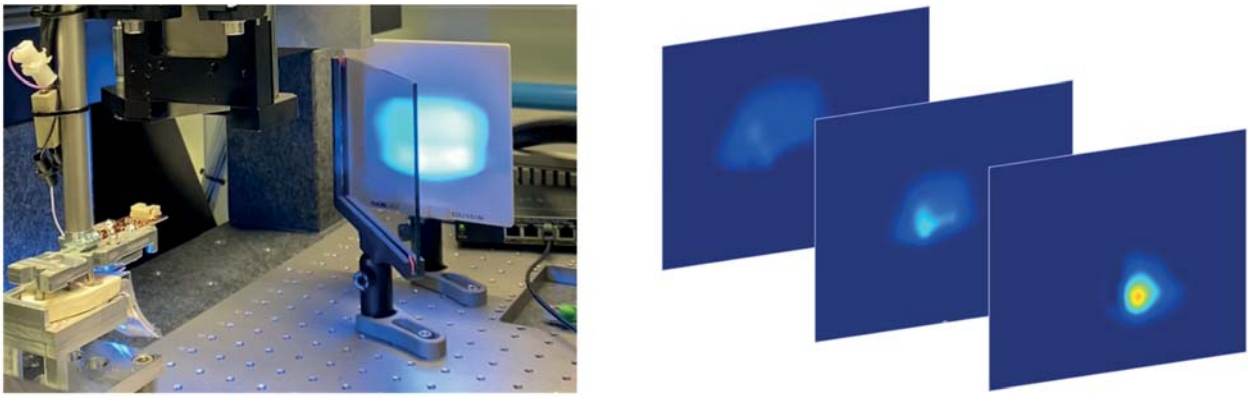



*Bild 7: Herausforderung durch Varianz in den Produktkomponenten für die Montage am Beispiel von LED-Scheinwerfermodulen – Aktive KI-gestützte Montage*

Dieses Komplexitätsproblem wird mit dem Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen gelöst, da diese Co-Abhängigkeiten identifizieren können, die für den menschlichen Fachwissenden maximal schwer und durch aufwendige Versuche erkennbar wären. So werden über eine sinnvolle abstrakte Darstellung der Daten komplexe Strukturen modelliert, die lediglich durch zusätzliches Expertenwissen stetig verbessert werden können. Mittels einer Datenbasis bestehend aus Posen und zugehörigen Lichtverteilungen wird der selbstlernende Algorithmus automatisiert antrainiert. Das daraus resultierende konvergierte Ersatzmodell der Systemfunktion schätzt während der Scheinwerfer-Justage aus der aktuellen Lichtverteilung den relativen Fehler zur optimalen Position. Die Generierung der Daten, sowie die Evaluierung des Modells, passiert entweder am realen System oder über einen digitalen Zwilling, der in Form einer virtuellen Umgebung agiert und die jeweiligen Lichtverteilungen bereitstellt. Der Übergang von der klassischen Programmierung von closed-loop Justage-Prozessen zu einer datengetriebenen Programmierung ermöglicht zudem einen agileren Entwicklungsprozess. Prozessentwickelnde und Produktkoryphäen werden in die Lage versetzt, ihre Zielvorgaben dem selbstlernenden Algorithmus vorzugeben, der spezifisch auf diese trainiert wird.

Die Vielfalt in der Produktion wirkt sich auf die Nachhaltigkeit insbesondere durch die Beherrschung bisher zu komplexer Mechanismen aus. Autonome Selbstoptimierung, auch auf unterschiedlichste Zielgrößen, erlaubt eine Ressourcenschonung, die bisher aus ökonomischen Gründen nicht gehoben worden wäre.

### 3.3 Konvergenz Mensch Maschine

In der biologischen Transformation verschwimmen die bislang existierenden klaren Grenzen zwischen Natur und Technik. Ähnlich zu lebenden Systemen weisen Maschinen hier ebenfalls selbstreplizierende und selbsterhaltende Fähigkeiten auf ohne explizite menschliche Überwachung und Steuerung. Gleichzeitig wird der Mensch innerhalb der Produktion schrittweise mechanisiert, um Qualität und Produktivität sowie das eigene Wohlergehen zu steigern. Daher kann diese Entwicklung als eine Konvergenz zwischen Mensch und Maschine aufgefasst werden. (vgl. Bild 8). [13]

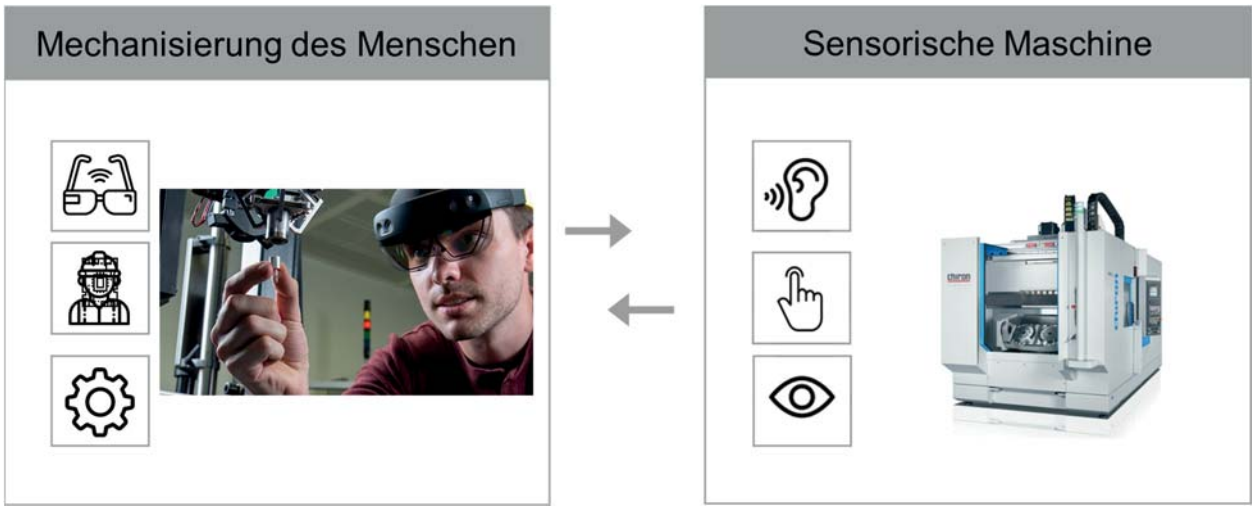



*Bild 8: Konvergenz Maschine Mensch*

Zurzeit bekannte Beispiele für die Mechanisierung des Menschen sind das Exoskelett für manuelle Montagetätigkeiten und die AR-Technik für kontextualisierte Informationen, die teilweise bereits Einzug in die Produktion gefunden haben. Forschungsseitig wird in den kognitiven Neurowissenschaften an Gehirn-Computer-Schnittstellen (BCI) geforscht, die eingeschränkten Personen einen Zugang zum Alltag ermöglichen sollen. Exoskelette unterstützen durch mechanische Strukturen die Körperbewegung des Menschen. Zukünftig können diese Arbeitskräfte in der Produktion bei ihren täglichen Aufgaben unterstützen und entlasten. So kann präventiv die ergonomische Arbeitssituation der Arbeitskräfte verbessert und Ausfalltage durch Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSD) reduziert werden. Des Weiteren ist die Arbeit mit einem Exoskelett intuitiver und damit in einer kürzeren Zeitspanne erledigt, als beispielsweise die mit einer teuren mobilen Hebehilfe, sodass eine verbesserte Produktivität und vor allem Flexibilität in bestimmten Teilprozessen der Fertigung möglich wird.

In gewisser Weise steht der Einsatz von Menschen in der Produktion im Widerspruch zu einer autonomen, von Algorithmen gesteuerten Produktion, die im vorherigen Kapitel thematisiert wurde. Allerdings bleibt der Mensch für die bereits angesprochene Flexibilität und die schwer zu automatisierende Massenanpassung ein zentraler Baustein. Die Konvergenz ermöglicht eine Variantenvielfalt, die für eine konsequente Wettbewerbsfähigkeit für zukünftige Megatrends notwendig ist. [1], [17]

Grundsätzlich neu ist der Gedankengang der beschriebenen Konvergenz nicht, da bereits Wieners Kybernetik Ansatz explizit versucht, die Kommunikation und Kontrolle in Lebewesen und Maschinen auf die gleiche Ebene abstrakter Mechanismen zu stellen. In diesem Zusammenhang definiert der Kybernetiker Georg Klaus die Maschine als „*jedes Gerät, jede Vorrichtung, jedes […] System, das einen bestimmten Input (bzw. bestimmte Typen von Inputs) zu einem bestimmten Output (bzw. bestimmten Typen von Outputs) verarbeitet. Unter diesem Gesichtspunkt ist jede Maschine identisch mit dem materiellen Modell einer bestimmten Transformation. Diese Verallgemeinerung des klassischen Maschinenbegriffs ist notwendig, wenn stoffbearbeitende und –verarbeitende Maschinen, Maschinen zur Gewinnung bestimmter Energieformen aus anderen Energieformen sowie Maschinen zur Erzeugung, Übertragung, Speicherung von Information unter einen Oberbegriff gebracht werden sollen*“ [20]. [13]

Demnach ist nicht das Material oder deren Eigenschaften, sondern die übergreifende Organisationsform, in der die Funktionalität der Maschine eingebettet ist, von Bedeutung. Mit dieser Herangehensweise kann ein erstes Verständnis einer sensorischen Maschine

erzeugt werden. Die Fähigkeit der Adaption wird erreicht, indem die Sinne und physionomischen Eigenschaften des Menschen über entsprechende Sensorik adaptiert wird. Dazu wird in Bild 9 Sensorik im Kontext der Werkzeugmaschine auf unterschiedlichen Abstraktionsleveln dargestellt. [13]

*Bild 9: Wahrnehmung durch integrierte Sensorik: "Sensorische Maschine"*

Die Interpretation komplexer Sensorsignale von beispielsweise Körperschall und Vibrationssensoren haben bisher einen breiten Einsatz in industriellen Anwendungen zurückgehalten. Der Programmieraufwand für eine explizite Festlegung von Grenzwerten und Entscheidungslogik zur Ableitung von robusten Aussagen stand häufig nicht im Verhältnis zum wirtschaftlichen Nutzen. Die Entwicklungen der letzten Jahre zur hardwareseitigen Analyse der Signale durch leistungsstarke lokale Recheneinheiten, kabelloser Übertragungstechnik sowie neue Entwicklungsparadigmen, die ein Trainieren neuronaler Netze in den Vordergrund stellen, beschleunigen jedoch die Erschließung neuer Anwendungsfelder. So wird beispielsweise im NRW Projekt Risen_5G an intelligenter Sensorik zum Walzrollieren geforscht. Durch die intelligente Sensorik wird allgemein eine höhere Präzision sowie eine höhere Wirtschaftlichkeit durch reduzierten Ausschuss und optimierte Betriebsbedingungen erwartet.

Weitere konkrete Beispiele zur Biologisierung, insbesondere von Werkzeugmaschinen, finden sich im Rahmen des Fraunhofer Verbundprojekts BioManu3 zwischen IWU, IST und IPT. Beispielhaft für den Einsatz biologischer Materialien in Werkzeugmaschinen sind im Folgenden der Einsatz von biologischen Kühlmittelschmierstoff und die Anwendung von Mizellen als Dämmstoff für thermische und akustische Fragestellungen abgebildet. In beiden Fällen ermöglicht der Einsatz nicht nur die technischen Grenzen weiter auszubauen, sondern insbesondere auch die Nachhaltigkeit der Produktionsmaschine positiv zu beeinflussen.

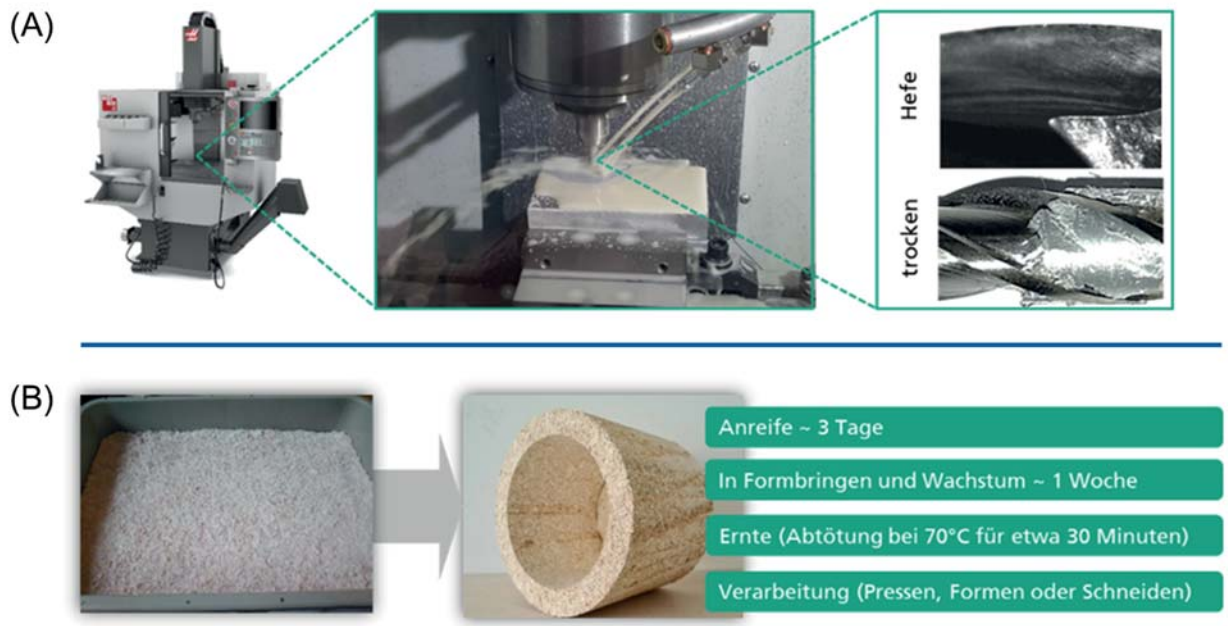



*Bild 10: Beispiele für biologische Materialien in der Werkzeugmaschine. (A) biologischer Kühlschmierstoff (B) Mizellen als Dämmstoff für thermische und akustische Fragestellungen*

Im Problemfeld Thermik verfolgt der Projektansatz in BioManu den Grundgedanken eines homoiothermen (gleichwarmen) Lebewesens. Durch eine möglichst genaue und echtzeitfähige Vorhersage von erwarteten Lastverläufen lassen sich wesentlich engere Temperaturgrenzen erzielen. Ermöglicht wird dies durch eine intelligente Temperierung der einzelnen Maschinenelemente der Werkzeugmaschine durch einen modellprädiktiven Regler, der das erwartete, thermische Verhalten antizipiert und kurzfristig hierauf reagiert. So reduzieren sich thermisch bedingte Effekte, die andernfalls aufwendig kompensiert werden müssen. Der positive Effekt wirkt sich jedoch nicht nur deutlich auf die Präzision der Werkzeugmaschine aus, auch die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit wird positiv beeinflusst. Potenziell sinkt der Bedarf an energieintensiven Aufstellungsbedingungen und reduziert Warm- bzw. Leerlaufphasen. [24]

Eine Herausforderung für das verfolgte Vorgehen ist der Bedarf einer präzisen und echtzeitfähigen Vorhersage des thermischen Verhaltens. Hierfür wurde insbesondere im Sonderforschungsbereich Transregio96 zwischen Dresden, Chemnitz und Aachen wertvolle Grundlagenarbeit geschaffen. So entstanden durch Versuche validierte FEM-Modelle für zentrale Elemente der Werkzeugmaschine und deren thermisch relevante Eigenschaften. Für die Anwendung in einer thermischen Vorsteuerung werden prozessparallele Berechnungen zu unterschiedlichen Szenarien in Echtzeit benötigt. Hierfür ist eine deutliche Reduktion der für die Simulation notwendigen Rechenzeit wichtig. Ein möglicher Ansatz ist die Approximation des Verhaltens auf Basis neuronaler Netze. Als Trainingsdaten dient eine Datengrundlage auf Basis simulierter FEM-Versuche, die bereits einen deutlichen zeitlichen und kostentechnischen Vorteil gegenüber realen Versuchsdaten besitzen. Ein solches Ersatzmodell erlaubt um Größenordnungen schnellere Vorhersagen mit einer ausreichenden Präzision.

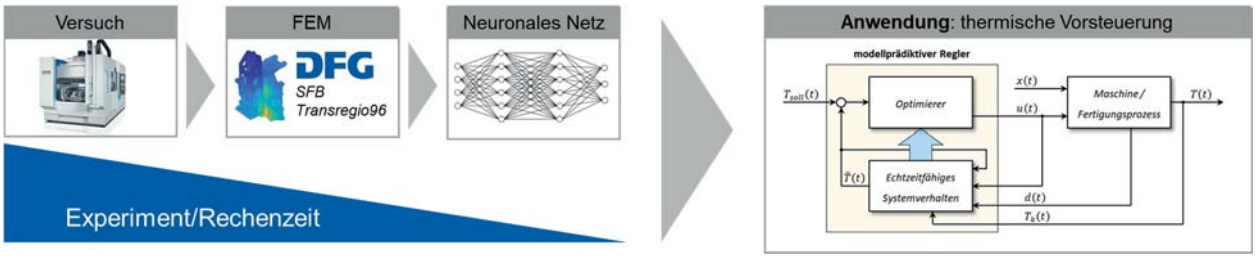



*Bild 11: Verkapselung von Erfahrungswissen ausgehend von Versuchen über FEM-Berechnungen in neuronalen Netzen*

Die folgende Abbildung zeigt einen Prüfstand am WZL, der die beschriebene thermische Vorsteuerung für eine Spindel durch Arbeiten von Neus und Steinert demonstriert. Für die Untersuchung der Motorfrässpindel, wird diese in einen gusseisernen Spindelstock eingesetzt. Für die Simulation von Lastmomenten wird eine zweite Spindel koaxial zur Prüfspindel positioniert. In Abhängigkeit der Spindeldrehzahl können so bis zu 130 Nm an Lastmoment simuliert werden. Beide Spindeln sind über eine Welle mit einem auf Dehnungsmessstreifen basierten Drehmomentsensor verbunden. Eine pneumatische Belastungseinheit simuliert zusätzlich Radiallasten zwischen 0 und 4 kN auf die Prüfspindel. Als Stellglied für die untersuchte thermische Vorsteuerungslogik wurde eine Kühleinheit entwickelt, welche die stufenlose Einstellung von Durchflussmengen und Vorlauftemperaturen für die jeweilige Gehäuse- und Wellenkühlung ermöglicht. Dies dient insbesondere der Vermeidung von Sägezahnprofilen. Wie beschrieben, ermöglicht der Prüfstand eine Untersuchung der Prüfspindel und der thermischen Regelung unter verschiedenen Bedingungen und erlaubt somit die Validierung der FEM-basierten Simulation sowie daraus abgeleiteten neuronalen Netzen. Dabei lag der gemessene Fehler zwischen Simulation und Messung im stationären Fall unterhalb von nur 0.2 °C. [24]

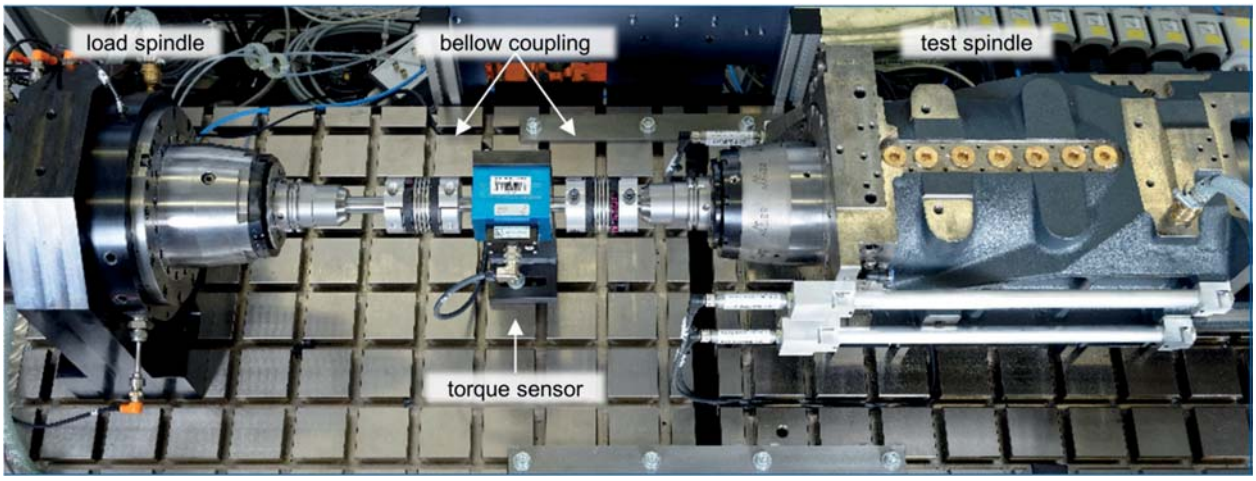



*Bild 12: Spindelprüfstand zur Validierung thermischer Vorsteuerungsversuche [24]*

Abschließend lässt sich feststellen, dass auch die aufgeführten Beispiele für die Konvergenz Mensch und Maschine entsprechend dem Leitthema “Turning data into sustainability” einen Beitrag für die Nachhaltigkeit in der Produktion liefern. Dies gilt insbesondere für die Seite der Maschine, die durch ihren Energie- und Materialeinsatz ein besonders hohes Potenzial bietet. Neben dem Einsatz biologischer Materialien ist vor allem die Verknüpfung von Sensorik und intelligenter Auswertung geeignet, dieses Potenzial durch einen ressourceneffizienten Betrieb zu heben.

# 4 Blick in die Zukunft

Für eine nachhaltige Produktion, dessen Augenmerk neben wirtschaftlichen auch auf ökologischen Faktoren liegt, ist ein Umdenkprozess notwendig. Dieser Umdenkprozess soll innerhalb der biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfungskette stattfinden, mit dem Ziel neue Produktionstechnologien und –Prozesse zu entwickeln. Hierbei soll der Fokus auf die Verschmelzung von Technik, Bio- und Informationstechnologie gelegt werden, die sich für die Produktionslandschaft von morgen zu einer biointelligenten Wertschöpfung zusammenschließt. Insbesondere in den Bio- und Informationstechnologien weisen andere Länder wie beispielsweise die USA oder China einen Vorsprung auf, was durch die vergleichsweise restriktive Gesetzgebung und dem eingeschränkten Zugang zu Risikokapital in Deutschland begründet ist. Die biologische Transformation bietet der deutschen Industrie großes Potenzial für Innovationen, die sowohl in der Technik als auch in Wirtschaft und Politik Einzug finden. So kann der Vorsprung nicht nur aufgeholt, sondern eine Vorreiterrolle für zukünftige Produktionstechnologien eingenommen werden. [1], [3]

Diese führen nicht nur zu einer höheren technischen Qualität der Produkte, sondern auch zu einem nachhaltigeren Schutz der Umwelt sowie der Verbesserung menschlicher Bedürfnisse. So werden körperliche und geistige Entlastungsmöglichkeiten wie z.B. Exoskelette zu Standards und reduzieren die durchschnittliche Arbeitsbelastung der Mitarbeitende mit signifikantem Benefit auf ihr Gesundheitssystem. Potenziell weitere für die biologische Transformation wichtige Technologien und deren mögliche Einführung wird im Gartner-Hype-Zyklus in Bild 13 sichtbar.

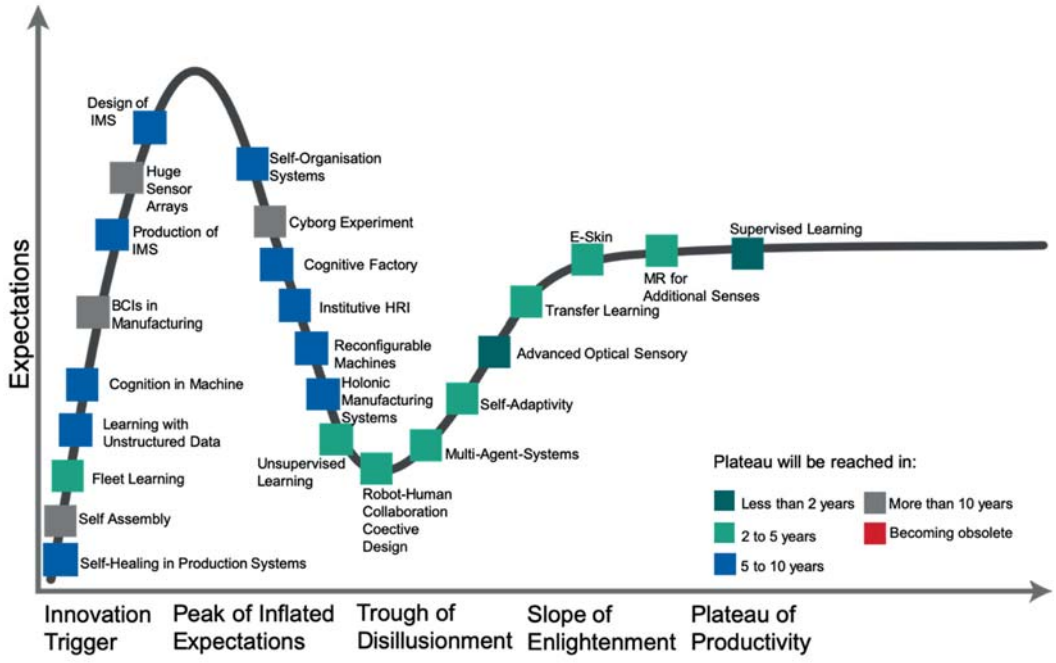



*Bild 13: Gartner Hype Zyklus für potenzielle Technologien der biologischen Transformation [8]*

Für eine effiziente Entwicklung und Umsetzung der Technologien muss ein Wissenstransfer zwischen den unterschiedlichen Forschungsdisziplinen stattfinden. Daher muss der Open-Source Gedanke, der sich im Software Segment gebildet und etabliert hat, auch in der Produktion Einzug finden. Dies erleichtert die Definition von Standardisierungen, die in einer komplexen, dynamischen Umgebung notwendig sind,

um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden. Dabei sollen diese Standards nicht als fixe Gebilde angesehen werden, sondern offen sein für Änderungen und Überarbeitungen. [1], [8]

Die Realisierung neuer Technologien birgt gleichzeitig auch immer die Chance innovativer Geschäftsmodelle, die zukünftig unter ökonomischen und ökologischen Aspekten entwickelt werden sollten. Durch Maßnahmen der Politik wie z.B. Subventionierungen oder Besteuerungen können diese unterstützt werden und die Start-up-Kultur in Deutschland fördern. So kann sich beispielweise an der Idee des Car-Sharing orientiert und in Form einer Sharing Economy in die Produktion integriert werden, in der je nach Auslastungsgrad teure Werkzeuge oder Maschinen verliehen bzw. gemietet werden können. Dabei ist dieses Geschäftsmodell für beide Parteien profitabel, da die eine mit zwischenzeitlich ungenutzten Ressourcen dennoch einen Gewinn erzielen kann und die andere sich die Anschaffungskosten erspart. Aufgrund effizienterer Ressourcennutzung kann zudem ein Beitrag zur Nachhaltigkeit geschaffen werden. [1], [3]

Politik und Wirtschaft stehen in der Verantwortung eine Akzeptanz der biologischen Transformation in der Bevölkerung zu schaffen. Diese geht mit der Angst vor sich ändernden Arbeitsbedingungen und dem möglichen Kontrollverlust der Produktionsprozesse einher. Insbesondere mit der postulierten Konvergenz ergeben sich ethische Fragestellungen, die offen kommuniziert und diskutiert werden müssen. Werden sicherheitskritische Komponenten auf Basis von autonomen, selbstlernenden Algorithmen produziert, entsteht zwangläufig ein größeres Maß an Unsicherheit. Die Gewährleistung einer hohen Qualität dieser Produkte ist jedoch zwingend notwendig, weshalb über neue Konzepte der Qualitätssicherung nachgedacht werden muss. Die Realisierung eines biointelligenten Produktionssystems verlangt allerdings nach einem gewissen Grad an Unsicherheit, da sich die Natur auch nicht durch einen klaren Determinismus auszeichnet, sondern durch die Interaktion der Gene mit ihrer Umwelt. Demnach stellen sich zahlreiche technische, ethische und soziale Fragestellungen, die zu klären bleiben. Insgesamt benötigt die biologische Transformation derzeit enorme politische Unterstützung, um deren Vorteile und Potenziale vollständig nutzen zu können. [1]

# 5 Literatur


[1] Miehe, R.; Bauernhansl, T.; Beckett, M.; Brecher, C.: The biological transformation of industrial manufacturing. Technologies, status and scenarios for a sustainable future of the German manufacturing industry. In: *Journal of Manufacturing Systems. 54*. Jg., 2020, Januar, S. 50-61.

[2] Miehe, R.; Bauernhansl, T.; Schwarz, O.; Traube, A.: The biological transformation of the manufacturing industry. Envisioning biointelligent value adding. In: *Procedia CIRP*. 72. Jg., 2018, S. 739-743.

[3] Kompetenzzentrum Biointelligenz: *Die biointelligente Wertschöpfung. White Paper des Kompetenzzentrums Biointelligenz*. URL: https://www.iao.fraunhofer.de/images/iao-news/bio-intelligenz.pdf [Stand: 27.02.2020].

[4] Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen: Forschungsstrategie. Fortschritt NRW. Forschung und Innovation für nachhaltige Entwicklung 2013 – 2020. Düsseldorf, 2013.

[5] Schwarz, O.: OPTIMIEREN STATT MAXIMIEREN – DER ABSCHIED VOM LINEAREN DENKEN. In: *Biologische Transformation und Bioökonomie*. München, 2018. URL: https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschung/artikel/2018/Biologische-Transformation/Whitepaper-Biologische-Transformation-und-Bio-Oekonomie.pdf [Stand: 25.02.2020].

[6] Marzi, T.; Knappertsbusch, V.; Marzi, A., Naumann, S.; Deerberg, G.; Eckhard, W.: Fragen zu einer biologischen Technik. Oberhausen: Karl Maria Laufen, 2018.

[7] Harari, Y. N.: *„Das System ist erstarrt“*. URL: https://www.handelsblatt.com/arts_und_style/kunstmarkt/yuval-noah-harari-intelligente-technologie/20461518-4.html?ticket=ST-5752688-uY3lMllbeqNI4ETZ2B4Y-ap5 [Stand: 27.02.2020].

[8] Byrne, G.; Dimitrov, D.; Monostori, L.: Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 21. Jg., 2018, Mai, S. 1-32.

[9] Russel, S.: Künstliche Intelligenz. Ein moderner Ansatz. 3., aktualisierte Auflage. München: Pearson, 2012.

[10] Biotechnologie.de: *Was ist Biotechnologie?*. URL: https://biotechnologie.de/knowledge_base_articles/1-was-ist-biotechnologie [Stand: 02.03.2020].

[11] Dressler, F.; Akan, O.; Marzi, A.: A survey on bio-inspired networking. In: *Computer Networks*. 54. Jg., 2010, Nr. 6, S. 881-900.

[12] Europäisches Parlament: *Kreislaufwirtschaft. Definition und Vorteile*, URL: https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile [Stand: 03.03.2020].

[13] Trogemann, G.: Synthese von Maschine und Biologie. Organische Maschine und die Mechanisierung des Lebens. In: Gramelsberger, G.; Bexte, P.; Kogge, W. (Hrsg.): *Synthesis. Zur Konjunktur eines philosophischen Begriffs in Wissenschaft und Technik.* Bielefeld: transcript, 2013, S. 171-197.

[14] Sutton, R.; Barto, A.: Reinforcement Learning: An Introduction. Second edition. Cambridge: MIT Press, 2018.

[15] Talkhestani, B.; Schlögl, W.; Weyrich, M.: Synchronisierung von digitalen Modellen. Anwendung einer Ankerpunktmethode für Fertigungszellen. In*: atp magazin*. 59. Jg., 2017, Nr. 07-08, S. 62-69.

[16] Siemens: *Digitalisierung in der Industrie. Zwillinge mit Potenzial*, URL: https://new.siemens.com/global/de/unternehmen/stories/industrie/der-digitale-zwilling.html [Stand: 4.03.2020].

[17] Dahmen, C.; Wöllecke, F., Constantinescu, C.: Challenges and Possible Solutions for Enhancing the Workplaces of the Future by Integrating Smart and Adaptive Exoskeletons. In: *Procedia CIRP*. 67. Jg., 2018, S. 268–273.

[18] Yang, G.-Z.; Bellingham, J.; Dupont, P. E.; Fischer, P.; Floridi, L.; Full, R.; Jacobstein, N.; Kumar, V.; McNutt, M.; Merrifield, R.; Nelson, B. J.; Scassellati, B.; Taddeo, M.; Taylor, R.; Veloso, M.; Wang, Z. L.; Wood, R.: The grand challenges of Science Robotics. In: *Science Robotics*. 3. Jg., 2018, Nr. 14. DOI: 10.1126/scirobotics.aar7650

[19] Chou, Y.-C.; Cao, H.; Cheng, H. H.: A bio-inspired mobile agent-based integrated system for flexible autonomic job shop scheduling. In: *Journal of Manufacturing Systems.* 32. Jg., 2013, Nr. 4, S. 752-763.

[20] Klaus, G.: Wörterbuch der Kybernetik. Bd. 1. Frankfurt a.M.: Fischer,1971.

[21] Harai, Y.: Homo Deus. Eine Geschichte von Morgen. 11. Aufl. München: C.H. Beck, 2017.

[22] Liggesmeyer, P.; Dörr, J.: KOMPLEXITÄT UND GLEICHGEWICHT – DIGITALE ÖKOSYSTEME. In: *Biologische Transformation und Bioökonomie*. München, 2018. URL: https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschung/artikel/2018/Biologische-Transformation/Whitepaper-Biologische-Transformation-und-Bio-Oekonomie.pdf [Stand: 25.02.2020].

[23] Sauer, A.; Miehe, R.: ULTRAEFFIZIENTE PRODUKTION IN DER FABRIK DER ZUKUNFT. In: *Biologische Transformation und Bioökonomie*. München, 2018. URL: https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschung/artikel/2018/Biologische-Transformation/Whitepaper-Biologische-Transformation-und-Bio-Oekonomie.pdf [Stand: 25.02.2020].

[24] Brecher, C.; Ihlenfeldt S.; Neus S.; Steinert A.; Galant A.: Thermal condition monitoring of a motorized milling spindle; German Academic Society for Production Engineering (WGP), 2019, https://doi.org/10.1007/s11740-019-00905-3

[25] Brecher, C. Klatte M., Lee T. H., Tzanetos F.; Metrological analysis of a mechatronic system based on novel deformation sensors for thermal issues in machine tools; In: *Procedia CIRP*; Volume 77, 2018, Pages 517-520; https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.245

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 2.2:

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT
Dr.-Ing. A. Broos, Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V .VDW
B. Essig, Mapal
Prof. Dr. B. Hofmann, Aesculap
Dr.-Ing. G. Mallmann, Blum-Novotest
Dr.-Ing. T. Muecke, Siemens
Dr.-Ing. M. Queins, Cytec Zylindertechnik
Dr.-Ing. M. Streichfuss, Roland Berger
A. Tavakolian, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
D. Zontar, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

## 2.3 Montage der Zukunft – Automatisierung jenseits der Massenproduktion

*R. Schmitt, D. Eickhorst, F. Flöter, P. Freeman, A. Göppert, N. Hanke, G. Hüttemann, M. Korte, B. Montavon, T. Prefi, J. Sachs, R. Schares, B. Strujik*

**Inhaltsverzeichnis**

1 Nachhaltigkeit im Kontext der industriellen Montage ..... 197

2 Nachhaltige Montagesysteme ..... 199
2.1 Bewertungskriterien ..... 200
2.2 Linienlose, mobile Montagesysteme als Ansatz für die Montage der Zukunft ..... 202

3 Automation of Automation ..... 204
3.1 Ubiquitäre Messtechnik und verteilte Sensordienste ..... 205
3.2 Dreilagige Kommunikations- und Rechenarchitektur ..... 207
3.3 Mobile und vielseitige Ressourcen ..... 208

4 Digital Twin Pipeline ..... 210
4.1 Ontologiebasierte Definition ..... 210
4.2 Standardisierte Modellierung ..... 212
4.3 Automatisierte Bereitstellung ..... 212

5 Technologie- und Anwendungsbeispiele die Montage der Zukunft ..... 214
5.1 Mobile Roboterplattformen in der Luft- und Raumfahrtautomation ..... 214
5.2 Referenzimplementierung für Lkw-Rahmenmontage ..... 215

6 Fazit und Ausblick ..... 218

7 Literatur ..... 219

## Kurzfassung

### Montage der Zukunft - Automatisierung jenseits der Massenproduktion

Das Thema Nachhaltigkeit bringt neue Herausforderungen für die industrielle Montage mit sich. Die Abkehr von der Massenproduktion und das Einbeziehen von Kreislaufwirtschaftsansätzen verpflichtet auch zur Berücksichtigung der Demontage. Die Implementierung und Organisation zukünftiger Montagesysteme erfordert neue Ansichten auf Leistungskennzahlen und Designziele: die Ressourceneffizienz der Montageprozesse selbst, Lebenszyklen des Montagesystems und der Produkte sowie Ausschussvermeidung sind wichtige Beispiele.

*Automation of Automation* ist ein neues Paradigma, das sich auf die Automatisierung in de facto unkontrollierten und damit a priori undefinierten Umgebungen bezieht. Planung und Ausführung setzen nicht mehr auf regelbasierte Strukturen, Wiederholbarkeit und feste räumlich-zeitliche Synchronisation, stattdessen stützen sie sich auf kontextbezogene Echtzeitdaten, die beispielsweise durch ubiquitäre Messtechnik bereitgestellt werden und so zielbasierte Ansätze mit hoher Autonomie verfolgen.

Diesem Paradigma folgen mobile Montagesysteme statt den liniengebundenen, die flexible, standardisierte Automatisierungsressourcen in Verbindung mit einer uneingeschränkten und dynamischen Prozessplanung zur Auflösung fester Hallenlayouts nutzen. Datenerfassung, Kontextualisierung und Durchgängigkeit werden mit generativen Ansätzen zur Programmierung und Ressourcenverwaltung in einer performanten Infrastruktur kombiniert. Dies gewährleistet Transparenz in der datengetriebenen Quantifizierung von Nachhaltigkeit.



## Abstract

### Future Assembly – Automation beyond Mass Production

Sustainability brings new challenges to industrial assembly beyond increasing efficiency in mass production, i.e., introducing the circular economy concept, and increasing the focus on disassembly. Consequently, implementation and organization of future assembly systems require new perspectives to performance indices and design objectives: Resource efficiency of the assembly processes themselves, life cycles of the assembly system and products, and complete avoidance of scrap are notable examples.

*Automation of Automation* is a novel paradigm referring to automation in virtually uncontrolled and hence a priori undefined environments. Planning and execution are no longer imposing rules, repeatability, and fixed spatiotemporal synchronization. Instead, they rely on context-aware real-time data, e.g. provided by ubiquitous metrology following a goal-based approach. The resulting systems are expected to operate highly autonomously and be more resilient under the boundary conditions above.

Line-less mobile assembly systems that leverage mobile, standardized automation resources in conjunction with unrestricted and dynamic process planning to resolve fixed shop floor layouts follow this paradigm. Data acquisition, contextualization, and continuity are combined with generative programming and asset administration approaches in high-performance infrastructure. This ensures transparency in data-driven sustainability quantification.

# 1 Nachhaltigkeit im Kontext der industriellen Montage

Die Notwendigkeit der Nachhaltigkeit führt in der Produktion zu einem Paradigmenwechsel, der sich insbesondere in der Verfolgung von ESG-Kriterien widerspiegelt. Aufgrund der besonderen Rolle der industriellen Montage in der Wertschöpfungskette, werden hier erhebliche Auswirkungen erwartet. Am bedeutsamsten ist die zu erwartende weitere Verkürzung der Produktlebenszyklen aufgrund kürzerer Innovationszyklen, welche aus der Notwendigkeit der ESG-gerechten Produktgestaltung und entsprechend erhöhter Komplexität resultieren [1, 2]. Dies wird voraussichtlich mit einer höheren Anzahl von Produktvarianten einhergehen, wodurch sich die Losgrößen in der Produktion weiter verringern. Diesen Trend kann man bereits heute in der Fertigung deutlich erkennen [3]. Mit Blick auf konventionelle Produktionsparadigmen kommt dies einem Bedeutungsrückgang der typischen Massenproduktion gleich. Während die Massenproduktion hochgradig effizient sein kann, bringt diese auch die Problematiken der Überproduktion, langer Anlaufphasen und reduzierter Wandlungsfähigkeit mit sich. Während diese Nachteile für große Stückzahlen hinnehmbar sind und auf dem Gebiet der Massenproduktion viele Innovationen erreicht wurden, steht sie nun einem veränderten Bewusstsein von Kundinnen und Kunden für Nachhaltigkeit sowie einer zunehmenden Marktvolatilität gegenüber. Ein weiterer erwarteter Effekt ist die Abkehr von der Produktion auf Basis von Bedarfsprognosen hin zu einer Produktion auf Basis des tatsächlichen Bedarfs mit dem Ziel Verschwendung durch Überproduktion zu vermeiden. Ein hoher Automatisierungsgrad zur Gewährleistung angemessener Durchlaufzeiten und Produktionsqualität ist hierfür Voraussetzung.

Trotz existierenden Bestrebungen, Montagesysteme an eine steigende Variantenzahl oder variierende Anforderungen anzupassen, bleibt das Grundprinzip starrer Fertigungslinien mit festen Prozessabläufen und Taktzeiten bislang die vorherrschende Form der Montageorganisation [4, 5]. Bei vielen modernen Montagesystemen erfolgt der Einsatz von Automatisierung technologisch und wirtschaftlich nach den Prinzipien der Wiederholbarkeit und Skalierbarkeit. Einer Ausweitung des Automatisierungsumfangs in den heutigen Produktionsszenarien stehen weniger die technische Machbarkeit des Prozesses als vielmehr wirtschaftliche Aspekte wie Inbetriebnahme, Rüsten und Wartung, Prozessstabilität und Qualitätsüberlegungen entgegen. Hohe materielle und finanzielle Investitionen werden in Kauf genommen, um bereits vor der Produktion die Grundlage für stabile Prozesse zu schaffen. Dies ist oftmals mit einem signifikanten ökologischen Fußabdruck verbunden, welcher nicht notwendigerweise erforderlich ist. Im ungünstigsten Fall ist der Lebenszyklus der Montageressourcen an die Marktlebensdauer des Produkts gekoppelt. Während dies aus ökonomischer Sicht oft schon heute unerwünscht ist, wird es in Zukunft ökologisch unhaltbar werden.

Darüber hinaus bringt der Ansatz der Kreislaufwirtschaft neue Anforderungen für Montagesysteme mit sich, indem er eine Fülle von kleinteiligen bzw. individualisierten Aufgaben bei der Kleinserienfertigung, Wiederaufbereitung, dem Recycling von Komponenten (Remanufacturing) und der Demontage benötigt [6]. Diese Aufgaben sind durch heterogene Prozesse und unterschiedliche Prozessreihenfolgen gekennzeichnet und sind dabei vor allem durch den Lebenszyklus der Produkte geprägt. Getrieben durch die Reduktion des $CO_2$-Fußabdrucks, höhere Recyclingraten und verbesserte Gesamtressourceneffizienz, wird eine höhere Varianz an Bauteilen und Prozessen erwartet. Das letztgenannte Ziel vermeidet Ausschuss in größtmöglichem Umfang und stärkt das bewährte First Time Right-Prinzip.

Generell kann die industrielle Montage als einer der kritischsten Bereiche für den Wandel zur Nachhaltigkeit in der Produktion betrachtet werden. Sie stellt einen der höchsten Kosten- und Aufwandstreiber entlang der Wertschöpfungskette dar und ist gleichzeitig der Dreh- und Angelpunkt für die Produktdiversifikation [7]. Dies beginnt bereits in der Phase des Produktdesigns, z. B. bei der Berücksichtigung der Modularität oder dem Grad der möglichen Demontage, und setzt sich über die Organisation von Montagesystemen und die Umsetzung einzelner Montageprozesse fort. Darüber hinaus wird aus gesellschaftlicher und gesetzlicher Perspektive erwartet, dass die Bedürfnisse der Mitarbeitenden berücksichtigt werden. Eine Abnahme der Akzeptanz von repetitiven, gering qualifizierten Aufgaben ist absehbar, während Mitarbeitende zukünftig stärker in die Systemorchestrierung eingebunden sein werden. Zukünftige Montagesystemen sind somit auch weiterhin hybride Systeme.

Als aufschlussreiches Beispiel für die Gestaltung zukünftiger Montagesysteme fungiert die Luft- und Raumfahrtbranche, da die Montage eines der wesentlichen Handlungsfelder für Luftfahrt-OEMs ist. Sowohl Boeing (25% Reduktion des Kohlenstoffdioxid-Fußabdruckes in der Fertigung bis 2025) als auch Airbus (40% Reduktion des Kohlenstoffdioxid-Fußabdruckes in der Fertigung bis 2030) haben ambitionierte Nachhaltigkeitsziele ausgerufen. Diese beruhen auf verbessertem Recycling, reduzierten Emissionen, weniger Abfall und reduziertem Wasser- und Energieverbrauch [8, 9]. Folglich übertragen sich diese Anforderungen auf den Bereich der Montage und die resultierende Notwendigkeit für Innovationen.

Rekapituliert man die oben skizzierten Aspekte (vgl. Abbildung 1), wird deutlich, dass ein Technologiesprung erforderlich ist, um ökonomische und ökologische Montagesysteme zu etablieren. Eine Weichenstellung dafür ist die Automatisierung, welche jedoch nicht mehr wie bisher ihre Daseinsberechtigung nur auf das Wiederholungsparadigma der Massenproduktion stützen kann, sondern ebenfalls den erklärten Nachhaltigkeitszielen Rechnung tragen muss. Zukünftige Montagesysteme müssen während der Rekonfiguration und Wartung einer Teilmenge ihrer Ressourcen die Produktion aufrechterhalten können. In der Automobilindustrie ist dies vor allem für den Karosseriebau von Bedeutung. Insbesondere für Automatisierungssysteme, die auf autonomen mobilen Robotern (AMR) und flexiblen Manipulatoren beruhen, sind erhebliche Fortschritte in Richtung erhöhter Autonomie in komplexen, weitgehend unstrukturierten Umgebungen erforderlich, um den Einrichtungs- und Inbetriebnahme-Aufwand zu mindern, der derzeit ihren Einsatz jenseits von Massenproduktionsszenarien verhindert. Insbesondere gilt dies auch für die Demontage. Die Steuerung und Konfiguration dieser Montagesysteme wird sich noch stärker auf komplexe Software stützen müssen, die zu einem integralen Bestandteil des Designs der Produktionssysteme werden wird. Dies erfordert, dass typische Systemintegratoren und Anbieter von Automatisierungslösungen zu Technologieanbietern werden, welche Software-Bausteine bereitstellen können. Vorhandene Steuerungsarchitekturen, die oft anbieterspezifisch sind, müssen überprüft werden, und Ansätze zur Vereinfachung und Vereinheitlichung ihres Einsatzes, wie generative Programmierung oder Low-Code-Konfiguration, müssen dem Bereich der Informationstechnologie auf Produktionssysteme übertragen werden. Gleichzeitig müssen bestehende Herausforderungen wie der enorme Aufwand für die Aktualisierung und Pflege von Software auf einer Vielzahl von Subsystemen innerhalb von Automatisierungssystemen adressiert werden.

*Abbildung 12: Anforderungen an nachhaltige Montagesysteme und bereits heute bestehende Herausforderungen.*

Dieser Beitrag konzentriert sich auf die Handlungsfelder der Montageorganisation und -automatisierung und folgt dabei der folgenden Struktur: In Kapitel 2 wird die Rolle der Montage in der nachhaltigen Produktion detailliert dargestellt und es werden Kriterien zur Bewertung vorgeschlagen. Linienlose mobile Montagesysteme werden als neuartige Montageparadigmen vorgestellt, welche einen Ansatz zur Adressierung der oben genannten Herausforderungen bieten. Kapitel 3 befasst sich mit den notwendigen Fortschritten in der Automatisierung, um die Wiederholbarkeit als Grundlage für den Entwurf von Automatisierungssystemen durch datengetriebene Ansätze und ubiquitäre Messtechnik als Informationsquelle für kontextbewusste Entscheidungsfindung in angepasster Echtzeit zu ersetzen. In diesem Zusammenhang werden das Konzept und der Begriff der *Automation of Automation* definiert und ihre Schlüsseltechnologien umrissen. Aus Sicht der Informationstechnologie sind die resultierenden Systeme von hoher Komplexität. Daher werden semantigetriebene, ontologiebasierte Ansätze zum Ressourcen- und Kommunikationsmanagement als Grundlage für ein automatisiertes Softwaredeployment in Automatisierungssystemen in Kapitel 4 als Digital Twin Pipeline zusammengefasst. Kapitel 5 schließt den Beitrag mit Anwendungsbeispielen ab, die die skizzierten Fortschritte aufgreifen.

Dieser Beitrag ist eine Fortsetzung des vorherigen Artikels *Future Assembly with Distributed Sensor Services* [10]. Er rekapituliert daher nur kurz die Konzepte der linienlosen mobilen Montagesysteme und der verteilten Sensordienste. Für weitere Details und zusätzliche Beispiele werdendie Leserinnen und Leser auf den oben genannten Artikel verwiesen.

## 2 Nachhaltige Montagesysteme

Der Beitrag der industriellen Montage zur Nachhaltigkeit wird in der Literatur bisher nur vage diskutiert, weshalb nur einige wenige Arbeiten exemplarisch angeführt werden. MICIETA ET AL. betonen die Notwendigkeit der Flexibilität und Adaptivität von Montagesystemen, um hohe Variantenzahlen bei gleichzeitig hoher Effizienz, insbesondere hinsichtlich der Ressourcennutzung, zu berücksichtigen [11]. TONELLI ET AL. Legen den Fokus auf Wiederverwendung, Wiederaufbereitung und Recycling und heben die Demontage als integralen Bestandteil der industriellen Montage hervor [6]. BI ET AL.

nennen die Vermeidung von Abfall als Maxime und diskutierten die Rekonfigurierbarkeit von Montagesystemen, um die effektive Lebensdauer ihrer Komponenten (z. B. Roboter, Steuerungen, Transfersysteme) zu erhöhen und den $CO_2$-Impact zu reduzieren [12]. Darüber hinaus ist ein genereller Trend zur Erfassung des $CO_2$-Fußabdruckes für die gesamte Wertschöpfungskette erkennbar, wie er z. B. im Scope-Standard beschrieben wird [13]. Um den Begriff der Nachhaltigkeit in der industriellen Montage zusammenzufassen und zu schärfen, schlagen die Autoren die folgende Definition vor:

> *Nachhaltige Montage wird als Implementierung und Organisation von Montage- und Demontagesystemen verstanden, die darauf abzielen, mit maximaler Ressourceneffizienz in einer holistischen Perspektive zu arbeiten, die den Montageprozess selbst, die Lebensdauer des Montagesystems, den Lebenszyklus des Produkts und die Gesamtausschussrate umfasst. Nachhaltige industrielle Montagesysteme sind unter Berücksichtigung der Paradigmenwechsel hin zur Kreislaufwirtschaft, der Abkehr von der Massenproduktion und unter Beachtung von ESG-Kriterien für einen nachhaltigen, langfristigen Betrieb geeignet.*

Diese Definition bildet die Grundlage für die nachfolgende Betrachtung des Stands der Technik in Bezug auf Nachhaltigkeit in der industriellen Montage, die Definition von Bewertungskriterien und die Einführung von linienlosen mobilen Montagesystemen (Englisch: Line-less Mobile Assembly Systems, LMAS) als Organisationsansatz.

## 2.1 Bewertungskriterien

Um den Entwurf, die Implementierung und die Bewertung nachhaltiger Montagesysteme zu erleichtern, wird eine Reihe von Bewertungskriterien benötigt. Sie ermöglichen wiederum ein gemeinsames Verständnis von Nachhaltigkeit in der industriellen Montage. In diesem Beitrag werden die folgenden Kriterien vorgeschlagen (vgl. Abbildung 2):

- Die *Gesamtressourcenauslastung* der Montageanlage ist als Verhältnis zwischen der Zeit, in der eine Ressource aktiv ist, und der maximal verfügbaren Zeit, in der eine Ressource aktiv sein kann definiert. Die verfügbare Zeit ist um notwendige Leerlaufzeiten, z. B. durch Wartung, zu korrigieren. Die Gesamtauslastung des Montagesystems sollte über ein geeignetes, z. B. gewichtetes, Mittelungsschema aus den Werten je Ressource berechnet werden. Eine erhöhte Gesamtauslastung ist günstig, um den auf das Produkt übertragenen Anteil des Fußabdrucks des Montagesystems zu reduzieren. Weiterhin wird so die inhärente Flexibilität eines Montagesystems, Produkte ohne Rekonfiguration zu produzieren, indirekt beschrieben, da sie zur Gesamtauslastung beiträgt.

- Die *projektierte Lebensdauer* eines Montagesystems stellt die zu erwartende Zeit dar, bevor das Montagesystem veraltet ist. Obsoleszenz kann z. B. durch unzureichende Anpassungsfähigkeit an neue Produkte oder durch starken Verschleiß auftreten. Eine hohe Lebensdauer wird aus den gleichen Gründen bevorzugt, aus denen eine erhöhte Ressourcenauslastung vorteilhaft ist.

- Das *Energiesparpotenzial* ist die relative Energiemenge, die das Montagesystem durch Anpassung seiner Parameter, z. B. der Arbeitsgeschwindigkeit, an den aktuellen Bedarf, einsparen kann, ohne kritische Taktzeiten oder die Termintreue zu verletzen.

- Der *Grad der zerstörungsfreien Montage* bezieht sich auf den Anteil der reversiblen Fügevorgänge bei der Herstellung eines Produkts und trägt zur Wiederaufbereitbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Materialtrennbarkeit am Ende des Lebenszyklus eines Produktes bei. Diese Kennzahl ist eng mit dem Produktdesign gekoppelt, wird jedoch auch von der Wahl der Fügetechnologien bei der Gestaltung des Montagesystems beeinflusst.

- Die *variable $CO_2$-Belastung* pro Produkt fasst den gesamten $CO_2$-Fußabdruck während der Montage eines einzelnen Produkts zusammen. Dieser ist primär auf den Energieverbrauch der Anlage während der Wertschöpfung zurückzuführen ist. Sie berücksichtigt nicht den $CO_2$-Fußabdruck, der durch die Materialien des Produkts oder die anfängliche Einrichtung der Montageeinrichtung entsteht.

- Die *$CO_2$-Basisbelastung* quantifiziert den $CO_2$-Ausstoß aus Einrichtung und Basisbetrieb des Montagesystems, d. h. der gesamte Fußabdruck, der entsteht, bevor das erste Produkt montiert und wenn kein Produkt montiert wird, die Anlage also in Betrieb aber nicht produktiv ist. Der Bezugsrahmen für die Quantifizierung kann je nach gewähltem Ansatz unterschiedlich sein und ist vergleichbar mit der Quantifizierung des gesamten $CO_2$-Fußabdrucks des Produkts. Um die Schwere der anfänglichen $CO_2$-Belastung besser beurteilen zu können, sollte dieses Kriterium über die Lebensdauer des Montagesystems oder die Anzahl der Produkte skaliert werden.

- Die *Gesamtausschussrate* wird durch das Verhältnis von Teilen oder Produkten, die verworfen werden müssen, zur Gesamtzahl der produzierten Teile bestimmt. Diese Kennzahl spiegelt vor allem die Fähigkeit eines Montagesystems wider, Toleranzanforderungen einzuhalten. Darüber hinaus ist die erfolgreiche Einbindung von nicht toleranzhaltigen Teilen in Baugruppen von Vorteil. Dies ist dann der Fall, wenn Einzelteile außerhalb ihrer spezifischen Tolerierung im Kontext einer Baugruppe toleranzkonform gefügt werden können (z. B. Montage von Blechbaugruppen).

- Der Automatisierungsanreiz ist ein qualitatives Kriterium, das gesellschaftliche und staatliche Nachhaltigkeitsziele adressiert. Es umfasst die Frage, ob die Substitution menschlicher Arbeitskräfte durch Automatisierung in einer ganzheitlichen Betrachtung wünschenswert ist, z. B. unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Wertevorstellungen oder auch möglicher staatlicher Anreize für die Beschäftigung neben reinen Kosteneinsparungen und Produktivitätsmetriken.

Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit für die oben postulierten Bewertungskriterien. Zudem ist zu erwarten, dass Kriterien für einzelne Systeme nicht anwendbar oder zumindest angepasst werden müssen.

*Abbildung 34: Übersicht der Bewertungskriterien für die Nachhaltigkeit von Montagesystemen*

## 2.2 Linienlose, mobile Montagesysteme als Ansatz für die Montage der Zukunft

Linienlose, mobile Montagesysteme (LMAS) verbinden die zeitliche und räumliche Entkopplung von Produktionsmitteln mit modernen Ansätzen zur Mobilisierung aller relevanten Ressourcen in der industriellen Montage [14]. Die Mobilisierung ermöglicht das Zusammenführen von Ressourcen und Produkten an auf dem Shopfloor frei wählbaren Positionen in der Fabrik. Sie nutzt damit das Paradigma der Verlagerung von Ressourcen hin zum Produkt, was insbesondere großen Produkten zugutekommen kann (vgl. Abbildung 5). Innerhalb von LMAS muss durch die Produktionsplanung die Ressourcenzuweisung, die Vorgangsreihenfolge und die Standortplanung innerhalb der Fabrik festgelegt werden. LMAS sind wie folgt definiert:

> *LMAS sind Montagesysteme, die eine kontinuierliche Anpassung und Optimierung der Produktion durch individuelle Auftragsrouten auf Basis der völlig freien Zuordnung von Aufträgen, Ressourcen, Zeit und Arbeitsplätzen innerhalb der Fabrik ermöglichen.*

Die inhärente Flexibilität von LMAS trägt, wie oben erwähnt, direkt zur positiven Entwicklung der Nachhaltigkeitsbewertungskriterien bei. Die Ressourcenflexibilität stärkt die Fähigkeit, neue Prozesstechnologien schnell einzuführen, während die organisatorische Flexibilität durch die räumlich-zeitlichen Freiheitsgrade der Ressourcenzuweisung die Fähigkeit erhöht, Produktvarianz zuzulassen.

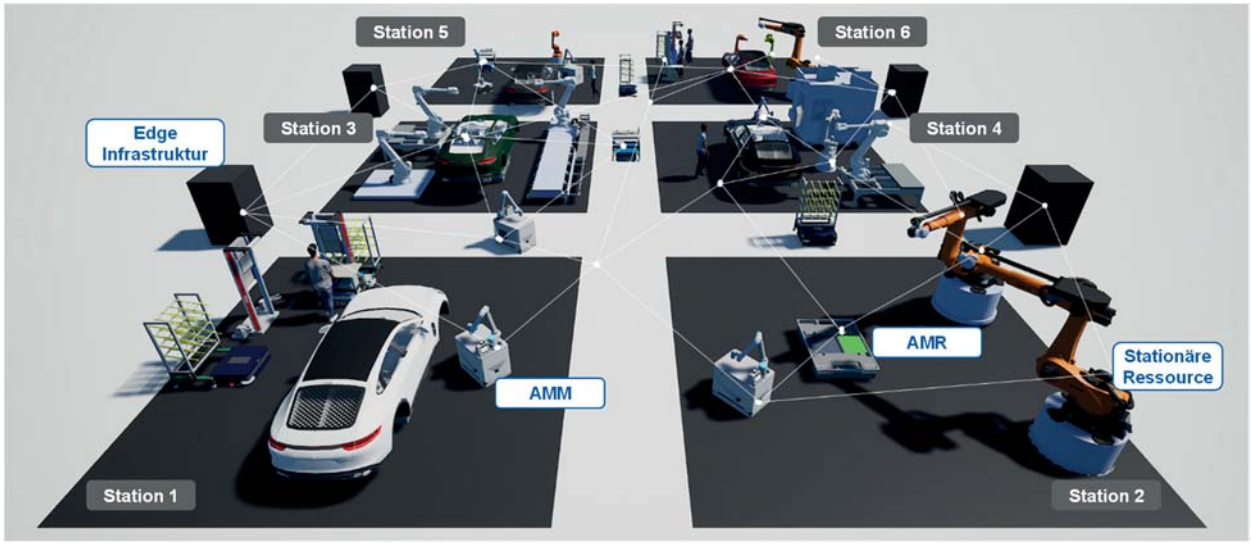



*Abbildung 56: Szenario der linienlosen mobilen Montage für die Automobilmontage, das eine hybride Umgebung mit AMR, AMM und stationären Hochlastressourcen zeigt. Die einzelnen Stationen sind schwarz hervorgehoben.*

Der hier vorgestellte LMAS-Ansatz stellt einen radikalen Entwurf zukünftiger Montagesysteme dar, welcher möglicherweise nicht uneingeschränkt für alle Produktionsszenarien anwendbar ist. Kerninnovationen der unterschiedlichen Realisierungsstufen zwischen dem Stand der Technik und dem LMAS-Paradigma sind z. B. die modulare Gestaltung von Montagestationen oder linienunabhängige Montagesysteme (Englisch: Line-less Assembly System, LAS) mit rein stationären oder teilmobilen Ressourcen (vgl. Abbildung 7). Es ist zu erwarten, dass tatsächliche Anwendungen nachhaltiger Montagesysteme nur einen Teil der vielfältigen Aspekte von LMAS aufgreifen und zu hybriden Systemen führen (z. B. teilweise Nutzung stationärer Ressourcen innerhalb des Montagesystems). Schlüsseltechnologien von LMAS, wie z. B. mobile Ressourcen, können auch heute schon in der industriellen Montage eingesetzt werden, so dass mit zunehmender Technologiereife ein schrittweiser Übergang möglich ist.

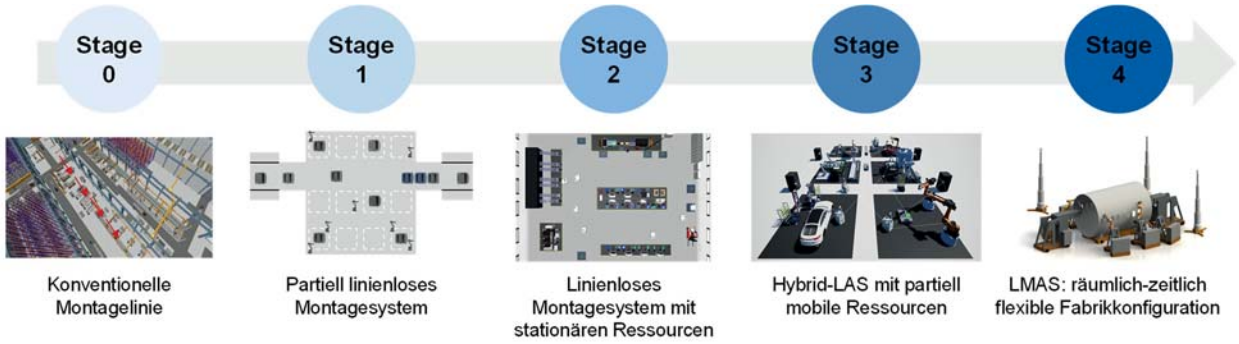



*Abbildung 7: Evolutionsstufen vom klassischen Fließband zur linienlosen mobilen Montage. Neben der Modularität unterscheiden sich die Stufen vor allem durch den Grad der organisatorischen Flexibilität und den Einsatz mobiler Ressourcen.*

# 3 Automation of Automation

In der Vision zukünftiger, nachhaltiger Montagesysteme stellen die allgemeinen Trends der Produktionstechnik hin zu kleineren Stückzahlen, mehr Anpassungsfähigkeit, reduziertem Ausschuss und einem erhöhten Recyclinganteil große Herausforderungen im Bereich der Automatisierungstechnik dar. Der traditionelle, starre Ansatz der Automatisierung basierend auf wiederholbaren Prozessen und festen Regeln stößt an seine Grenzen. Mit *Automation of Automation* wird im Folgenden ein übergreifendes Leitmotiv für diese Herausforderungen vorgestellt:

> *Automation of Automation bezeichnet die Automatisierung in nahezu unkontrollierten und damit a priori undefinierten Umgebungen. Planung und Ausführung basieren nicht mehr auf klaren Regeln, Wiederholbarkeit und fester räumlich-zeitlicher Synchronisation, sondern werden stattdessen auf Basis von kontextbezogenen Echtzeitdaten generiert, die bereits von der ubiquitären Messtechnik nach einem zielorientierten Ansatz bereitgestellt werden können. Das bedeutet, dass nicht nur die unmittelbaren Aktionen (z. B. Roboterprogramme) selbst automatisiert sind, sondern auch der Inbetriebnahmeprozess (z. B. Erstellung und Anpassung der Roboterprogramme) wenig bis gar keine menschlichen Eingriffe erfordert. Das resultierende System arbeitet mit einem hohen Grad an Autonomie, reagiert auf Veränderungen seiner Umgebung und bietet effizient automatisierte Prozesse außerhalb der Massenproduktion.*

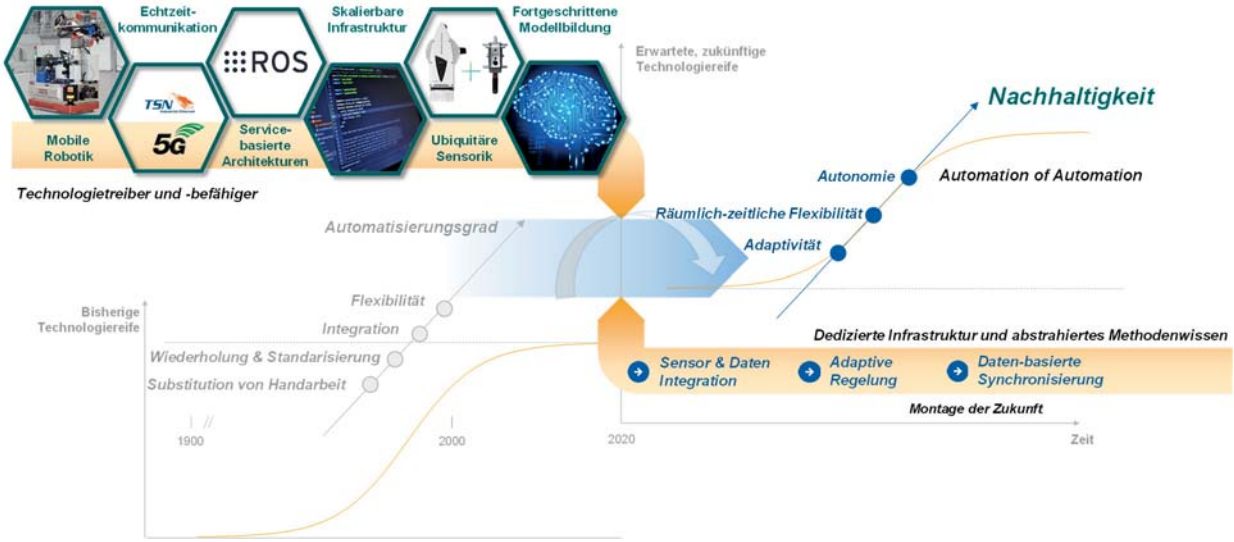



*Abbildung 89: Technologischer Sprung zur Automation of Automation dargestellt als Innovations-S-Kurve. Das derzeitige Plateau kann durch den Einsatz der dargestellten Schlüsseltechnologien überwunden werden.*

Abbildung 8fasst den angestrebten Technologiesprung zusammen: Die meisten bisherigen Entwicklungen konzentrierten sich auf die Erhöhung des Automatisierungsgrades durch Substitution von Handarbeit, Standardisierung, verbesserter Integration und zuletzt die Ermöglichung eines gewissen Grades an Flexibilität. Die nun angestrebten Punkte wie Anpassungsfähigkeit, räumlich-zeitliche Entkopplung und Autonomie in zukünftigen Montagesystemen, die letztlich zur Nachhaltigkeit in der Produktion beitragen, erfordern Schlüsselinnovationen in zentralen Technologiefeldern. Dies sind insbesondere die mobile Robotik, (drahtlose) Echtzeitkommunikation, Service-basierte Architekturen, skalierbare Recheninfrastruktur, ubiquitäre Sensorik sowie fortgeschrittene Modelle. Während sich in diesen

Technologiefeldern in der jüngeren Vergangenheit bereits Innovationen abzeichneten, ist deren Verfügbarkeit erst jetzt gegeben.

Das autonome Handeln der zukünftigen Systeme basiert auf einem dreistufigen Prozess: Sehen, Denken, Handeln (Englisch: See, Think, Act). Die technologischen Herausforderungen des Paradigmas der *Automation of Automation* orientieren sich daher an drei Hauptaktionsfeldern: Wahrnehmen und Verstehen der Umgebung (Sehen), autonomes Bestimmen, Planen und Terminieren einer Vorgehensweise, um das vorgegebene Ziel zu erreichen (Denken), und Ausführen der Vorgehensweise mit breit anwendbaren Ressourcen in einer potenziell herausfordernden Umgebung (Handeln). Die Umsetzung erfordert als zusätzliches Handlungsfeld die Bereitstellung einer geeigneten Infrastruktur. Alle Herausforderungen sind durch einen hohen Bedarf an Softwarelösungen gekennzeichnet, wodurch diese notwendige Voraussetzung für den skizzierten Technologiesprung wird.

Eine stark vereinfachte Veranschaulichung dieser Entwicklung wird nachfolgend am Beispiel der automatisierten Verschraubung dargestellt: Konventionelle Ansätze basieren auf der präzisen Positionierung von Teilen sowohl zueinander als auch im Arbeitsraum der Montageanlage, welche mit einem vorprogrammierten Roboter die notwendigen Schritte ausgeführt. Ein möglicher Schritt zur Erhöhung der Flexibilität ist der Einsatz von 2D- und/ oder 3D-Messtechnik zur Lokalisierung und Identifikation von Teilen, Gewinden und Schrauben, um den vordefinierten Montagevorgang innerhalb eines engen Parametersatzes automatisch anzupassen und auszuführen. Dieser Grad der Autonomie entspricht dem Stand der Forschung [15]. Die Automation of Automation erfordert dann die Integration solcher spezialisierten Lösungen in ein komplettes, rekonfigurierbares System, welches auch die Handhabung bisher unbearbeiteter Teile und die bedarfsgerechte Anpassung der Fähigkeiten der Automatisierungsressourcen auf der Basis einer generalisierten, ressourcenagnostischen Aufgabenbeschreibung beherrscht. Ähnlich verhält sich die Weiterentwicklung bei autonomen mobilen Robotern (Englisch: Autonomous Mobile Robots, AMR). Anstelle der strikten Verfolgung eines vorgegebenen Pfades, sind diese Systeme zunehmend in der Lage in dynamischen Umgehungen unbekannten und unerwarteten Hindernisse wie Personengruppen oder Logistikkisten auszuweichen.

## 3.1 Ubiquitäre Messtechnik und verteilte Sensordienste

Die Messtechnik ist ein wesentliches Element der Digitalisierung sowie der cyber-physischen Produktion und bildet die Schnittstelle zwischen physischen und virtuellen Systemen [16]. Die Messtechnik bildet damit in fortgeschrittenen Automatisierungslösungen dabei die Datenquelle für alle kognitiven Funktionen in Robotersystemen. Außerhalb der Automatisierungsdomäne hat sich aufgrund der gestiegenen Nachfrage der Qualitätssicherung für hochwertige und/oder funktionskritische Produkte eine breite Palette an industrieller Messtechnik herausgebildet. Aus Sicht der Autoren werden dabei fast alle physikalischen Messprinzipien in irgendeiner Form genutzt. Mit dem Trend zu kürzeren Qualitätskontrollzyklen wurden viele Systeme so optimiert, dass sie direkt in der Fertigung und nicht nur in einem separaten Messraum eingesetzt werden können, was sie zu geeigneten Kandidaten für die automatisierungsintegrierte Messtechnik macht [17]. Getrieben durch den zunehmenden Einsatz von Sensoren in der Unterhaltungselektronik, z. B. Beschleunigungssensoren in Smartphones, Umgebungssensoren in Geräte für die Heimautomatisierung (Smart Home), sinken die Stückkosten und steigt die Verfügbarkeit von einfachen Sensoren auf dem Markt. Darüber hinaus besteht das Potenzial für den massiven Einsatz von Sensoren in Situationen, in denen das Erreichen der

geringstmöglichen physikalischen Messunsicherheit gegenüber der Verringerung der Unsicherheit in einem System aufgrund einer unzureichenden Anzahl von Messungen depriorisiert wird.

Mit der massiven Verfügbarkeit von Sensoren bzw. Messsystemen kann von einer ubiquitären Fülle an zur Verfügung stehenden Informationen ausgegangen werden. Innerhalb der Anwendungsdomäne zukünftiger Montagesysteme wird eine Klassifizierung des Einsatzes von Sensorinformationen in vier Ebenen vorgeschlagen:

- *Lokale Kognition* bezieht sich auf Sensoren, die es einem einzelnen Robotersystem (oder einer Gruppe von Robotersystemen) ermöglichen, die notwendigen Informationen zu erfassen, mithilfe derer eine bestimmte Automatisierungsaufgabe, z. B. ein Fügevorgang, autonom durchführbar ist. Prominente Beispiele sind 3D-Bildverarbeitungssysteme, die an Endeffektoren angebracht sind und eine Punktwolke relevanter Teile in ihrer tatsächlichen Form erfassen, Kraft-/Drehmomentsensoren zur Steuerung von Greifvorgängen oder 2D-Bildverarbeitungssysteme zur Erkennung lokaler Muster wie beispielsweise Schraubenköpfe oder Bohrungen.
- *Lokale Überwachung* fasst Sensoren zusammen, die nicht direkt in einen Automatisierungsregelkreis eingreifen, sondern relevante Informationen für die Stabilität und Leistungsfähigkeit eines einzelnen (oder einer kleinen Gruppe von) Robotersystem(en) erfassen, z. B. die Messung von Vibrationen, Schallemissionen oder Temperaturen. Derartige Ansätze werden oft unter dem Begriff Condition Monitoring eingeordnet.
- *Globale räumlich-zeitliche Informationen* sind in zukünftigen Montagesystemen relevant, um die einzelnen Systeme in einem globalen Automatisierungssystem zu synchronisieren. Bei der angestrebten Abwesenheit von physischen Referenzen (z. B. Landmarken) wird ein messtechnischer Bezugsrahmen zur räumlichen Orientierung benötigt, um stabile Prozesse vor dem Hintergrund erhöhter Toleranzanforderungen aufrechtzuerhalten. Typische Messsysteme, die diese Ebene bilden, sind großvolumige Koordinatenmesssysteme, z. B. Laser Tracker, sogenannte Indoor-GPS-Systeme oder großvolumige Photogrammetrie-Lösungen. Da viele Prozesse dynamisch ablaufen, ist ebenso ein Mechanismus zur Zeitsynchronisation, der über eine geeignete Netzwerkverbindung oder über elektrisch verteilte Triggersignale realisiert werden kann, von großer Bedeutung.
- *Globale Überwachung* beinhaltet Sensorsysteme, die über den gesamten Fertigungsbereich verteilt sind und global relevante Informationen zur Prozessfähigkeit und Zustandsüberwachung erfassen, z. B. Umgebungssensoren für Temperatur, Druck, relative Luftfeuchtigkeit oder Partikelkonzentration. Die Relevanz der einzelnen Informationen hängt stark von den ablaufenden Prozessen und eingesetzten Materialien ab.

Da die benötigten Sensortechnologien auf allen oben vorgestellten Ebenen bereits verfügbar sind, besteht die größte Herausforderung in der Interoperabilität im entstehenden Gesamtsystem. Zunächst ist die Kontextualisierung und Zusammenführung lokaler und globaler Informationen mit virtuellen Modellen auf physikalischer Ebene erforderlich. Damit soll Unsicherheiten und möglichen Inkonsistenzen Rechnung getragen werden. Zweitens muss die technologische Heterogenität verschiedener Systeme und deren Schnittstellen berücksichtigt werden, um eine Integration in ein übergeordnetes, komplexes Montagesystem zu ermöglichen. Diese Situation wurde von SCHMITT ET AL. unter dem Begriff der verteilten Sensorsysteme (Englisch: Distributed Sensor Services, DSS) zusammengefasst [10, 18]:

> *Jede Einheit, die physikalische Prinzipien nutzt, um reale Größen zu messen und zu digitalisieren, kann als Sensor betrachtet werden. Darüber hinaus können Sensoren auch komplexe Systeme sein, die mehrere Sensoren kombinieren, z. B. Laser Tracker. Sie sind physikalisch verteilt, ebenso wie die (Netzwerk-)Schnittstellen zu ihren aktuellen und historischen Daten und die an der Datenverarbeitung der beteiligten Rechenressourcen. Die Interoperabilität ist entscheidend, um die Sensorinformationen in einem heterogenen, verteilten System zu nutzen. Dies erfordert eine funktionale Modellierung von Sensoren und Verarbeitungsmodulen, welche die bereitgestellte Information als Mehrwert unabhängig von der proprietären Implementierung in den Vordergrund stellt.*

Ein System verteilter Sensordienste, dass die Kombination lokaler, großvolumiger Koordinatenmesssysteme zu einem globalen Referenzkoordinatensystem adressiert, wurde von MONTAVON ET AL. als möglicher Baustein für zukünftige Montagesysteme implementiert und unterstreicht die Machbarkeit, den oben genannten Herausforderungen mit dem Konzept der verteilten Sensordienste zu begegnen [19, 20].

## 3.2 Dreilagige Kommunikations- und Rechenarchitektur

Der Übergang von einem regelbasierten zu einem zielbasierten Ansatz in der *Automation of Automation* führt zu einem deutlich erhöhten Bedarf an Rechenleistung. Typischerweise rechenintensive Aufgaben sind die Sensordateninterpretation, die autonome Generierung von Aktionssequenzen, die Aktionsausführung und die Adaption von Operationen mit mobilen, kollaborierenden Ressourcen in einer sich ändernden Umgebung. Hinzu kommen Einschränkungen der traditionellen Automatisierung, wie Latenzanforderungen für Regelkreise, Verfügbarkeitsanforderungen oder Sicherheitsmaßnahmen. Um derartige komplexe rechnergestützte Systeme in der Fertigung zu beherrschen, wurden Paradigmen wie serviceorientierte Architekturen, holonische Fertigungssysteme und agentenbasierte Systeme entwickelt [21, 22]. Allen Ansätzen gemein ist die Zerlegung in aufgabenspezifische, interagierende Teilsysteme, welche jedoch in der Ausführung und Implementierung weitgehend autonom sind. In allen Fällen muss die Gestaltung des Gesamtsystems und die semantische Beschreibung der einzelnen Komponenten berücksichtigt werden. Neben einer Semantik, zu der ein Lösungsansatz in Kapitel 4vorgestellt wird, muss das Systemdesign durch eine geeignete Kommunikations- und Recheninfrastruktur ergänzt werden. Diese dient der Ausführung der einzelnen Teilaufgaben unter Berücksichtigung von Rechen- und Latenzanforderungen. In der Literatur sind verschiedene Protokolle und Referenzarchitekturen diskutiert worden [23]; dennoch ist letztendlich ein anwendungsspezifischer Entwurf erforderlich, der wiederum nicht exklusiv gültig ist, da mehrere geeignete Systemarchitekturen existieren können.

Abbildung 10zeigt einen vorgeschlagenen Ansatz zur Verteilung verschiedener Aufgaben in einem komplexen Montagesystem auf drei Ebenen, der auch die Grundlage für den in Abschnitt 5.2beschriebenen Demonstratoraufbau bildet: Von der Hardware vorgegeben, befinden sich Sensorik, Sicherheitstechnik und unmittelbare Treiber und Endstufen in der Feldebene und stellen strenge Anforderungen an die Kommunikationstechnik. Aus Kosten-, Kapazitäts- und Energieeffizienzgründen werden rechenintensive Aufgaben mindestens in die Edge-Ebene verlagert. Dies erfolgt über einen IIoT-Gateway. Dazu gehören Lokalisierung und Navigation, Bahnplanung sowie die erweiterte Wahrnehmung (oft als Machine Vision bezeichnet). In diesem Zusammenhang wird die Hardware der Edge- Ebene als Infrastruktur konzipiert, die sich auf oder in der Nähe der Produktionsstätte befindet und über eine adäquate Netzwerkverbindung verfügt, die eine

geringe Latenz und hohe Zuverlässigkeit aufweist. An dieser Stelle kommen die technischen Fortschritte in der zeitkritischen Vernetzung und 5G als wichtige technologische Befähiger voll zum Tragen. Das URLLC-Profil von 5G (Ultra-Reliable und Low Latency Communications wurde von Anfang an auch vor dem Hintergrund industrieller Anwendungen entwickelt und bietet Latenzen im Millisekundenbereich. Damit schließt es eine bestehende Lücke, um die Auslagerung der oben genannten Aufgaben auf die Edge für drahtlose sowie vor allem verteilte und mobile Systeme zu realisieren [23]. Es wird erwartet, dass das gesamte Kommunikationssystem auf gemischten Netzwerktechnologien aufbaut, d.h. kabelbasiert oder unter Nutzung anderer drahtloser Technologien (z.B. WiFi, Bluetooth), um sich den gegebenen Anforderungen so effizient wie möglich anzupassen.

Es verbleiben viele Aufgaben ohne kritischen Echtzeitbetrieb, die sich im dreistufigen Konzept besonders für die Nutzung einer Factory Cloud eignen. Diese kann in Form typischer Cloud- (oder Inhouse-Cloud-ähnlichen) Infrastrukturen umgesetzt werden. Diese fördern die Ausfallsicherheit und Skalierbarkeit des Gesamtsystems und ermöglichen eine moderne Interaktion der Nutzenden auf Basis von Web-Technologien und Endgeräten, z. B. Tablets oder Smart Wearables. Typische Komponenten für diese Ebene sind beliebige Langzeitdatenbanken und Bedienoberflächen sowie Software-Repositories für bereits vorhandene oder generierte Sequenzen und beliebige Simulationen. Es wird daher erwartet, dass die meisten der im nächsten Kapitel vorgestellten Schritte der sogenannten Digital Twin Pipeline hier ausgeführt werden.

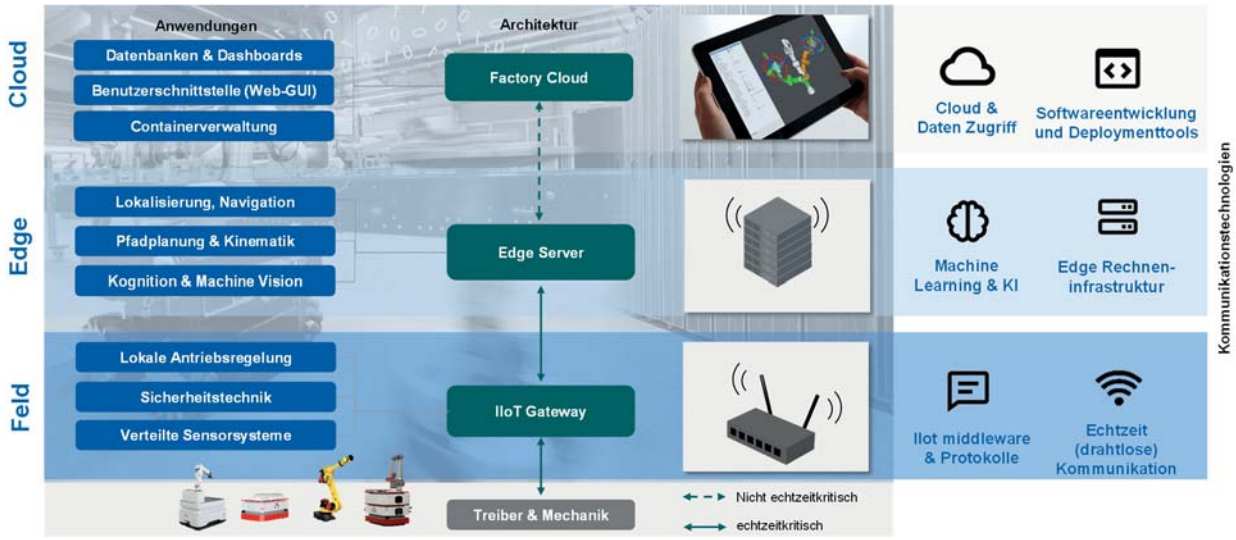



*Abbildung 1011: Dreistufige Architektur zur Implementierung zukünftiger Montagesysteme und zur Bewältigung der zu erwartenden Komplexität in der Softwareentwicklung und Datenverwaltung.*

## 3.3 Mobile und vielseitige Ressourcen

Mobile und vielseitig einsetzbare Ressourcen sind ein entscheidender Bestandteil von LMAS sowie des Leitmotivs *Automation of Automation* im Allgemeinen. Sie können in autonome mobile Roboter (AMRs) und autonome mobile Manipulatoren (AMMs) unterteilt werden. AMRs werden eingesetzt, um Teile und Produkte innerhalb der Fabrik zu transportieren. Sie verfügen über eine erweiterte Navigationsmöglichkeiten basierend auf Onboard-Intelligenz und Navigationssensoren, um sich ohne Führungslinien oder ähnliche Hilfsmittel zu bewegen. So bieten sie mehr Flexibilität als traditionelle fahrerlose Transportsysteme (Englisch: Automated Guided Vehicles, AGVs). AMMs erweitern den

Handlungsspielraum von AMRs, indem sie die Fähigkeiten eines Industrieroboters zur Handhabung mit sechs Freiheitsgraden mit der Mobilität von AMRs zusammenführen. AMMs können sowohl für Handhabungs- und Pick & Place-Operationen als auch für komplexere Montage- und Bearbeitungssituationen eingesetzt werden. Insbesondere beim Einsatz von Cobots besteht die Möglichkeit einer einfachen Automatisierungsintegration in hybride Montagesysteme. Dies reduziert die Notwendigkeit ortsfester Sicherheitseinrichtungen. Beispiele hierfür sind das Handhaben von Rohmaterial, Fertigteilen und Werkzeugen in hochflexiblen Fertigungszellen, Cobot-basiertes automatisiertes Schleifen und Cobot-basierter Dichtmittelauftrag in der Luftfahrtmontage (vgl. Abbildung 12). Die Verwendung von standardisierten Schnittstellen und mobilen Plattformen ermöglicht den vielseitigen Einsatz von Ressourcen. Diese können auf andere Vorgänge umgestellt werden, was eine hohe Auslastung dieser gewährleistet, da die Flexibilität der Ressourcenzuweisung zu den Aufträgen erhöht wird. Es sei darauf hingewiesen, dass der Einsatz von AMRs für jede Form von hochflexiblen und nachhaltigen Montagesystems unumgänglich erscheint, während der Einsatz von AMMs auf einen kleineren Teil der möglichen Anwendungsfälle beschränkt ist. Ihr Einsatz ist vor allem für Anwendungen mit langen Zykluszeiten und bei großvolumigen Produkten angedacht.

*Abbildung 1213: AMM-Anwendungen in der flexiblen Fertigung (links), Cobot-basiertes Schleifen (Mitte) und Dichtungsauftrag für Luft- und Raumfahrtstrukturen (rechts). (© Makino (links), Broetje-Automation GmbH (Mitte, rechts))*

AMRs und AMMs werden trotz der hohen Investitionskosten ein unersetzbarer Bestandteil zukünftiger nachhaltiger Fabriken. Für den flächendeckenden Einsatz sind die Hürden für die Inbetriebnahme weiter zu reduzieren. Insbesondere die Konfiguration und Integration für den Einsatz in bestehenden Fabriken und Montagesystemen sind dabei Herausforderungen, welche über rein technische Lösungen hinausgehen. Sowohl AMRs als auch AMMs benötigen ein geeignetes mechanisches Design, das den Anforderungen ihres Einsatzes entspricht und Konzepte wie Kompaktheit, Leichtbau, Ausdauer, Stabilität und Nutzlast mit einer erforderlichen komplexen Software kombiniert. Sowohl für die Plattform als auch für den Industrieroboter werden Softwaremodule und Rechenleistung für Lokalisierung, Navigation und Bahnplanung benötigt, um den Betrieb der jeweiligen Ressource zu gewährleisten. Darüber hinaus muss eine komplexe Planungssoftware das globale und lokale Flottenmanagement einschließlich Ressourcenzuweisung, Energiemanagement und globaler Verkehrskoordination durchführen, um eine effiziente Ressourcennutzung zu gewährleisten. Während Lösungen für die lokale AMR/AMM-Steuerung schnell akzeptiert werden und in mehreren kommerziellen und freien Plattformen (z. B. ROS - Robot Operating System) verfügbar sind, ist die Verbreitung von Planungssoftware auf höherer Ebene noch deutlich weniger fortgeschritten. Laut der potentiellen Nutzergruppe sind die fehlende Verfügbarkeit und die hohe Komplexität bei der Erstellung solcher Software das Haupthindernis für den breiteren Einsatz von AMMs. Es besteht eine erhebliche Marktnachfrage nach Softwarelösungen, die alle automatisierungsrelevanten Systeme auf höheren Ebenen als derzeit etabliert, integrieren.

# 4 Digital Twin Pipeline

In allen Phasen, insbesondere Planung und Steuerung, werden Software und Datenverfügbarkeit als größte Herausforderungen für die erfolgreiche Implementierung zukünftiger Montagesysteme angesehen. Während Sensordienste, Kommunikations- und Recheninfrastrukturen als auch Mehrzweckressourcen zu einer Reihe von standardisierten Technologien, Modulen und Best Practices konvergieren, repräsentiert die Software das domänenspezifische Wissen und die anwendungs- bzw. produktspezifische Nutzung des Montagesystems. Um den gewünschten Grad an Autonomie, entsprechend des Paradigmas *Automation of Automation,* zu erreichen, ist ein automatisierter Deployment-Mechanismus, beispielhaft vergleichbar mit automatisierten Pipelines in der Softwareentwicklung und im maschinellen Lernen, erforderlich. GÖPPERT ET AL. stellen hierzu eine sogenannte Digital Twin Pipeline vor, welche in diesem Kapitel weiter ausgeführt wird [24]. Aus wissenschaftlicher Sicht können die geplanten Montagesysteme als Cyber-Physisches-Produktionssystem (CPPS), bestehend aus verschiedenen Einheiten (physisch und virtuell), betrachtet werden. Die Interoperabilität zwischen diesen Einheiten, die zur kontinuierlichen Bereitstellung und Nutzung von Informationen notwendig ist, stellt eine große Herausforderung dar [25]. Ein Ansatz zur Bewältigung dieser Herausforderung sind interoperable Digitale Zwillinge (häufig mit dem englischen Begriff Digital Twin bezeichnet), [26]obwohl deren Entwicklung und Einsatz mit einem hohen Aufwand verbunden sind [27]. Um die Interoperabilitätsvorteile von Digitalen Zwillingen nutzen zu können, muss deren Modellierungs- und Implementierungsaufwand reduziert werden. Die Gesamtstruktur der Digital Twin Pipeline ist in Abbildung 14dargestellt und folgt drei Phasen, die nachfolgend zusammen mit dem Workflow und den zugehörigen Akteurinnen und Akteuren näher erläutert werden.

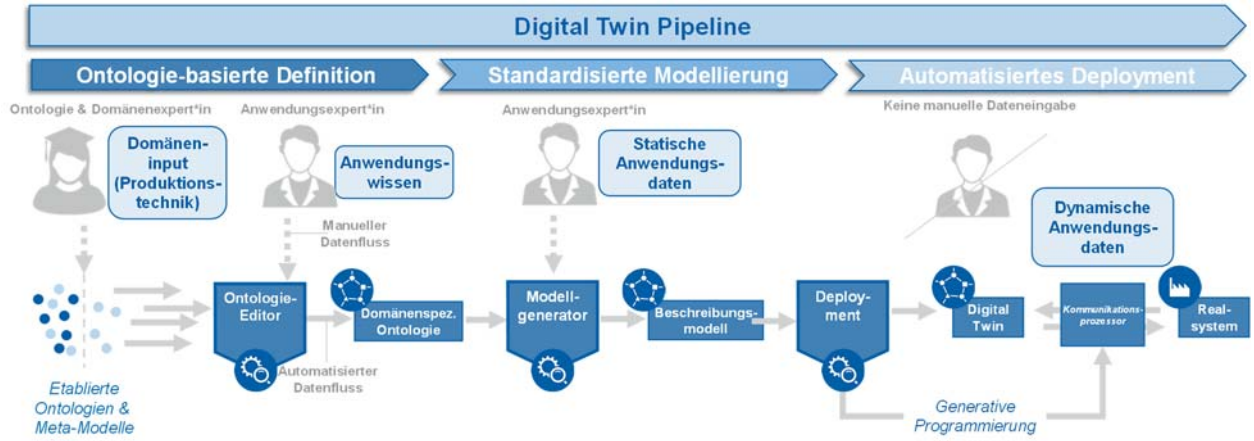



*Abbildung 1415: Überblick über eine Digital Twin Pipeline als Basis für das Informationsmanagement und die automatisierte Bereitstellung von Automatisierungsaufgaben unter Nutzung von ontologiebasierter Modellierung, standardisierten Kommunikationsprotokollen und generativer Programmierung [24].*

## 4.1 Ontologiebasierte Definition

In der Definitionsphase werden etablierte Ontologien und Metamodelle mithilfe des Fachwissens von Expertinnen und Experten vorausgewählt. Das zur Erstellung der Ontologie notwendige Wissen kann in eine Domänen- und eine Strukturebene unterteilt werden. Die Domänenebene umfasst Ontologien, die die Semantik und Zusammenhänge zwischen den Elementen für die spezifische Domäne (Anwendungswissen) beschreiben.

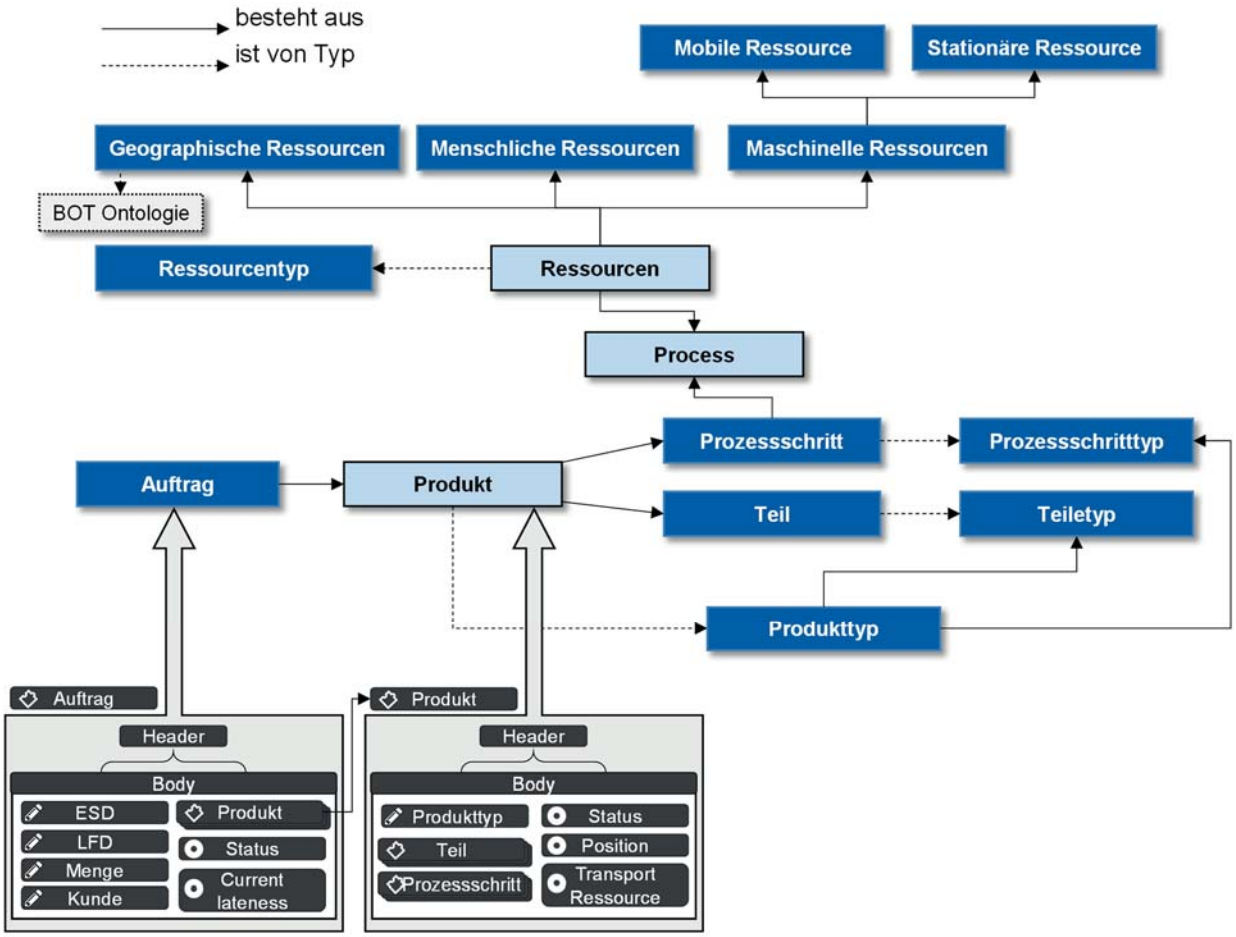



*Abbildung 1617: Exemplarische Ontologieübersicht für einen Auftrag innerhalb der Digital Twin Pipeline[24].*

Auf der Strukturebene werden Meta-Modelle für den grundlegenden und konsistenten Aufbau des Beschreibungsmodells und die Syntax zur Ausführung beschrieben. Die Referenzimplementierung der vorgestellten Digital Twin Pipeline verwendet auf der Domänenebene als Ontologien MASON [28] und BOT [29] und eine Kombination des Verwaltungsschalen-Konzepts mit SOIL [30] als Metamodell, bestehend aus Parametern, Variablen, Funktionen und Komponenten. Da sich die Ontologien teilweise überschneiden können, werden die entsprechenden Merkmale in einem Ontologie-Editor ausgewählt. Die Erstellerin oder der Ersteller kann nur bestimmte Teile einer Ontologie verwenden und diese mit Hilfe des Ontologie-Editors kombinieren (z. B. wird eine Ontologie für die Roboterbeschreibung und eine andere für Fähigkeiten und Dienste verwendet). Wenn jedoch bereits eine geeignete Ontologie mit einem konsistenten Meta-Modell existiert, kann diese direkt verwendet werden. Das Ergebnis dieser Definitionsphase ist eine domänenspezifische Ontologie in der, die gesamte Syntax und Semantik für das Beschreibungsmodell im Sinne des Digitalen Zwillings beschrieben ist. Abbildung 16zeigt einen Auszug der domänenspezifischen Ontologie für einen Auftrag. Dieser besteht aus verschiedenen, zu produzierenden Produkten. Alle Assets können entsprechend RAMI 4.0 in Typen und Instanzen unterschieden werden. Entspricht ein Produkt z. B. einem bestimmten Produkttyp, so werden die dazugehörigen Submodelle angewendet. Darüber hinaus werden die beschriebenen Prozessschritttypen und Teiletypen angewendet, instanziiert und dem Produkt zugeordnet. Ressourcen lassen sich nach MASON in geografische Ressourcen, die in diesem Fall durch die BOT-Ontologie repräsentiert werden, und menschliche Ressourcen und maschinelle

Ressourcen, die entweder mobil oder stationär sein können, unterteilen. Die Steuerung durch ein Leitsystem kann dann dadurch erfolgen, dass ein bestimmter Prozessschritt einer Ressource zugeordnet wird, auf der er ausgeführt wird. Die Kombination von Ressourcen (neben Maschinen können auch Bedienende und Werkzeuge erforderlich sein) und einem Prozessschritt ergibt einen Prozess.

## 4.2 Standardisierte Modellierung

In der Modellierungsphase wird unter Verwendung der zuvor erstellten standardisierten Ontologie ein anwendungsfallspezifisches Beschreibungsmodell erstellt. Zusätzlich kommen statische, anwendungsfallspezifische Informationen hinzu. Die Ontologie liefert die notwendigen und optionalen Parameter, zur Beschreibung der Anwendungsinstanz. Die vordefinierten Verknüpfungen zwischen einzelnen Komponenten dienen als Vorlage für die Verknüpfungen zwischen anwendungsfallspezifischen Instanzen. Durch die Verwendung von a priori definierten Teilmodellen für Parameter, Variablen und Komponenten wird eine konsistente Modellierung für das gesamte System sichergestellt. Ähnliche Parameter für verschiedene Instanzen folgen der gleichen Struktur. Durch die Abbildung des Modells auf ein Markup-Schema, z. B. JSON oder XML, sind unveränderliche Informationen wie die Struktur der eindeutigen Bezeichner oder die Einheit des übertragenen Wertes vordefiniert und können nicht verfälscht werden. Dynamische Informationen, z. B. die eigentlichen Messwerte, werden erst in der Implementierungsphase zugewiesen, die Syntax und Semantik ihrer Repräsentation sind jedoch bereits in der Modellierungsphase bekannt. Das Ergebnis der standardisierten Modellierungsphase ist ein Beschreibungsmodell ohne Datenfluss oder ein rein manueller Datenfluss zwischen den digitalen Objekten (d. h. dem Beschreibungsmodell) und der realen Welt (d. h. den physikalischen Objekten). Die automatisierte Instanziierung von Datenflüssen wird in der nächsten Phase durchgeführt.

## 4.3 Automatisierte Bereitstellung

Der letzte Schritt der Pipeline, die Implementierungsphase, ist vollständig automatisiert und erfordert keinen Eingriff der Nutzerinnen und Nutzer. Die Instanzen der zuvor definierten Modelle werden entsprechend der spezifischen Anforderungen erstellt und an den/die Digitalen Zwilling(e) als Objekt sowie an alle Agenten bzw. Dienste im System verteilt. Die Kommunikationsschnittstellen zu dem/den Digitalen Zwilling(en) werden mittels generativer Programmierung automatisch erstellt [30]. Hier zeigt sich ein wesentlicher Vorteil der Pipeline: Auf Basis der gleichen Daten und des Modells wird eine digitale Repräsentation generiert und gespeichert, die gleichzeitig interoperabel ist und relevante Daten bereitstellt. Schließlich werden auch die Kommunikationsschnittstellen zwischen den einzelnen Systemen, Agenten, Assets und dem/den Digitalen Zwilling(en) automatisch erstellt. Dadurch können Planung, Simulation und Steuerung auf konsistenten Daten und Modellen arbeiten. Abbildung 18gibt einen Überblick über den Kommunikationsfluss: Der Datenprozessor initialisiert einen Steuerungsagenten für ein Produkt, wenn es aus dem ERP unter Verwendung der ontologiebasierten Modellierungsstruktur eingeführt wird. Der Steueragent implementiert automatisch relevante Publisher, Subscriber und Services, ohne dass eine Interaktion der Nutzenden oder Kenntnisse der Übertragungsprotokolle erforderlich sind. Die Topic-Namen, die die relevanten Informationen adressieren, werden nach einer definierten Struktur freigegeben und empfangen. Eine eindeutige Verkettung von eindeutigen Bezeichnern sorgt für eine automatische Erkennung durch andere Teilnehmenden. Die gesamte Kommunikation wird von einem sogenannten Kommunikationsmaster verwaltet, der z. B.

durch einen MQTT-Broker oder einen Robot Operating System (ROS)-Masterknoten umgesetzt werden kann.

Die folgende Darstellung geht von einem LMAS mit verschiedenen Stationen und einem AMR-basierten Transportsystem als vereinfachtes System aus, um den Nachrichtenfluss beispielhaft zu erläutern (vgl. Abbildung 18). Ändert sich der Zustand eines Produktes, weil ein Montageschritt abgeschlossen ist, führt das Leitsystem die Disposition und Terminierung durch. Es ordnet dem Produkt zunächst eine neue Bearbeitungsstation zu und erzeugt dann einen Transportauftrag für einen AMR. Dieser AMR abonniert das entsprechende Topic und erhält somit automatisch die Information über den auszuführenden Transportauftrag. Der Nachrichteninhalt folgt der Semantik und Syntax des vordefinierten Teilmodells. Im Gegenzug erhält die Montagestation die relevanten Informationen, um den nächsten Montageschritt auszuführen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Integration der Simulation in die Digital Twin Pipeline. Auf Basis dieser Simulation sollen Szenarioanalysen entweder für eine erste Potenzialanalyse, wie das System konfiguriert werden sollte, oder als Entscheidungshilfe eingesetzt werden, in denen verschiedene Handlungsalternativen und Szenarien bewertet werden. Dazu werden die Komponenten des Digitalen Zwillings in einem Datenprozessor zu einer wiederverwendbaren Datei aggregiert, die das Gesamtsystem in seinem aktuellen Zustand beschreibt. Verschiedene Systemkonfigurationen und Aktionen werden auf Basis von Eingaben der Nutzenden oder historischen Daten zu unterschiedlichen Produktionsszenarien modelliert. Für jedes Szenario wird automatisch ein Simulationsmodell erstellt und dann mit einer diskreten Ereignissimulation unter Verwendung externer Entscheidungsalgorithmen simuliert. Die Ergebnisse der Simulationsstudien werden in einem Postprozessor zusammengefasst und ausgewertet, um datenbasierte Handlungsempfehlungen (Entscheidungsunterstützung; z. B. neue Maschine, Layoutänderung) zu ermöglichen oder Aktionen automatisch durchzuführen (z. B. Umplanung).

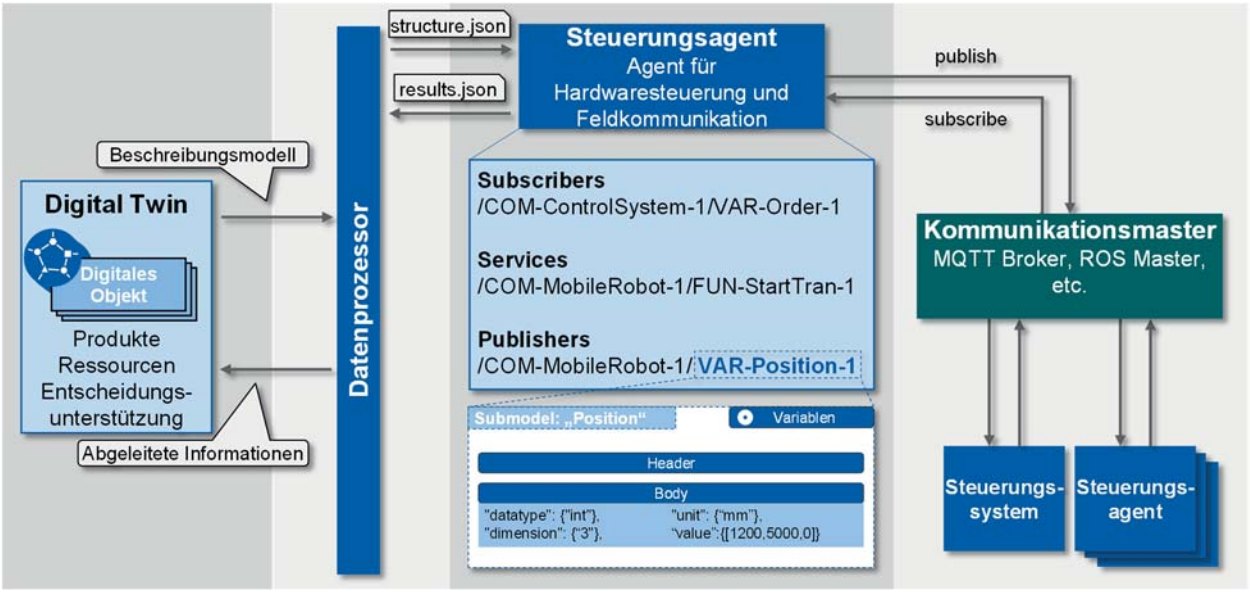



*Abbildung 1819: Kommunikationsfluss innerhalb der Digital Twin Pipeline. Der Datenfluss wird durch den Datenprozessor initialisiert, während der Kommunikationsmaster die gesamte Kommunikation verwaltet.*

# 5 Technologie- und Anwendungsbeispiele die Montage der Zukunft

Das LMAS-Konzept und die oben genannten Basistechnologien sind durch den industriellen Bedarf erhöhter Anpassungsfähigkeit aufgrund der sich ständig ändernde Anforderungen motiviert. Im Folgenden werden die allgemein erwarteten Aussichten überprüft und bereits bestehende Anwendungsfälle für eingesetzte Technologien aufgeführt.

## 5.1 Mobile Roboterplattformen in der Luft- und Raumfahrtautomation

Die Automatisierung in der Luft- und Raumfahrtmontage wird überwiegend für die Herstellung von Primärstrukturelementen wie Rumpf- und Flügelmontage eingesetzt. Traditionell sind die entsprechenden Anlagen für diese Anwendungen speziell angefertigte, große Maschinen mit begrenzter Flexibilität. Diese sind auf hohe Produktivität und Zykluszeiten von weniger als 10 s ausgelegt. Der relativ enge Anwendungsbereich dieser Maschinen stellt die Integratoren vor die Herausforderung, maßgeschneiderte Lösungen für alle Kundinnen und Kunden zu entwickeln, was zu zusätzlichem technischem Aufwand und damit zu hohen Kosten führt. In den letzten Jahren haben erhebliche Anstrengungen sowohl der Flugzeughersteller, als auch der Automatisierungsanbieter und Integratoren zu neuen Automatisierungslösungen geführt, die die Flexibilität verbessern und gleichzeitig die Automatisierung weiter erhöhen.

Broetje-Automation setzt für Bearbeitungsaufgaben in der Luft- und Raumfahrtindustrie zunehmend AMMs ein, die auf mobilen Plattformen zum Bauteil fahren. Dies ermöglicht eine deutlich höhere Flexibilität in der Layout- und Produktionsplanung und eröffnet neue Produktionsstrategien. Während Fertigungsprozesse in der Luft- und Raumfahrt oft kundenspezifische Lösungen erfordern, um Qualität, Stabilität und Produktivität zu gewährleisten, basiert das Maschinendesign auf einer skalierbaren, standardisierten Struktur in Software und Hardware. Durch die Standardisierung der Ansätze für die Energiebereitstellung, das AMR-Design, die Cobot-Integration, die Sensorik, die Softwarestruktur, die Sicherheitstechnik und die Mensch-Maschine-Schnittstelle werden die Designeffizienz und die Austauschbarkeit verbessert. Aus dem Designschema lassen sich vollautomatische mobile Maschinen (vgl. Abbildung 20, Hintergrund) und kleinere AMR mit Cobots (vgl. Abbildung 20, Vordergrund) ableiten. Während größere Maschinen oft auf NC-Programme und komplexe CAM-Infrastruktur angewiesen sind, können Cobot-basierte Systeme mit weniger Aufwand in Mensch-Roboter-Interaktion programmiert werden. Dies gewährleistet ein einfaches Einrichten von sich wiederholenden Aufgaben und hält dennoch die Qualitätsstandards aufrecht, der üblicherweise mit konventioneller Automatisierung verbunden werden.

Diese neuen Maschinenkonzepte sollen die Basis für zukünftige "Clean-Floor"-Fabriken im Sinne des in diesem Beitrag dargestellten zukünftigen Montageszenarios bilden. Solche Produktionssysteme können sich mit minimalen Umrüstungsmaßnahmen schnell an sich ändernde Produktionsanforderungen anpassen. Die Skalierbarkeit in der Automatisierung wird durch die optionale Hinzunahme weiterer mobiler Ressourcen bei Bedarf erreicht und trägt damit zur Nachhaltigkeit in der Automatisierung bei.

*Abbildung 2021: Skalierbare autonome AMMfür Montageaufgaben in der Luft- und Raumfahrt, die gemeinsame Plattform-Design-Elemente sowohl für vollautomatisches Nieten (Hintergrund) als auch für Cobot-unterstützte Prozesse in Mensch-Roboter-Interaktion (Vordergrund) nutzen, © Broetje-Automation GmbH*

## 5.2 Referenzimplementierung für Lkw-Rahmenmontage

Um das Potenzial zukünftiger Montagekonzepte auf Basis der LMAS-Prinzipien zu evaluieren und deren technologische Reife voranzutreiben, wurde am WZL ein Demonstrator umgesetzt. Er umfasst die automatisierte Montage von Längs- und Querträgern zu einem Lkw-Rahmen. Lkw-Rahmen zeichnen sich durch eine erhebliche Produktvarianz aus, die sich auf die Produktgröße, die Anzahl der Arbeitsgänge und die Produktkonfiguration auswirken. Der bisher weitgehend manuelle Prozess erfordert bei der Automatisierung ein hohes Maß an Flexibilität sowohl im organisatorischen als auch im technischen Sinne.

Der Demonstrator konzentriert sich auf die Rekonfiguration und Automatisierung von Prozessschritten, die derzeit manuell ausgeführt werden, um der Varianz gerecht zu werden. Dieser umfasst verschiedene Montagestationen eines hybriden Typs, der auf stationäre und autonome mobile Manipulatoren mit Cobots setzt. Um der Verfügbarkeit und dem erheblichen Teilegewicht Rechnung zu tragen, erfolgt das Handling mit stationären Robotern, während AMMs Montageprozesse und Leichtbauoperationen durchführen. AMRs dienen als primäres Transportsystem für den Lkw-Rahmen. Messtechnik und weitere Sensorik werden je nach Prozessanforderung integriert. Kurz zusammengefasst stellt sich der Montageprozess wie folgt dar: Stationäre Roboter nehmen Teile von AMRs auf und positionieren sie in der Geometrie des LKW-Rahmens, wobei markerlose, bildverarbeitungsbasierte Lokalisierungsalgorithmen verwendet werden. Schwere Teile werden von kooperierenden stationären Robotern aufgenommen und platziert. AMMs, die mit kabellosen Schraubwerkzeugen ausgestattet sind, montieren die Bauteile. Schrauben und andere Materialien werden bei Bedarf von weiteren leichten AMRs bereitgestellt. Die Lkw-Rahmen bewegen sich mit einem Schwerlast-AMR dynamisch von einer Station zur anderen, was eine lückenlose Produktführung durch das Montagesystem ermöglicht. Abbildung 22zeigt einen grafischen Überblick über den Referenz-Anwendungsfall (links) und den Nahbereich-Betrieb mit mehreren AMRs und AMM zur Durchführung der oben genannten Montageaufgaben (rechts).

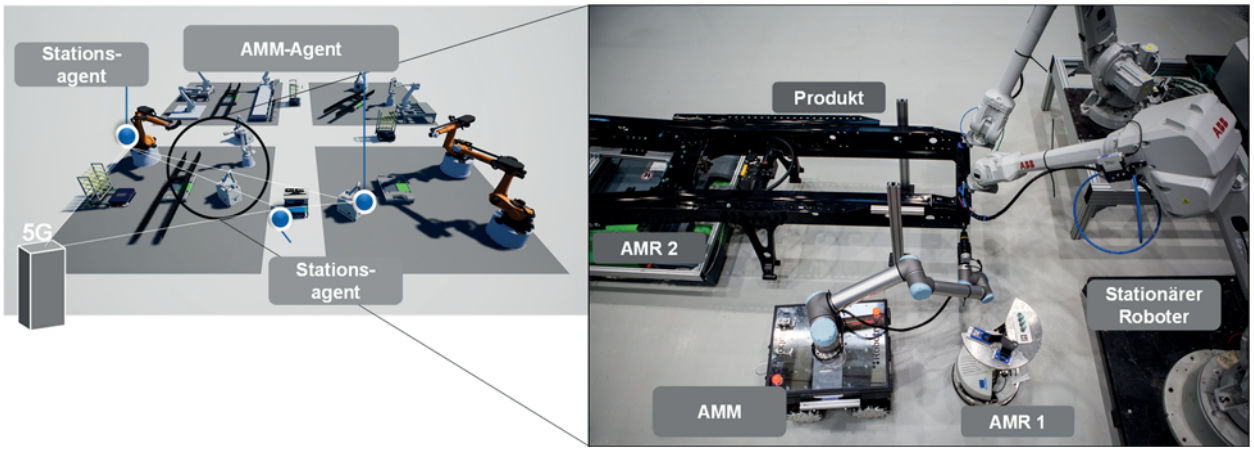



*Abbildung 2223: Future Assembly-Demonstrator, der die Montage von Lkw-Fahrgestellen zeigt, mit mobilen Manipulatoren für Montageaufgaben und AMR für den Produkt- und Materialtransport. Links: Übersicht über mehrere Stationen mit einem Hybridkonzept mit AMM und stationären Robotern, Rechts: Nahbereichskoordination von mehreren AMR und AMM für die Querträgermontage*

Das Softwaredesign und die Steuerungsarchitektur basieren auf dem in Abschnitt 3.2skizzierten Vorschlag, der das Robot Operating System (ROS) als primäres Ökosystem und herstellerunabhängige Abstraktionsebene verwendet. ROS besitzt bereits heute eine industrielle Community von Nutzerinnen und Nutzern und wurde zuletzt bspw. bei Boeing explizit im Kontext von AMM untersucht [31]. Abbildung 24zeigt die resultierende Verteilung der Komponenten entlang der vorgestellten Ebenen: Jede Anlage (z. B. Station, AMM, AMR) wird mithilfe von ROS-Knoten modelliert, um Aktionen bereitzustellen und ROS-Nachrichten von anderen Entitäten zu veröffentlichen und zu abonnieren, sowie um entsprechend Aufgaben auszuführen. Das knotenbasierte Design beinhaltet die Ausnutzung des Publish/Subscribe-Kommunikationsmusters und des Masters von ROS (vgl. Abbildung 18). Für die physikalische Kommunikationsschicht werden 5G, WiFi6 und Ethernet kombiniert, um eine kontextabhängige Echtzeitkommunikation zwischen stationären und mobilen Entitäten zu ermöglichen. ROS wird auch verwendet, um einen Management-Kern für die Planung und Terminierung zu implementieren: Anhand von Montage-Präzedenzgraphen für jeden Produkttyp wird ein Prozessschritt ausgewählt und einer Station zugewiesen, welche über die notwendigen Fähigkeiten verfügt. Diese Stationen werden nach dem LMAS-Prinzip dynamisch konfiguriert und gebildet, so dass notwendige AMM und Betriebsmittel an die jeweilige Station gezogen werden. Im Gegenzug ist eine fest programmierte Multi-Roboter-Kooperation nicht möglich, so dass die Softwareelemente aus einer Container-Verwaltung gezogen werden, die einem kontinuierlichen Integrations- und Bereitstellungsmuster (Englisch: Continuous Integration and Deployment, CI/CD) und einer Toolchain aus der Softwaretechnik folgt. In Verbindung mit den erweiterten Kommunikationsfähigkeiten ermöglicht dies die dezentrale Ausführung relevanter Aufgaben (z. B. bildverarbeitungsbasierte Positionierung, Pick & Place) unter Beibehaltung der softwarebasierten Synchronisation auf Anlagenebene.

Die mobilen Ressourcen navigieren auf Basis einer Karte, die aus Multi-Roboter-SLAM mit dem ROS-Navigations-Stack erstellt wird. Die Just-in-Time-Bewegungsplanung wird hersteller- und roboterunabhängig (innerhalb physikalischer Beschränkungen) auf Basis des ROS MoveIt-Pakets realisiert. Aufgrund der dynamischen Natur von LMAS ändert sich diese Karte ständig, da die Positionen von Produkten und Teilen nicht vordefiniert sind und jedes Mal variieren. Während die Karte zur globalen, räumlich-zeitlichen Synchronisation dient, wird lokal das Prinzip der monokularen, markerlosen

Teileverfolgung verwendet, um Teile- und Schraubenpositionen mit Hilfe von Kameras zu identifizieren, die an den Endeffektoren des Roboters angebracht sind. Die Notwendigkeit von Vorrichtungen entfällt ebenfalls, was einen wesentlichen Beitrag zur Anpassungsfähigkeit des Systems an neue Aufgaben und Produkte darstellt.

Neben der allgemeinen Steuerung und -planung bietet der Managementkern einen Kommunikationskanal zu einem MQTT-Broker, um die Interaktion mit übergeordneten Planungs- und Steuerungssystemen (z. B. ERP), Datenbanken (z. B. Produkttypinformationen) und Bedienoberflächen zu ermöglichen. Die Wahl von MQTT als zweites Kommunikationsprotokoll ist motiviert durch die einfachere Anwendbarkeit auf der Cloud-Ebene der vorhandenen Infrastruktur sowie die vereinfachte Integration von Fremdprodukten. Exemplarisch wird eine Integration von PTC ThingWorx genutzt, um eine bidirektionale Interaktion zwischen Betreiberfirma und Ressourcen in Dashboards zu ermöglichen, die den aktuellen Systemstatus, die Positionen der mobilen Geräte, relevante KPIs und Triggerelemente für neue Aufträge anzeigen. Eine zusätzliche, virtuelle 3D-Darstellung des Shopfloors wird durch elisa 3DVisualizr bereitgestellt und unterstützt die Mensch-Maschine Interaktion.

Für den gesamten Demonstrator wird die in Kapitel 4vorgestellte Digital Twin Pipeline verwendet. Dadurch wird die Konsistenz, Serialisierung und Kommunikation der digitalen Modelle sichergestellt und der Aufwand für die Interoperabilität a priori reduziert. Der Pipeline-Ansatz wird aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse als sehr vorteilhaft für die Implementierung zukünftiger Montage- und Automatisierungssysteme eingeschätzt.

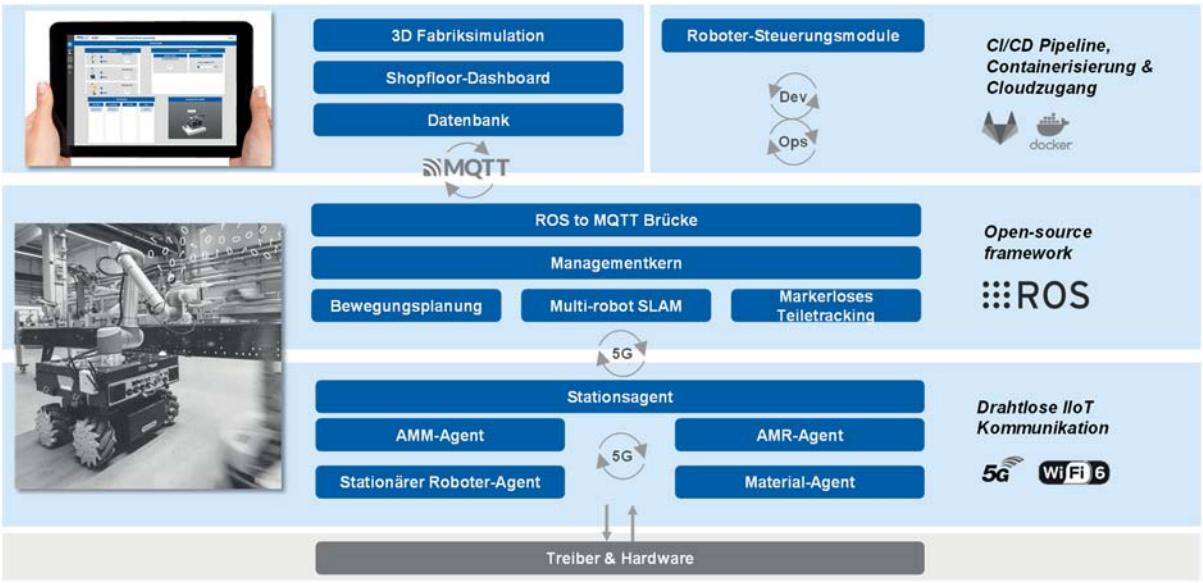



*Abbildung 2425: Systemarchitektur des Future Assembly Demonstrators basierend auf ROS-gestützter Robotik*

# 6 Fazit und Ausblick

Nachhaltigkeit in der industriellen Montage erfordert Lösungen für hohe Varianz, kleine Losgrößen und steigende Produktkomplexität. Zukünftige Montagesysteme erfordern organisatorische und technologische Konzepte, die die Effizienz erhöhen, die Komplexität beherrschen und die Lebenszyklen der Montagesysteme und ihrer Ressourcen verlängern. Während die Autoren der Meinung sind, dass zukünftige, nachhaltige Montagesysteme voraussichtlich hybride Montagesysteme sind, in denen automatisierte und manuelle Prozesse koexistieren, muss der Grad der Autonomie in der Automatisierung erhöht werden, damit die Automatisierung außerhalb der bisherigen Einsatzbedingungen in basierend auf Massenproduktion zukunftsfähig ist.

Dieser Beitrag betrachtet linienlose, mobile Montagesysteme (LMAS) als das zugrundeliegende Paradigma für die Gestaltung nachhaltiger Montagesysteme, deren Anwendungsbereich auf die Demontage erweitert werden kann und so zur Kreislaufwirtschaft beiträgt. Darüber hinaus ermöglichen die entstehenden Freiheitsgrade ein autonomes Reagieren auf instabile Prozesse und eine kurzfristige Anpassung der Fabrik an den aktuellen Bedarf, wodurch Effizienz und Widerstandsfähigkeit erhöht werden. Diese Überlegungen stellen den notwendigen Bewusstseinswandel hin zu einer zeitlichen und räumlichen Entkopplung von Produktionssystemen durch Ressourcenmobilisierung basierend auf dem Clean-Floor-Approach dar, auch wenn ein Roll-out in Brownfield-Situationen erschwert sein kann und hohe Anfangsinvestitionen erforderlich sind. Aktuelle und zukünftige Fortschritte bei mobilen Plattformen und Manipulatoren sind entscheidend für eine wirtschaftlich tragfähige Einführung von LMAS in bestehenden und zukünftigen Montagestandorten.

Die Beherrschung der inhärenten Komplexität der LMAS-Organisation und der darin enthaltenen Automatisierung hängt stark von der Verfügbarkeit geeigneter Software für die AMM-Steuerung, den Materialfluss und die Produktionsplanung und -steuerung ab. Solange die Erstellung der erforderlichen Software nicht vereinfacht wird, kann die Automatisierung als Teil zukünftiger nachhaltiger Montagesysteme nicht erreicht werden. Dieser Beitrag stellt eine verallgemeinerte dreistufige Systemarchitektur für zukünftige Montagesysteme vor. Er stellt weiterhin eine Digital Twin Pipeline vor, die die Grundlage für alle erforderlichen Modellierungen von Produkt-, Prozess- und Ressourcen für LMAS ist. Diese Modelle bilden die Verbindung zwischen den von ubiquitären Sensorsystemen erfassten Informationen, den Planungsalgorithmen, die zur Durchführung aller relevanten Aufgaben innerhalb des LMAS erforderlich sind, und den mobilen Ressourcen zur Durchführung dieser Operationen. Damit schließt sich der Zyklus SEE-THINK-ACT, der für eine erhöhte Autonomie bei der Entscheidungsfindung innerhalb komplexer Produktionssysteme erforderlich ist. Folglich stellt dies einen ersten Schritt des Paradigmenwechsels dar, hin zur Verwaltung von Mess- und Automatisierungsressourcen auf einer Fähigkeits- und Informationsbeitragsebene statt auf einer spezifischen Technologie- und Protokollebene. Das Einrichten und die Inbetriebnahme von Montagesystemen wechseln damit von der Programmierung zu reinen Konfigurationsaufgaben.

Aus Sicht der Autoren sind alle Schlüsseltechnologien und Kernkonzepte zur Implementierung von LMAS heute verfügbar. Zukünftige Forschungs-, Design- und Engineering-Aktivitäten werden sich auf die Realisierung von exemplarischen Systemen mit industrieller Reife konzentrieren. Darüber hinaus sehen die Autoren das Paradigma Automation of Automation als Grundlage für die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle und Ansätze für die Fertigung. Zu den Geschäftsmodellen könnten dienstleistungsbasierte Ansätze gehören, wie z. B. AMR-as-a-Service, bei dem AMRs

aufgrund der einfachen Einrichtung in großer Zahl bei produzierenden Unternehmen eingesetzt werden können, die nach einem Pay-per-Use-Modell betrieben werden. Da die Automatisierung auch außerhalb der Massenproduktion verfügbar wird, können kleinere, lokalere Fertigungsanlagen realisiert werden, wodurch der ökologische Fußabdruck der aktuellen Lieferkettennetzwerke reduziert wird. Ein weiterer Fortschritt kann in der Anpassung an de-facto undefinierte Umgebungen gesehen werden, wie sie im Baubereich zu finden sind. Es ist zu erwarten, dass viele der technologischen Fortschritte in Richtung der übergreifenden Vision einer zukünftigen und nachhaltigen Montage dem Fertigungsbereich bei der Beantwortung von Herausforderungen, die bereits heute bestehen, zugutekommen.

## 7 Literatur


[1] S. J. Hu *et al.,* “Assembly system design and operations for product variety,” *CIRP Annals*, Bd. 60, Nr. 2, S. 715–733, 2011, DOI: 10.1016/j.cirp.2011.05.004.

[2] G. Putnik *et al.,* “Scalability in manufacturing systems design and operation: State-of-the-art and future developments roadmap,” *CIRP Annals*, Bd. 62, Nr. 2, S. 751–774, 2013, DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.002.

[3] F. S. Fogliatto, G. J.C. da Silveira, D. Borenstein, “The mass customization decade: An updated review of the literature,” *International Journal of Production Economics*, Bd. 138, Nr. 1, S. 14–25, 2012, DOI: 10.1016/j.ijpe.2012.03.002.

[4] G. Hüttemann, C. Gaffry, R. H. Schmitt, “Adaptation of Reconfigurable Manufacturing Systems for Industrial Assembly: Review of Flexibility Paradigms, Concepts, and Outlook,” *Procedia CIRP*, Bd. 52, S. 112–117, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.021.

[5] H. ElMaraghy, W. ElMaraghy, “Smart Adaptable Assembly Systems,” *Procedia CIRP*, Bd. 44, S. 4–13, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.107.

[6] F. Tonelli, S. Evans, P. Taticchi, “Industrial sustainability: challenges, perspectives, actions,” *IJBIR*, Bd. 7, Nr. 2, S. 143, 2013, DOI: 10.1504/IJBIR.2013.052576.

[7] B. Lotter, H.-P. Wiendahl, Eds., *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.

[8] The Boeing Company, *Global Environment Report 2020.* URL: https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/principles/environment/pdf/2020_environment_report.pdf

[9] Airbus, “Information on the Company’s Activities: Non-Financial Information,” S. 57–58, 2019. URL: https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/facts-and-figures/annual-report/Registration-document-2019-pages-57-to-58.pdf

[10] Schmitt, Robert H.; Eickhorst, Dirk; Flöter, Felix; Freeman, Philip L.; Hanke, Norbert; Hüttemann, Guido; Korte, Michael; Montavon, Benjamin; Prefi, Thomas; Sachs, Joachim; Struijk, Bob, “Future Assembly with Distributed Sensor Services” In: T. Bergs, C. Brecher, Schmitt, Robert H., Schuh, Günther, “Internet of Production - Turning Data into Value: Statusberichte aus der Produktionstechnik”, Aachen: Fraunhofer IPT, 2020, S. 158-184, DOI: 10.24406/ipt-n-589615.

[11] B. Micieta, V. Binasova, R. Lieskovsky, M. Krajcovic, L. Dulina, “Product Segmentation and Sustainability in Customized Assembly with Respect to the Basic

Elements of Industry 4.0," *Sustainability*, Bd. 11, Nr. 21, p. 6057, 2019, DOI: 10.3390/su11216057.

[12] Z. M. Bi *et al.,* "Reusing industrial robots to achieve sustainability in small and medium-sized enterprises (SMEs)," *IR*, Bd. 42, Nr. 3, S. 264–273, 2015, DOI: 10.1108/IR-12-2014-0441.

[13] World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, "Corporate value chain (Scope 3) accounting and reporting standard: Supplement to the GHG protocol corporate accounting and reporting standard". Washington, DC: World Resources Institute [u.a.], 2011. [Online]. URL: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporing-Standard_041613_2.pdf

[14] G. Hüttemann, "Model-based a priori analysis of line-less mobile assembly systems," Dissertation, RWTH Aachen University, Aachen, 2021, DOI: 10.18154/RWTH-2021-02011

[15] K. Dharmara, R. P. Monfared, P. S. Ogun, M. R. Jackson, "Robotic assembly of threaded fasteners in a non-structured environment," *Int J Adv Manuf Technol*, Bd. 98, 5-8, S. 2093–2107, 2018, DOI: 10.1007/s00170-018-2363-5.

[16] R. H. Schmitt, C. Voigtmann, "Sensor information as a service – component of networked production," *J. Sens. Sens. Syst.*, Bd. 7, Nr. 1, S. 389–402, 2018, DOI: 10.5194/jsss-7-389-2018.

[17] R. H. Schmitt *et al.,* "Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends," *CIRP Annals*, Bd. 65, Nr. 2, S. 643–665, 2016, DOI: 10.1016/j.cirp.2016.05.002.

[18] M. Peterek, B. Montavon, "Prototype for dual digital traceability of metrology data using X.509 and IOTA," *CIRP Annals*, Bd. 69, Nr. 1, S. 449–452, 2020, DOI: 10.1016/j.cirp.2020.04.104.

[19] B. Montavon, M. Peterek, R. H. Schmitt, "Model-based interfacing of large-scale metrology instruments," in *Multimodal Sensing: Technologies and Applications*, Munich, Germany, Jun. 2019 - Jun. 2019, p. 11. URL: https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11059/2527461/Model-based-interfacing-of-large-scale-metrology-instruments/10.1117/12.2527461.full

[20] A. F. Buckhorst *et al.,* "Holarchy for line-less mobile assembly systems operation in the context of the internet of production," *Procedia CIRP*, Bd. 99, S. 448–453, 2021, DOI: 10.1016/j.procir.2021.03.064.

[21] B. Götz, D. Schel, D. Bauer, C. Henkel, P. Einberger, T. Bauernhansl, "Challenges of Production Microservices," *Procedia CIRP*, Bd. 67, S. 167–172, 2018, DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.194.

[22] L. Ribeiro, J. Barata, P. Mendes, "MAS and SOA: Complementary Automation Paradigms," in *IFIP – The International Federation for Information Processing, Innovation in Manufacturing Networks*, A. Azevedo, Ed., Boston, MA: Springer US, 2008, S. 259–268.

[23] J. Sachs, G. Wikstrom, T. Dudda, R. Baldemair, K. Kittichokechai, "5G Radio Network Design for Ultra-Reliable Low-Latency Communication," *IEEE Network*, Bd. 32, Nr. 2, S. 24–31, 2018, DOI: 10.1109/MNET.2018.1700232.

[24] A. Göppert, L. Grahn, J. Rachner, D. Grunert, S. Hort, R. H. Schmitt, *Pipeline for ontology-based modeling and automated deployment of digital twins for planning and control of manufacturing systems (submitted to Journal of Intelligent Manufacturing)*. Aachen, 2021.

[25] M. Hoffmann, “Adaptive und skalierbare Informationsmodellierung zur Ermöglichung autonomer Entscheidungsfindungsprozesse für interoperable, reaktive Fertigungenautonomer Entscheidungsfindungsprozesse,” Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2017.

[26] C. Hildebrandt, S. Törsleff, Caesar, B., Fay, A, “Ontology Building for Cyber-Physical Systems: A domain expert-centric approach,” *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 1079-1086, 2018.

[27] A. Madni, C. Madni, S. Lucero, “Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering,” *Systems*, Bd. 7, Nr. 1, S. 7, 2019, DOI: 10.3390/systems7010007.

[28] S. Lemaignan, A. Siadat, J.-Y. Dantan, A. Semenenko, “MASON: A Proposal For An Ontology Of Manufacturing Domain,” in *IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications (DIS’06)*, Prague, Czech Republic, Jun. 2006, S. 195–200.

[29] Linked Building Data Community Group (LBD), *Building Topology Ontology (BOT).* URL: https://w3c-lbd-cg.github.io/bot/

[30] M. Bodenbenner, M. P. Sanders, B. Montavon, R. H. Schmitt, “Domain-Specific Language for Sensors in the Internet of Production,” in *Lecture Notes in Production Engineering, Production at the leading edge of technology*, B.-A. Behrens, A. Brosius, W. Hintze, S. Ihlenfeldt, J. P. Wulfsberg, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, S. 448–456.

[31] The Boeing Company, *Public GitHub Page.* URL: https://github.com/Boeing

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 2.3:

Prof. Dr.-Ing. R. Schmitt, WZL der RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT
D. Eickhorst, Broetje-Automation GmbH
Dr. F. Flöter, Lufthansa Technik AG
Dr. P. L. Freeman, The Boeing Company
A. Göppert, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University
N. Hanke, Hexagon AB
Dr. G. Hüttemann, XL Assembly GmbH
Dr.-Ing. M. Korte, Audi AG
B. Montavon, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University
Prof. Dr.-Ing. T. Prefi, umlaut SE
Dr.-Ing. J. Sachs, Ericsson AB
Dr.-Ing. R. Schares, Makino Europe GmbH
Dr. B. Struijk, Fanuc Europe Corporation

# SESSION 3

## DATA SCIENCE IN PRODUCTION

ptc

# ACCELERATE DIGITAL TRANSFORMATION

## Bridge the Physical and Digital Worlds with Industry-Leading IoT and AR Solutions

vuforia®  thingworx®

# 3 Data Science in Production

*C. Brecher, B. Biernat, M. Fey, S. Kehne, V. Lohrmann, R. Spierling, M. Wiesch*

**Gliederung**

1 Data Science als Enabler nachhaltiger Produktionsmaschinen .....227

2 Bisherige Enabler zur Abbildung und Optimierung von Produktionsmaschinen..229

2.1 Physikalische Modellansätze .....229

2.2 Datenkombinierte Modellansätze .....230

3 Übergreifende hybride Modellansätze als Enabler nachhaltiger Produktionsmaschinen .....233

3.1 Domänenübergreifende Daten- und Modellbereitstellung über den digitalen Schatten.....235

3.2 Modelladaption durch die Nutzung von Produktionsdaten .....237

3.3 Lernende hybride Modellansätze als Kombination datenbasierter Black-Box-Ansätze mit vorhandenem Expertenwissen.....240

4 Ganzheitliche Produktivitätsoptimierung von Fertigungsprozessen .....244

5 Ressourcenschonende und plattformübergreifende Nutzung von Werkzeugen..247

6 Erhöhung der Verfügbarkeit über Condition Monitoring von Kugelgewindetrieben.....250

7 Erhöhung der Energieeffizienz am Beispiel der thermo-energetischen Modellierung von Produktionsmaschinen .....256

8 Zusammenfassung und Ausblick .....258

9 Literatur.....259

## Kurzfassung

**Data Science in Production**

Im Rahmen der zunehmenden Vernetzung innerhalb von Produktionsanlagen ist die gewinnbringende und nachhaltige Nutzung von Daten direkt aus der Produktion ein zentrales Thema für produzierende Unternehmen. Globale Ereignisse stellen die exportorientierte Produktionsbranche in Deutschland aufgrund langer Reaktionszeiten vor große Herausforderungen. Vor diesem Hintergrund ist innerhalb der Produktionsbranche ein Wandel hin zu einem kontinuierlichen Lösen von Fertigungsherausforderungen und dem Bereitstellen von flexiblen, garantierten und nachhaltigen Produktionskapazitäten erforderlich.

Die Fähigkeit, im Rahmen einer gezielten Aggregation von Planungs- und Prozessinformationen vertrauenswürdige Vorhersagen auf Basis stetig wachsender und domänenübergreifender Datengrundlagen zu ermöglichen, ist technischer Enabler dieser Entwicklung und äußert sich in einem ganzheitlichen, hybriden Lernen für zukünftige Bearbeitungsfälle und angrenzende Teildomänen. *Data Sciences in Production* schafft dadurch eine übergreifende Produktionstransparenz, die es ermöglicht, komplexe Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zu durchdringen, wodurch innerhalb kurzer Reaktionszyklen die richtigen Entscheidungen getroffen werden können.

Das AWK’21 zeigt auf Basis konkreter Anwendungsbeispiele verschiedene Umsetzungen der zugrundeliegenden Methodik und veranschaulicht, wie *Data Sciences in Production* die Grundlage einer zukunftsfähigen, nachhaltigen Produktionslandschaft bildet.

## Abstract

**Data Science in Production**

In the context of increasing networking within production plants, the profitable and sustainable use of data directly from production is a key issue for manufacturing companies. Global events pose major challenges for the export oriented production industry in Germany due to long response times. Against this backdrop, a change is required within the production industry towards a continuous solution of manufacturing challenges and the provision of flexible, guaranteed and sustainable production capacities.

The ability to enable trustworthy predictions based on constantly growing and cross-domain data bases within the framework of a targeted aggregation of planning and process information is the technical enabler of this development and manifests itself in holistic, hybrid learning for future processing cases and adjacent sub-domains. Data Sciences in Production thus creates an overarching production transparency that makes it possible to penetrate complex cause-and-effect relationships, enabling the right decisions to be made within short response cycles.

AWK'21 shows different implementations of the underlying methodology on the basis of concrete application examples and illustrates how Data Sciences in Production forms the basis of a sustainable production landscape fit for the future.

# 1 Data Science als Enabler nachhaltiger Produktionsmaschinen

Tiefgreifende globale Veränderungsprozesse haben in den letzten Jahren die Forderung nach einem nachhaltigen Handeln deutlich erhöht. Auch die Produktionsbranche steht in der Verantwortung, ihre Produkte und Prozesse durch die zur Verfügung stehende digitale Vernetzung unter wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Aspekten ganzheitlich zu betrachten und nachhaltig zu optimieren. Erste Beispiele aus der Mobilität zeigen, dass die Optimierung der Energieeffizienz nicht allein die Nachhaltigkeit verbessert, sondern insbesondere der Betrieb und die Auslastung der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge wichtig ist. Die vor Jahren eingeführten Subskriptionsmodelle zur besseren Auslastung von Fahrzeugen wie beispielsweise Carsharing können dabei zu einem nachhaltigeren Handeln führen [1]. Ähnliches lässt sich auch für Produktionsanlagen ableiten. Allein der Bereich Werkzeugmaschinen verfügt mit einer mittleren Auslastung von 34 % [2] und einem Energieeffizienzpotential von über 30 % in den in [3] untersuchten Anlagen über ein hohes Potenzial zur finanziellen und ökologischen Nachhaltigkeit. Voraussetzung für die Nutzung ist dabei ein datenorientiertes Auswerten und Nachregeln von Produktionsanlagen.

Zur besseren Einordnung der dargestellten Strategien zur Nachhaltigkeit werden sog. FESG-Faktoren ***F**inance*, ***E**nvironment*, ***S**ocial* und ***G**overnance* auf Produktionsanlagen qualitativ angewandt, Abbildung 1. Sie beschreiben jeweils Maßnahmen hinsichtlich der finanziellen, ökologischen, sozialen und steuernden Nachhaltigkeit, die im Folgenden näher dargestellt werden.

### *Finanzielle Nachhaltigkeit (Financial Sustainability)*

Zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit müssen anhand von zahlreichen Datenquellen Kompromissentscheidungen für die Produktivität, die Bearbeitungsqualität und die Verfügbarkeit von Anlagen gefunden werden. Durch die zunehmende Komplexität der Bearbeitungsvorgänge (z. B. durch Variantenvielfalt) wird es immer schwieriger vorherzusehen, in welchem Maße Störgrößen Einfluss auf die Bearbeitungsgenauigkeit haben. Die Folge sind häufig niedrige Bearbeitungsgeschwindigkeiten, ein Überbeanspruchen von Nebenenergieformen (z. B. Kühlung [4]) und ein kostenintensives Vorhalten von zahlreichen Verschleißkomponenten. Das systematische Erfassen von Echtzeitdaten und das domänenübergreifende Verknüpfen produktionsrelevanter Datenquellen ermöglichen dabei, Prozesse und Zustände virtuell zu jedem Zeitpunkt zu beobachten und damit auch zu optimieren.

### *Ökologische Nachhaltigkeit (Environmental Sustainability)*

Steigendende Rohstoffpreise sowie zahlreiche Anreize für das Green Manufacturing (z. B. die 2021 eingeführte $CO_2$-Emissionssteuer) erfordern eine bedarfsgerechte Produktion mit minimalen Überschüssen. Die ökologische Nachhaltigkeit ist dabei eng mit der finanziellen Nachhaltigkeit verknüpft und schließt sich in vielen Bereichen nicht aus. Beispielsweise führt ein optimierter Betrieb der Kühlung für Fräs- und Drehmaschinen zu geringeren Energiekosten und gleichzeitig zu einer besseren Öko-Bilanz [3]. Diese Maßnahme wird jedoch aufgrund von Unsicherheiten im thermo-elastischen Verhalten und damit möglichen Qualitätseinbußen nur sehr selten ausgeführt. Abhilfe schafft eine Kombination aus sensor- und datenbasierten Ansätzen zur Aggregation von thermischen Belastungsfällen, wodurch die Unsicherheit in der Vorhersage des thermo-elastischen Verhaltens auf den Produktionsprozess minimiert werden kann.

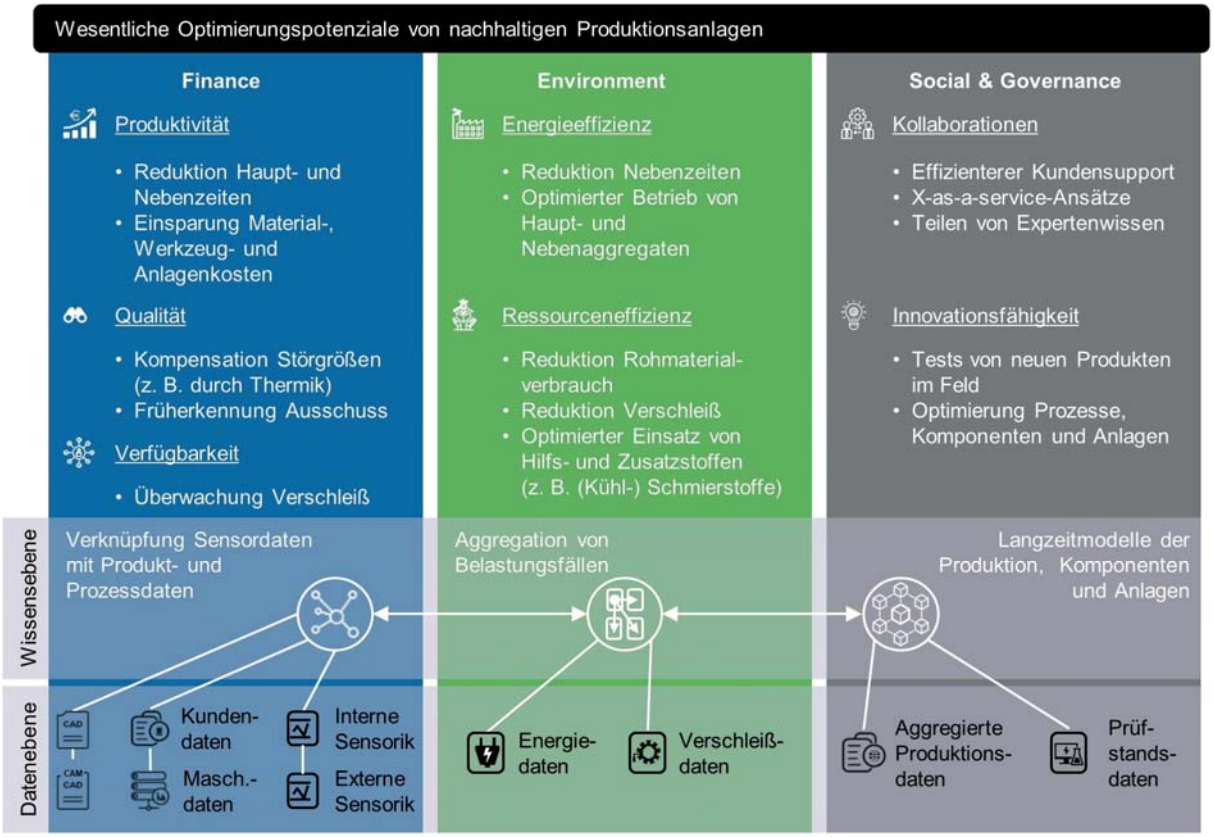



*Abbildung 1: Wesentliche Optimierungspotenziale für nachhaltige Produktionsanlagen*

### *Soziale und steuernde Nachhaltigkeit (Sustainability in Social Aspects and Governance)*

Die modellbasierte Datenauswertung ermöglicht neue Kollaborations- und Innovationsmöglichkeiten. Diese Kollaborationen werden durch den Zugang zu neuen digitalen Ökosystemen in Form offener Plattformen umgesetzt. Die Rolle des Menschen und die Art der Zusammenarbeit muss dabei geregelt werden. Den Vorteil dieser Art des Handelns zeigen folgende Beispiele: Durch X-As-Service-Ansätze kann Expertenwissen von verschiedenen Entitäten gewinnbringend miteinander verknüpft werden. Dadurch können beispielsweise im Rahmen von externen Prozessoptimierungen der Werkzeugverschleiß und die Nebenzeiten weiter reduziert werden. Der Zugang zu aggregierten Verschleiß- und Nutzungsdaten für produzierende Unternehmen von Komponenten, Werkzeugen und Werkzeugmaschinen ermöglicht eine realitätsnahe Optimierung neuer Komponenten und beispielsweise eine passgenaue Abrechnung über Pay-per-X-Geschäftsmodelle. Es sei an dieser Stelle auf den Expertenvortrag *Neue Geschäftsmodelle für Werkzeugmaschinen* verwiesen, der diesen Aspekt genauer behandelt.

### *Anwendungsfälle einer nachhaltigen Optimierung durch die Nutzung übergreifender Data Science-Ansätze*

Neben der systematischen Erfassung von Produktionsdaten benötigen variierende Belastungen und Beanspruchungen von Produktionsanlagen übergreifende Ansätze aus dem Bereich Data Science, um Modellunsicherheiten hinreichend zu reduzieren, aktuelle Zustände zu analysieren und zukünftiges Verhalten vorherzusagen, wodurch ganzheitliche und nachhaltige Optimierungsansätze ermöglicht werden. Kapitel 2 leitet über den Stand der Technik bisheriger Ansätze ab, welche Grundvoraussetzungen moderne Pro-

duktionsanlagen für deren nachhaltige Nutzung erfüllen müssen, Kapitel 3. Der vorgestellte Ansatz wird nachfolgend auf vier exemplarische Anwendungsfälle für Produktionsanlagen angewandt: Produktivitätssteigerung durch virtuelle Qualitätsmessungen, Verbesserung der Verfügbarkeit durch Zustandsschätzung des Werkzeug- und Kugelgewindetriebverschleißes und die Kompensation von thermo-elastischen Störgrößen.

# 2 Bisherige Enabler zur Abbildung und Optimierung von Produktionsmaschinen

## 2.1 Physikalische Modellansätze

Zur Vorhersage des Verhaltens von Produktionsanlagen, wie Werkzeugmaschinen, hat in den vergangenen Jahren die Virtualisierung für die Analyse physikalischer Ursache-Wirk-Zusammenhänge vermehrt Einzug in die Produktion erhalten. Modellwissen, z. B. in Form von virtuellen Repräsentationen des betrachteten Objekts, befähigen eine anforderungsgerechte simulative Vorhersage von Dreh- und Fräsprozessen, beispielsweise zur Ermittlung der Bauteilqualität und Prozessstabilität, Abbildung 2. Die Aggregation von untersuchten Ursache-Wirk-Zusammenhängen in die virtuelle Welt ermöglicht darüber hinaus eine frühzeitige Erkennung und Beseitigung systematischer Fehlerquellen, bevor die Maschine oder der Prozess in die jeweilige Anwendung gebracht werden. Typische Anwendungsfälle im Bereich der Fertigung sind die virtuelle Kollisionserkennung [5] und im Bereich Steuerungstechnik die virtuelle Inbetriebnahme von Werkzeugmaschinen [6].

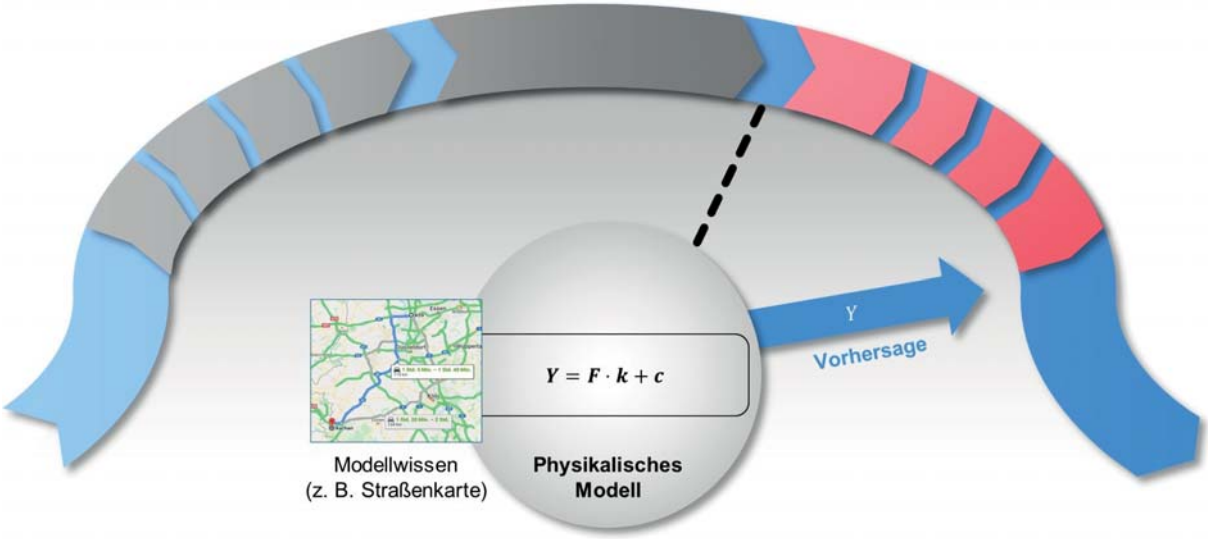



*Abbildung 2: Prinzip der simulationsbasierten Vorhersage von Fertigungsprozessen*

Des Weiteren wurden zur Auslegung von CNC-Zerspanprozessen im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „ReffiZ – Realisierung effizienter Zerspanprozesse“ Planungsmethoden, Simulationsmodelle und Softwarewerkzeuge erarbeitet, die anhand individueller Fertigungsszenarien eine simulative Prognose der Prozessstabilität zulassen [7]. Die Folge ist die Reduzierung der Prozess-Ramp-Up-Iterationen bis hin zum Erreichen der Stabilitätsgrenze der Produktionsanlage sowie die durch die Parallelisierung von realer und virtueller Welt erreichte Erhöhung der Maschinenverfügbarkeit. Eine grundlegende Information zur Bewertung des simulativen Zerspanprozesses sind die am Tool-Center-Point (TCP) wirkenden Prozesskräfte, woraus sich die im Kraftfluss liegenden Be-

lastungen für die Maschinenstruktur sowie der Einzelkomponenten ableiten lassen. Simulative Ansätze zur Vorhersage von Prozesskräften werden unter anderem in [8] und [9] gezeigt. Eine zentrale Herausforderung dieser Modelle ist dennoch die Ermittlung der richtigen Modellparameter, sodass die zu errechnende Zielgröße, in diesem Fall die Prozesskraft, als Input zur weiteren Bewertung des Fertigungsprozesses eine valide und vertrauensvolle Aussagefähigkeit besitzt. Die Ermittlung dieser Parameter ist gerade bei komplexen Fertigungsprozessen mit einem hohen Aufwand verknüpft und gilt lediglich für konkret definierte Modellrandbedingungen, wodurch die Übertragbarkeit auf andere Prozesse erschwert ist.

Die Grenzen der A-Priori-Simulation werden insbesondere dann erreicht, wenn stochastisch eingebrachte Unsicherheiten das Gesamtergebnis maßgeblich verzerren. Ursächlich hierfür sind zeitlich variable Faktoren wie die Ermüdung und der Verschleiß von Betriebsmitteln bzw. ihrer Komponenten. Aber auch die schwankende Qualität des in den Prozess eingebrachten Rohmaterials spielt eine entscheidende Rolle.

Demgegenüber ermöglicht die alleinige Betrachtung von zurückgeführten Live-Daten aus den jeweiligen Produktionsanlagen eine Analyse des konkreten Ist-Zustands von Maschine, Komponente und Prozess. Eine zentrale Herausforderung des Ansatzes ist jedoch die bedingte Umsetzbarkeit im industriellen Umfeld. Zur Verfügung stehende Sensorlösungen sowie die maschineninternen Messsysteme liefern zum einen nur indirekte Messgrößen und weisen zum anderen eine variable Distanz zum Analyseobjekt auf. Des Weiteren gilt insbesondere die Schaffung einer generalisierten und prozessübergreifenden Mustererkennung als weitere Herausforderung, die durch reine Big-Data-Ansätze aufgrund der fehlenden Kontextualisierung nicht umgesetzt werden kann.

### 2.2 Datenkombinierte Modellansätze

In der Praxis sind weniger die reinen Rohdaten als vielmehr die dahinterliegenden Erkenntnisse, z. B. die erzielte Bauteilqualität, von Interesse. Um an diese Erkenntnisse zu gelangen und die messtechnische Distanz zum Analyseobjekt zu minimieren, ist die Zusammenführung der aufgezeichneten Live-Daten mit domänenspezifischem Modellwissen, das einerseits in den physikalischen Simulationsmodellen aus Kapitel 2.1 und andererseits als implizites Erfahrungswissen der Mitarbeitenden vorliegt, notwendig. Dieses Konzept wurde als eines der zentralen Leitthemen des *AWK'17* vorgestellt [10]. Die geschilderte Vorgehensweise eliminiert als kombinierte Konzeption rein datenüberwachungs- und simulationsbasierter Ansätze die jeweiligen individuellen Schwächen der Einzelansätze. Auf diese Weise wird das Domänenwissen mit stochastischen Einflüssen kombiniert, wodurch Rohdaten in Form veredelter Informationen vergleichbar werden und als Grundlage für eine prozessparallele Bewertung des Prozesses genutzt werden können, Abbildung 3.

Die zugrundeliegenden Modelle sind im Gegensatz zu rein simulationsbasierten Ansätzen so reduziert, dass sie echtzeitfähige Direktanalysen liefern können. Die Zusammenführung von Informationen aus verschiedenen Datenerhebungsdomänen sowie vorhandenem Modellwissen geschieht in Form eines digitalen Abbilds von Bauteil, Maschine oder Prozess, dem sog. digitalen Schatten des Betrachtungsobjekts. Dieser vereint ausschließlich die der Analyse zugrundeliegenden notwendigen Informationen und ist innerhalb dieses Kontextes ein reduziertes Abbild der Realität. Im Umkehrschluss befähigt die reduzierte Darstellung die Echtzeitfähigkeit des Ansatzes.

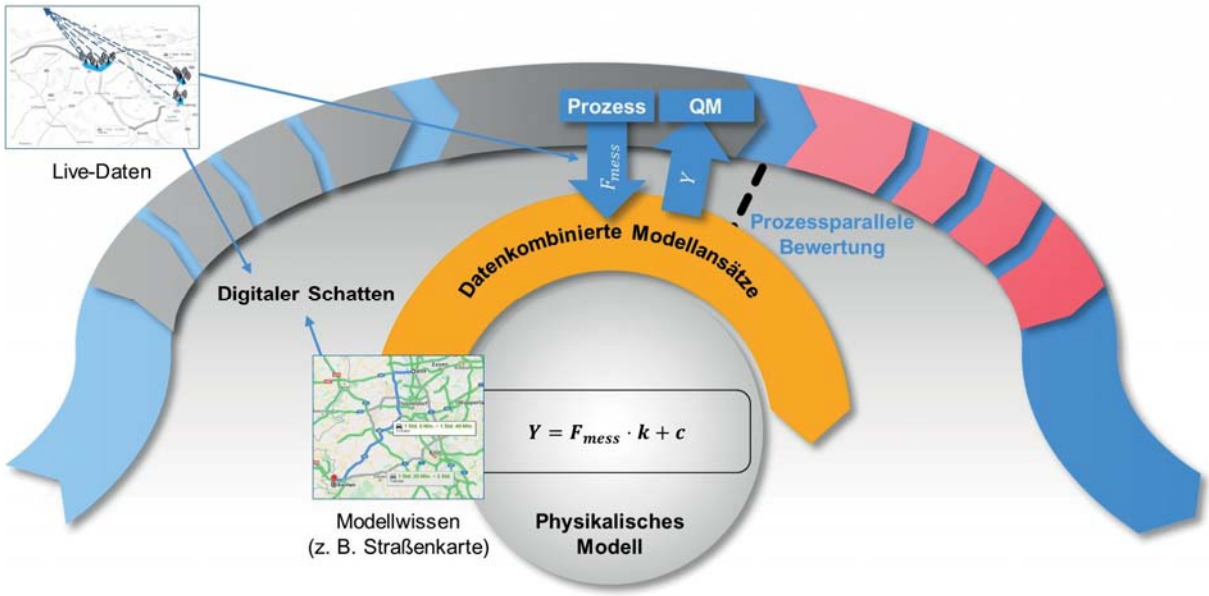



*Abbildung 3: Datenkombinierte Modellansätze von Fertigungsprozessen*

Durch die beschriebene Herangehensweise steigt die Qualität der Analyseergebnisse signifikant an, da prozessindividuelle Störeinflüsse, wie beispielsweise Kraftüberhöhungen ausgelöst durch eine Materialinhomogenität, Berücksichtigung finden. In diesem Kontext wird betont, dass innerhalb der modellbasierten Datenanalyse durch die zusätzliche Betrachtung der stochastischen Störeinflüsse ausschließlich eine Direktanalyse der jeweiligen Ist-Situation stattfindet. Im Umkehrschluss lässt der Ansatz keine A-Priori-Vorhersage zu [10].

### *Anwendungsbeispiel Qualitätsüberwachung*

Die Qualitätsüberwachung spielt eine zentrale Rolle in der Produktionstechnik. In der industriellen Praxis wird der hiermit verbundene Aufwand derzeit vorwiegend über stochastische Verfahren reduziert. Vorhandene technische Lösungen im Rahmen der modellbasierten Datenanalyse ermöglichen die Virtualisierung und prozessparallele Prädiktion der Produktqualität [11].

Hierzu wird zunächst ein maßgeschneidertes virtuelles Teilabbild des Werkstücks, der eingeführte digitale Schatten, benötigt. Um den Fertigungsprozess nachzuvollziehen, werden steuerungsinterne Signale, wie z. B. die Ist-Positionen aller Achsen als Repräsentation des Werkzeugpfads, direkt an der Maschinensteuerung abgegriffen. Für die tatsächliche Position des TCP müssen die erfassten Positionswerte einerseits um zuvor eingemessene geometrisch-kinematische Abweichungen der Maschine korrigiert sowie andererseits um die statische und dynamische Verlagerung des Werkzeugs infolge der wirkenden Prozesskräfte beaufschlagt werden. Werkstückseitig sind zur Bestimmung der Qualität darüber hinaus der Verzug infolge der Einspannung [12] sowie prozesskraftbedingte Verlagerungen zu berücksichtigen.

Zur Ermittlung der werkzeugseitigen Verlagerung bedarf es statischen und dynamischen Nachgiebigkeitsmodellen für Maschine und Werkzeug, die im Vorfeld der Produktion durch messtechnische Untersuchungen bestimmt werden müssen. Für die werkstückseitige Nachgiebigkeit wird vorab eine automatisierte bahnbezogene FEM-Simulation der endkonturrelevanten Werkstückbereiche durchgeführt. In beiden Fällen müssen die Prozesskräfte bekannt sein, um aus der Nachgiebigkeit die Verlagerungen zu berechnen.

Hierzu existieren unterschiedliche Vorgehensweisen, die hauptsächlich auf die Schätzung der Prozesskräfte mittels der Antriebsströme der Positionierachsen [13] oder mittels der Positionsdifferenzen zwischen direktem und indirektem Positionsmesssystem [14] gestützt sind. Beide Methoden liefern zufriedenstellende Ergebnisse. Für die weitere Verwendung in kontinuierlich lernenden Modellen ist jedoch eine höhere Datengüte erforderlich. Daher werden externe Sensoren, wie z. B. eine spindelintegrierte Kraftsensorik [15], benötigt, die vom Maschinenverhalten möglichst wenig beeinflusst werden und wirtschaftlich integrierbar sind. Die beschriebene Sensorik wird zum *AWK'21* vorgestellt.

Um aus diesen Daten einen virtuellen Bauteilschatten zu schaffen, wird der Materialabtrag simuliert, indem die vorliegenden Daten der Position am Bauteil zugeordnet werden [10, 11]. Hierbei werden sowohl Werkstück als auch Werkzeug durch diskrete lineare Volumenelemente, sogenannte Dexel, repräsentiert. Bei Durchdringung der virtuellen Repräsentationen im Rahmen ihrer Relativbewegung werden die Dexel des Werkstücks gekürzt und so der Materialabtrag simuliert. Im Anschluss kann das Bauteil vermessen werden, indem die im Messbereich liegenden Dexel virtuell angetastet werden, Abbildung 4. Sind nur die resultierenden Messschriebe von Interesse, so kann auf die Materialabtragsimulation und deren grafisch aufwendige Berechnung verzichtet werden. Durch die Auswertung der berechneten TCP-Positionen und der Werkzeuggeometrie kann die Qualitätsprädiktion ebenfalls erfolgen, auch wenn die Prozessdaten dem Bauteil dabei nur partiell zugeordnet werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen taktilen Messverfahren liegt das Messergebnis direkt im Anschluss an die Fertigung und ohne zusätzlichen Berechnungsaufwand vor. Damit ist eine unmittelbare Analyse der zu Abweichungen führenden Fertigungsbedingungen möglich. Eine valide Prozessverhaltensvorhersage im Vorfeld des Fertigungsprozesses ist anhand dieses Vorgehens nicht abbildbar und bedarf lernender Modellansätze über die Fertigungshistorie.

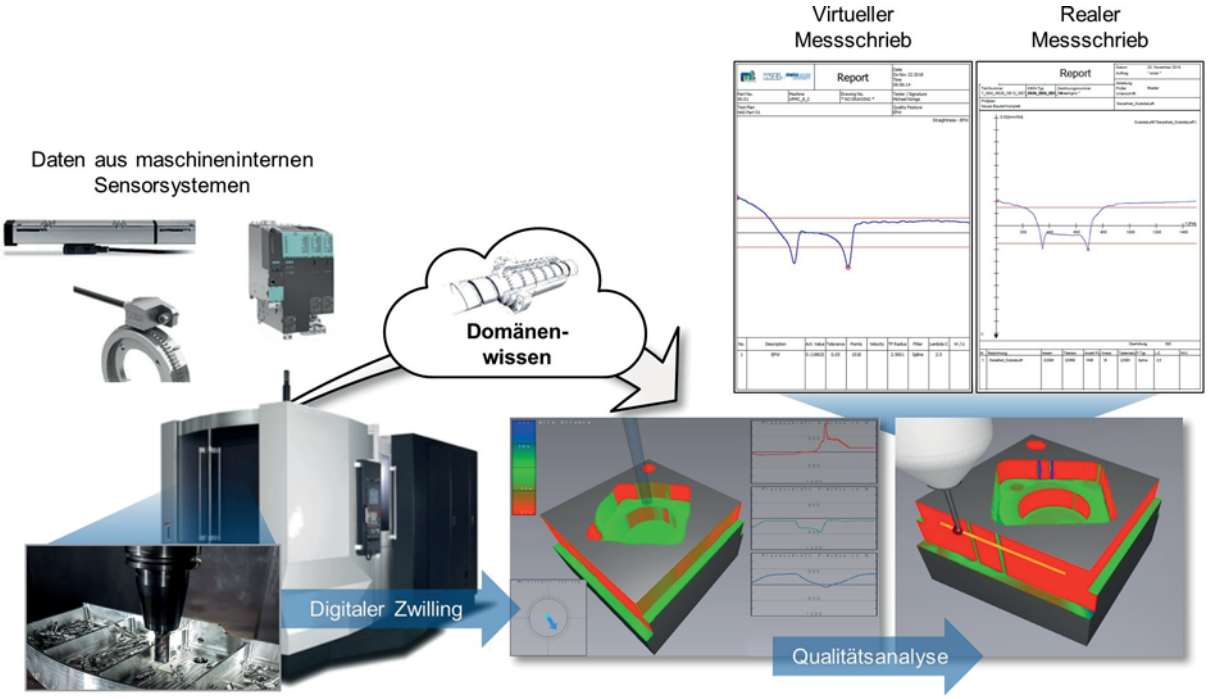



*Abbildung 4: Anwendungsbeispiel Qualitätsüberwachung*

# 3 Übergreifende hybride Modellansätze als Enabler nachhaltiger Produktionsmaschinen

Aktuelle Arbeiten am WZL belegen, dass die Verknüpfung rein physikalischer Modellansätze auf Basis reduzierter schnellrechnender Modelle mit Live-Daten in Form der datenkombinierten Modellansätze die Analysequalität der Produktion deutlich erhöht. Allerdings bezieht sich die Analyse ausschließlich auf den aktuell vorliegenden Einzelfall. Die zugrundeliegenden Modelle sind auf der einen Seite zwar generalisierbar, dennoch müssen sie in Kombination mit den Prozessdaten auf den individuellen Einzelfall adaptiert werden, um valide Verhaltensvorhersagen treffen zu können. Entscheidende Informationen liegen daher in der Veränderung der Daten über einzelne Datensätze hinweg und damit in der Produktionshistorie, wodurch bisheriges Modellwissen mit Hilfe von Methoden der künstlichen Intelligenz sukzessive erweitert wird.

Der grundlegende Aufbau der Methodik übergreifender hybrider Modellansätze besteht aus drei zentralen Schritten:

**Schritt 1:** *Domänenübergreifende Daten- und Modellbereitstellung über den digitalen Schatten*, Kapitel 3.1.

**Schritt 2:** *Modelladaption durch die Nutzung von Produktionsdaten*, Kapitel 3.2.

**Schritt 3:** *Lernende hybride Modellansätze als Kombination datenbasierter Black-Box-Ansätze mit vorhandenem Expertenwissen*, Kapitel 3.3.

***Im ersten Schritt*** wird ein virtuelles Abbild des Betrachtungsobjekts, z. B. das zu fertigende Bauteil, aus den domänenübergreifenden Daten- und Modellsilos erstellt. Innerhalb des digitalen Schattens ist definiert, welche Daten- und Modelle jeweils kombiniert werden, um ein möglichst genaues digitales Abbild zu schaffen. ***Der zweite Schritt*** fokussiert die kontinuierliche Adaption von Verhaltensmodellen über die Nutzung von Produktionsdaten, was noch keinen lernenden Prozess charakterisiert. In Kombination mit Algorithmen aus der künstlichen Intelligenz, u. a. das maschinelle Lernen, kann in ***einem dritten Schritt*** sogar unbekanntes Verhalten quantifiziert werden. In Kombination entstehen hybride Modelle, die in der Lage sind, komplexes Verhalten mit der Zeit und der erforderlichen Datenmenge abzubilden.

Notwendiger Input für die vorgestellte Modellierung sind innerhalb des Produktionsumfeldes anfallende Daten, die die jeweilig geltenden Zusammenhänge implizit enthalten, welche im Anschluss durch das beschriebene Vorgehen extrahiert werden. Ein notwendiges Werkzeug stellt der sog. digitale Schatten dar, der die zugrundeliegenden Daten und Modelle des jeweiligen Betrachtungsobjekts so kontextualisiert, dass Informationen einer heterogenen Datenlandschaft über verschiedene Domänen vergleichbar werden. Dieser Schritt ist obligatorisch und versteht sich als notwendige Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung künstlicher Lernverfahren. Die notwendige Datengrundlage zur Abbildung von komplexem Verhalten steigt. So können empirisch „neue“ Ursache-Wirk-Zusammenhänge autonom ermittelt werden, die bisher nicht über das vorhandene Erfahrungswissen abgebildet werden. Diese Ursache-Wirk-Zusammenhänge können mit einer entsprechenden Datenmenge aus dem künstlichen Lernprozess quantifiziert und extrahiert werden. Im Folgenden wird diese Fähigkeit als *Empiric Learning* bezeichnet. *Empiric Learning* befähigt im Anschluss eine sofortige qualitativ hochwertige Aussagefähigkeit der zu erwartenden Auswirkungen von z. B. etwaigen Planungsänderungen im Produktionsumfeld, woraus konkrete Maßnahmen zum Gegensteuern abgeleitet werden können.

Am Beispiel von *Google Maps* wird der Mehrwert eines solchen Vorgehens intuitiv herausgestellt, Abbildung 5. Die Nutzung von Kartenmodellen als digitales Abbild, ***Schritt 1***, und die Berechnung der kürzesten Route stellt die rein simulative Metrik der algorithmischen Ermittlung einer festgelegten Zielgröße bei Einhaltung bestimmter Randbedingungen dar. Wird die Simulation mit Live-Daten zum Standort, z. B. GPS-Signale der datenerhebenden Smartphones, sowie weiteren allgemein bekannten Informationen im Verkehr verknüpft, kann das Kartenmodell auf die Live-Situation adaptiert werden, ***Schritt 2***. Dadurch können aktuelle Verkehrszustände wie Staus, Sperrungen oder Baustellen in der Ermittlung der schnellsten Route berücksichtigt werden. Diese Darstellung ist eine Analyse der aktuellen Ist-Situation, bezieht sich konkret auf den aktuellen Verkehrszustand und kann sich kurzfristig je nach Änderung der Lage anpassen. Eine vorausschauende Routenplanung auf Basis der zu erwartenden Verkehrseinflüsse bleibt vorerst aus. Erst die Erweiterung der Informationsgrundlage sowie die Betrachtung der Historie innerhalb eines lernenden hybriden Modellansatzes befähigt eine valide Verkehrsvorhersage, ***Schritt 3***. Am Beispiel von *Google Maps* werden Informationen aus verschiedenen Domänen, wie der jeweilige Werktag, die lokale Ferienlage, aktuelle Veranstaltungstermine sowie die gemeldeten Witterungsverhältnisse genutzt, das zu erwartende Verkehrsaufkommen vorherzusagen. Diese domänenübergreifenden Informationen müssen zur Erhöhung der Datengrundlage im Vorfeld entsprechend vorverarbeitet und in einen gemeinsamen Kontext zur verbesserten Vergleichbarkeit gebracht werden.

*Abbildung 5: Lernende Modelle im Alltag am Beispiel von Google Maps*

Dadurch ist es im Anschluss möglich, mit zunehmenden Datenmengen angelernte Ursache-Wirk-Zusammenhänge beispielsweise zur Vorhersage von Verkehrssituationen und zum Ableiten einer optimalen Route für das jeweilige Zeitfenster zu nutzen, da der jeweilige Einfluss auf eine Veränderung der entsprechenden Zielgröße bekannt ist.

Wie diese Vorgehensweise zur Steigerung der Nachhaltigkeit in der Produktion adaptiert werden kann, beschreibt die im Folgenden zugrundeliegende Methodik der übergreifend lernenden hybriden Modellansätze, Abbildung 6.

Im Anschluss wird diese Methodik anhand verschiedener Anwendungsbeispiele für einen nachhaltigen Einsatz von Produktionsmaschinen im Produktionsumfeld untermauert. Nicht die Optimierung einzelner Teilaspekte steht dabei im Fokus, vielmehr wird über den ganzheitlichen Modellansatz versucht, die größten Stellhebel zur Erhöhung der Produktivität oder für einen effizienteren Einsatz von begrenzten Ressourcen zu finden.

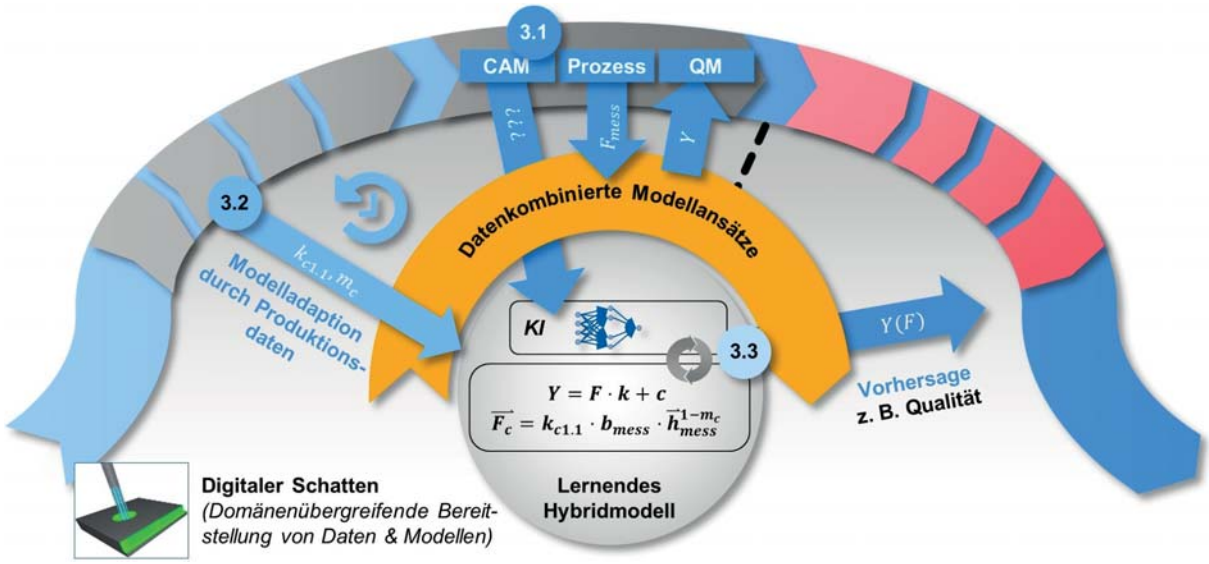



*Abbildung 6: Methodik der übergreifend lernenden hybriden Modellansätze*

## 3.1 Domänenübergreifende Daten- und Modellbereitstellung über den digitalen Schatten

Sowohl die globalen als auch die lokalen Wirkzusammenhänge von Produktionsanlagen sind vielfältig und komplex. Die verschiedenen Systemstrukturen müssen in ihrer Individual-, aber auch in ihrem Interaktionsverhalten verstanden werden. Erst dadurch lassen sich Produktionsanlagen effizient und wirtschaftlich auslegen. Ziel ist es, die Komplexität von Systemverhalten individuell und im Zusammenspiel mit weiteren Systemen zu durchdringen, was durch simulationsbasierte Ansätze auf Basis reduzierter Verhaltensmodelle nicht erreicht werden kann. Die Fähigkeit, Systemkomplexität durch das Lernen von Verhalten zu verstehen, bedarf einer konsistenten, kontextrelevanten und aggregierten Datengrundlage, die eine Vergleichbarkeit ermöglicht. Die hohe Anzahl möglicher Systeme sowie die damit verbundene Datenheterogenität verschiedener Domänen führt zu der Betrachtung der domänenübergreifenden Bereitstellung von Daten und Modellen durch das Instrument des digitalen Schattens, Abbildung 7.

Der digitale Schatten generalisiert die über die Produktionshistorie anfallenden und verfügbaren sowie speziell ausgewählten Daten auf Basis des betrachteten Anwendungsfalls und kombiniert diese mit geltendem Wissen in Form reduzierter Modelle. Innerhalb des Use-Cases der Qualitätsvorhersage, Kapitel 6, können demnach alle verfügbaren Daten und Informationen aggregiert und für lernende Modelle verfügbar gemacht werden, um sich von der dargestellten Einzelfallbetrachtung zu lösen. Durch die Anreicherung mit kontextrelevanten Daten, die im direkten Zusammenhang mit der Fertigung oder Prozessplanung stehen, wie z. B. Maschineneigenschaften oder Parameter der CAM-Planung, entsteht eine lernfähige Datenumgebung, die dem digitalen Schatten angeheftet wird. Diese Umgebung wird infrastrukturell in intelligenten Datenbankstrukturen abgebildet und stellt damit die Basis für den Einsatz künstlicher Intelligenz in der Produktionstechnik dar.

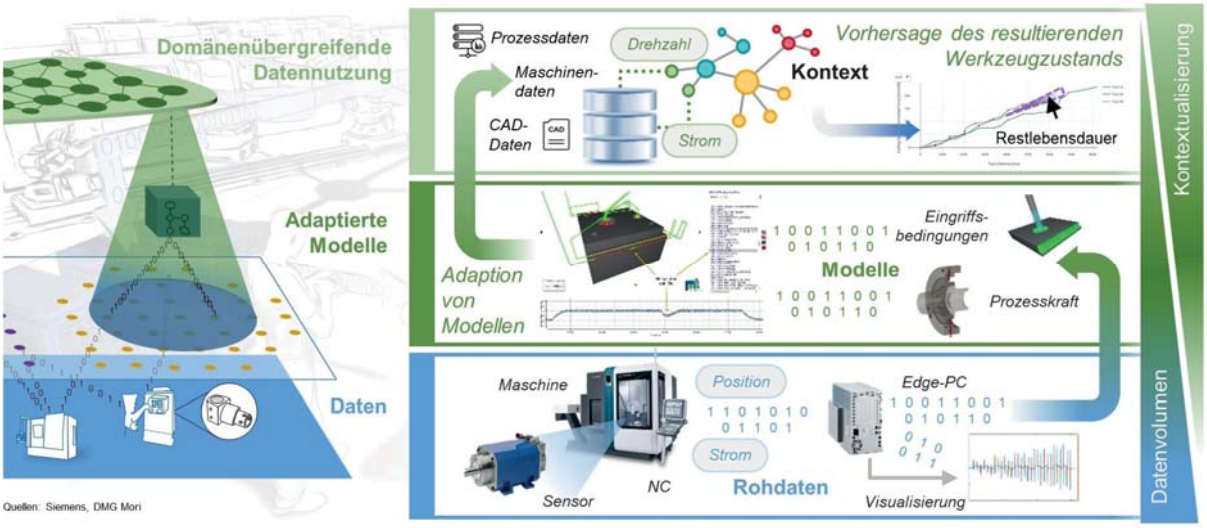



*Abbildung 7: Domänenübergreifende Daten- und Modellbereitstellung als notwendige Voraussetzung erfolgreich lernender Strukturen (Prinzip: Linke Bildhälfte)*

Als Grundlage und Instrument zur direkten Kontextualisierung ausgewählter domänenübergreifender Datensätze in Form der Erstellung eines digitalen Schattens ist am WZL in Kooperation mit einem Partnerunternehmen aus der Industrie eine interaktive Plattform entwickelt worden, die es ermöglicht, die zur Verfügung stehende Datenbasis im jeweilig betrachteten Kontext zu visualisieren. Abbildung 8 zeigt am Beispiel eines digital gefertigten Fräswerkstücks die Umsetzung der beschriebenen Plattform.

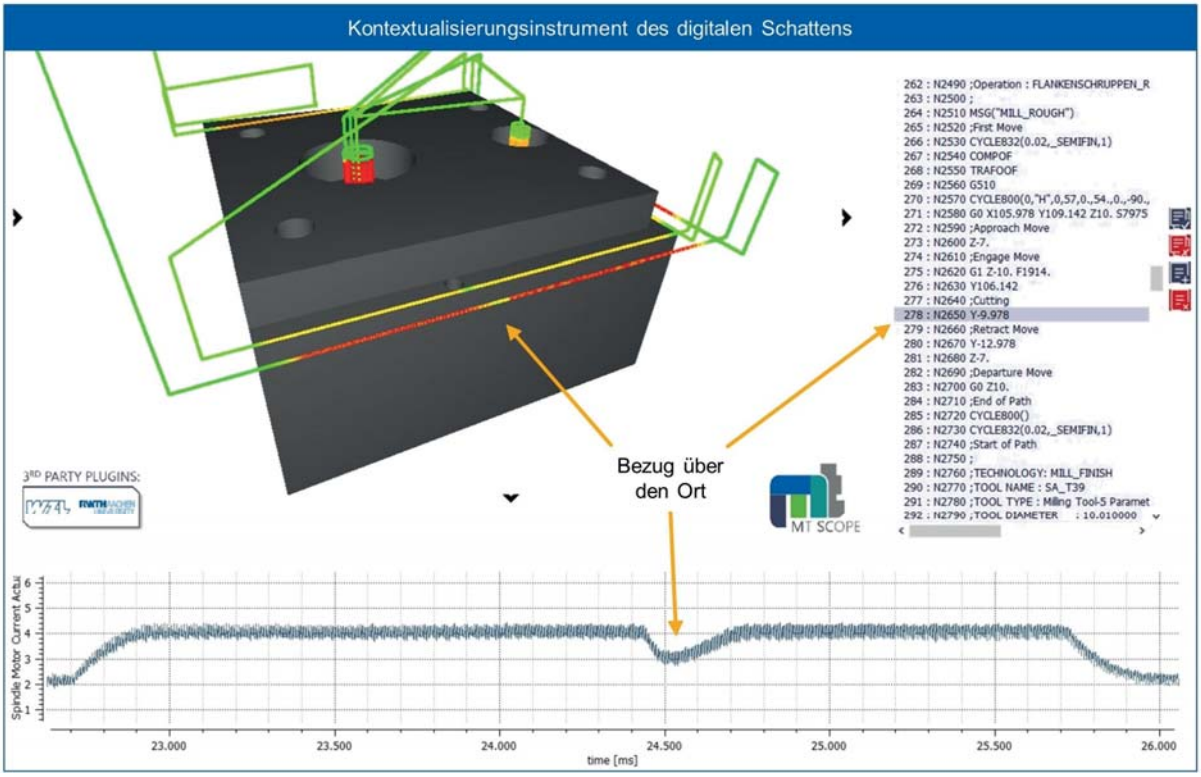



*Abbildung 8: Kontextualisierungsinstrument des digitalen Schattens als Grundlage einer domänenübergreifenden Datennutzung*

Dem Werkstück können in verschiedenen Darstellungsformen, wie dem Fertigungsort oder der Zeit, die zugrundeliegenden Informationen angeheftet werden. Das gefertigte

Werkstück ist in diesem Fall die notwendige Vergleichbarkeitsgrundlage. Durch die geschaffene Vergleichbarkeit, beispielsweise die werkstückübergreifende Betrachtung einzelner bauteilähnlicher Fertigungsfeature, entwickelt sich die Grundlage für eine empirische Wissensgenerierung durch kontinuierliches Lernen. Darüber hinaus ermöglicht die Plattform die Darstellung bisher unbekannter bzw. neu erlernter Ursache-Wirk-Zusammenhänge zur Ansatz-Validierung auf Basis von Realfertigungsprozessen.

***Ergebnis***

Ergebnis der in Kapitel 3.1 beschriebenen Vorgehensweise ist der Aufbau eines anwendungsbezogenen digitalen Schattens, der domänenübergreifende Daten und Modelle in einen gemeinsamen Kontext bringt. Die durch die gewonnene Vergleichbarkeit der Informationen erhöhte Datenmenge ist Grundlage übergreifender Verhaltensanalysen in Produktionsanlagen.

## 3.2 Modelladaption durch die Nutzung von Produktionsdaten

Die domänenübergreifende Datenbereitstellung ist die Grundlage für eine ganzheitliche Datenanalyse zur Optimierung von Produktionsprozessen. Der dadurch ermöglichten Nutzung von KI-Methoden zur Abbildung komplexer Zusammenhänge und Prädiktion zukünftigen Verhaltens im Produktionsumfeld geht der Schritt der Modelladaption von bestehenden Modellwissen voraus. Grund dafür ist das am WZL über die Jahre generierte Wissen über Produktionsmaschinen und Prozesse, welches nicht erneut durch einen rein KI-basierten Ansatz erlernt werden soll. Vielmehr werden die entwickelten Modelle genutzt, um bereits bekanntes Verhalten innerhalb von Produktionsmaschinen schnell auf ähnliche oder neue Anwendungsfälle zu übertragen. In Kombination mit rein KI-basierten Methoden entstehen die übergreifend lernenden hybriden Modellansätze, Abbildung 6.

Der in Kapitel 3.1 eingeführte digitale Schatten kann mit bestehenden physikalischen Modellen inklusive der Beschreibung von Verhaltenszusammenhängen kombiniert werden. Allerdings zeichnen sich diese Modelle häufig dadurch aus, dass die Modellparameter nicht unmittelbar übertragbar auf neue Prozesse oder Maschinen sind. Um dennoch das im Modell implizierte Wissen zu nutzen, werden vorhandene physikalische Modelle am Realprozess auf der betrachteten Produktionsmaschine schnell parametriert. Der Modelladaptionsprozess wird am Beispiel der Ermittlung aktueller Modellkennwerte zur Vorhersage von Prozesskräften über den klassischen empirischen Modell-Ansatz nach Otto Kienzle im Detail erläutert, Abbildung 9.

Zur Adaption des Kraftmodells nach Otto Kienzle am Realprozess stehen NC-interne sowie externe Messsignale aus dem Produktionsprozess zur Verfügung: Zur Ermittlung der aktuell wirkenden Kräfte wurde am WZL ein spindelintegrierter Verlagerungssensor entwickelt, welcher in der Lage ist, hochdynamische Prozesskräfte am TCP zu messen [15]. Des Weiteren werden NC-interne Messsignale (z. B. die Positionen der Verfahrachsen im Arbeitsraum) mit einer prozessparallelen Materialabtragsimulation zur Abbildung des vorherrschenden Werkzeugeingriffs kombiniert und mit den gemessenen Prozesskraftwerten aus dem externen Sensor verknüpft.

Das folgende Vorgehen wird für den Modellgeltungsbereich von $k_{c1.1}$ beispielhaft vorgestellt: Bei Prozessstart werden dem hinterlegten Kraftmodell mit dessen Startwerten $k_{c1.1}$ und $m_c$ Live-Messwerte der wirkenden Schnittkraft $F_c$ und des aktuellen Eingriffs $b_{mess}$, $h_{mess}$ zugeführt, Abbildung 9. Innerhalb kurzer Zyklen wird am industriellen Live-Prozess nach [16] ein Optimierungsproblem für jedes geometrische Bauteil-Feature gelöst, wel-

ches die entsprechenden Kraftparameter $k_{c1.1}$ und $m_c$ zur Vorhersage der vorherrschenden Prozesskraft ermittelt, Abbildung 10, rechts oben. Dabei konvergiert bei ausreichender Datenmenge und entsprechend eingestellten Startwerten der Algorithmus gegen stabile Parameterwerte. Das eingestellte Konvergenzniveau ist dabei abhängig von der erwarteten Kraftamplitude sowie der geforderten Qualität, die in Kombination mit dem bekannten Abdrängungsverhalten der Maschine aus Kapitel 2.2 zurück auf ein Maximalamplitudenintervall der Prozesskraft gerechnet werden kann.

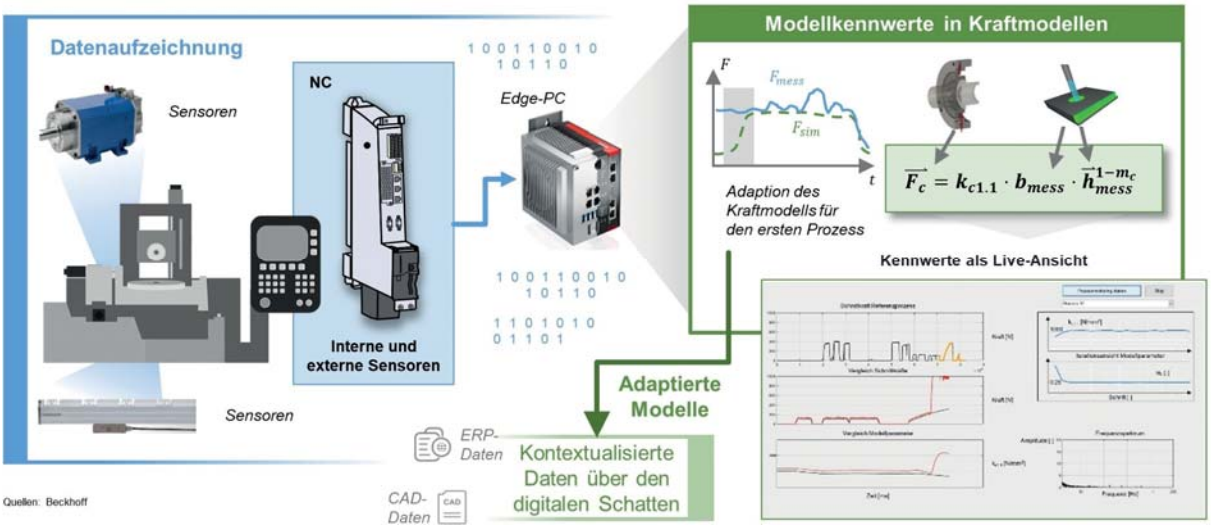



*Abbildung 9: Prozessparallele Adaption physikalischer Verhaltensmodelle – hier am Beispiel der Kienzle-Parameter zur Vorhersage der Prozesskraft*

Aus dem vorgestellten Adaptionsverfahren leitet sich die folgende Frage ab: Wie können die adaptierten Modellparameter zur übergreifenden Produktionsanalyse genutzt werden? Die Antwort auf diese Frage wird im Folgenden schrittweise hergeleitet: Neben den reinen Modellgrößen werden weitere Meta-Informationen, die beim Adaptionsprozess vorliegen, erfasst und in eine Modelldatenbank integriert. Am Beispiel des vorgestellten Kraftmodelladaptionsansatzes handelt es sich dabei um Informationen zum genutzten Werkzeug (Geometrie, Werkstoff, Schneidenanzahl etc.), zum zerspanten Material (Werkstoffspezifikation, Geometrie etc.), den vorherrschenden Eingriffen sowie Informationen zur Maschine. Diese Meta-Informationen können über die am WZL aufgebaute Dateninfrastruktur und Ankopplung der Produktionsmaschinen automatisch erfasst und gespeichert werden. Ergebnis ist ein entsprechend adaptiertes Modell zur Vorhersage der Prozesskräfte mit einer Gültigkeit unter den in den Meta-Informationen zugrundeliegenden Randbedingungen. Für verschiedene geometrische Fertigungs-Feature-Typen liegen adaptierte Modellparameter für den jeweiligen Geltungsbereich vor.

Der erste Vorteil dieser Erfassungs- und Speichertechnologie zeigt sich in der Prozessüberwachung von Kleinserienprozessen, Abbildung 10 (Detailansicht aus Abbildung 9): Klassische Prozessüberwachungssysteme fokussieren in der Regel eine messbare Größe und überprüfen prozessparallel diesen Wert auf Über- oder Unterschreiten einer festen oder dynamischen Grenze. Diese Grenzen werden über entsprechende Referenzprozesse aufwändig ermittelt. Änderungen im Prozess (alternative Bearbeitungsstrategie, alternatives Material oder Werkzeug) führen dazu, dass die ursprünglich eingestellten Überwachungsgrenzen nicht mehr gelten, da diese im Adaptionsprozess nicht abgebildet wurden. Hingegen besteht durch das kontinuierliche Erweitern der Modelldatenbank die Möglichkeit, mittels der hinterlegten Randbedingungen entsprechend adaptierte Modelle zu nutzen, die auf die aktuelle Bearbeitungssituation angewendet werden können. Unter-

schied zum klassischen Ansatz ist die Überwachung der für das aktuell gefertigte geometrische Feature geltenden Modellparameter, die bereits verschiedene Einflüsse wie den Materialeingriff abbilden und dadurch den zu erwartenden Kraftverlauf nachbilden können. Die mit der Zeit wegfallende aufwändige Modelladaption begünstigt einen Einsatz für Kleinserienprozesse. Abbildung 10 zeigt die Überwachung eines aktuellen Prozesses im Vergleich zu einem Referenzprozess. Für den aktuellen Prozess werden die Kraftparameter kontinuierlich adaptiert und mit bereits existierenden Modellparametern für gleiche bzw. ähnliche geometrische Fertigungs-Feature nach dem beschriebenen Schema verglichen. Eingriffsbedingte Änderungen des Kraftverlaufs haben nur unwesentlich Einfluss auf eine Änderung der Modellparameter (unterer Plot, Abbildung 10).

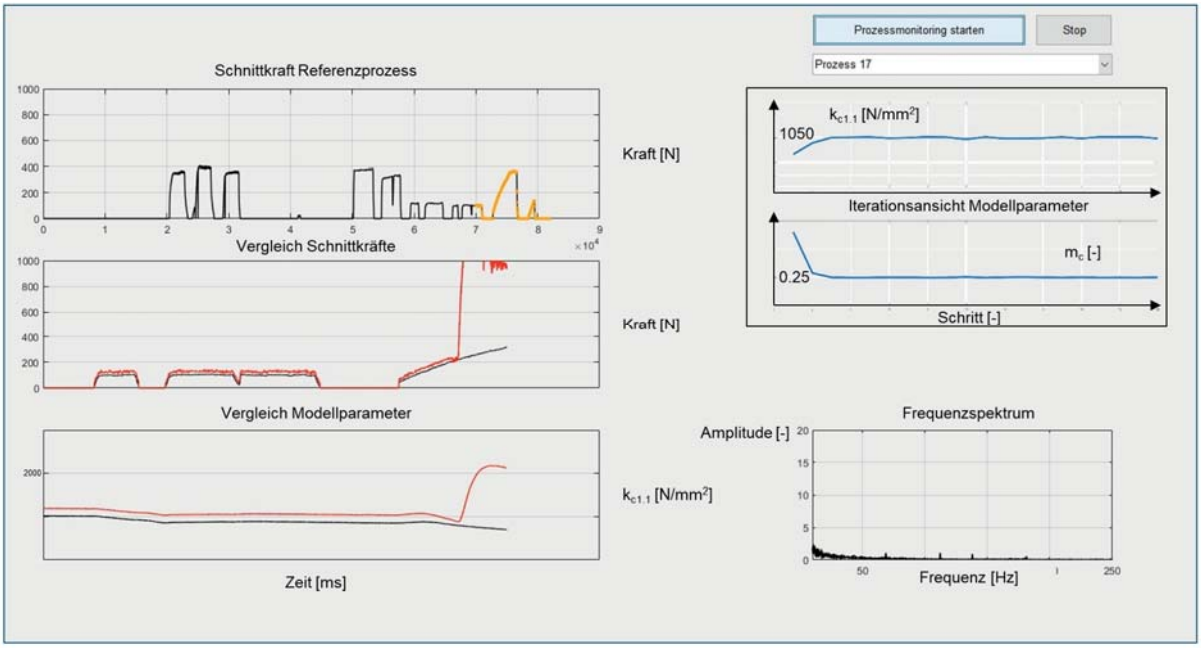



*Abbildung 10: Live-Adaption von Kraftmodellen am realen Prozess sowie Überwachung von Modellparameteränderungen (Detailansicht)*

Zurück zur einleitenden Frage der Nutzung der Modellparameter zur übergreifenden Produktionsanalyse: Die Nutzung bekannter Zusammenhänge und deren Adaption auf aktuelle Prozesssituationen führt zu einer Erhöhung der Vergleichbarkeit zwischen einzelnen gefertigten geometrischen Feature. Aus dieser Sicht bilden die Modellparameter des Kraftmodells aussagekräftige Kennwerte mit einem höheren Informationsgehalt als die reine Überwachung von Messwerten. In Kombination mit Meta-Informationen zur Eingriffssituation, verwendeten Materialien, Prozessparametern sowie der gesehenen Werkzeugbelastung lassen sich diese Kennwerte mit höherem Informationsgehalt in sog. Belastungs- und Zustandsindikatoren einteilen. Belastungsindikatoren fokussieren die im Namen enthaltene Belastungsart für jedes Fertigungsfeature, eine Kombination der erfassten Kräfte mit den entsprechenden Randbedingungen der Bearbeitungsstrategie. Die kontinuierlich adaptierten Kennwerte des Kraftmodells werden dagegen als Zustandsindikator zur Beschreibung des aktuellen Zustands der Werkzeuge klassifiziert. Zustandsindikatoren können ebenfalls durch direkte Messverfahren ermittelt werden, z. B. mikroskopische Verfahren zur Messung der Verschleißmarkenbreite. Nach erfolgter Definition bedeutet eine Änderung der Modellparameter des Kraftmodells eine relative Änderung des Zustandsindikators unter bestimmten Belastungsindikatoren, die zu dieser Zustandsänderung geführt haben. Kombiniert wird das eingebrachte Modellwissen in

Form der Indikatoren im nächsten Schritt mit der kontinuierlich ansteigenden domänenübergreifenden Datengrundlage, Kapitel 3.3, wodurch Effekte berücksichtigt werden, die nicht a-priori bekannt sind. Mittels der eingeführten Indikatoren lassen sich mit entsprechender Datengrundlage komplexe Trends wie die Restlebensdauer der Werkzeuge prozessübergreifend ermitteln, Kapitel 6. Darauf aufbauend kann der Einfluss bestimmter Bearbeitungsstrategien auf die Veränderung in der Restlebensdauer bestimmt werden. Die Bearbeitungsstrategien bestimmen das Verschleißverhalten sowie den relativen Verschleißzuwachs einer Komponente wie das Werkzeug und beeinflussen dadurch die Restlebensdauer. Diese Auswirkung wird im Folgenden *Verschleißimpact* genannt.

***Ergebnis***

Als Ergebnis liegen für auf den jeweiligen Anwendungsfall adaptierte Verhaltensmodelle vor. Diese Verhaltensmodelle sind mit zusätzlichen Meta-Informationen zur Beschreibung der Modellanwendungsgrenzen versehen. Ein kontinuierlicher Adaptionsprozess allein führt somit zur Erhöhung von Wissen, wo adaptierte Verhaltensmodelle jederzeit abgerufen werden können. Dieses Know-how wird im letzten Schritt mit reinen Black-Box-Ansätzen verknüpft, die über die gesamte Fertigungshistorie neue Zusammenhänge erlernen, die generalisierte Verhaltensmodelle noch nicht abbilden.

## 3.3 Lernende hybride Modellansätze als Kombination datenbasierter Black-Box-Ansätze mit vorhandenem Expertenwissen

Als Hybrid-Modell im Kontext übergreifend lernender hybrider Modellansätze werden in der Definition Modelle bezeichnet, die aus einem deterministischen und einem datengetriebenen Ansatz (z. B. Algorithmen des maschinellen Lernens) bestehen. Diese beiden Ansätze werden in Kombination miteinander so verzahnt, dass die charakteristischen Vorteile der Einzelmodellierungsansätze die individuellen Nachteile überwiegen. Vor diesem Hintergrund werden hybride Modellstrukturen auch als sog. Grey-Box-Modelle bezeichnet. Eine beispielhafte Umsetzung hybrider Strukturen zur Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit der Prozesskraftschätzung zeigt [17].

In den bisherigen Ansätzen sind unabhängig von den in Betracht gezogenen Daten die zugrundeliegenden Modelle zeitinvariant. Für die Modellierung notwendige Parameter werden vorab auf den Anwendungsfall adaptiert und im Anschluss nicht weiter angepasst, Kapitel 3.2. Dabei wird vernachlässigt, dass sich die Einflussgrößen im Verlaufe der Zeit, beispielsweise durch kontinuierlich zunehmenden Verschleiß von eingesetzten Werkzeug- oder Maschinenkomponenten, verändern können. Die Kombination aus qualitativem Vorwissen und quantitativen Daten über tatsächliche Ist-Zustände aus den betrachteten Produktionsanlagen befähigt dazu, die zugrundeliegende Modellbeschreibung laufend zu aktualisieren, in künstlich angelegtes Wissen zu überführen und so die Vorhersagegenauigkeit des Verhaltens weiter zu verbessern sowie das Systemverständnis zu durchdringen. Als potenzielles Werkzeug eignen sich die im Vorfeld definierten hybriden Modellstrukturen, die über eine rein kontinuierliche Modellanpassung auf Basis rückgeführter Live-Daten hinausgehen, indem sie bisher unbekannte Effekte über den datengetriebenen Black-Box-Ansatz berücksichtigen. Im Gegensatz dazu benötigen rein datenbasierte Modellansätze für eine valide Aussagefähigkeit große Datenmengen zur Durchdringung der beschriebenen Systemverhaltenskomplexität. Hybride Modellstrukturen hingegen reduzieren aufgrund des eingebrachten Vorwissens sowie der im Kontext von *Empiric Learning* neu erlernten Zusammenhänge diese Datenmenge erheblich, gleichzeitig wird die Übertragbarkeit des Ansatzes gesteigert. Der jeweilige Wissensanteil, abgebildet innerhalb sog. White-Box-Modelle, kann innerhalb der hybriden Struktur verschiedene Positionierungen annehmen. Vorwissen kann vor dem Einsatz beispielsweise

einer neuronalen Struktur auf der Input-Seite zur Datenanreicherung eingesetzt werden, um bekannte von bisher unbekannten Einflüssen zu trennen. Im Gegenzug können die der Output-Seite einer neuronalen Struktur kontinuierlich zugeführten messbaren Trainingsdaten über bereits bekannte Zusammenhänge angereichert werden. In beiden Fällen steigt die zugrundeliegende Trainingsdatenmenge für den kontinuierlich lernenden Ansatz. Die in Kapitel 3.1 dargestellte Methodik der kontextualisierten Datenbereitstellung befähigt dieses Vorgehen weiter, da diese zu einer erhöhten Vergleichbarkeit der Daten führt, wodurch die nutzbare Datenmenge weiter steigt.

Die beschriebene Vorgehensweise der hybriden Modellierung entspricht vor diesem Hintergrund nur bedingt den in Kapitel 2.2 beschriebenen datenkombinierten Modellansätzen, die ebenfalls in den Geltungsbereich einer hybriden Modellstruktur fallen, allerdings in diesem Zusammenhang lediglich deterministische Modelle mit stochastischen Einflüssen verknüpft.

Das zugrundeliegende Potenzial übergreifend lernender hybrider Modellstrukturen zur Verbesserung und Generalisierung der Vorhersagegenauigkeit zeigt sich insbesondere an der Prozesskraftvorhersage von Zerspanprozessen, hier in der Fräsbearbeitung, Abbildung 11. Die Kraft nimmt innerhalb der spanenden Bearbeitung zur Bewertung und Optimierung von Prozessen eine Schlüsselrolle ein. Eine übergreifende Vorhersage und Rückführung auf ursächliche Phänomene eines Kraftanstiegs beispielweise ist daher zentrales Kernelement zum Aufdecken nachhaltiger Optimierungspotenziale.

Eine kontinuierliche Adaption von Verhaltensmodellen nach Kapitel 3.2 am Beispiel des Prozesskraftmodells nach Otto Kienzle ermöglicht durch die zusätzliche Betrachtung der bauteilübergreifenden Prozesshistorie und dem laufenden Zuführen real gemessener Prozesskräfte, zeitvariante Effekte innerhalb der Modellparameter abzubilden. Dennoch bestehen die Kienzle-Faktoren zu diesem Zeitpunkt aus Mischgrößen, die verschiedene Einflüsse innerhalb eines Parameters abbilden und somit nicht eindeutig einer Ursache zugeordnet werden können. Des Weiteren schließt das sich kontinuierlich parametrierende Kienzle-Modell lediglich einen Vorhersagefunktionsrahmen der aktuell geltenden Situation ein. Zusammenfassend wird über das Zuführen von Live-Daten im ersten Schritt lediglich ein Abgleich zwischen dem Kienzle-Modell als charakteristischer White-Box-Teil in der hybriden Struktur und den real gemessenen Prozesskräften erreicht. Über die Modell-Erweiterung auf Basis des Black-Box-Ansatzes werden ausschließlich bisher nicht betrachtete und innerhalb der Historie veränderliche Informationen verarbeitet und so von den Kienzle-Parametern entkoppelt, sodass eine saubere Trennung potenzieller Ursache-Wirk-Zusammenhänge stattfindet. Dadurch wird das zeitlich veränderliche Verhalten berücksichtigt und nach Art eines menschlichen Gehirns angelernt und gespeichert. Des Weiteren verarbeitet der Black-Box-Anteil in der hybriden Struktur Effekte, für die bislang keine voll parametrischen oder empirischen Herangehensweisen in Form von Prozessvorwissen auf Basis unbekannter Wechselwirkungen vorliegen. Daraus folgt die kontinuierliche Erschließung neuer Ursache-Wirk-Zusammenhänge.

Abbildung 12 zeigt exemplarisch den Vorteil des übergreifend lernenden hybriden Modellansatzes am Beispiel der Prozesskräfte für Fräsbearbeitungen. Die Adaption des Kienzle-Prozesskraftmodells nach dem Vorgehen aus Kapitel 3.2 (rote Kurve) zeigt bereits eine gute Übereinstimmung mit der gemessenen Prozesskraft (gelbe Kurve) für den Beispielprozess (dargestelltes Bauteil, rechte Seite). Aus Darstellungsgründen ist das empirische Prozesskraftmodell nach Kienzle statisch gemittelt, sodass der Einzelschnei-

deneingriff nicht abgebildet ist. Für die verschiedenen Fertigungsfeature werden aktualisierte bzw. adaptierte Modellparameter zur Vorhersage genutzt. Im Anschluss werden dem neuronalen Netz als Kern des vorgestellten Black-Box-Ansatzes nach Abbildung 11 kontinuierlich Trainingsdatensätze über verschiedene Fertigungsfeature und Prozesse zur Verfügung gestellt. Der Verlauf der Prozesskraft des hybriden Prozesskraftmodells (blaue Kurve) zeigt an den ausgewählten Stellen (Pfeilkennzeichnung) eine deutlich bessere Übereinstimmung als der rein adaptive Modellansatz. Einen weiteren Vorteil zeigt der übergreifend lernende hybride Modellansatz bei der Vorhersage von Störungen (Detailansicht unterer Plot): Der rein adaptive Ansatz ist nicht in der Lage, der gemessenen Prozesskraft zu folgen. Auch die Darstellung der Einzelschneideneingriffe im Kienzle-Modell ändert die getätigte Aussage nicht. Durch den in Teileinflüsse unterteilten kombinierten Black-Box-Anteil ist der Gesamtansatz in der Lage, die Störung in Form von Kraftschwingungen großer Amplitude abzubilden. Die Rückführung auf die Ursache ergibt schwingungstechnische Einflüsse der Struktur, die zu einem Werkzeugbruch geführt haben. Durch die Menge an Freiheitsgraden im hybriden Gesamtmodell im Vergleich zum adaptiven Modellanteil können diese Schwingungsphänomene stärker gewichtet werden, wodurch die Rückführung auf die Ursache leichter ist.

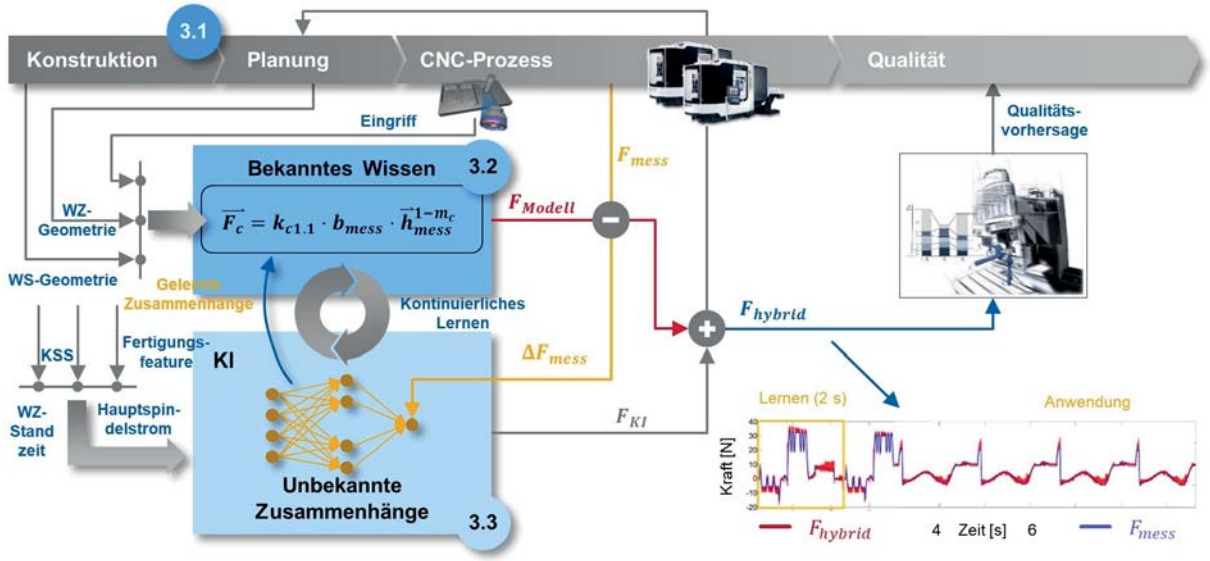



*Abbildung 11: Übergreifend lernender hybrider Modellansatz zur Vorhersage von Prozesskräften innerhalb der Fräsbearbeitung*

Aufbauend auf der sauberen Entkopplung verschiedener Ursache-Wirk-Effekte betrachtet der bisher beschriebene Ansatz die Transformation einer voll nichtparametrischen Herangehensweise innerhalb des Black-Box-Modells in einen erlernten Zusammenhang, das sog. *Empiric Learning*. Durch dieses Vorgehen steigt die Vorhersagegenauigkeit der Prozesskraft. Des Weiteren ist es möglich, Ursachen von Kraftveränderungen über die erlernten Zusammenhänge sofort zu detektieren. Kraftänderungen unterliegen dabei verschiedenen mehrdimensionalen Datenmustern, die die Rückführung auf eine konkrete Ursache, z. B. zunehmender Werkzeugverschleiß oder der in Abbildung 12 gezeigte Werkzeugbruch, befähigen. Ist diese Ursache identifiziert, kann über den zugrundeliegenden Black-Box-Ansatz als Teil des hybriden Modellansatzes der neue Verhaltenszusammenhang quantifiziert werden. Die so ermittelten quantifizierten Verhaltenszusammenhänge können aufgrund der eindeutigen Isolation als valides Feedback bzw. als Entscheidungsgrundlage zurückgespielt werden.

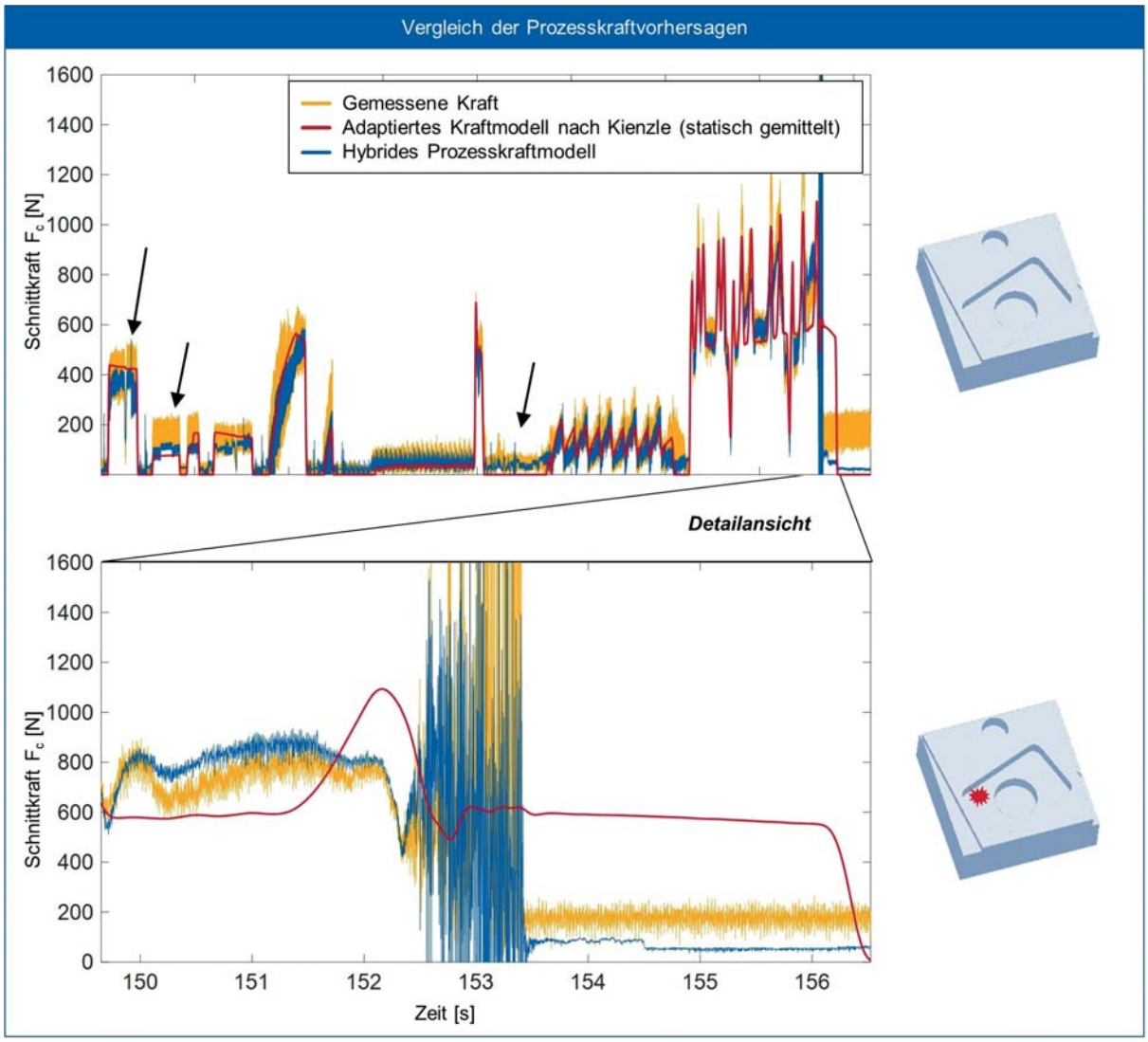



*Abbildung 12: Vergleich der Prozesskraftmodellansätze*

Darüber hinaus können Aussagen getroffen werden, wozu durch die Nutzenden selbst noch nicht einmal die entsprechende Frage gestellt wurde. Zukunftsfähige Produktionsanlagen stellen dem Menschen weiterführende Informationen zur Verfügung, die konkrete Entscheidung obliegt aber letztlich dem menschlichen Bewusstsein. Viele Informationsbausteine entziehen sich aber der menschlichen Kenntnisse bzw. sind in Gänze nicht mehr zu fassen. Vor diesem Hintergrund müssen die bestehenden Ansätze so erweitert werden, dass Entscheidungen getroffen oder zumindest Handlungsvorschläge automatisiert unterbreitet werden können.

***Ergebnis***

Das kontinuierliche Lernen neuer und Adaptieren bekannter Zusammenhänge befähigt langfristig den Aufbau einer umfassenden Wissensdatenbank. Mit dieser Methodik können innerhalb des Produktionsumfelds die größten Optimierungshebel in Hinblick auf die eingeführten FESG-Faktoren gefunden werden. Wie dieses Wissen bzw. diese Methodik in konkreten Anwendungsfällen zur Steigerung der Nachhaltigkeit bereits am WZL genutzt wird, zeigen die folgenden vier Anwendungsbeispiele. Ausgehend von der Betrachtung des Fertigungsprozesses über die Nutzung von Maschinenkomponenten bis hin zur

Bewertung der Gesamtmaschine werden alle am Produktionsprozess beteiligten Teilbereiche von Produktionsmaschinen abgebildet mit dem Ziel einer nachhaltigen Optimierung im Rahmen der FESG-Kategorisierung.

# 4 Ganzheitliche Produktivitätsoptimierung von Fertigungsprozessen

Das erste Anwendungsbeispiel fokussiert den Teilaspekt Finance (**F**) der in Kapitel 1 eingeführten **F**ESG-Faktoren zur Beschreibung des Nachhaltigkeitsbeitrags verschiedener Optimierungsstrategien. Der Teilbereich Finance (**F**) fokussiert unter anderem die Erhöhung der Gesamtanlageneffektivität (eng. Overall Equipment Effectiveness OEE). Der OEE-Kennwert setzt sich wiederum aus verschiedenen Teilfaktoren, unter anderem dem sog. Leistungsfaktor, zusammen, der sich unteranderem über die erreichte Stückzahl pro Stunde definiert. Daraus hat das WZL über den methodischen Ansatz aus Kapitel 3 die Notwendigkeit einer teilautomatischen Produktivitätssteigerung von Prozessen abgeleitet, die im Folgenden konkretisiert wird.

Über das in Kapitel 3.1 eingeführte Werkzeug des digitalen Schattens (Abbildung 8) können Prozesssegmente verschiedener Prozesse kategorisiert werden. Diese Segmente werden in folgende Klassen eingeteilt: Pfadsegmente ohne Materialeingriff, nichtkonturendrelevante Pfadsegmente, endkonturrelevante Pfadsegmente sowie endkonturrelevante Pfadsegmente mit Qualitätsbezug. Über den digitalen Schatten sowie die domänenübergreifende Dateninterpretation können diese Kategorien automatisch ermittelt werden. Für den zu analysierenden Prozess liegen jeweils NC-interne sowie teils externe Messdaten für die Achspositionen, die momentenbildenden Antriebsströme, die Drehzahl, die aktuellen NC-Sätze, das aktuelle Werkzeug sowie die dynamischen Prozesskräfte vor. Zusätzlich sind die reinen Prozessrohdaten mit den eingeführten Meta-Informationen aus Kapitel 3.2 verknüpft, wodurch innerhalb der Datenbankstruktur adaptiertes Wissen genutzt werden kann.

Die eigentliche Produktivitätssteigerung unterteilt sich nach der Pfadkategorisierung in zwei Schritte: Die Prozessanalyse und –optimierung systematischer Prozesspotenziale. Die Prozessanalyse sucht in den zur Verfügung gestellten Prozess- und Metadaten in jeder Kategorie nach den Operationen mit dem größten Optimierungspotenzial bzw. –hebel. Dieser Hebel setzt sich zum einen aus dem Zeitanteil der Operation sowie zum anderen aus dessen Einsparpotenzial zusammen. Dabei wird der Zeitanteil je Operation automatisch auf Basis der Zeitreihendaten aus den Sensoren berechnet mit dem Ziel, diesen potenziell zu minimieren. Zur Ermittlung des Einsparpotenzials wird durch die jeweiligen Expertinnen und Experten eine Untersuchungsgröße sowie Regel, beispielsweise die Detektion möglicher Abweichungen der Untersuchungsgröße, definiert. Im Anschluss können die Zeitanteile einer Verletzung der Untersuchungsgröße ermittelt und gewichtet werden. Durch den Zugriff über aufgezeichnete Meta-Informationen auf adaptiertes Modellwissen können ebenfalls veredelte Größen, z. B. gefittete Kraftparameter, und Regeln, z. B. die Abweichungen dieser Parameter, zur ganzheitlichen Untersuchung des Prozesses auf das Einsparpotenzial verwendet werden. Im Nachgang der Analyse werden die Operationen mit den größten Produktivitätseinsparpotenzialen kategorisiert gespeichert und der Optimierung zur Verfügung gestellt. Die Optimierung nutzt dabei die Informationen aus den Regeln und Untersuchungsgrößen zur Ermittlung des Einsparpotenzials. Ziel der Optimierung ist das Umsetzen des in der Analyse ermittelten Einsparpotenzials.

Aus diesem Vorgehen hat sich ein sog. Smart Expert entwickelt, der in der Lage ist, automatische Vorschläge zur Optimierung des Prozesses nach definierter Zielgröße und unter Einhaltung von Randbedingungen, z. B. die geforderte Qualität, abzuleiten, Abbildung 14. Dabei führt das domänenübergreifende Wissen zum Einbeziehen aller Parameter, die sich auf die Zielgröße, hier die Produktivitätssteigerung, auswirken.

Am Beispiel der automatischen Optimierung endkonturrelevanter Pfadsegmente an einer Demonstrationsbearbeitung wird der oben geschilderte Anwendungsfall der teilautomatisierten Produktivitätssteigerung im Detail erläutert. Die automatische Pfadkategorisierung hat neben Einsparpotenzialen für die Werkzeugbewegungen ohne Materialeingriff (Freifahrbewegungen, An- und Abfahrbewegungen sowie Transferbewegungen) Potenziale von endkonturrelevanten Segmenten mit Qualitätsbezug detektiert, Abbildung 13 links unten.

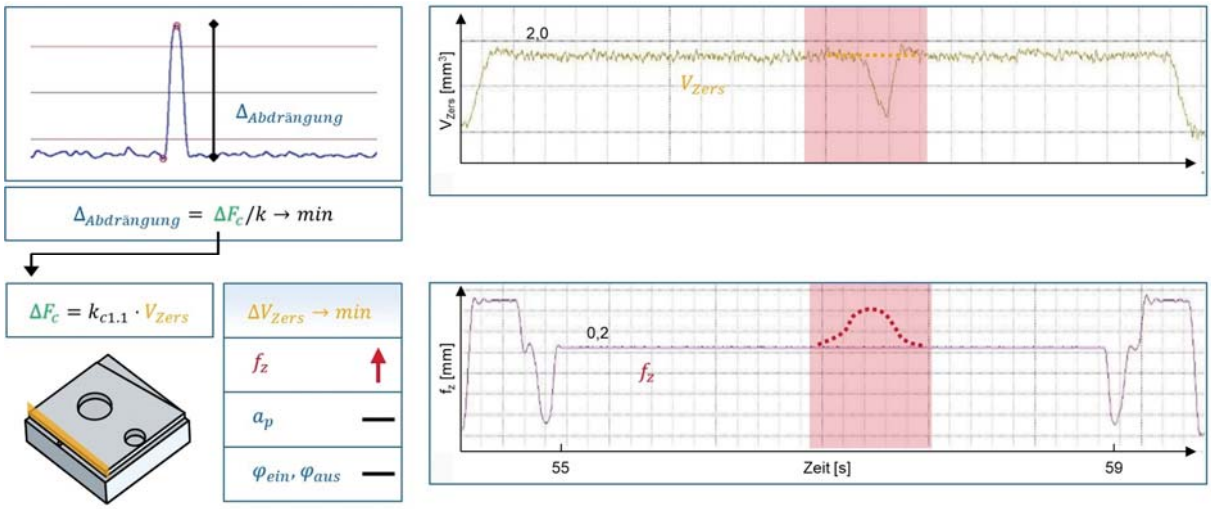



*Abbildung 13: Smart Expert am Beispiel der Vorschuboptimierung von identifizierten Störstellen im Prozess*

Das untersuchte Pfadsegment zerspant mittels Schaftfräser eine Flanke und erfordert an der Flankenseite eine tolerierte Geradheit. Über den digitalen Schatten und der Möglichkeit der virtuellen Vermessung kann dieses Qualitätsfeature an der Flanke überprüft werden, Abbildung 13 links oben. Das Ergebnis zeigt eine Abweichung der geforderten Qualität in unmittelbarer Umgebung der Bohrungsposition. Einfluss auf die Qualität haben dabei unter anderem geometrische Ungenauigkeiten der Maschine sowie kraftbedingte Abweichungen des Werkzeugs, welcher hier den Hauptanteil der Abdrängung bildet. Als Untersuchungsgröße stehen über die Modelldatenbank adaptierte Kraftmodelle zur Verfügung, die auf mögliche kraftänderungsbedingte Einflussgrößen zurückrechnen können. In unmittelbarer Umgebung zur gefertigten Flanke werden im Anschluss mögliche Unregelmäßigkeiten in den für den Modelleingang relevanten aufgezeichneten Messdaten untersucht. Die ermittelten Zeitreihenanteile der gemessenen Modelleingangsparameter weisen in der Nähe zur Bohrung ebenfalls Unregelmäßigkeiten auf, hier unter anderem im dargestellten Zerspanvolumen über der Zeit, Abbildung 13 rechts oben. Der Vorschub $f_z$ als direkt mit der Kraft zusammenhängende Größe weist dagegen einen stabilen Verlauf vor, was darauf schließen lässt, dass die seitliche Zustellung $a_e$ Ursache der aufgetretenen Anomalie ist.

Die kraftbedingte Abdrängung des Werkzeugs kann über das adaptierte Modelwissen zum statischen Maschinenverlagerungsverhalten auf die ursächlichen Eingangsparameter zurückgerechnet werden. Im Anschluss besteht daher die Möglichkeit, die Erhöhung des Vorschubs, die für eine Einhaltung der geforderten Qualität notwendig ist, quantitativ zu ermitteln. Das Beispiel zeigt, dass aus der Untersuchungsgröße der Qualitätsabweichung im zweiten Schritt über den Zugang zu adaptierten Prozesskraftmodellen eine produktivitätssteigernde Maßnahme abgeleitet werden konnte, ein Vorteil der domänenübergreifenden Daten- und Modellbereitstellung.

Der übergreifend lernende hybride Modellansatz erweitert in Zukunft das hier vorgestellte Beispiel zur ganzheitlichen Produktivitätssteigerung um das Ermitteln nachhaltiger Optimierungspotenziale, Abbildung 14. In Kombination mit einem Feedback aus der Werkstattebene mittels der Expertise des Fachpersonals können die durch die Analyse ermittelten Optimierungshebel gewichtet und kontinuierlich erweitert werden.

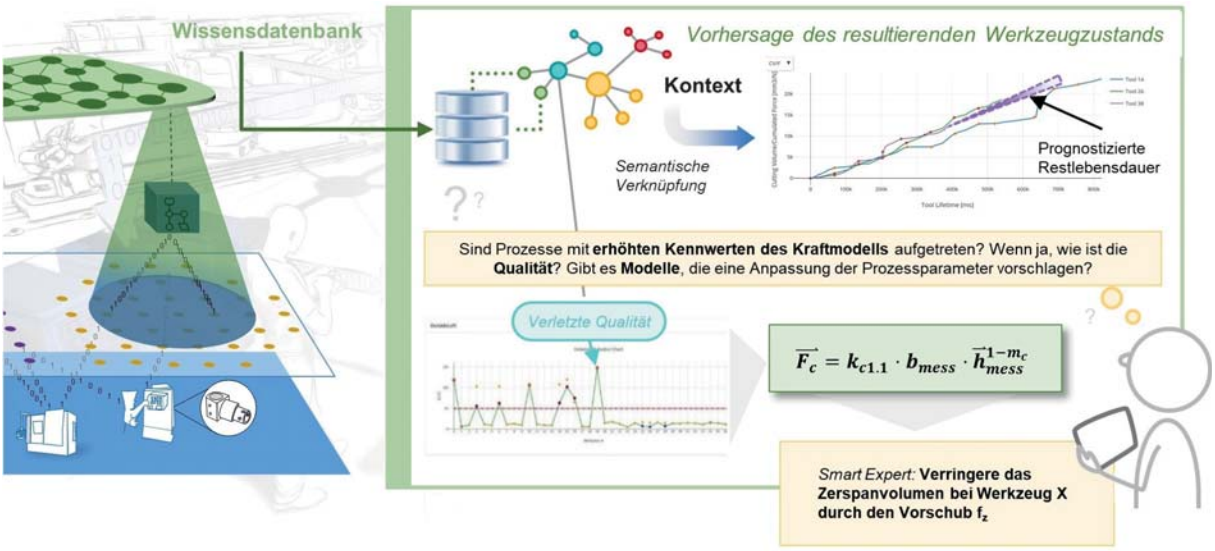



*Abbildung 14: Smart Expert als Grundlage automatischer Optimierungsentscheidungen*

Über das damit verbundene kontinuierliche Erweitern von Optimierungsmodellen sowie deren semantische Beziehung zueinander besteht die Möglichkeit, verschiedene Zielgrößen gegeneinander abzuwägen. So können über den hier vorgestellten Anwendungsansatz ganzheitliche Produktivitätspotenziale zur Zeiteinsparung bei Fertigungsprozessen ermittelt werden. Über das aufgebaute Wissen zum Verschleißverhalten von Werkzeugen bilden sich Schnittmengen von Einflussgrößen auf verschiedene Zielgrößen zur Steigerung der Nachhaltigkeit. So ist es zum einen Ziel, die Prozesszeit zu minimieren und damit den Leistungsfaktor innerhalb des OEE-Kennwerts zu maximieren. Zum anderen ist es Ziel, Werkzeuge effizienter und somit ressourcenschonender zu nutzen. Diese gegenläufigen Effekte sowie deren Hebel auf die Steigerung der Nachhaltigkeit können innerhalb des ganzheitlichen Modellierungsansatzes ermittelt und untersucht werden. Aus diesem Grund zeigt Kapitel 5 die Ermittlung des sog. *Verschleißimpacts* von Bearbeitungen, wodurch Werkzeuge effizienter genutzt und gleichzeitig ressourcenschonender ausgewählt werden können.

# 5 Ressourcenschonende und plattformübergreifende Nutzung von Werkzeugen

Die Produktivitätssteigerung einzelner Fertigungsprozesse in Verbindung mit dem über historische Prozessinformationen aufgebauten Wissen ist ein direkt messbarer Effekt zur Erhöhung der OEE und fällt damit in den Bereich Finance (**F**) innerhalb der eingeführten **F**ESG-Faktoren. Eine einfache Vorschuboptimierung beim Schruppprozess zur Reduzierung der Prozesszeit führt zwar zur Erhöhung der OEE, aber in der Regel auch zur Steigerung der Werkzeugbelastung. Die Ermittlung der Auswirkung dieser oder ähnlicher Effekte auf die Gesamtlebensdauer sowie den aktuellen Zustand der Werkzeuge ist daher ein elementares Ziel. Aus diesem Grund sind nicht direkt messbare Effekte mit ihrem Einfluss auf eine erhöhte Nachhaltigkeit wichtige zusätzliche Informationen, die im Rahmen der vorgestellten Methodik gelöst werden können. Im Kontext der Nutzung von Werkzeugen sind immer wieder gleiche Fragestellungen aus dem industriellen Umfeld auffallend:

- Wie ist der aktuelle Zustand des Werkzeugs?
- Reicht die Restlebensdauer des Werkzeugs für die geplante Bearbeitung aus?
- Welchem Verschleißtyp unterliegt bei konkreter Bearbeitung das Werkzeug?
- Wann steht der optimale Werkzeugwechselzeitpunkt an?

Die Beantwortung dieser Fragen ist daher zentraler Bestandteil der vorgestellten Methodik. Ist man in der Lage, die Antworten auf diese Fragen zu generieren, können Werkzeuge ressourceneffizient bzw. ressourcenschonend verwendet werden, woraus sich ein direkter Nachhaltigkeitsbeitrag innerhalb der Kategorie **E** der F**E**SG-Faktoren ableitet.

Die Funktionalität der kontinuierlichen Datenverfügbarkeit aus den Fertigungsprozessen verschiedener Produktionsanlagen befähigt die übergreifende Verfolgung von Produktionsmitteln, wie z. B. das am Fertigungsprozess beteiligte Werkzeug. Daraus lässt sich ein digitaler Werkzeugschatten ableiten, der neben den Meta-Informationen (eingesetzte Maschine, eingesetzter Prozess, bearbeitete geometrische Feature, Werkzeug-Geometrie, Anzahl der Schneiden, Werkstoff etc.) auch deren Verwendung in Form sog. Belastungsindikatoren aufzeichnet. Durch diese Kombination ist man in der Lage, auf Basis der gesehenen Belastungen pro Werkzeug sowie deren Einsatzart Restlebensdauern sowie Verschleißtypen langfristig zu klassifizieren.

Dazu werden in einem ersten Schritt neben der domänenübergreifenden Datenverfügbarkeit für das Werkzeug die Belastungsindikatoren des Werkzeugs definiert. Von Interesse ist sowohl die Höhe sowie die Zone der Belastung beim aktuellen Werkzeug. Über die automatisch angelegten Meta-Informationen kann jedes Bearbeitungsfeature über folgende Größen eindeutig beschrieben werden:

- Makroskopische Schnittbreite $a_p$
- Makroskopische Schnitttiefe $a_e$
- Schneidenein- und Austrittswinkel $\varphi_{ein}$ / $\varphi_{aus}$
- Entsprechend adaptiertes Kraftmodell für den nicht verschlissenen Zustand
- Geometrische Beschreibung des Werkzeugs

Der Belastungsindikator wird im Anschluss durch die Verfügbarkeit der Fertigungsprozessdaten aus der NC sowie aus der externen spindelintegrierten Kraftsensorik nach der in Kapitel 3.2 beschriebenen Methodik kontinuierlich für den aktuellen Zustand und die aktuelle Bearbeitung ermittelt. Damit definiert sich der Belastungsindikator als Kumulation der Veränderung der Modellparameter des Kienzle-Kraftmodells. Dank der zugrundeliegenden Meta-Informationen ist ein Mapping dieses Belastungsindikators auf das jeweilige Bearbeitungs-Feature möglich. Als Folge lassen sich sog. *Verschleißimpacts* für jedes Bearbeitungsfeature ableiten, die den relativen Zuwachs des kumulierten Belastungsindikators für eine entsprechende Bearbeitung über den Einsatz des Werkzeugs auftragen, Abbildung 15 unterer Plot. Dabei stellen die einzelnen Punkte im Plot den Start eines neuen Prozesses dar.

Über die gewonnene Aufschlüsselung lässt sich der relative Anteil an Verschleißzuwachs verschiedener Bearbeitungssituationen entlang des Prozesses charakterisieren. Der Belastungsindikator unterliegt dabei sowohl positiven als auch negativen Kumulationsverläufen. Grund dafür sind die möglichen Verschleißmechanismen einer Bearbeitung. Des Weiteren sind Werkzeuge durch die hohe Bauteil- und Prozessdiversität unterschiedlichen Belastungsreihenfolgen und damit auch verschiedenen Verschleißmechanismen ausgesetzt.

In einem ersten Schritt ist es daher wichtig, vergleichbare und übergreifende Belastungsindikatoren für das Werkzeug zu definieren sowie deren Veränderungscharakter bezogen auf das jeweils gesehene Bearbeitungsfeature abbilden zu können. Die damit geschaffene Vergleichbarkeit von Werkzeugen führt zu einer erhöhten Datenverfügbarkeit für ganzheitliche Werkzeugverschleißstudien, wodurch ideale Wechselpunkte bzw. Restlebensdauern bei geplanter Bearbeitung abgeleitet werden können.

In einem zweiten Schritt werden daher sog. Zustandsindikatoren definiert, die den aktuellen Zustand eines Werkzeugs unabhängig von seiner Belastungshistorie beschreiben. Diese Zustandsindikatoren sind zum einen die Beschreibung des vorherrschenden Verschleißmechanismus sowie die messbare Verschleißgröße, z. B. die Verschleißmarkenbreite (VB). In der industriellen Fertigung werden solch quantitative Größen wie die Verschleißmarkenbreite nicht zwangsläufig kontinuierlich bestimmt. Hier wird in der Regel die Erfahrung des Fachpersonals zur Bestimmung des aktuellen Zustands des Werkzeugs genutzt. Auch diese lässt sich mit modernen Ansätzen in ihrer Charakterisierung eindeutig beschreiben [18].

Die Verfügbarkeit von Belastungs- und Zustandsindikatoren wird im Anschluss prozessübergreifend als Eingang für den KI-basierten Teil des hybriden Modellansatzes genutzt. Langfristig lässt sich mittels der lernenden Methodik der Einfluss verschiedener Bearbeitungsarten und –reihenfolgen auf den Verschleißmechanismus und –zustand ermitteln. Des Weiteren besteht zudem die Möglichkeit, diesen Prozess durch eine plattformübergreifende Kooperation mit der Expertise der Werkzeugherstellerfirma zu beschleunigen. In der Regel stehen bei produzierenden Unternehmen von Werkzeugen eine Vielzahl von Versuchs- und Verschleißdaten für die jeweiligen Werkzeuge zur Verfügung. Die in der eigenen Fertigung entstehenden Nutzungsdaten in Form der eingeführten Terminologie können mit diesen Daten abgeglichen werden, sodass die gesuchten Zielgrößen schneller und genau ermittelt werden können. Dadurch entsteht die Grundlage, Prozesse in Zukunft sowohl verschleiß- als auch produktivitätsoptimiert auszulegen. Durch das Aufschlüsseln der zur Verfügung stehenden eingeführten Kennwerte auf das jeweilige Bearbeitungsfeature können Fertigungszeiten und die Auswirkungen auf die Restlebensdauer gegeneinander abgewägt werden. Diese Art der plattformübergreifenden digitalen Ko-

operation muss in einem rechtlich geregelten Ökosystem stattfinden. Fragen unter anderem zur Haftung, zum Geschäftsrahmen, zum Umgang und Schutz vor Cyberkriminalität müssen im Vorfeld beantwortet werden, sodass unter den definierten Regeln der Mehrwert für alle Teilnehmenden erreicht werden kann. Der regelnde Rahmen trägt ebenfalls in Form der Bereiche Social (**S**) und Governance (**G**) in den FE**SG**-Faktoren zu einer nachhaltigen Gesamtproduktion bei.

Der hier vorgestellte Ansatz der digitalen Werkzeugverfolgung sowie Zustandscharakterisierung zum Ableiten der Restlebensdauer und der optimalen Werkzeugwechselzeitpunkte ist in Kooperation mit einem Partnerunternehmen aus der Industrie auf Werkstattebene umgesetzt und getestet worden, Abbildung 15.

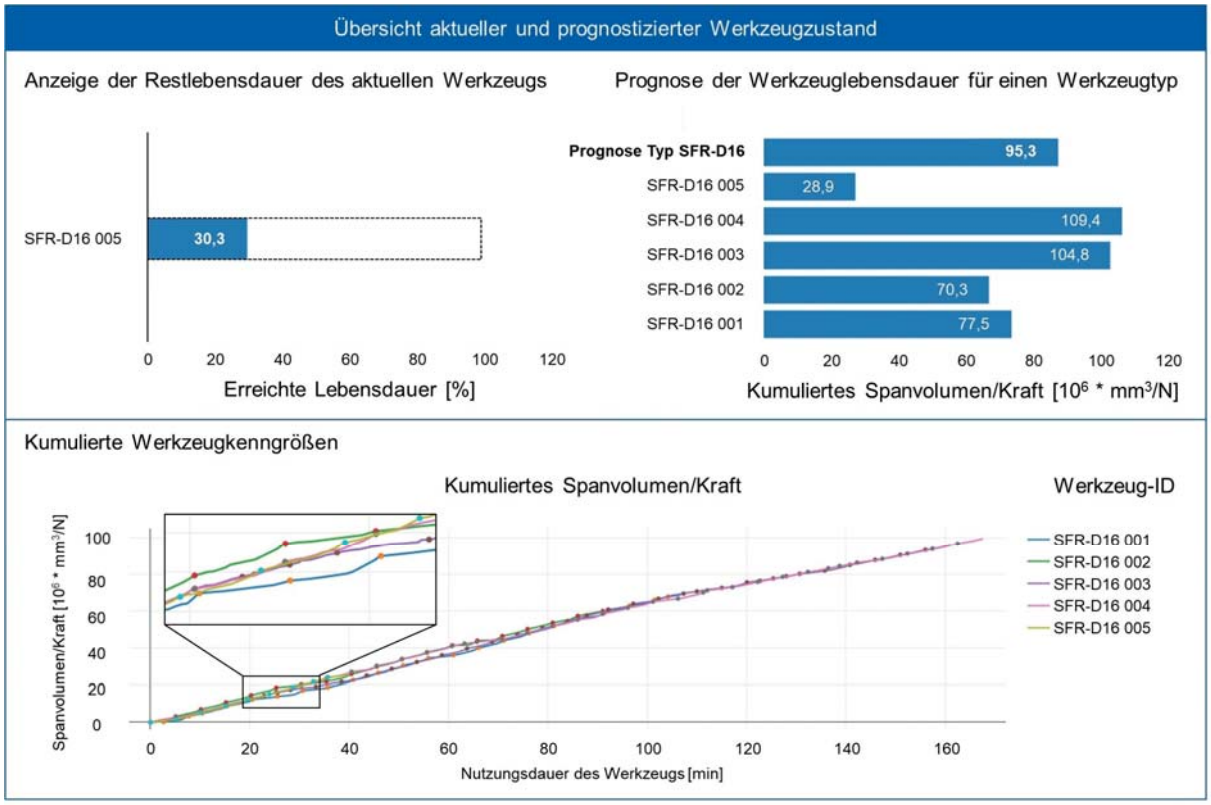



*Abbildung 15: Monitoring der historischen Werkzeugbelastung und der Ermittlung der Restlebensdauer*

Der obere Bereich der Abbildung enthält zwei Übersichtsanzeigen zur Anzeige und Prognose von Lebensdauern eingesetzter Werkzeuge. Die rechte Anzeige stellt werkzeugübergreifend auf Basis der definierten Indikatoren, die für jedes eingesetzte Werkzeug automatisch ermittelt werden, die prognostizierte Gesamtlebensdauer über einem ausgewählten Belastungsindikator, hier das kumulierte Spanvolumen über der Kraft, dar. In die Prognose fließt neben den Indikatoren die Information ein, wann das jeweilige Werkzeug vom Fachpersonal aus dem Betrieb genommen wurde, wodurch dieses Fachwissen auf Werkstattebene in der Vorhersage berücksichtigt wird. Der Prognosewert wird mit jedem gefertigten Bearbeitungsfeature angepasst, wodurch die Vorhersagegenauigkeit mit zunehmender Datenbasis steigt. Unterhalb des Prognosewerts werden die aktuellen Zustände der einzelnen Werkzeuge aufgelistet. Für das aktuelle Werkzeug wird die erreichte Lebensdauer auf der linken Seite komprimiert dargestellt. Des Weiteren können die Veränderungen der Zustandsindikatoren für jedes Werkzeug prozessübergreifend

dargestellt werden, sodass der *Verschleißimpact* des jeweiligen Bearbeitungsfeature abgeleitet werden kann, Abbildung 15 unten. Die einzelnen Punkte definieren jeweils den Beginn bzw. das Ende eines Bearbeitungsfeature.

Mit steigender Datenbasis und der damit verbundenen Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit werden in Zukunft zu erwartende Restlebensdauern ermittelt, die auf Basis der geplanten Bearbeitung das zu erwartende Verschleißverhalten prognostizieren. Mittels der ersten Umsetzung beim Industriepartner konnten über die direkte Aufbereitung und Visualisierung der prozessübergreifenden Werkzeugzustände Werkzeuge effizienter und somit ressourcenschonender genutzt werden.

## 6 Erhöhung der Verfügbarkeit über Condition Monitoring von Kugelgewindetrieben

Neben der Qualität und Produktivität nimmt auch die Verfügbarkeit von Produktionsmitteln eine entscheidende Rolle im Produktionsprozess und damit in nachhaltigen Produktionsanlagen ein. Für eine ausbalancierte Lösung zwischen diesen sich gegenseitig beeinflussenden Größen ist die Lösung eines Zielkonflikts und damit eines multikriteriellen Optimierungsproblems notwendig. Hierzu müssen die Wechselwirkungen zwischen Qualität, Produktivität und Verfügbarkeit einerseits abgebildet und durch ein genaues Anlagen- und Prozessverständnis tiefgreifend verstanden werden [10].

Unternehmen stehen reaktive, periodische und zustandsbasierte Instandhaltungsstrategien zur Verfügung, Abbildung 16. Bei der reaktiven Instandhaltung werden Maschinenkomponenten bis zum Ausfall betrieben. Hierdurch ergibt sich eine gute Nutzung des Restgebrauchsvorrats wartungsintensiver Komponenten. Nachteilig wirken sich die in der Regel langen Ausfallzeiten, die schlechte Planbarkeit des Ausfallzeitpunktes und die ggfs. reduzierte Qualität produzierter Bauteile aus. Bei der Instandhaltung nach festen Zeitintervallen (vorbeugende Instandhaltung) können diese Nachteile umgangen werden. Aus wirtschaftlicher Sicht ist jedoch mit hohen Kosten für zu ersetzende Komponenten zu rechnen, da der Restgebrauchsvorrat dieser Komponenten in der Regel nicht vollständig ausgenutzt wird. Die periodische Instandhaltung ist besonders dann sinnvoll, wenn das Komponentenausfallverhalten durch Erfahrungswissen oder Modelle genau beschrieben werden kann [19].

Bei der zustandsorientierten Instandhaltung wird der Restgebrauchsvorrat der zu wartenden Komponenten nahezu vollständig ausgenutzt, indem Instandhaltungsmaßnahmen auf Basis von Zustandsinformationen geplant werden. Hierzu wird der Komponentenzustand häufig auf Basis externer Sensorik erfasst und in der Instandhaltungsplanung verarbeitet. Nachteilig zeigt sich die meist notwendige externe Sensorik sowie, abhängig von der Qualität des verwendeten Modells, eine gewisse Unschärfe in der Vorhersage der verbleibenden Restgebrauchsdauer [19, 20].

Das Ergebnis mehrerer wissenschaftlicher Untersuchungen ist, dass eine reduzierte Verfügbarkeit von Werkzeugmaschinen häufig auf deren Vorschubachsen (Kugelgewindetriebe und Linearführungen) sowie Hauptspindeln zurückzuführen ist. Aufgrund des durch diese Komponenten verlaufenden Kraftflusses ist die Belastung und damit die Lebensdauer der verbauten Komponenten von der Produktivität der Gesamtmaschine abhängig (hohe Inertial- und Prozesskräfte), wodurch der Zielkonflikt zwischen Verfügbarkeit und Produktivität begründet wird [21, 22].

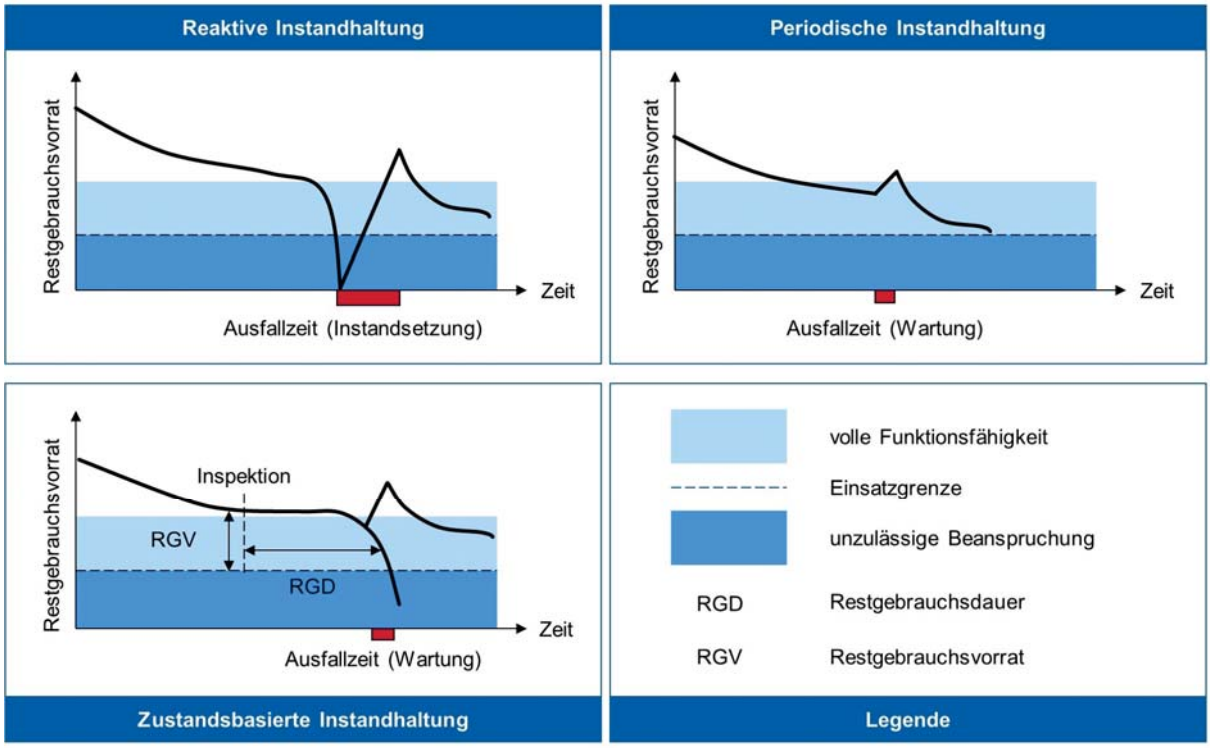



*Abbildung 16: Etablierte Instandhaltungsstrategien nach [20]*

Aufgrund der hohen Relevanz des Kugelgewindetriebs (KGT) für die Verfügbarkeit von Werkzeugmaschinen wird im Folgenden das Konzept eines kontinuierlich lernenden Lebensdauermodells für die Instandhaltungsplanung am Beispiel dieser Maschinenkomponente hergeleitet.

***Erweiterung bisheriger Lebensdaueransätze auf Basis kontinuierlich parametrierender Modelle***

Herstellerangaben und Normungstexte liefern Ansätze zur Abschätzung der Lebensdauer von KGT. Aus dem Verhältnis von Tragzahl $C_a$, die aus Geometrie- und Werkstoffparametern berechnet wird, sowie der äquivalenten dynamischen axialen Belastung $F_m$ wird eine Lebensdauer $L$ in Umdrehungen bzw. Betriebsstunden berechnet:

$$L = \left(\frac{C_a}{F_m}\right)^3 \cdot 10^6$$

Die Berechnung der äquivalenten dynamischen axialen Belastung basiert dabei auf bei der Auslegung der Vorschubachse angenommenen Lastkollektiven, die, insbesondere in der Kleinserienfertigung, von der realen Belastung deutlich abweichen können. Zusätzlich werden bei der oben genannten Lebensdauerberechnung einige Einflussgrößen vernachlässigt oder vereinfacht. Auf Basis von Korrekturfaktoren, die aus Erfahrungswerten stammen, berücksichtigen einige Herstellerunternehmen von Komponenten fehlende Einflussgrößen in der Berechnungsmethodik auf Basis der von den Anwendenden erstellten Nutzungsangaben. Neben Erfahrungswerten stehen zusätzlich erweiterte Ermüdungsmodelle zur Verfügung, die eine Berücksichtigung individueller Nutzungsprofile erlauben [23]. Eine genaue Abbildung der Realität kann jedoch unter anderem aufgrund fehlender Live-Informationen der tatsächlichen Belastungskollektive im Produktivbetrieb nicht im Vorfeld erfolgen, wodurch die Planung von Instandhaltungstätigkeiten erschwert

wird. An Demonstratoren des Werkzeugmaschinenlabors WZL wird die berechnete Lebensdauer kontinuierlich auf Basis von Historiendaten aus steuerungsinternen Messsystemen aktualisiert. Neben der Auswertung von zurückliegenden Belastungen wurde auch eine Prognose der Restlebensdauer umgesetzt. Hierzu wird die äquivalente dynamische Belastung beispielsweise des letzten Bauteils, des letzten Tages oder des vergangenen Monats herangezogen.

Neben Vereinfachungen in der Lebensdauerberechnung nach DIN ISO 3408-5, die beispielsweise das Fahrprofil oder vorliegende Montageabweichungen unberücksichtigt lässt, muss im industriellen Umfeld zusätzlich zwischen der Lebensdauer und Gebrauchsdauer verwendeter Komponenten unterschieden werden. Erstgenannte bezieht sich lediglich auf den Schadensfall der Ermüdung. In realen Anwendungen liegen jedoch überlagerte Schadensformen bzw. -einflüsse vor, sodass Komponenten mit Wälzkontakten häufig schon vor dem Erreichen der Ermüdungslebensdauer ersetzt werden müssen. Ergebnisse einer Studie des WZL zeigen, dass dies häufig durch eindringende Verschmutzung und dem daraus folgenden abrasiven Verschleiß zu begründen ist. Die mit dieser Verschleißform einhergehende Steifigkeitsreduzierung folgt aus veränderten Kugel- und Laufbahnradien. In einem ersten Stadium kann dieser Effekt durch die Lageregelung der Werkzeugmaschine in Kombination mit einem direkten Wegmesssystem ausgeglichen werden. Im weiteren Verlauf, insbesondere wenn ein Umkehrspiel resultiert, werden Instandhaltungsmaßnahmen notwendig [24].

Die Berücksichtigung weiterer Schadenseinflüsse, die über Ermüdungsschäden hinausgehen, nimmt in der Planung von Wartungsmaßnahmen eine entscheidende Rolle ein. Da einige Einflussgrößen, wie die eingebrachte Verschmutzung, stochastischen Verteilungen unterliegen, ist eine Prognose von Instandhaltungszeitpunkten auf alleiniger Basis von Lastindikatoren mit großen Unsicherheiten verbunden.

Für eine erhöhte Vorhersagequalität werden am Werkzeugmaschinenlabor empirische Verschleiß- und Ermüdungsmodelle entwickelt, die weitere Einflussgrößen abbilden als es die Berechnungsmethode nach dem Stand der Technik erlaubt. Zusätzlich erfolgt die Adaption dieser Modelle durch das Zurückspielen von Last- und Zustandsinformationen aus dem Produktionsprozess, woraus ein lernender Modell-Ansatz resultiert, Abbildung 17. Die hierzu notwendigen Zustandsinformationen der Komponenten von Vorschubachsen werden mit Hilfe von Referenzfahrten gewonnen. Es werden Parameter wie der Motorstrom oder die Differenz des direkten und indirekten Wegmesssystems genutzt, die während definierter Fahrbewegungen der Maschinenachsen aufgenommen werden. Die Berücksichtigung des Komponentenzustands in der Berechnung der Restgebrauchsdauer und die damit einhergehende Instandhaltungsplanung ermöglicht somit die Berücksichtigung kombinierter Schadensarten von Maschinenkomponenten. Aufgrund der vielfältigen Zusammenhänge von Eingangsgrößen, die neben den Last- und Zustands-Indikatoren auch Konstruktionsparameter der Kugelgewindetriebe umfassen, und der Ausgangsgröße Restlebensdauer ist ein rein datengetriebener Ansatz nicht zielführend. Daher wird das lernende Lebensdauermodell mit einem physikalischen Modell, das bereits bekannte und gut erforschte Schadensmechanismen beschreibt, in Form einer hybriden Modellstruktur gekoppelt. Hierzu wird das vorhandene Ermüdungsmodell für Kugelgewindetriebe nach [25], das auf den Arbeiten von Lundberg und Palmgreen aufbaut, genutzt und erweitert.

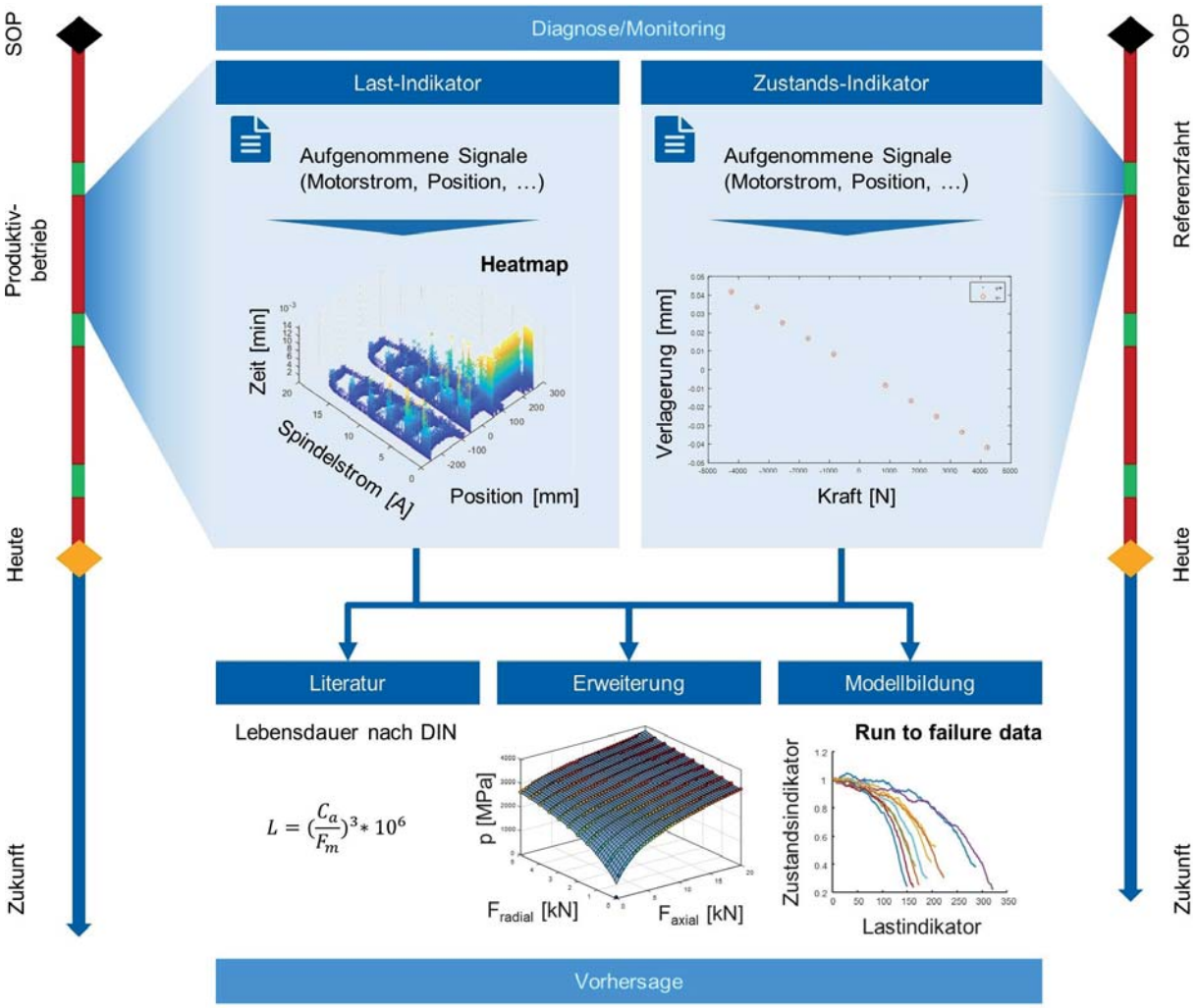



*Abbildung 17: Ansatz zur Modelladaption am Beispiel von Kugelgewindetrieben*

Herstellerangaben zufolge sind Kugelgewindetriebe lediglich in axialer Richtung zu belasten. Aktuelle Berechnungsgrundlagen basieren auf der Annahme, dass Moment- oder Radialbelastungen vollständig durch steife, parallel zum KGT verbauten Linearführungen aufgenommen werden, sodass mehrachsige Belastungen keinen Eingang in die Berechnung der Restlebensdauer finden. Im Bereich der Werkzeugmaschinen treten die beschriebenen Zusatzlasten jedoch insbesondere aufgrund von Montageabweichungen zwischen Führungen und KGT auf. Aufgrund der hohen Steifigkeit des Führungssystems führen schon geringe Abweichungen zu hohen Zwangskräften, woraus eine stark variierende innere Lastverteilung resultiert. Zusätzlich werden, abhängig vom zurückgelegten Fahrprofil, verschiedene Spindelbereiche unterschiedlich stark belastet, was zu einer ungleichmäßigen Nutzung des Verschleißvorrats über der Spindellänge führt.

Am WZL wurde deshalb eine Erweiterung der vorhandenen Lebensdauertheorie entwickelt, die die Berechnung einer ortsaufgelösten Ermüdungslebensdauer ermöglicht und ergänzend Zusatzlasten berücksichtigt. Abbildung 18 verdeutlicht das Vorgehen zur Überführung eines Bewegungs- und Lastprofils aus der realen Fertigung mit wechselnden Bearbeitungsoperationen (oben) in eine orts- und lastaufgelöste Matrixschreibweise (unten), wobei die interne Lastverteilung des Kugelgewindetriebs eine weitere Eingangsgröße darstellt [26]. Die Matrizen werden für beide Flankenseiten von Spindel und Mutter erstellt, indem beide Komponenten in Bereiche segmentiert werden, deren Länge dem in

Achsrichtung projizierten Kugelabstand entsprechen. Mittels Farbskala wird die Anzahl der Lastwechsel segment- und kraftaufgelöst dargestellt. Die abschließende Berücksichtigung von Werkstoffparametern ermöglicht die Berechnung der nutzungsorientierten Ermüdungslebensdauer einzelner Laufbahnen sowie des gesamten Kugelgewindetriebs unter Zuhilfenahme stochastischer Methoden [23].

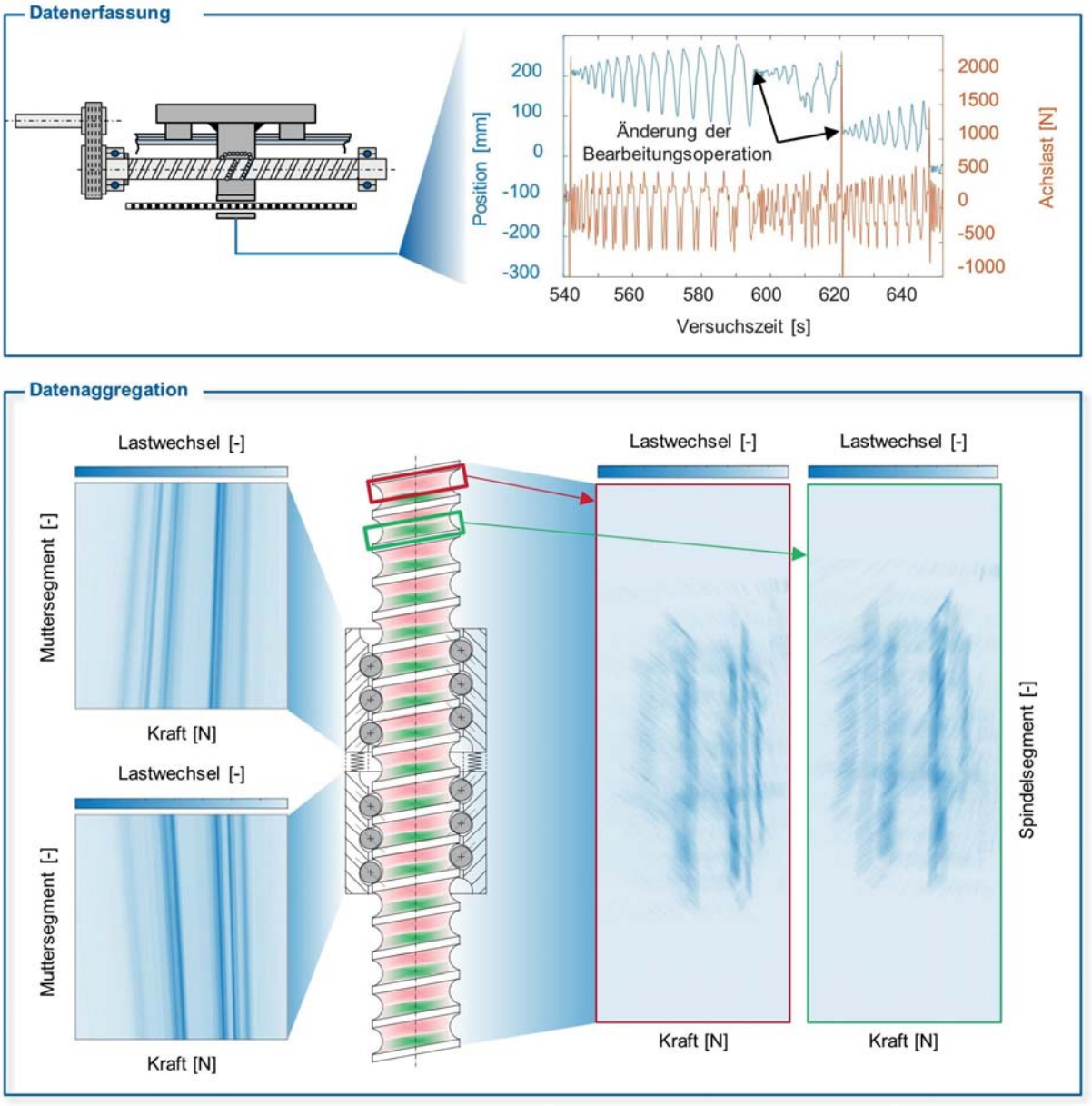



*Abbildung 18: Überführung einer Zeitreihe in eine orts- und lastaufgelöste Matrixschreibweise [23]*

Für die effiziente Anwendung dieser Erweiterung muss das beschriebene physikalische Modell in Kombination mit dem lernenden Lebensdauermodell in eine hybride Modellstruktur überführt werden. In einem aktuellen Forschungsansatz werden die beschriebenen Erweiterungen sowohl in Prüfstandsversuchen als auch im Feld validiert und finden insbesondere bei Einzelteil- und Kleinserien Anwendung. Weiterhin wird die Methode in der Auslegung von Kugelgewindetrieben in alternativen Anwendungen wie dem KFZ-Lenkgetriebe, in denen auf parallel angeordnete Führungen verzichtet wird und damit stark schwankende Lastverteilungen in Kauf genommen werden, eingesetzt.

### *Maschinenübergreifende Datenerfassung als Grundlage lernender Modelle zur Lebensdauerschätzung*

Komponenten von Vorschubachsen werden in der Regel für eine Betriebszeit von ca. 20.000 h ausgelegt. Für den Aufbau eines zuverlässigen Lebensdauermodells, das unter Berücksichtigung verschiedener Versagensarten eine Prognose der Restlebensdauer von Maschinenkomponenten erstellt, wird eine Vielzahl von Trainingsdaten benötigt. Da ein derart hoher Versuchsaufwand weder unter wirtschaftlichen noch nachhaltigen Gesichtspunkten sinnvoll umsetzbar ist, wird die notwendige Datenmenge durch die Nutzung bekannter Ursache-Wirk-Zusammenhänge reduziert, während die zugrundeliegende Datengrundlage auf Basis der Informationsabstrahierung erhöht wird. Am Beispiel des KGT befähigt dieses Vorgehen die produktions- und maschinenintegrierte Versuchsdurchführung. Hierzu werden steuerungsinterne Daten von Werkzeugmaschinen im Produktionsbetrieb sowie auf Basis durchgeführter Referenzfahrten aufgenommen, Abbildung 18.

Über die Edge-Lösung wird im ersten Schritt die Grundlage geschaffen, unternehmens- und branchenübergreifend Felddaten zu sammeln. Das am WZL entwickelte Simulationsprogramm $MT_{plus}$ ermöglicht es dabei, verschiedene Baugrößen und Bauarten von in Werkzeugmaschinen eingesetzten Kugelgewindetrieben untereinander vergleichbar zu machen. Hierzu werden die Komponenten durch die Berücksichtigung von Geometrieparametern auf den Kugelkontakt reduziert, wodurch auch Belastungskennwerte auf diesen bezogen werden können. Die Verknüpfung mit Zustandsparametern, beispielsweise der lebensdauerabhängigen axialen Steifigkeit im KGT, die auf Kontaktbedingungen zurückgeführt werden kann, ermöglicht in einem ersten Schritt die Analyse des Ist-Zustands der jeweiligen Komponente. Auf Basis der in Kapitel 3 vorgestellten Methodik ist eine Vorhersage bzw. Prognose der Restlebensdauer für KGT ausschließlich möglich, wenn Informationen aus der Belastungshistorie produktionsintegriert und -übergreifend für ein kontinuierlich lernendes Modell genutzt werden.

Vor diesem Hintergrund werden die aufgenommenen Signale statt in Zeitreihen aggregiert in mehrdimensionalen sog. Heatmaps gespeichert, wodurch der Speicherbedarf und die Zugriffzeiten deutlich reduziert werden. Weiterhin sind gefertigte Bauteile durch das Clustern der Daten nicht nachvollziehbar bzw. reproduzierbar, wodurch auch ein unternehmensübergreifender Aufbau von Wissensdatenbanken ermöglicht wird.

In aktuellen Betrachtungsmodellen kann der Einfluss von Material- und Gestaltungsparametern wie dem Kugelrückführungssystem, der Toleranzklasse oder dem Abstreifersystem auf der Ebene des Kugelkontakts nicht berücksichtigt werden. Angelehnt an die vorgestellte Methodik kontinuierlich lernender Hybrid-Modelle wurde ein Konzept entwickelt, welches das noch in der Entwicklung befindliche Restlebensdauermodell durch weitere relevante Metadaten, wie die Art der Schmierung, des betrachteten Prozesses (Fräs- oder Schleifprozess), etc. erweitern wird. Dieses Modell kombiniert und verknüpft definierte Last-, Zustand- und Metadaten eines KGT auf Kugelkontaktebene und entspricht daher einer hybriden Modellstruktur in Form eines sog. Grey-Box-Modells. Bisher unbekannte Einflüsse auf die Restlebensdauer werden fortlaufend auf Basis vorhandener und neu erhobener Daten aus dem produktionsübergreifenden Reallabor basierend auf dem vorgestellten Historienmodell, Abbildung 18, dem Black-Box-Anteil der hybriden Struktur zugeführt. In seiner Architektur ist dieser Teil befähigt, bisher unbekannte Zusammenhänge zu detektieren und so zu lernen, dass eine dauerhafte Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit in Kombination mit dem White-Box-Teil erzielt werden kann. Innerhalb

des Reallabors lassen sich somit die angeschlossenen Maschinen auf der einen Seite als Lieferant zur Verbesserung der Prognosezuverlässigkeit der Restlebensdauer von Kugelgewindetrieben charakterisieren. Auf der anderen Seite profitieren diese im Umkehrschluss direkt von der Vorhersage der Restlebensdauer auf Basis des aktuellen Modellgenauigkeitszustands der kontinuierlich lernenden Struktur. Auf Grundlage des Ansatzes können Komponenten zum einen effizienter ausgelegt und somit zum anderen nachweislich besser ausgenutzt werden, wodurch die Verfügbarkeit steigt und die Ressourcen geschont werden, womit der Ansatz unmittelbar zu den Bereichen Verfügbarkeit (**F**) und Ressourcenschonung (**E**) beiträgt. Eine prototypische Umsetzung des Ansatzes wird zum *AWK'21* vorgestellt.

# 7 Erhöhung der Energieeffizienz am Beispiel der thermo-energetischen Modellierung von Produktionsmaschinen

Das letzte Anwendungsbeispiel fokussiert den Faktor Environmental (**E**) der FESG-Bewertung aus Kapitel 1. Dabei wird die in Kapitel 3 beschriebene Methodik der domänenübergreifenden, lernenden Hybrid-Modelle zur Optimierung des thermischen Haushalts von Werkzeugmaschinen eingesetzt. Die bisherigen Arbeiten in dem Feld verwenden den Optimierungsrahmen aus Produktivität (**F**), Qualität (**F**) und Energieeffizienz (**F**, **E**) [27]. Die industrielle Umsetzung der erarbeiteten Lösungen scheitert jedoch zumeist aus folgenden Gründen: Mangelnde Übertragbarkeit, fehlende Transparenz hinsichtlich des übergeordneten Nutzens sowie eine erhöhte Modellunsicherheit der parametrierten Korrektur. Letztere kann durch stärkere Schwankungen des Maschinenverhaltens die Ausschussrate erhöhen. Kontinuierlich lernende, hybride Modelle schaffen hier die Grundlage für Meta-Analysen, die Klarheit bzgl. der genannten Hürden schaffen können.

Das thermo-elastische Verhalten von Werkzeugmaschinen ist geprägt von einer Vielzahl an Einzeleffekten, die einen Einfluss auf die TCP-Verlagerung haben. Exemplarisch seien die Verlustleistung der Antriebe, der Einfluss des Hallenklimas sowie der Einfluss von Kühlschmierstoff genannt [27]. Für Großserienprozesse stellt sich dabei aufgrund der immer gleichen Bearbeitungsoperationen im 3-Schicht-Betrieb ein quasi konstantes Maschinenverhalten ein, was die Beherrschung der Effekte stark vereinfacht. In der Fertigung kleiner Lose und Einzelteile bilden sich jedoch teils erhebliche Schwankungen aus. Die regelmäßig schwankenden Betriebsbedingungen erzeugen ein sehr breites Spektrum an Randbedingungen für die verschiedenen Effekte. Dabei ist insbesondere der Einfluss von Kühlschmierstoff (KSS) vielfach von kaum direkt quantifizierbaren Einflüssen, wie dem variierenden Strahlengang des vom Bauteil abprallenden KSS geprägt. Eine modellbasierte White-Box-Abbildung ist bisher nicht bekannt. Außerdem limitieren die Unsicherheiten, z. B. der Koeffizienten der Wärmeübertragungsmechanismen, die Abbildungsgenauigkeit existierender physikalischer Modelle.

Die in Kapitel 3 vorgestellten domänenübergreifenden, lernenden Hybrid-Modelle können hier bei der Identifikation unbekannter Zusammenhänge helfen. Als weiterer Nutzen der Aktivitätsüberwachung der Einzelmodelle ist die Reduktion der Unsicherheiten bzw. eine dadurch gesteigerte Vorhersagegenauigkeit möglich.

Abbildung 19 zeigt die Anwendung der Methode der domänenübergreifenden, lernenden Hybrid-Modelle für das Anwendungsbeispiel: Im ersten Schritt wird die reale TCP-Position mit einem maschinenintegrierten Messsystem bestimmt. Das Setup besteht aus einem thermostabilen Laserrahmen, der auf dem Tisch fixiert ist, und einem in der Spindel geführten Messkopf. Das maschinenintegrierte Messsystem kann mittels Messungen in

den Nebenzeiten 13 von 21 volumetrischen thermo-elastischen Fehlern innerhalb weniger Minuten erfassen [28].

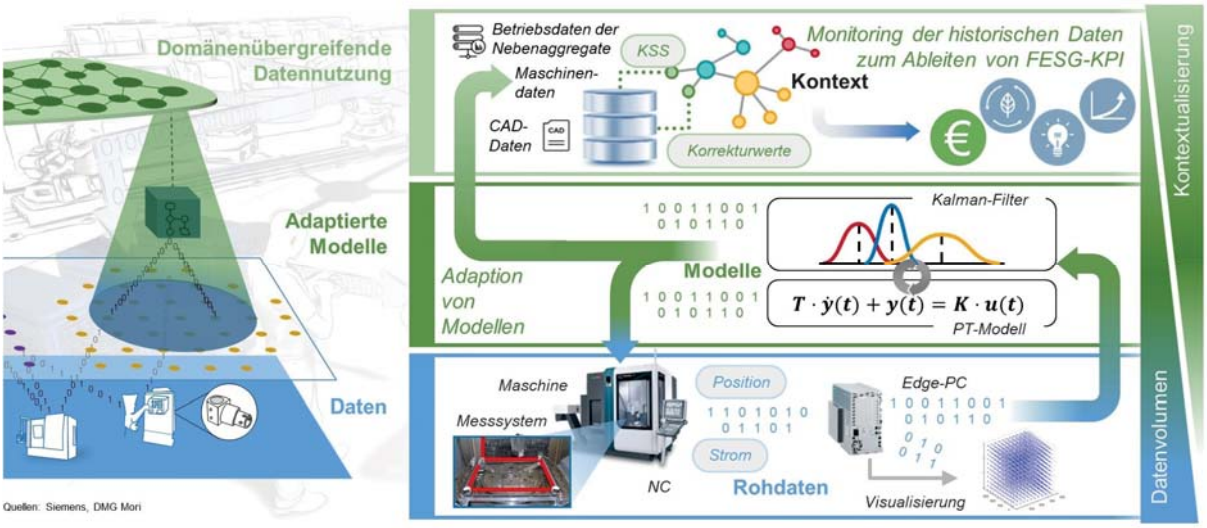



*Abbildung 19: Maschinenintegrierter Messaufbau und lernendes Hybrid-Modell*

Wie in Kapitel 3 vorgeschlagen, ergänzt im zweiten Schritt ein lernendes Hybrid-Modell das Messsystem. Maschineninterne Daten, wie Achspositionen und -geschwindigkeiten dienen als Eingangsdaten. Die Grey-Box-Komponente der lernenden Struktur wird durch ein Verzögerungsglied 1. Ordnung abgebildet. Dieses Modell lehnt sich an die aus der Wärmelehre bekannten, für das thermo-elastische Maschinenverhalten ursächlichen physikalischen Phänomene an und bestimmt in diesem Anwendungsfall den Einfluss der Maschinenachsen. Das Modell wird im Anschluss um einen Unscented Kalman-Filter (UKF) ergänzt, der als lernende Struktur das *Empiric Learning* ermöglicht [29]. Dabei führt der UKF eine Parameterschätzung für Teilmodelle durch. Mit fortschreitender Lerndauer respektive größerem Datenbestand steigt die Vorhersagegenauigkeit der geschätzten Parameter. Mit jeder weiteren Messung lernt das Modell und wird dadurch kontinuierlich verbessert bzw. die Robustheit des Modells steigt. Auch mittel- bzw. langfristige Effekte z. B. Verschleiß werden so berücksichtigt. Die Möglichkeit nach und nach unbekannte bzw. nicht adaptierte Effekte in die White-Box-Struktur zu integrieren, verspricht im Bereich des thermo-elastischen Maschinenverhaltens besonders großes Potential, da hier eine Vielzahl an Einflüssen existiert. In der industriellen Praxis werden Modelle daher oft nur für einen reduzierten Wertebereich und einen Teil der Phänomene adaptiert.

Nach einer angemessenen Lernperiode ist unter der domänenübergreifenden Einbeziehung von CAM-Daten eine Feature-bezogene Vorhersage der Bauteilqualität für optimierte Bearbeitungsparameter (Vorschub, Schnittgeschwindigkeit) möglich (**F**). Diese Vorhersage ergänzt die Produktivitätsoptimierung aus Kapitel 4.

Außerdem liefert das Modell im Zusammenspiel mit den historischen Daten zum Betrieb der Nebenaggregate Transparenz hinsichtlich des thermischen Haushalts der Gesamtanlage. Es wird dadurch zum Enabler für übergeordnete energetische Optimierungen (**F**, **E**). Darüber hinaus steigt mit der Korrekturqualität auch das Potential zur Reduktion des Medieneinsatzes, was den Ressourceneinsatz im Maschinenbetrieb optimiert (**F**, **E**).

Der kollaborative Austausch von anonymisierten KPIs zu den vorher genannten Punkten über alle Inhabenden der Baureihe mittels Plattformen der Maschinenherstellerfirma ordnet die eigene Performance der Maschinenanwendung auf allen Feldern ein (**F**, **S**). Damit

heben alle Inhabenden gemeinsam diese Optimierungspotentiale im Verlauf des Produktlebenszyklus der Maschine auf eine nächste Ebene. Langfristig ergibt sich damit aus Einzeloptimierungen der FESG-Faktoren eine Metrik zur nachhaltigen Optimierung des thermo-energetischen Maschinenverhaltens. Gerade KMUs, die stärker im Bereich der Fertigung kleiner Losgrößen und Einzelteile engagiert sind, können so Skaleneffekte erzielen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Verfügbarkeit von industriellen Produktionsdaten in einer vernetzten Systemlandschaft fungiert als technischer Enabler, die Relevanz von umfassenden Data Science-Ansätzen zu steigern, wodurch sich neue Potenziale ergeben. In der Vergangenheit konnte das Werkzeugmaschinenverhalten als Einzelsystem durch komplexe physikalische Modelle basierend auf analytischen oder empirischen Grundlagen bereits gut approximiert werden. Eine Anwendung solcher Modelle in einer industriellen Fertigung scheiterte allerdings häufig sowohl an der fehlenden Übertragbarkeit von Modellen aufgrund von veränderten Rahmenbedingungen als auch an deren Echtzeitfähigkeit. Auch in Zukunft ist das Ziel, solche Modelle, beispielsweise zur Vorhersage des Ausfallverhaltens von Maschinenkomponenten sowie zur Prognose des Stabilitätsverhaltens von Werkzeugmaschinen, zu entwickeln und zu erweitern. Durch die vernetzte Produktionslandschaft entsteht jedoch zusätzlich die einmalige Möglichkeit, jedes fertigende System als „Prüfstand“ zu nutzen, um die bisherigen Modellgrenzen und die -übertragbarkeit mit Hilfe einer übergreifend lernenden hybriden Modellierung zu erweitern und dadurch die Vorhersagegenauigkeit des prognostizierten Systemverhaltens zu erhöhen.

Dieser Beitrag liefert einen methodischen Überblick über das Vorgehen zur Ausschöpfung des umfassenden Potenzials hybrider Lernansätze bei richtiger Anwendung in der Produktion und rundet das Vorgehen mit konkreten Anwendungsbeispielen des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen auf Basis letztjähriger Ergebnisse aus der Forschung ab. Zusätzlich im Fokus der vorgestellten Demonstratoren steht die Thematik der Nachhaltigkeitssteigerung der Produktion nach dem *AWK’21*-Leitthema *Turning Data into Sustainability*.

# 9 Literatur


[1] É. M. S. Ramos, C. J. Bergstad, A. Chicco, und M. Diana, “Mobility styles and car sharing use in Europe: attitudes, behaviours, motives and sustainability,” *Eur. Transp. Res. Rev.*, Jg. 12, Nr. 1, 2020, doi: 10.1186/s12544-020-0402-4.

[2] T. Bergs, “Internet of Production - Turning Data into Value,” 2020.

[3] B. Denkena, E. Abele, C. Brecher, M.-A. Dittrich, S. Kara, und M. Mori, “Energy efficient machine tools,” *CIRP Annals*, Jg. 69, Nr. 2, S. 646–667, 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.05.008.

[4] C. Brecher, Hrsg., *Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb - EWOTeK: Verbundprojekt im Rahmenkonzept "Forschung für die Produktion von morgen", "Ressourceneffizienz in der Produktion" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF),* Aachen: Apprimus Verl., 2012.

[5] F. Wellmann, “Datengetriebene, kontextadaptive Produktivitätssteigerung von NC-Zerspanprozessen,” Dissertation, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, RWTH Aachen, Aachen, 2019.

[6] NC-Fertigung, *Die Zukunft heißt Siemens Sinumerik ONE.* [Online]. Verfügbar: https://www.nc-fertigung.de/die-zukunft-heisst-siemens-sinumerik-one (zugegriffen: Apr. 28 2020).

[7] C. Brecher, *Realisierung effizienter Zerspanprozesse: Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojekts ReffiZ*. Aachen: Shaker Verl., 2015.

[8] F. Klocke, *Fertigungsverfahren 1: Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide,* 9. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018.

[9] N. Zeroudi, M. Fontaine, und K. Necib, “Prediction of cutting forces in 3-axes milling of sculptured surfaces directly from CAM tool path,” *J Intell Manuf*, Jg. 23, Nr. 5, S. 1573–1587, 2012, doi: 10.1007/s10845-010-0460-x.

[10] C. Brecher, A. Epple, M. Fey, M. Königs, S. Neus, und F. Wellmann, “Lernende Produktionssysteme,” in *Internet of Production für agile Unternehmen: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017, 18. bis 19. Mai*, C. Brecher, F. Klocke, R. Schmitt, und G. Schuh, Hrsg., Aachen: Apprimus Verlag, 2017, S. 135–161.

[11] C. Brecher, M. Wiesch, und S. Neus, “Prozessparallele Qualitätssicherung in der spanenden Fertigung,” *Werkstoffe in der Fertigung*, Jg. 56, Nr. 3, S. 21–22, 2019.

[12] S. Knape, M. Königs, A. Epple, und C. Brecher, “Increasing Accuracy of Material Removal Simulations by Modeling Workpiece Deformation Due to Clamping Forces,” in *Advances in Production Research*, R. Schmitt und G. Schuh, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 72–80.

[13] Y. Yamada und Y. Kakinuma, “Sensorless cutting force estimation for full-closed controlled ball-screw-driven stage,” *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 87, Nr. 9-12, S. 3337–3348, 2016.

[14] M. Fey, A. Epple, S. Kehne, und C. Brecher, “Verfahren zur Bestimmung der Achslast auf Linear- und Rundachsen,” DE102016013890, Deutschland DE102016013890A, Mai 24, 2018.

[15] C. Brecher, H.-M. Eckel, T. Motschke, M. Fey, und A. Epple, “Estimation of the virtual workpiece quality by the use of a spindle-integrated process force measurement,” *CIRP Annals*, Jg. 68, Nr. 1, S. 381–384, 2019.

[16] M. Schwenzer, S. Stemmler, M. Ay, T. Bergs, und D. Abel, “Ensemble Kalman filtering for force model identification in milling,” *Procedia CIRP*, Jg. 82, S. 296–301, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.028.

[17] M. Königs, F. Wellmann, M. Wiesch, A. Epple, und C. Brecher, “A scalable, hybrid learning approach to process-parallel estimation of cutting forces in milling applications,” in *7. WGP-Jahreskongress Aachen, 5.-6. Oktober 2017*, R. Schmitt und G. Schuh, Hrsg., Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2017, S. 425–432.

[18] C. Brecher, W. Lohse, und F. Wellmann, “Automatisierter Werkzeugauswahlprozess: Ein wissensbasierter Ansatz für die 2,5 D-Fräs- und Bohrbearbeitung,” *ZWF*, Jg. 109, Nr. 11, 2014.

[19] S. Hölbfer, “Modell zur Auswahl von Instandhaltungsstrategien in anlageintensiven Industriebetrieben,” Dissertation, Lehrstuhl Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2014.

[20] M. Obdenbusch, *Referenzarchitektur für cloudbasiertes Condition Monitoring am Beispiel von Verpackungsmaschinen,* Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2018.

[21] C. Brecher, S. Witt, und W. Klein, “Werkzeugmaschinen-Komponenten mit Sensorik und Signalanalyse überwachen,” *MaschinenMarkt*, 2008.

[22] M. Schopp, *Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2009. Aachen: Shaker, 2009.

[23] C. Brecher, B. Biernat, und S. Neus, “Lastverteilungen in Kugelgewindetrieben. Berücksichtigung ortsdiskreter Lasten in der Lebensdauerberechnung von Kugelgewindetrieben,” *wt Werkstattstechnik online*, Jg. 111, 2021.

[24] C. Brecher, B. Biernat, T. Frenken, aud M. Fey, “Verschmutzungsuntersuchungen an Kugelgewindetrieben,” *Ingenieurspiegel*, Jg. 12, Nr. 3, S. 46–48, 2019.

[25] *Kugelgewindetriebe – Teil 5: Statische und dynamische axiale Tragzahl und Lebensdauer*, DIN ISO 3408-5, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Apr. 2011.

[26] C. Brecher, B. Eßer, J. Falker, F. Kneer, und M. Fey, “Modelling of ball screw drives rolling element contact characteristics,” *CIRP Annals*, Jg. 67, Nr. 1, S. 409–412, 2018.

[27] K. Großmann, *Thermo-energetic design of machine tools: A systemic approach to solve the conflict between power efficiency, accuracy and productivity demonstrated at the example of machining production*. Cham: Springer Internat. Publ, 2015.

[28] C. Brecher, R. Spierling, M. Fey, und S. Neus, “Direct measurement of thermo-elastic errors of a machine tool,” *CIRP Annals*, Jg. 70, Nr. 1, 2021.

[29] E. A. Wan und R. van der Merwe, “The unscented Kalman filter for nonlinear estimation,” in *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No.00EX373)*, Lake Louise, Alta., Canada, Okt. 2000, S. 153–158.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 3.0:

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT
B. Biernat, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
M. Fey, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
S. Kehne, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
V. Lohrmann, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
R. Spierling, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
M. Wiesch, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

## 3.1 Funktionale und ökologische Rückverfolgbarkeit von Prozessketten

Ein daten- und modellbasierter Ansatz

*T. Bergs, J. Brimmers, G. Kappmeyer, C. Löpenhaus, F. Scheffler, U. Thies, N. Troß, J. Wemhöner, H. Yakaria*

**Gliederung**

1 Was ist Rückverfolgbarkeit? ..... 265
1.1 Externe Rückverfolgbarkeit ..... 265
1.2 Interne Rückverfolgbarkeit ..... 266
1.3 Funktionale und ökologische Rückverfolgbarkeit von Prozessketten ..... 266
2 Daten- und modellbasierte Produktion ..... 268
2.1 Datenanalyse ..... 269
2.2 Modellbasierte Datenanalyse ..... 270
2.3 Herausforderungen bei der Implementierung ..... 271
3 Prozessbeschreibung ..... 272
3.1 Daten- und modellbasierte Prozessgestaltung in der Verzahnungsfertigung ..... 272
3.2 Hochskalierung von Einzelprozessen auf die Prozesskette ..... 275
4 Datenschnittstelle ..... 276
4.1 Datenschnittstelle in der Verzahnungsfertigung ..... 277
4.2 Produktlebenszyklusmanagement ..... 279
5 Barrieren und Mehrwert ..... 280
5.1 Offene Handlungsfelder ..... 280
5.2 Mehrwert durch Rückverfolgbarkeit ..... 282
5.3 (Traum-)Fabrik der Zukunft ..... 283
6 Fazit und Ausblick ..... 284
7 Literatur ..... 286

## Kurzfassung

**Funktionale und ökologische Rückverfolgbarkeit von Prozessketten**

Der Weg vom Rohteil zum einsatzfertigen Produkt kann mit unterschiedlichen Prozesstechnologien beschritten werden, die sich in ihrer Eignung zur Bearbeitung eines Bauteils, der erzielbaren Bauteilfunktionalität sowie ihrem ökologischen Fußabdruck unterscheiden. Zur Sicherstellung der Bauteilfunktionalität spielt die Rückverfolgbarkeit eine entscheidende Rolle. Im Falle eines Qualitätsproblems muss das herstellende Unternehmen in der Lage sein, umgehend die Fehlerursache zu identifizieren und wirksame Maßnahmen zu dessen Behebung zu ergreifen. In der Regel werden hohe Anforderungen an die Beherrschung der Fertigungsprozesskette hinsichtlich Verfügbarkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit (Produktivität) gestellt. Die in den einzelnen Fertigungsschritten aufgezeichneten Daten müssen zu jeder Zeit verfügbar sein und aussagekräftige Informationen über das Bauteil, die vorangegangenen Prozesse sowie die verwendeten Produktionsmittel enthalten.

Ein datenbasierter Ansatz zur Prozessgestaltung bietet das Potenzial, die Fertigungsprozesse effizienter und ressourcenschonender zu gestalten und gleichzeitig einen höheren Informationsgehalt für die Rückverfolgbarkeit zu generieren. Eine Kopplung mit Prozessmodellen erlaubt die nachhaltige Abbildung funktionaler Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und somit eine technologische Abstimmung der einzelnen Prozessschritte hinsichtlich der resultierenden Bauteileigenschaften und des ökologischen Fußabdrucks.

## Abstract

**Functional and Ecological Traceability of Process Chains**

The path from the raw part to the ready-to-use product can be taken with different process technologies, which differ in their suitability for processing a component, the achievable component functionality and the ecological footprint. Traceability plays a decisive role in ensuring component functionality. In the event of a quality problem, the manufacturer must be able to identify the cause of the fault immediately and take effective measures to rectify it. As a rule, high demands are placed on the control of the manufacturing process chain with regard to availability, quality and efficiency (productivity). The data recorded in the individual production steps must be available at all times and contain up-to-date information about the component, the preceding processes and the production resources used.

A data-based approach to process design offers the potential to make manufacturing processes more efficient and sustainable while at the same time generate a higher information content for traceability. A coupling with process models allows the sustainable mapping of functional cause-effect relationships and thus with a technological coordination of the individual process steps with regard to the resulting component properties and the ecological footprint.

# 1 Was ist Rückverfolgbarkeit?

Der Begriff *Rückverfolgbarkeit* (englisch *Traceability*, von *Trace* „Spur“ und *Ability* „Fähigkeit“) ist vielfältig und kann je nach Industriebereich unterschiedlich definiert sein. In der System- und Softwareentwicklung bezeichnet Rückverfolgbarkeit die Zuordenbarkeit von Anforderungen zu beliebigen Artefakten über den gesamten Entwicklungsprozess [1, 2]. Im produzierenden Gewerbe (z. B. Automobil-, Lebensmittel- und Pharmaindustrie) wird die Rückverfolgbarkeit als die Fähigkeit verstanden, alle Prozesse von der Rohstoffbeschaffung über die Produktion bis hin zum Verbrauch und zur Entsorgung zu verfolgen [3]. Die Internationale Organisation für Normung (ISO) hat in der ISO 9000 die Rückverfolgbarkeit wie folgt definiert:

„*Möglichkeit, den Werdegang, die Verwendung oder den Ort eines Objektes zu verfolgen. Bei einem Produkt oder einer Dienstleistung kann sich Rückverfolgbarkeit beziehen auf die Herkunft von Werkstoffen und Teilen, auf den Ablauf der Verarbeitung sowie auf die Verteilung und den Standort des Produkts oder der Dienstleistung nach Auslieferung.“* [4]

Die Rückverfolgbarkeit spielt somit eine entscheidende Rolle im Qualitätsmanagement. Denn im Falle eines Qualitätsproblems muss das herstellende Unternehmen in der Lage sein, umgehend die Ursache zu identifizieren und wirksame Maßnahmen zu dessen Behebung zu ergreifen. Eine zu langsame oder unzureichende Antwort erzeugt Misstrauen bei Kund:innen oder Geschäftspartner:innen und ist somit schädlich für das Unternehmen [3]. Um die Rückverfolgbarkeit sicherzustellen stellt die ISO 9001 Mindestanforderungen an die Produktkennzeichnung: Erstens müssen Produkte mit geeigneten Mitteln eindeutig gekennzeichnet werden. In der Produktionstechnik kommen hierfür insbesondere 2D-Darstellungsformate, beispielsweise Data Matrix Codes (DMC), als Identifikationssymbol zum Einsatz. Zweitens muss während der gesamten Produktion der Status der Ergebnisse in Bezug auf die Überwachungs- und Messanforderungen gekennzeichnet werden. Drittens müssen die dokumentierten Informationen aufbewahrt werden, sofern sie notwendig sind, um eine Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten. [5]

Trotz unterschiedlicher Sichtweisen kann der Begriff der Rückverfolgbarkeit in zwei Hauptaspekte unterteilt werden: Einerseits in die *externe Rückverfolgbarkeit* der Fertigungs- und Lieferkette und andererseits in die *interne Rückverfolgbarkeit*.

## 1.1 Externe Rückverfolgbarkeit

Rückverfolgbarkeit innerhalb der Fertigungs- und Lieferkette (externe Rückverfolgbarkeit) bedeutet, dass der Verlauf von der Beschaffung von Rohstoffen und Teilen bis hin zu deren maschineller Bearbeitung, Montage, Vertrieb und Verkauf verfolgt werden kann, vgl. Bild 1. Die herstellenden Unternehmen können überwachen, wohin ihre Produkte geliefert wurden, während Unternehmen, Kundinnen und Kunden verstehen können, welchen Weg die Produkte genommen haben. Herstellende Unternehmen können gezielt Produkte zurückrufen, falls unerwartete Probleme auftreten sollten. Vor allem in der Automobilindustrie wird die Rückverfolgbarkeit vorangetrieben. Sie wird in der Regel zur Vermeidung von Rückrufaktionen, zur Schadensminimierung sowie zur Sicherung des Qualitätsmanagements angewandt. Die Herausforderung besteht darin, die Daten von der Fertigung bis zur Entsorgung individuell für zehntausende Bauteile zu überprüfen und die sich im Laufe der Zeit wandelnden Gesetze und Richtlinien einzuhalten. Neben der

Automobilindustrie haben Unternehmen von sicherheitsrelevanten Bauteilen, z.B. Luftfahrt- oder Medizintechnik, ein hohes Bedürfnis nach der Rückverfolgbarkeit ihrer Bauteile. Insbesondere zertifizierte Bauteile unterliegen hohen Anforderungen an die Bauteil- und Prozess(ketten)dokumentation. Zudem schreitet die Globalisierung zügig voran, während sich der Kosten- und Terminwettbewerb in den letzten Jahren verschärft hat, weshalb die Wichtigkeit der Rückverfolgbarkeit weiter zunimmt. Es besteht ein dringender Bedarf für den Aufbau eines Verlaufsmanagementsystems aus einer globalen Perspektive, das sowohl innerhalb als auch außerhalb der Produktionsanlagen eingesetzt werden kann. [3]

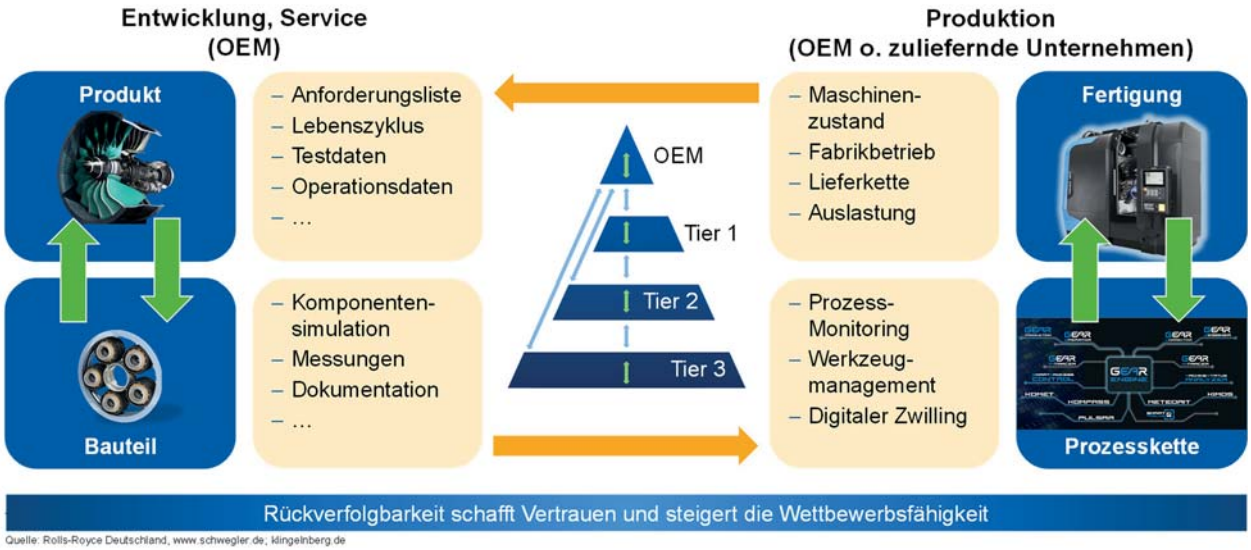



*Bild 1: Rückverfolgbarkeit der Fertigungs- und Lieferkette*

## 1.2 Interne Rückverfolgbarkeit

Interne Rückverfolgbarkeit bedeutet, dass die Bewegung von Produkten in einem bestimmten, klar eingegrenzten Bereich überwacht wird, wie zum Beispiel in einem einzelnen Unternehmen oder Werk. Im Vergleich zur externen Rückverfolgbarkeit findet kein Informations- und Materialaustausch oder Verantwortlichkeitswechsel über diese definierten Grenzen statt. Ein Werk für Getriebemontage beschafft beispielsweise Komponenten wie Verzahnungen und Lager von zuliefernden Unternehmen und montiert diese. Zusätzliche notwendige Arbeitsschritte beinhalten die Verwaltung und Nutzung der Fertigungs- sowie der Prüfergebnisse der Bauteile. Hier stellt das Werk die definierte Grenze dar.

Ein weiterer Aspekt der internen Rückverfolgbarkeit ist das Teilemanagement. Hier dient die Rückverfolgbarkeit der Steuerung und dem Betrieb mehrfach verwendeter Teile wie Werkzeuge und Vorrichtungen. Zur individuellen Identifizierung werden eindeutige Seriennummern auf jedem Werkzeug angebracht, beispielweise in Form von 2D-Codes. Auf diese Weise können Werkzeuginformationen (Name, herstellendes Unternehmen, usw.) verwaltet sowie Querverweise zu Fertigungsaufträgen hinterlegt werden. Weitere Informationen wie die Anzahl der Nachschleifvorgänge können inklusive Zeitstempel erfasst und verwaltet werden, um die Produktqualität zu stabilisieren.

## 1.3 Funktionale und ökologische Rückverfolgbarkeit von Prozessketten

Die *funktionale und ökologische Rückverfolgbarkeit von Prozessketten* kann sowohl der internen als auch der externen Rückverfolgbarkeit zugeordnet werden. In vielen Fällen

kann der Weg vom Rohteil zum einsatzfertigen Produkt mit unterschiedlichen Prozesstechnologien beschritten werden, die sich in ihrer geometrisch-kinematischen Eignung zur Bearbeitung eines Bauteils, der erzielbaren Bauteilqualität, der Randzoneneigenschaften sowie des ökologischen Fußabdrucks unterscheiden. In vielen Fällen setzt sich die Prozesskette hochbeanspruchter Bauteile aus einer Weichbearbeitung, einer Wärmebehandlung und einer abschließenden Hartbearbeitung zusammen. Ein Beispiel für eine hoch spezialisierte Prozesskette ist die Verzahnungsfertigung. [6, 7]

Je nach Branche unterscheiden sich die spezifischen Anforderungen, die an die Rückverfolgbarkeit einer Prozesskette gestellt werden, vgl. Bild 2. In der Massenproduktion (z. B. Automobilindustrie) steht die Reduktion von Taktzeiten bei gleichzeitiger Sicherstellung der Qualität und Funktionalität der Bauteile im Vordergrund. Bauteile mit hohen Anforderungen an Sicherheit, z. B. die im UltraFan™ der Firma ROLLS-ROYCE eingesetzten Planetengetriebe, müssen die definierten Qualitätsanforderungen entlang der gesamten Fertigungskette nachweisbar erfüllen. In beiden Fällen werden hohe Anforderungen an die Beherrschung der Fertigungskette hinsichtlich Verfügbarkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit (Produktivität) gestellt. Die in den einzelnen Fertigungsschritten aufgezeichneten Daten müssen zu jederzeit verfügbar sein und aktuelle Informationen über das Bauteil, die vorangegangenen Prozesse sowie die verwendeten Produktionsmittel enthalten.

*Bild 2: Funktionale und ökologische Rückverfolgbarkeit von Prozessketten*

Die kontinuierlich steigenden Umweltauflagen bedingen zudem eine zunehmende Energieeinsparung und Ressourcenschonung. So sieht beispielsweise die EU-Energieeffizienzrichtlinie (EED) in Artikel 7 die Einrichtung eines Energieeinsparverpflichtungssystems (EEOS) als ein zentrales Instrument zur Erreichung von Energieeinsparzielen vor. Im Rahmen der Einsparverpflichtungen wird ein Einsparziel festgelegt und auf Unternehmen verteilt. Die Unternehmen sind verpflichtet, innerhalb einer bestimmten Periode Energieeinsparungen nachzuweisen. [8, 9]

Ein daten- und modellbasierter Ansatz zur Prozessgestaltung bietet hier das Potenzial, die Fertigungsprozesse effizienter zu gestalten und gleichzeitig einen höheren Informationsgehalt für die Rückverfolgbarkeit zu generieren. Beispielsweise kann durch die Verknüpfung von Spindelleistungssignalen aus der Werkzeugmaschine mit Regressionsmodellen Werkzeugverschleiß frühzeitig detektiert werden (Prozessüberwachung). So kann die Qualität des Bauteils sichergestellt werden, ohne dass der laufende Betrieb eingestellt

werden muss. Gleichzeitig werden für Rückverfolgbarkeit Informationen über den Fräserzustand (Werkzeugverschleiß) sowie die Leistung (Energieverbrauch) während der Bearbeitung generiert. Mit Methoden, wie z. B. Maschinellem Lernen, können diese Daten weiterverwendet werden, um die Prozesse für künftige Bearbeitungsaufgaben stabiler und effizienter zu gestalten. Die Kopplung mit Prozessmodellen erlaubt die nachhaltige Abbildung funktionaler Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und somit eine technologische Abstimmung der einzelnen Prozessschritte hinsichtlich der resultierenden Bauteileigenschaften. Zur Implementierung dieses Ansatzes liegen folgende Fragestellungen vor:

- Was sind die Voraussetzungen für eine daten- und modellbasierte Prozessbeschreibung?
- Wie können die einzelnen Prozesse bestmöglich beschrieben werden und welche Daten werden hierfür benötigt?
- Wie können diese Daten intern im Unternehmen und extern zwischen Unternehmen ausgetauscht werden?
- Wo sind offene Handlungsfelder für die Implementierung von Rückverfolgbarkeitssystemen?
- Was ist der erwartete Mehrwert der Rückverfolgbarkeit für die Produktionstechnik?

Der vorliegende Beitrag adressiert diese Fragestellungen und zeigt Lösungsansätze zur Umsetzung anhand von Praxisbeispielen aus Industrie und Wissenschaft auf.

## 2 Daten- und modellbasierte Produktion

Wirtschaftlicher Erfolg kann nur dann erzielt werden, wenn die technischen und technologischen Anforderungen an den Fertigungsprozess und die Bauteileigenschaften erfüllt werden. Daher ist es erforderlich, Modelle und Daten zu nutzen, welche die Besonderheiten unterschiedlicher Fertigungstechnologien abbilden und somit eine korrekte Prozessauswahl sowie Einstellung bzw. Kompensation einzelner Prozessschritte zur Erzielung einer gewünschten Funktionalität des Bauteils erlauben. Sogenannte Data Analytics Methoden erzeugen aus den vorliegenden Fertigungsdaten Informationen, indem mathematische Zusammenhänge (z. B. Korrelationen) zwischen Prozess- oder Bauteilparametern visualisiert werden. Durch empirisches Erfahrungswissen und Technologieverständnis der physikalischen Gesetzmäßigkeiten können Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in den analysierten Daten identifiziert werden, wodurch das reale Prozessverhalten und Schadensereignisse im Fertigungsbetrieb besser vorhergesagt und der Prozess robuster ausgelegt werden kann, vgl. Bild 3. [6]

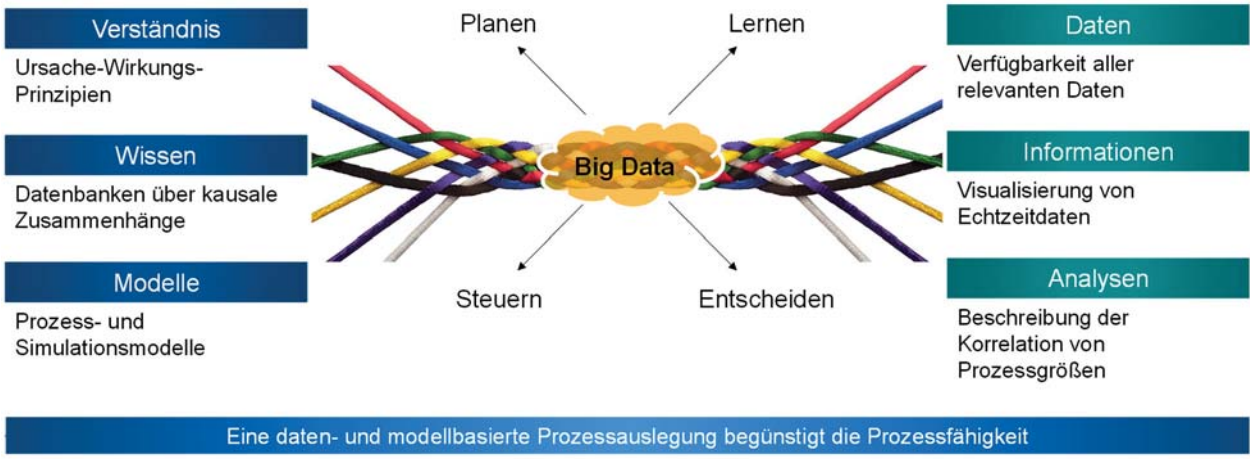



*Bild 3: Verknüpfung von Technologie und Prozesswissen*

## 2.1 Datenanalyse

Der erste Schritt zur Schaffung einer datenbasierten Fertigungsoptimierung ist die Aufnahme und Speicherung aller relevanten Fertigungsdaten in ausreichender Auflösung. Die während der Bearbeitung erzeugten Prozessgrößen, wie z.B. Kraft, Leistung oder Temperatur, können mittels geeigneter Sensorik gemessen und in Form von Datensätzen ausgelesen werden. Das Ziel der Weiterentwicklung der Prozessdatenaufnahme ist die Steigerung der Transparenz über die realen Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück in der Eingriffszone. Dadurch können die tatsächlichen Zusammenhänge zwischen den voreingestellten Prozessparametern und dem Bearbeitungsergebnis nachvollziehbar ausgewertet werden. Des Weiteren können bisher unbekannte Störgrößen und Einflussfaktoren identifiziert und reduziert sowie statistische Einflüsse abgebildet werden. Ebenfalls ist es durch die Datenanalyse möglich, die Prozesse kontinuierlich zu überwachen.

Aus der Datenmenge lassen sich durch Data Analytics Methoden verschiedenste Korrelationen, Cluster, Klassifikationen oder Regressionen innerhalb der Daten erkennen, die anschließend als Informationen dem Nutzer bereitstehen. Innerhalb der Data Analytics Methoden existieren verschiedene Ausbaustufen, die jeweils unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen:

- Descriptive Analytics: Ereignisse und Zusammenhänge beschreiben
- Diagnostic Analytics: Ereignisse und Zusammenhänge verstehen
- Predictive Analytics: Ereignisse vorhersagen
- Prescriptive Analytics: Ereignisse vorausplanen

In Zukunft werden sich Data Analytics Methoden als Bestandteil der Produktionsoptimierung von einer rückwirkend erklärenden hin zu einer proaktiv eingreifenden bzw. steuernden Rolle wandeln. Vielen Unternehmen stehen die zur Auswertung notwendigen Daten bereits heute zur Verfügung. Die relevanten Daten zu identifizieren und diese auch entsprechend der Zielsetzung aufzubereiten, stellt die weit größere Herausforderung dar. Insbesondere der vorliegende Datensatz bestimmt häufig, wie gut die jeweilige Methode geeignet ist. Um zunächst aus den großen Datenmengen die wichtigen Informationen ableiten und darstellen zu können, müssen mittels Descriptive Analytics die Abhängigkeiten bzw. Korrelationen innerhalb der berücksichtigten Fertigungsdaten identifiziert

werden. Als Ergebnis stehen dem anwendenden Unternehmen schließlich die Zusammenhänge innerhalb der analysierten Fertigungsdaten zur Verfügung. Um die Richtigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, müssen die anwendenden Unternehmen wiederrum die Verfügbarkeit, die Verlässlichkeit sowie die Geschwindigkeit bei der Informationsgewinnung sicherstellen. Dies ist vor allem dann von höchster Bedeutung, wenn die Datenverarbeitung und Informationsbereitstellung in Echtzeit erfolgen soll. Die resultierenden Verzögerungen oder Ungenauigkeiten können möglicherweise zu schwerwiegenden Fehlentscheidungen führen. Aufgrund der kontinuierlich ansteigenden Komplexität von Fertigungssystemen stellen die Informationsverfügbarkeit, die Informationsverlässlichkeit und die Informationsgeschwindigkeit wesentliche zukünftige Herausforderungen dar. [6]

Data Analytics Methoden, wie z. B. Maschinelles Lernen, brauchen, wenn sie gut funktionieren sollen, eine große Anzahl strukturierter Datensätze. Diese liegen jedoch nicht immer vor oder sind bei Bedarf abrufbar. Durch die Verknüpfung von deterministischen Modellen mit datengetriebenen Ansätzen kann die benötigte Menge an Daten reduziert und der Prozess verlässlicher gestaltet werden. Diese Methode wird als *Model-Based Data Analytics* oder *Grey-Box-Modeling* bezeichnet.

## 2.2 Modellbasierte Datenanalyse

Nach STACHOWIAK sind Modelle durch drei Merkmale beschrieben: Das Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal und das pragmatische Merkmal. Das Abbildungsmerkmal besagt, dass Modelle stets Repräsentationen von Originalen sind. Dabei werden nur solche Attribute des Originals erfasst, die für den jeweiligen Anwendungsfall relevant erscheinen (Verkürzungsmerkmal). Gemäß dem pragmatischen Merkmal sind Modelle ihren Originalen nicht zugeordnet, sondern erfüllen eine Ersetzungsfunktion für bestimmte Subjekte innerhalb bestimmter Zeitintervalle und für bestimmte Operationen. [10]

Mit dem Erstellen eines Modells wird demzufolge die Realität abstrahiert, weil sie meist zu komplex ist, um vollständig abgebildet zu werden. Ein Anspruch auf Vollständigkeit wird in der Regel nicht beabsichtigt. Vielmehr sollen die wesentlichen Einflussfaktoren identifiziert und dargestellt werden, die für den fokussierten Prozess und im Modellkontext bedeutsam sind.

Modelle können in White-Box-Modelle, Black-Box-Modelle oder Grey-Box-Modelle unterschieden werden (vgl. Bild 4). Die Modellierung industrieller Prozesse basiert traditionell auf der White-Box- oder Black-Box-Modellierung. Bei der White-Box-Modellierung wird das Modell unter Verwendung wissenschaftlicher Beziehungen konstruiert. Bei der Black-Box-Modellierung wird hingegen ein Modell verwendet, das an Messdaten aus Experimenten angepasst ist. Für viele industrielle Fertigungsprozesse gibt es ein gewisses, aber unvollständiges Wissen über das System. Dies impliziert, dass zwischen den White-Box- und den Black-Box-Modellen eine Grauzone besteht, die eine dritte Möglichkeit zur Erstellung von Modellen bietet. Bei diesem Ansatz wird Wissen über den Prozess verwendet und unbekannte Teile des Modells werden aus Messdaten geschätzt. Die Idee hinter der Grey-Box-Modellierung kann so formuliert werden, dass man "nicht schätzt, was man bereits weiß, sondern sein Wissen mit experimentellen Daten testet". [11]

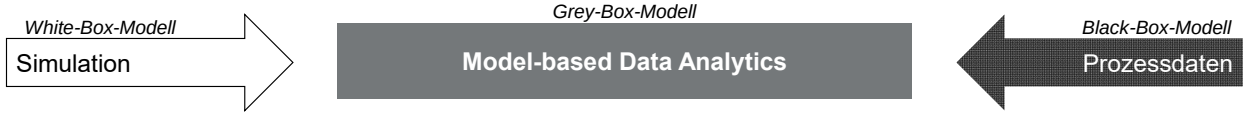



*Bild 4: Grey-Box-Modellierung*

Methoden wie Maschinelles Lernen verfolgen oft ausschließlich Black-Box-Ansätze, d.h. eine nichtparametrische Herangehensweise bei der es kein geschlossenes parametrierbares Modell gibt. Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung in der Industrie basieren dagegen in der Regel auf White-Box-Ansätzen, d. h. auf parametrischen Modellen. Grey-Box-Modelle kombinieren qualitatives Vorwissen mit quantitativen Daten. Dadurch kann die gesamte verfügbare Information über einen industriellen Prozess zur Bestimmung eines bestmöglichen Modells des Prozesses verwendet werden. Gegenüber Black-Box- und White-Box-Modellen haben Grey-Box-Modelle den Vorteil, Vorwissen und die Information in vorhandenen Daten zu nutzen.

## 2.3 Herausforderungen bei der Implementierung

Aktuelle Herausforderungen bestehen darin, die Komplexität der Datenmengen und Datenverschiedenheit zu beherrschen sowie die Datengeschwindigkeit und Datenrichtigkeit sicherzustellen. Als Analogie gleicht die Datenerfassung einem Eisberg (vgl. Bild 5). Die Spitze des Eisbergs beschreibt Daten und Informationen, die ohne großen Aufwand heute schon abrufbar und nutzbar sind (beispielsweise das Leistungssignal in Werkzeugmaschinen). Das große Potenzial, und damit der Mehrwert, liegt verdeckt unter der Wasseroberfläche. Um sich diese Daten bzw. Methoden zugänglich zu machen, steigt jedoch der zu betreibende Aufwand und damit direkt der Investitionsbedarf. Um Informationen über Randzoneneigenschaften zu erhalten, werden in der Regel externe Sensoren benötigt. Sind die zu messenden Stellen nur schwer zugänglich, muss in der Regel eine zerstörende Prüfung durchgeführt werden. Wissenschaftliche Modelle, die eine Prädiktion der Randzonenschädigung auf Basis von online erfassten Fertigungsdaten erlauben, sind heutzutage nicht Stand der Technik und müssen speziell für einen Anwendungsfall entwickelt werden. Unternehmen sehen sich demzufolge konfrontiert mit teils hohen Investitionskosten für spezifische Hardware- und Softwarelösungen bei gleichzeitiger Unsicherheit über den erzielbaren Mehrwert bei hohem Risiko. Vorab müssen daher für die Implementierung von daten- und modellbasierten Ansätzen folgende Fragen gestellt werden:

**Was soll gemessen werden?**

Die Frage zielt auf die zu beschreibenden Zielgrößen ab. Diese müssen einerseits funktional beschreibbar sein (z. B. Randzonenschädigung am Bauteil) und andererseits Teilprozessen und deren Key Performance Indicator (KPI) zugeordnet werden können. In Abhängigkeit von der gesuchten Zielgröße muss folgend geklärt werden, welche Daten die Zielgröße bestmöglich beschreiben und in welcher Menge bzw. Auflösung die Daten erfasst werden müssen.

**Wie soll gemessen werden?**

Ist die erste Frage geklärt, stellt sich die Frage, wie gemessen werden soll. Dies bezieht sich sowohl auf die Sensoren (womit messen?), als auch auf die Messmethoden (wo messen?). Der Ort der Messung kann bauteilseitig (z.B. Geometrie, Rauheit), werkzeugseitig (z.B. Leistungsaufnahme) oder operativ (z.B. Hilfsstoffverbrauch) erfolgen.

**Wie soll ausgewertet werden?**

Sind die notwendigen Daten erfasst, müssen diese in der Regel ausgewertet werden. Die Auswertung ist auch in diesem Fall nach der zu beschreibenden Zielgröße gerichtet. Eine Herausforderung bei der Auswertung stellen die Datenverarbeitung und die Wahl nach geeigneten Modellen bzw. Algorithmen dar.

*Bild 5: Aufwand der Datenerfassung*

Die ergebnisorientierte Vorgehensweise in produzierenden Unternehmen fokussiert in den meisten Fällen die Fragestellung nach der minimal notwendigen Datenmenge, um die benötigten Informationen zu erhalten. In diesem Zusammenhang besteht die Herausforderung darin, die relevanten Daten frühestmöglich zu identifizieren und aufzubereiten sowie unwichtige Daten aus Komplexitätsgründen zu vernachlässigen. Im Rahmen von Kooperationen aus Industrie und Forschung müssen daher zweckmäßige Strategien zur Extrapolation auf Basis kleiner Datenmengen gefunden werden. Die durchgeführten Analysen über die aufgenommenen Fertigungsdaten basieren in der Regel auf Algorithmen, die lediglich numerische Werte vergleichen und berechnen. Innerhalb dieser Vorgehensweisen werden reale physikalische Wechselwirkungen nicht berücksichtigt bzw. sind derzeit nicht ausreichend in die mathematischen Algorithmen integrierbar. Die visualisierten Zusammenhänge der Prozessdaten sind daher zunächst als reine mathematische Korrelationen zu verstehen. Einzig das Technologieverständnis des Menschen kann aus korrelierenden Daten und Informationen das Wissen über reale Ursache-Wirkungs-Prinzipien generieren. Daher müssen die datenbasierten Zusammenhänge dem anwendenden Unternehmen in ausreichender Auflösung zur Verfügung gestellt werden, damit dieser durch Erfahrungs- und Technologiewissen sowie durch Unterstützung von empirischen Prozessmodellen über einen kausalen Zusammenhang in den Datenkorrelationen entscheiden kann. [6]

# 3 Prozessbeschreibung

Im Folgenden werden am Beispiel der Verzahnungsfertigung daten- und modellbasierte Ansätze für unterschiedliche Fertigungsprozesse und deren Anwendbarkeit für Prozessgestaltung sowie funktionaler und ökologischer Rückverfolgbarkeit vorgestellt.

## 3.1 Daten- und modellbasierte Prozessgestaltung in der Verzahnungsfertigung

Die Prozesskette der konventionellen Zahnradfertigung besteht in der Regel aus den Prozessschritten Weichbearbeitung, Härten und Hartfeinbearbeitung. In der Weichbearbeitung wird der Werkstückrohling, der entweder geschmiedet oder aus Stangenmaterial gesägt wird, zunächst gedreht und anschließend vorverzahnt (z. B. durch Wälzfräsen oder Wälzschälen). Um die Tragfähigkeit der Verzahnung zu steigern, folgt dem Vorver-

zahnen der Härteprozess (z. B. Einsatzhärten). Zur Eliminierung der aus dem Härteprozess resultierenden Verzüge sowie zur Sicherstellung der geforderten Bauteilqualität werden die Verzahnungen hartfeinbearbeitet. Zunächst werden die Funktionsflächen der Verzahnung (Bohrung und Stirnflächen) geschliffen, um Plan- und Rundlaufabweichungen zu minimieren. Auf einer Verzahnungsschleifmaschine findet anschließend die Hartfeinbearbeitung der Zahnflanken statt. Dieser Prozessschritt stellt in der Regel den letzten und somit qualitätsgebenden Fertigungsschritt dar. Im Prozess muss kontinuierlich sichergestellt werden, dass das korrekte Flankenaufmaß zerspant wird. Wird zu viel zerspant, wird ein Randhärteverlust provoziert. Durch die hohe thermische Belastung der Zahnflanken während des Schleifvorgangs besteht zudem die Gefahr einer unerwünschten Gefügeumwandlung (Schleifbrand), welche die Tragfähigkeit der Verzahnung maßgeblich reduziert. Die Wahl und Kontrolle der Prozessparameter im Hinblick auf den Verzahnungsfall, den Werkstückwerkstoff sowie die verwendete Schleifscheibenspezifikationen sind essentiell wenn Schleifbrand vermieden werden soll. Weiterhin müssen die Qualitätsanforderungen hinsichtlich Verzahnungsgeometrie (Profil,- Flankenlinien- und Teilungsabweichungen) sowie Flankenrauheit eingehalten werden. Liegt die geforderte Qualität bereits in einem der genannten Punkte außerhalb der Toleranz, ist die Verzahnung nicht für den Einsatz geeignet und wird als Ausschuss deklariert. Insbesondere in der Kleinserienfertigung großer Bauteile, wie z.B. im Bereich Aerospace oder Windkraft, liegt ein hoher Einzelkomponentenwert vor, der mit jedem Fertigungsschritt zunimmt. Dies führt dazu, dass der Ausschuss von Bauteilen erhebliche Kosten verursacht. Neben der Reduzierung von Ausschuss spielt die Rückverfolgbarkeit eine entscheidende Rolle. Insbesondere für Bauteile mit hohen Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen müssen die erforderlichen Informationen zu jedem Zeitpunkt der Prozesskette abrufbar sein. Eine Unvollständigkeit in der Datenerhebung führt zu einer erhöhten Unsicherheit gegenüber dem Bauteil, weshalb dieses nicht weiter verwertet werden kann.

Die datenbasierte Prozessgestaltung zur Sicherstellung der erforderlichen Bauteilqualität ist in Bild 6 am Beispiel eines Kegelradfräsprozesses der Firma KLINGELNBERG abgebildet. Anforderungen an die Kegelradfertigung sind höchste Oberflächenqualitäten, eine kontinuierliche Effizienzsteigerung durch die Reduktion von Taktzeiten, geräuscharme Getriebe durch kontinuierliche Prozesskontrolle sowie die sofortige Verfügbarkeit von Informationen über Produktionsmittel, Bauteile und Prozesse [12]. Durch die kontrollierte Variation der Spindellast im Fräsprozess kann der Fertigungsprozess entscheidend optimiert werden. Hierzu wird die Spindellast hochauflösend aufgezeichnet und visualisiert. Die kontinuierliche Aufnahme der Spindellast hilft ein tieferes Prozessverständnis zu erlangen. Lastspitzen, die im Fertigungsprozess auftreten, können durch gezielte Grey-Box-Modellierung signifikant reduziert werden. Hierzu werden die physikalischen Zusammenhänge zwischen der aus der Tauchtiefe resultierenden Spandicke und der Zerspankraft genutzt. Eine Anpassung der Vorschubrampe während des Tauchprozesses auf Basis des Spandickenverlaufes erlaubt eine kontrollierte Änderung der Spindellast. Diese Vorgehensweise resultierte einerseits in einer Steigerung der Werkzeugstandzeit und andererseits in einer reduzierten Bearbeitungszeit bei konstanter Oberflächenqualität.

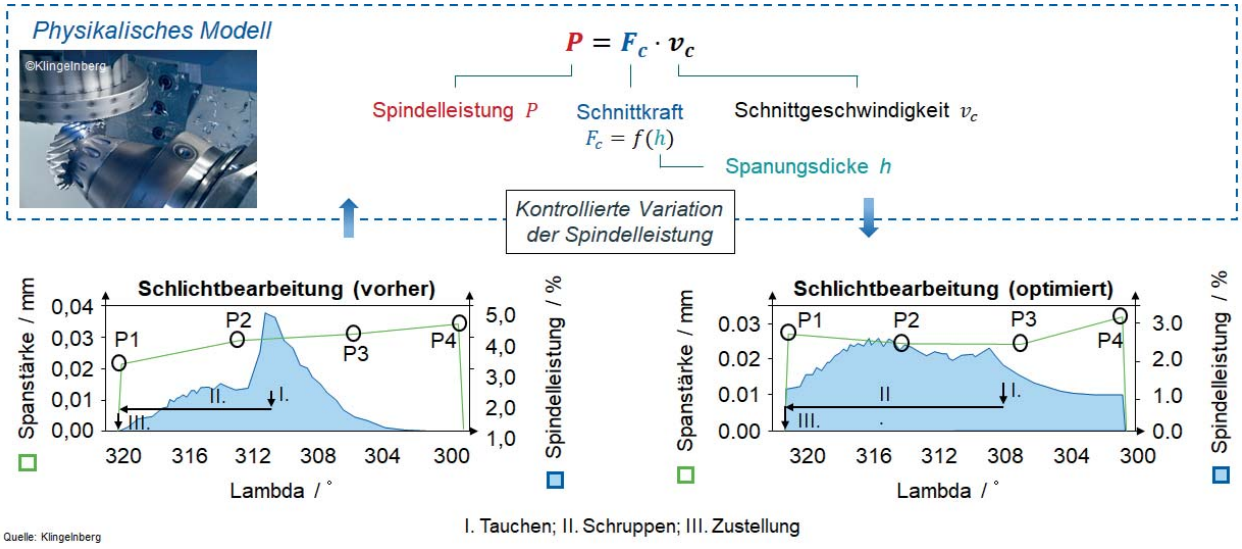



*Bild 6: Datenbasierte Prozessgestaltung in der Kegelradfertigung*

Das Beispiel zur Kegelradfertigung verdeutlicht, wie eine modell- und datenbasierte Prozessauslegung die Prozessstabilität begünstigt. Der Aufwand zur Datenerfassung ist in diesem Fall gering, da eine Aufnahme der Spindelleistung in modernen Werkzeugmaschinen in der Regel durch die Maschinensteuerung (z. B. Sinumerik) auslesbar ist. Der Aufwand steigt, wenn keine bereits vorhandene interne Sensorik oder Datenerfassung genutzt werden können, sondern externe Sensoren appliziert werden müssen.

Soll der Prozess allerdings nicht nur a priori ausgelegt, sondern in Echtzeit überwacht werden, ist eine reine Betrachtung der Spindelleistung nur bedingt geeignet. Zwar resultiert ein steigender Werkzeugverschleiß (Verringerung der Werkstückqualität) in einer Zunahme der Spindelleistung, jedoch ist das Signal oft nicht sensibel genug, um qualitätsschädigenden Werkzeugverschleiß frühzeitig zu erkennen. In der Praxis werden Werkzeuge in der Regel ausgebaut, wenn eine zuvor definierte Standzeit bzw. Standmenge erreicht oder die Qualität des Werkstücks nicht mehr in Toleranz ist.

Dieses Vorgehen wurde auch in der Vergangenheit von der Firma DAIMLER für das Wälzschälen von Verzahnungen angewandt (vgl. Bild 7). In zyklischen Abständen wird ein gefertigtes Werkstück zur Qualitätskontrolle gegeben. Ist die Qualität in Toleranz, wird der Prozess fortgesetzt, ist sie außerhalb, wird das Werkzeug gewechselt. Neben einer hohen Anzahl erforderlicher Messintervalle wurde bei Werkzeugwechsel oft hoher Werkzeugverschleiß festgestellt, sodass das Werkzeug nicht mehr nachgeschliffen werden konnte.

Durch die Integration eines externen Schwingungssensors in die Werkzeugmaschine und Überwachung der Schwingungssignale konnten nicht nur die Anzahl der Messintervalle reduziert, sondern auch die kritische Werkzeugverschleißgrenze eingehalten werden, ab der die Profilform des Bauteils nicht mehr gegeben war. In Voruntersuchungen wurde zunächst die Korrelation zwischen Werkzeugverschleiß und Schwingungssignal identifiziert. Anschließend wurde ein definierter Grenzwert bestimmt, nach dessen Überschreitung der Werkzeugverschleiß stark ansteigt und Werkzeugausbrüche und Profilformfehler auftreten können.

*Bild 7: Datenbasierte Prozessüberwachung für das Wälzschälen*

Durch die kontinuierliche Datenerfassung und Auswertung werden auch gleichzeitig zusätzliche Informationen für die Rückverfolgbarkeit generiert. Jedem Werkzeug kann durch seine eindeutige Kennzeichnung ein zugehöriges Schwingungssignal zugeordnet werden. Durch eine modellbasierte Datenanalyse könnte der zu diesem Zeitpunkt vorliegende Werkzeugverschleiß ermittelt werden. Weiterführende Modellansätze, wie beispielsweise Fertigungssimulationen, können darüber hinaus zur Analyse von Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Prozesseinstellung und Prozessergebnissen (Verschleiß, Kräfte, Oberflächenabweichungen, …) genutzt werden.

## 3.2 Hochskalierung von Einzelprozessen auf die Prozesskette

Zur Realisierung einer adaptiven Korrekturstrategie entlang der gesamten Prozesskette, der Prädiktion von Wechselwirkungen zwischen den Prozessen sowie der vollständigen Rückverfolgbarkeit ist die Analyse eines Einzelprozesses nicht ausreichend. Eine wesentliche Weiterentwicklung stellt die Erweiterung des Konzepts des *Digitalen Zwillings* auf Prozesskettenebene dar. Als Basis werden die individuellen Prozessschritte daten- und modellbasiert beschrieben. Die strukturierte Speicherung und Auswertung der generierten Daten erlaubt es für neue Anwendungsfälle, die Prozesseinrichtung durch Selbstlernstrategien zu verkürzen.

Im Rahmen des *Inkubators E-Getriebe* forscht der Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren des WZL an Methoden für die vollständige Rückverfolgbarkeit von Prozessketten (vgl. Bild 8). Für eine repräsentative Prozesskette wird eine über alle Instanzen reichende Vernetzung realisiert, die die Datenakquisition, -speicherung, -verarbeitung und -nutzung erarbeitet. Das Konzept reicht von der wissens- und datenbasierten Verzahnungs- und Fertigungsauslegung über die adaptive Prozess- und Prozessketten-regelung bis hin zum Einsatz im Prüffeld. Durch die kontinuierliche Datengenerierung, -speicherung und -analyse wird eine vollständige Rückverfolgbarkeit der individuellen Werkstücke und der Ökobilanz des Fertigungsprozesses entlang der Prozesskette ermöglicht.

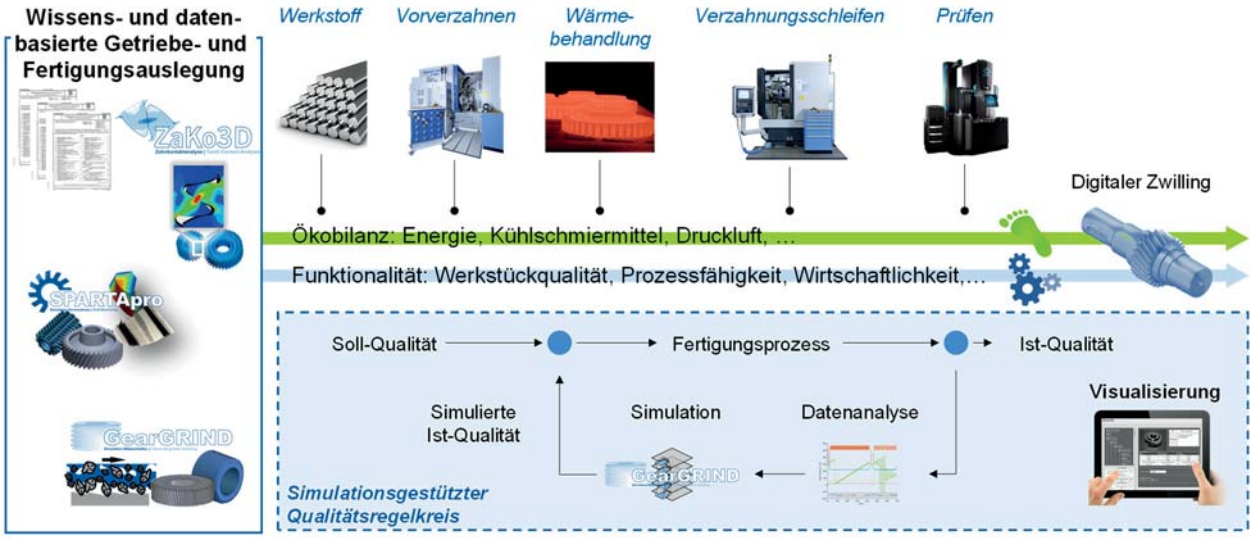



*Bild 8: Digitaler Zwilling in der Zahnradfertigung*

Die Ermittlung optimaler Getriebeauslegungen setzt in der Regel eine iterative Lösungsfindung voraus. Mit jedem Schritt wird der Detailgrad vertieft, sodass unterschiedliche Methoden und Berechnungsprogramme zum Einsatzverhalten des Getriebes und zur Fertigungssimulation der Verzahnungen zum Einsatz kommen [7]. Insbesondere die Fertigungsauslegung profitiert durch den Zugriff auf Daten und Analysen vorangegangener Fertigungsoperationen. KI-Algorithmen können aus historischen Daten schöpfen und Zusammenhänge zwischen Werkstoff, Werkzeug, Prozessparametern, Prozessgrößen (Kräfte, Leistung, Temperatur…) sowie der resultierenden Oberflächentopographie und -integrität erkennen. Auf Basis dieser Analyse können gezielt auf die Bauteilfunktionalität und den Energieverbrauch abgestimmte Prozessparameter abgeleitet werden.

In der Fertigung kann durch eine simulationsgestützte Prozessgestaltung eine adaptive Regelung des Prozesses sowie eine Echtzeitprognosefähigkeit realisiert werden. Am Beispiel des diskontinuierlichen Profilschleifens wurde eine Fertigungssimulation entwickelt, die auf dem Grundprinzip der freien Kinematiken beruht. Mit dieser Methode können beliebige Achsbewegungen der Werkzeugmaschine abgebildet werden. Die im Fertigungsprozess aufgezeichneten Servo-Traces der Maschinenachsen bilden die Grundlage der Simulation. Durch einen parallel ablaufenden Durchdringungsalgorithmus kann zunächst das kinematische Werkzeugprofil beim Abrichten numerisch berechnet werden. Mit dem abgerichteten Profil wird anschließend der Schleifvorgang auf Basis der realen Maschinenbewegungen durchgeführt. So können die kinematischen Abweichungen des geschliffenen Zahnrades auf Basis realer Achsbewegung und des abgerichteten Profils ermittelt werden. Auf diese Weise kann die Auswirkung von Achsabweichungen oder prozessbedingten charakteristischen Achsbewegungen auf die Verzahnungsqualität nahezu in Echtzeit vorhergesagt werden. Die Methode kann in einen Qualitätsregelkreis integriert werden, um Messintervalle durch simulationsgestützte Qualitätsvorhersage zu reduzieren. Eine Visualisierung der Analyseergebnisse auf Endgeräten ermöglicht dem/der Maschinenbediener:in die kontinuierliche Qualitätskontrolle. [13]

## 4 Datenschnittstelle

Eine wesentliche Anforderung für die Realisierung des Digitalen Zwillings und von Rückverfolgbarkeit ist die Schaffung einheitlicher Schnittstellen. Zwischen den einzelnen Prozessschritten sowie Messmitteln ist ein effizienter und automatisierter Datenaustausch

erforderlich. Dies ist insbesondere für heterogene Fertigungsstraßen mit Maschinen unterschiedlicher herstellender Unternehmen von Bedeutung. Dazu bedarf es der Umsetzung allgemein akzeptierter Austauschformate.

### 4.1 Datenschnittstelle in der Verzahnungsfertigung

In der Verzahnungstechnik bietet das durch den VDI/VDE Fachausschuss „Messen an Zahnrädern und Getrieben“ definierte Datenaustauschformat *Gear Data Exchange* (GDE, VDI 2610) einen Standard zum Übertragen von verzahnungsrelevanten Daten an. Das Format basiert auf der *Extensible Markup Language, kurz XML.* Die XML-Sprache ist eine Auszeichnungssprache, die sowohl von Menschen als auch von Maschinen gelesen werden kann. Die Sprache wird zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten verwendet und ist flexibel erweiterbar. Sie besteht aus ASCII-Zeichen und kann mit einem konventionell verfügbaren Standard-Texteditor angezeigt und bearbeitet werden. Jede Datei besteht aus mindestens einer Datenstruktur gear_data (*Verzahnungsdaten*). Die Verzahnungsdaten umfassen neben der Verzahnungsgeometrie auch Modifikationen und Toleranzen. Zusätzlich können Mess- und Auswertungsdaten eines Bearbeitungszustandes berücksichtigt werden. Für die Übertragung von Fertigungsdaten bietet das GDE Format die Elemente *Werkzeug*, *Prozess*, *Prozesskette* und *Fertigungsstufen* an. Die Verknüpfung dieser Daten mit den Verzahnungsdaten erfolgt durch die eindeutigen Schlüsselattribute (ID-Nummer), die nur innerhalb der GDE-Datei gültig sind. [14]

Heutzutage erfolgt in der Zahnradproduktion die Datenübertragung in vielen Prozessen maßgeblich durch manuelle Eingabe. Das Potential, welches sich aus der IT- und Kommunikationstechnik ergibt, wird noch nicht ausgenutzt. Ein Informationsaustausch zwischen den Produktionsprozessen erfolgt nicht in digitaler Form, sondern manuell durch einen handschriftlichen Eintrag des Mitarbeitenden. Aufgrund fehlender Anwendung der standardisierten Schnittstelle können Verzahnungsdaten, die bereits in digitaler Form vorliegen, nicht durchgängig eingelesen werden. Eine automatische Übernahme der Daten erfolgt nur mit firmenspezifischen Schnittstellen des maschinenherstellenden Unternehmens. Die Definition und Bereitstellung der maschinenspezifischen Einzellösungen sind aufwändig und führen zu einer erschwerten Vernetzung der Prozesse. Die fehlende gemeinsame Datenerfassung in der Werkzeugbeschaffung, -planung sowie in der Fertigungsprozessplanung verhindert die Rückverfolgbarkeit der Produktionsdaten im Falle eines Schadensfalls. Eine dezentrale Datenerfassung erfordert sehr hohen Aufwand in Bezug auf die Entwicklungs- und Wartungsarbeiten. Für die gleichen Funktionalitäten müssen unterschiedliche Applikationstools doppelt oder mehrfach standortspezifisch entwickelt werden. [15]

Mit Hilfe der Digitalisierung kann diese Problematik vermieden und zu gewissem Teil gelöst werden. Der erste Schritt ist die Erfassung der digitalen Produktionsdaten in einer gemeinsamen Datenbank (vgl. Bild 9, Firma ZF FRIEDRICHSHAFEN). Daten, die bisher nur in Papierform vorliegen, müssen digitalisiert werden. Zur Erfassung der Produktionsdaten werden die Werkzeug- und Fertigungsplaner sowie die Qualitätssicherung an jedem Standort von einem einheitlichen Assistenzsystem unterstützt, mit dem die erforderlichen bzw. generierten Daten eines Produktionsprozesses aus der Datenbank abgeholt bzw. in die Datenbank übertragen werden. Außer der Unterstützung bei der Datenerfassung und -sammlung bietet das Assistenzsystem der Fertigung Applikationstools für die Auslegung des Werkzeuges und Prozesses, wie z. B. die Fertigungssimulation. Der Datenaustausch zwischen der Datenbank und den Produktionsmaschinen erfolgt automatisch ohne manuelle Handeinträge. Die Maschinensignale, die für die Prozessüberwachung

relevant sind, werden während der Produktion in die Datenbank gespeichert. Durch die Vernetzung der Qualitätsdaten mit dem Bearbeitungsprozess werden die Abweichungswerte direkt in die Bearbeitungsmaschine zurückgespielt (Closed-Loop). Ferner kann bei Bedarf auch das Messprotokoll auf dem Display der Bearbeitungsmaschine angezeigt werden. [15]

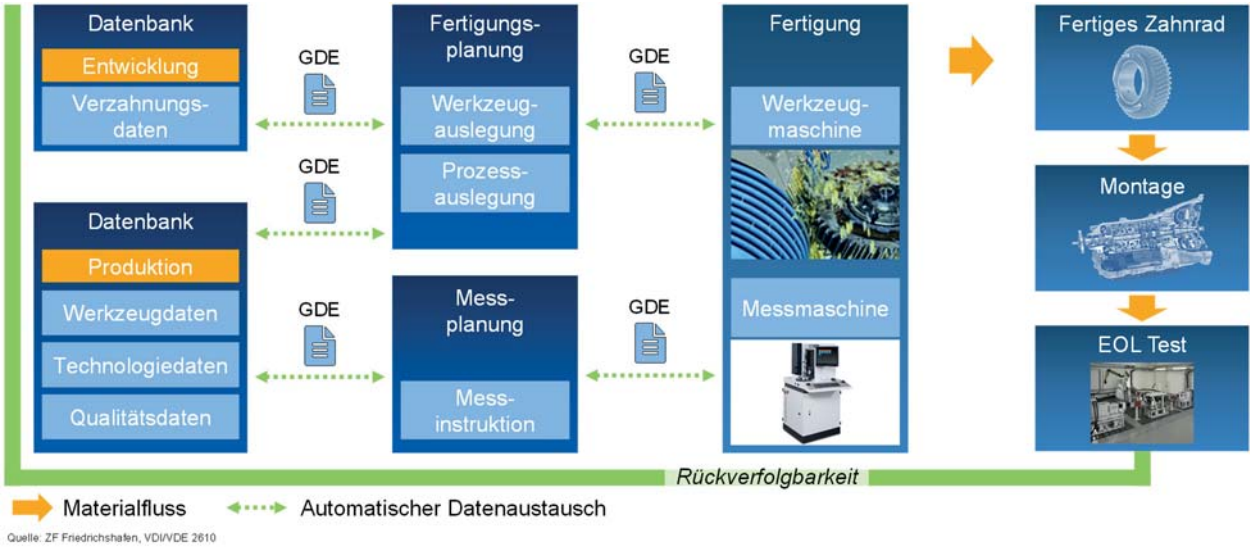



*Bild 9: Digitalisierung in der Verzahnungsfertigung [15]*

Neben der Nutzung als internes Austauschformat kann GDE auch als externes Austauschformat zwischen Unternehmen fungieren. Ein Beispiel ist die digitale Werkzeugbeschaffung. Basierend auf den Verzahnungsdaten aus der Entwicklung wird das Werkzeug von der Werkzeugplanung ausgelegt. Mit der Unterstützung des Assistenzsystems werden Fertigungssimulationen zur Ermittlung einer optimalen Werkzeuggeometrie durchgeführt. Nach dem Abschluss der Auslegungsschleife werden die Werkzeugdokumentationen zur Ablage im PDM-System erstellt. Sie sind die Basis für die Herstellung des Werkzeuges bei der zuliefernden Werkzeugmanufaktur. Der Datenaustausch mit dem zuliefernden Unternehmen erfolgt mittels GDE. Die erforderliche Werkzeuggeometrie mit dem Toleranzfeld kann sicher und eindeutig übertragen werden. Die standardisierte Schnittstelle vereinfacht die Kommunikation zwischen der Entwicklung, der Werkzeugplanung und Werkzeugherstellung. Sollten Änderungen seitens des herstellender Unternehmen vorkommen, werden die Änderungen nach Prüfung durch die Werkzeugplanung freigegeben und in der Datenbank erfasst. Die Vernetzung mit den Qualitätsdaten ermöglicht der Werkzeugplanung die Erfahrungsinformationen bei der Auslegung zu berücksichtigen. Diese Informationen können für die Entwicklung eines auf einer künstlichen Intelligenz basierenden Expertensystems verwendet werden. [15]

Ähnlich wie beim Werkzeugbeschaffungsprozess funktioniert der Datenaustausch bei der Fertigungsprozessplanung durchgängig durch Einsatz der Standardschnittstelle GDE automatisch. Auch hier unterstützt das Assistenzsystem die Fertigungsplanung bei der Ermittlung der optimalen Prozessparameter in Bezug auf Prozessstabilität und Wirtschaftlichkeit. Die Prozessauslegungsdaten werden für die Rückverfolgbarkeit in der Datenbank abgelegt. Die Rückkopplung der Qualitätsdaten dient sowohl für die Auslegung der Prozessparameter als auch für die Korrektur der Maschineneinstellgrößen. Aufgrund der unterschiedlichen Auswertestrategie bei der Verzahnungsauswertung muss die Interpretation der Qualitätsdaten zwischen der Datenbank, den Werkzeug- und den Messmaschinen synchronisiert werden, um eine einwandfreie Closed-Loop-Applikation zu ermögli-

chen. Dafür müssen sich das anwendende und das maschinenherstellende Unternehmen auf eine standardisierte Verzahnungsauswertestrategie wie z. B. die VDI 2612-1 einigen [16]. Anpassungen an den Maschineneinstellungen, die der/die Maschinenbediener:in zum Einhalten der Fertigungstoleranz durchführen muss, werden durch die Bearbeitungsmaschine vermittelt. Diese Anpassungen werden in der Datenbank erfasst und per digitaler Nachricht an die Fertigungsplanung geschickt. Somit verbessert die Vernetzung die Kommunikation zwischen der Planung und der Fertigung. Die Informationen über die getätigten Anpassungen können als Basis für die Analyse des Werkzeugverschleißes oder der Prozessstabilität dienen. Rückmeldungen aus dem Prozessüberwachungssystem der Bearbeitungsmaschine tragen beispielsweise dazu bei, frühzeitig eine Prozessstörung aufgrund von Werkzeugverschleiß zu erkennen. Weiterhin lassen sich Wartungs-, Service- und Instandsetzungsarbeiten an den Bearbeitungsmaschinen effizienter durchführen. [15]

## 4.2 Produktlebenszyklusmanagement

Eine weitere Möglichkeit der Datenspeicherung und des -Austausches bieten Product-Lifecycle-Management bzw. Produktlebenszyklusmanagement (PLM) Systeme. PLM ist ein Konzept zur nahtlosen Integration sämtlicher Informationen, die im Verlauf des Lebenszyklus eines Produktes anfallen. Das Konzept beruht auf abgestimmten Methoden, Prozessen und Organisationsstrukturen und bedient sich üblicherweise IT-Systemen für die Aufzeichnung und Verwaltung der Daten. [17]

Als produzierendes Unternehmen für Hochleistungspräzisionswälzlager für die Motorsport- und Luftfahrtindustrie nutzt die Firma CEROBEAR zur Speicherung relevanter Daten und deren Austausch mit zuliefernden Unternehmen, Kundinnen und Kunden ein solches System, vgl. Bild 10. Jedes Werkstück wird von Beginn der Produktion durch Aufbringen eines Data Matrix Codes mit einer eindeutigen Identifikationsnummer versehen. Entlang der Prozesskette wird eine mit dem PLM System verknüpfte Datenbank kontinuierlich mit Daten angereichert. Die Daten umfassen nicht ausschließlich Produktionsdaten, sondern können auch Informationen aus der Konstruktion und Entwicklung sowie von zuliefernden Unternehmen (z. B. Informationen zur Wärmebehandlung) enthalten. In der Fertigung kann durch ein Auslesen des Data Matrix Code die mit der Datenbank verknüpfte Werkzeugmaschine definierte Fertigungsdaten automatisiert übertragen.

Für die Bearbeitung hochfester Lagerwerkstoffe (z. B. M50-NiL, pulvermetallurgische Stähle) mittels Hartdrehen erfolgt eine prozessparallele Krafterfassung mit Sensorik in der Maschine. Aus dem Gesamtkraftverlauf mit unterschiedlichen Drehoperationen können einzelne Bereiche extrahiert werden, die im Bezug zu einem einzelnen Werkzeug stehen. Somit ist sowohl eine Rückverfolgbarkeit der einzelnen Werkzeuge als auch des Werkstücks möglich. Auffälligkeiten während der Bearbeitung, z. B. durch Schneidenbruch, können durch unzulässige Kraftveränderung sofort erkannt und der Prozess gestoppt werden. In einem prozessnachgelagerten Messvorgang findet die Erfassung der geometrischen und materialografischen Eigenschaften statt. Die Bauteilzuordnung erfolgt stets mit Data Matrix Code. Die gespeicherten Messergebnisse können im PLM-System zur Bestimmung von CpK-Werten eines Loses nachträglich ausgewertet werden.

Durch die direkte Online-Verknüpfung kann der Echtzeitstatus von Maschine und Bauteil jederzeit und überall abgerufen werden. Kunden und Zulieferunternehmen kann ein individueller Zugriff auf das System gewährt werden, sodass auch sie bedarfsgerecht Daten und Informationen abrufen können. Auf diese Weise wird die Rückverfolgbarkeit nicht nur

firmenintern, sondern auch über die Unternehmensgrenzen hinaus ermöglicht. Dies steigert das Vertrauen des Kundenkreises in die zugelieferten Produkte und somit die Wettbewerbsfähigkeit des zuliefernden Unternehmens.

*Bild 10: Digitaler Schatten im PLM System*

# 5 Barrieren und Mehrwert

Aus einer rein technischen Perspektive sind viele Elemente, die zur Realisierung einer funktionalen und ökologischen Rückverfolgbarkeit sowie einer daten- und modellbasierten Gestaltung der Prozesskette notwendig sind, bereits vorhanden. Aktuell werden sie jedoch noch nicht in der Art und Weise genutzt, wie es im Kontext von Industrie 4.0 möglich wäre. Bevor ein Mehrwert durch die Digitalisierung generiert werden kann, müssen gewisse Hürden überwunden werden.

## 5.1 Offene Handlungsfelder

Aus den vorhergehenden Kapiteln leiten sich offene Handlungsfelder ab, die zu einer erfolgreichen Etablierung eines Rückverfolgbarkeitssystems angegangen werden müssen, vgl. Bild 11. Diese sind unter anderen: Akzeptanz, Rechtssicherheit, Datensicherheit, Abhängigkeit und Investitionsbedarf.

**Akzeptanz**

An erster Stelle steht auch in einem digitalen Zeitalter der Mensch. Der Akzeptanz der Mitarbeitenden bei der Umsetzung der Digitalisierung kommt somit eine bedeutende Rolle zu. Oft wird die Digitalisierung jedoch nicht als Potenzial, sondern eher als Bedrohung wahrgenommen. Solche Denkweisen lassen sich ändern, wenn den betroffenen Personen aufgezeigt wird, welche persönlichen und betrieblichen Entwicklungen durch die Digitalisierung erzielt werden können. Digitale Konzepte müssen dazu beitragen, komplexe Technikprozesse sicherer, handhabbarer und einfacher zu machen. Dies kann beispielsweise durch die Einführung von Assistenzsystemen geschehen, die das Personal bei seiner täglichen Arbeit unterstützt, es aber nicht ersetzt. Gleichzeitig muss Klarheit darüber bestehen, dass mit den erfassten Daten keine leistungsbezogene Auswertung einer Person durchgeführt wird und kein arbeitsrechtlicher Nachteil für Mitarbeitende entsteht. Weiterhin kann eine flächendeckende Vernetzung mehr Selbstorganisation und Autonomie bedeuten und eine alters- und bedarfsgerechte Arbeitsgestaltung ermöglichen. Durch die Digitalisierung können Arbeitsorganisationen geschaffen werden, die

mehr selbstbestimmte Flexibilität zulassen, so dass Mitarbeitende besseren Zugang zu Informationen und Wissen erhalten. [15, 18]

*Bild 11: Offene Handlungsfelder für die Digitalisierung*

**Rechtssicherheit**

Rechtssicherheit ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für Investitionen in Industrie 4.0 Projekte. Rechtssicherheit bedeutet zum einen, dass rechtliche Hindernisse möglichst beseitigt werden. Zum anderen, dass sich der bekannte und für eine Investitionsplanung zugrunde gelegte Rechtsrahmen möglichst wenig ändert. Denn jede Änderung rechtlicher Grundlagen erzeugt auch Unsicherheit bei den Unternehmen und die Notwendigkeit, zeit- und kostenaufwändige Anpassungsprozesse durchzuführen. Eine Bitkom Studie aus dem Jahr 2016 untersuchte die rechtlichen Rahmenbedingungen in Rechtsgebieten, die für Industrie 4.0 von besonderer Bedeutung sind, unter anderem Datenhoheit und Datenschutz. Die Studie ergab, dass derzeit nur in wenigen Bereichen Rechtsetzungsbedarf besteht, so im AGB-Recht, im Vertragsrecht, im Datenschutzrecht und beim Schutz von Know-how. Dabei sind teilweise nur Änderungen, teilweise die Ausfüllung bestehender Rahmenvorschriften und teilweise auch nur untergesetzliche Normen erforderlich. Generell wird die geltende Rechtslage für ausreichend empfunden, um die Herausforderungen von Industrie 4.0 in den Griff zu bekommen, ohne die weitere Entwicklung der Digitalisierung in der Wirtschaft zu beeinträchtigen. [19]

**Datensicherheit**

Neben der gesellschaftlichen Akzeptanz muss die Sicherheit von digitalen Konzepten unter allen Umständen gewährleistet sein. Die Manipulation und Sabotage von Systemen stellt eine besondere Herausforderung dar. Technische Rahmenbedingungen müssen geschaffen werden, die einen sicheren Datentransfer zwischen Unternehmen erlauben (z.B. mittels Blockchain Technologie), um einen unbefugten Zugriff auf das System und die Daten zu verhindern.

**Investitionsbedarf**

Die Digitalisierung erfordert von den daran beteiligten Unternehmen nicht unerhebliche Investitionen, um Produktions- und Wertschöpfungsprozesse auf eine neue Qualitätsstufe zu heben. Neben Investitionskosten für Softwarelösungen, wie Datenbanken und

Fertigungssimulationen, fallen auch Kosten für Maschinenaufrüstungen (Schnittstellen, Sensorik) an.

### Abhängigkeit

Die Digitalisierung führt zu einer heterogenen Landschaft von Unternehmen, die sich in verschiedenen Phasen des Digitalisierungsprozesses befinden. Insbesondere zuliefernde Unternehmen von OEM, die in der Umsetzung digitaler Konzepte (Rückverfolgbarkeit) weit vorangeschritten sind, haben einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil gegenüber Konkurrenzunternehmen. Denn eine vollständige Rückverfolgbarkeit schafft Vertrauen zwischen den beteiligten Parteien. Aus der Sicht des OEM führt dies aber auch zu einer Abhängigkeit von dem zuliefernden Unternehmen.

## 5.2 Mehrwert durch Rückverfolgbarkeit

Sind die Barrieren für die Implementierung einer funktionalen Rückverfolgbarkeit ganz oder teilweise überwunden, kann das Unternehmen von verschiedenen Vorteilen profitieren und einen Mehrwert generieren, vgl. Bild 12. Ähnlich zu den zuvor diskutierten Barrieren ist auch der Mehrwert individuell auf ein Unternehmen zugeschnitten und kann nur schwer generalisiert werden.

*Bild 12: Mehrwert durch Digitalisierung*

### Gesteigertes Vertrauen

Ein wesentlicher Vorteil einer vollständigen Rückverfolgbarkeit ist ein gesteigertes Vertrauen zwischen den in der Liefer- und Fertigungskette beteiligten Unternehmen. OEM können stets nachverfolgen, ob die Qualität der Zulieferteile den Vorgaben entsprechen. Dies ist insbesondere für Branchen mit hohen Sicherheitsanforderungen, wie z. B. der Luftfahrtindustrie, ein wichtiger Aspekt.

### Ressourcenschonung

Durch eine daten- und modellbasierte Prozessgestaltung können Fertigungsprozesse effizienter ausgelegt werden. So wird unter anderem durch die Kenntnis von Ursache-Wirkungszusammenhänge Werkzeugverschleiß oder Ausschuss reduziert und somit Ressourcen geschont. Durch eine kontinuierliche Erfassung der Energieströme können zudem Energieeinsparpotenziale identifiziert und umgesetzt werden.

**Kostenreduktion**

Einerseits resultiert eine Steigerung der Produktivität bei gleichzeitiger Reduktion von Werkzeugverschleiß und Ausschuss in einer Verringerung der Kosten. Andererseits können die Fertigungsprozesse durch ein umfangreiches Prozessverständnis direkt in einem optimalen Parameterbereich ausgelegt werden („First Part Right"), wodurch Kosten durch aufwändige Iterationsschritte vermieden werden. Eine vollständige Rückverfolgbarkeit der gesamten Fertigungs- und Lieferkette erlaubt zudem eine schnelle und sicherere Nachvollziehbarkeit der Fertigungshistorie eines individuellen Bauteils. Kostenintensive Nachverfolgungsaufträge werden somit redundant.

**Verbesserte Funktionalität**

In der Fertigung, insbesondere im Luftfahrtbereich, ist es oft gängige Praxis Prozessparameter, mit denen die erforderliche Funktionalität (Oberflächenintegrität, geometrische Qualität) eines Bauteils erreicht wird, „einzufrieren" (Frozen Process). Dies bedingt jedoch zumeist eine Reihe von vorgeschalteten Iterationsschritten, bis geeignete Prozessparameter identifiziert werden. Mithilfe von daten- und modellbasierten Ansätzen können diese Iterationsschritte reduziert und die erforderliche Funktionalität früher erreicht werden. Durch einen Wechsel von „Frozen Process" zu „Frozen Functionality" wird die Funktionalität auch bei abweichenden Parametern kontinuierlich sichergestellt. Prozesse können so an äußere Störungen flexibel angepasst und potenzielle Abweichungen kompensiert werden.

**Steigerung der Produktivität**

Durch eine daten- und modellbasierte Prozessgestaltung können Fertigungsprozesse effizienter ausgelegt werden. So kann unter anderem bei konstanter Bauteilqualität die Produktivität erhöht werden. Insbesondere eine daten- und modellbasierte Betrachtung der Fertigungsstreuung unter Berücksichtigung der geforderten Fertigungstoleranzen aus der Konstruktion bietet Potenzial in der Steigerung der Produktivität.

## 5.3 (Traum-)Fabrik der Zukunft

In der (Traum-)Fabrik der Zukunft sind alle Barrieren überwunden und eine vollständige Datensicherheit sichergestellt (s. Bild 13). Kunden und zuliefernde Unternehmen haben durch ein gemeinsames Rückverfolgbarkeitssystem jederzeit und überall Einsicht in die für sie relevanten Produkteigenschaften und -informationen. Eine über alle Fertigungsinstanzen reichende Vernetzung ist realisiert, die die Datenakquisition, -speicherung, -verarbeitung und --nutzung in einer internen Unternehmens-Cloud-Umgebung (On Premise) sicherstellt. Werkzeug- und Messmaschinen sind direkt verbunden und können in Echtzeit relevante Daten übertragen. Die Verwendung von Realdaten kombiniert mit Technologiemodellen ermöglicht die Prognosefähigkeit von Prozessen, Prozessketten und Bauteilqualitäten. Durch diese modell- und datenbasierte Prozessgestaltung und --überwachung wird eine konstante Qualität der Bauteile bei minimalem Ressourcen- und Energieverbrauch und maximaler Produktivität sichergestellt. Über den Digitalen Zwilling als virtuelles Detailabbild der Komponente wird eine beschleunigte Produkt- und Prozessentwicklung sowie eine autonome Steuerung von Prozessen und Prozessketten ermög-

licht. Dadurch wird die Anpassungsfähigkeit einer Produktion deutlich verbessert. Mitarbeitende werden durch Visualisierungssysteme befähigt, Entscheidungen schneller und wissensbasierter zu treffen. [20]

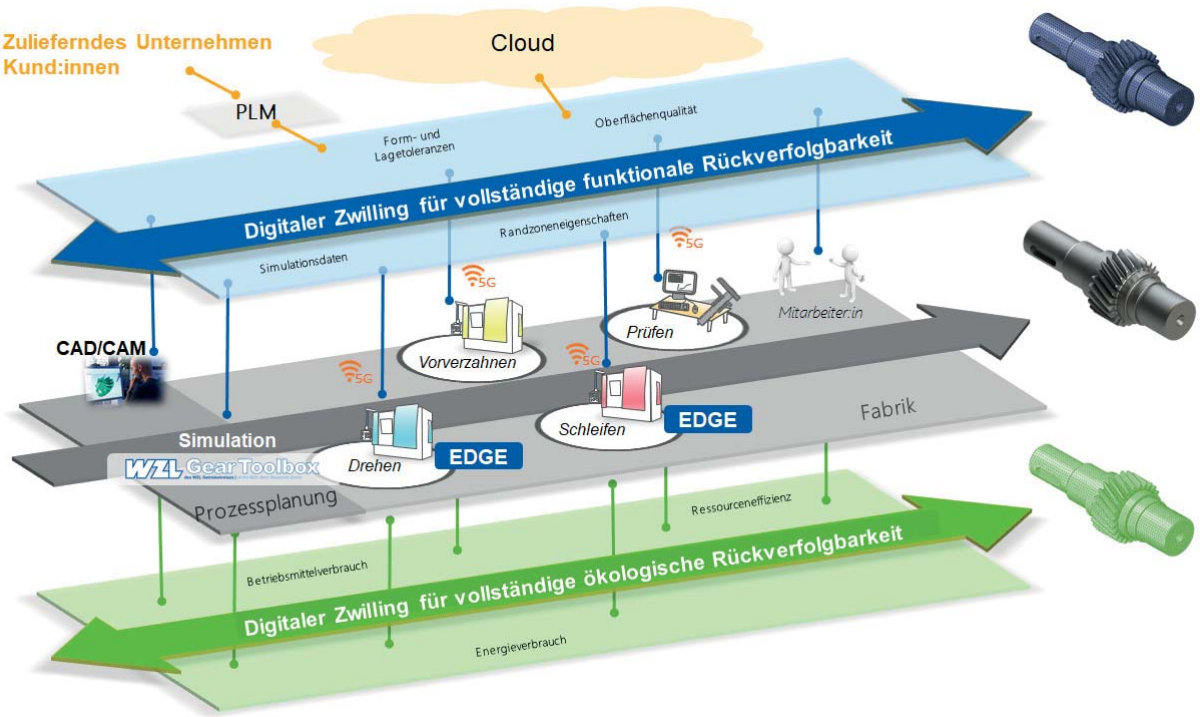



*Bild 13: Fabrik der Zukunft (angelehnt an [20])*

## 6 Fazit und Ausblick

Die Sicherstellung der Bauteilfunktionalität ist ein entscheidendes Qualitätskriterium. Die in den einzelnen Fertigungsschritten aufgezeichneten Daten müssen jederzeit verfügbar sein und aktuelle Informationen über das Bauteil, die vorangegangen Prozesse sowie die verwendeten Produktionsmittel enthalten. Im Falle eines Qualitätsproblems muss das herstellende Unternehmen in der Lage sein, umgehend die Fehlerursache zu identifizieren und wirksame Maßnahmen zu dessen Behebung zu ergreifen. Der Rückverfolgbarkeit kommt somit eine entscheidende Rolle zu. Durch daten- und modellbasierte Ansätze können Fertigungsprozesse so gestaltet werden, dass sie effizienter und ressourcenschonender arbeiten sowie gleichzeitig einen höheren Informationsgehalt für die Rückverfolgbarkeit generieren. Eine Kopplung mit Prozessmodellen erlaubt die nachhaltige Abbildung funktionaler Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und somit eine technologische Abstimmung der einzelnen Prozessschritte hinsichtlich der resultierenden Bauteileigenschaften und des ökologischen Fußabdrucks.

In komplexen Prozessketten (z. B. Verzahnungsfertigung) besteht die Anforderung, dass die einzelnen Prozessschritte zur Erfüllung der Bauteilanforderungen optimal aufeinander abgestimmt werden müssen. Im Detail unterschieden die sich daraus ergebenden Herausforderungen zwischen den Anwendungsfällen. Generell werden hohe Anforderungen hinsichtlich Verfügbarkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit gestellt. Weiterhin besteht zur Erfüllung der kontinuierlich zunehmenden Umweltauflagen der Bedarf nach Energieeinsparmaßnahmen. Vor diesem Hintergrund wurden verschiedene Aspekte einer daten- und modellbasierten Prozessgestaltung betrachtet. Es wurde gezeigt, dass die Datenerhebung zielgrößengerichtet sein muss und nur in dem Umfang erfolgen sollte, der tat-

sächlich sinnvoll ist. In einem nächsten Schritt müssen diese Daten wissensbasiert ausgewertet werden. Erst durch die Vernetzung der Informationen aus der Fertigung, insbesondere durch die Einbeziehung des/der Mitarbeitende, entsteht die Basis, um Prozessketten hinsichtlich der resultierenden Bauteilfunktionalität zu optimieren.

Zur Realisierung einer vollständigen Rückverfolgbarkeit der gesamten Prozesskette ist die Analyse eines Einzelprozesses jedoch nicht ausreichend. Eine wesentliche Weiterentwicklung stellt das Konzept des Digitalen Zwillings auf Prozesskettenebene dar. Als Basis werden die individuellen Prozessschritte daten- und modellbasiert beschrieben. Die strukturierte Speicherung und Auswertung der generierten Daten erlaubt es für neue Anwendungsfälle, die Prozesseinrichtung durch Selbstlernstrategien zu verkürzen. Für die Umsetzung des Digitalen Zwillings ist die Schaffung einheitlicher Schnittstellen zwingend erforderlich. Zwischen den einzelnen Prozessschritten sowie Messmitteln ist ein effizienter und automatisierter Datenaustausch notwendig. Dies ist insbesondere für heterogene Fertigungsstraßen mit Maschinen unterschiedlicher Spezifikationen von Bedeutung. Dazu bedarf es der Umsetzung allgemein akzeptierter Austauschformate.

Aus einer rein technischen Sicht sind viele Elemente, die zur Realisierung einer funktionalen und ökologischen Rückverfolgbarkeit sowie einer daten- und modellbasierten Gestaltung der Prozesskette notwendig sind, bereits vorhanden. Aktuell werden sie jedoch noch nicht in der Art und Weise genutzt, wie es theoretisch möglich wäre. Grund hierfür sind unterschiedliche rechtliche sowie unternehmens- und soziokulturelle Faktoren. Bevor ein Mehrwert durch die Digitalisierung generiert werden kann, müssen die Hürden ganz oder zumindest teilweise überwunden werden. Als Resultat entsteht ein modernes Produktionsumfeld, in dem eine vollständige Rückverfolgbarkeit und Prognosefähigkeit von Prozessen und Prozessketten gegeben ist. Durch ein gemeinsames Austauschsystem haben Kunden und zuliefernde Unternehmen jederzeit und überall Einsicht in die für sie relevanten Produkteigenschaften und -informationen. Mitarbeitende werden durch Visualisierungssysteme befähigt, Entscheidungen schneller und wissensbasierter zu treffen. Zudem können Unternehmen durch die Kenntnis des ökologischen Fußabdrucks der Fertigungskette Energieeinsparmaßnahmen vornehmen und so eine ressourcenschonende Produktion realisieren.

# 7 Literatur


[1] J. Cleland-Huang, O. Gotel, und A. Zisman, *Software and Systems Traceability*. London: Springer, 2012.

[2] O. Gotel und A. Finkelstein, “An Analysis of the Requirements Traceability Problem,” in *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Requirements Engineering*, Colorado Springs, CO, USA, 1994, S. 94–101.

[3] Keyence Corporation, “Leitfaden zur Rückverfolgbarkeit,” Neu-Isenburg, 2017.

[4] *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*, 9000, Norm, Berlin, Nov. 2015.

[5] *Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen*, 9001, Norm, Berlin, Nov. 2015.

[6] F. Klocke *et al.,* “Prognosefähigkeit für Prozessketten,” in *AWK Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium 2017: Internet of Production für agile Unternehmen*, Aachen, 2017, S. 435–493.

[7] F. Klocke und C. Brecher, *Zahnrad- und Getriebetechnik: Auslegung - Herstellung - Untersuchung - Simulation*. München: Hanser, 2017.

[8] *RICHTLINIE (EU) 2018/2002 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 zur Änderung der Richtlinie 2012/27/EU zur Energieeffizienz: EED*, 11. Dezember 20018.

[9] B. Schlomann, C. Rohde, und S. Bentele, “Mögliche Ausgestaltung eines Energieeinsparverpflichtungssystems für Deutschland,” Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2020.

[10] H. Stachowiak, *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer, 1973.

[11] B. Sohlberg und E. W. Jacobsen, “Grey Box Modelling - Branches and Experiences,” in *Proceedings of the 17th World Congress of The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, 2008, S. 11415–11420.

[12] T. Sadek, “Smarte Lösungen im Zeitalter der Digitalisierung,” in *Innovationen rund ums Kegelrad*, Aachen, 2018, S. 1–22.

[13] T. Bergs *et al.,* “Funktionale Rückverfolgbarkeit von Prozessketten: Ein daten- und modellbasierter Ansatz,” in *Internet of Production - Turning Data into Value: Statusberichte aus der Produktionstechnik 2020*, T. Bergs, C. Brecher, R. Schmitt, und G. Schuh, Hrsg., Aachen: Fraunhofer IPT, RWTH Aachen, 2020, S. 209–225.

[14] *Format für den Austausch von Verzahnungsdaten Gear-Data-Exchange-Format (GDE-Format)*, 2610, Richtlinie, Berlin, Mai. 2014.

[15] H. Yakaria, “Gear Data Exchange (GDE) - goLive,” in *International Conference on Gears 2017*, Garching, 2017, S. 1235–1246.

[16] *Messen und Prüfen von Verzahnungen: Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil*, 2612-1, Richtlinie, Berlin, Nov. 2018.

[17] M. Eigner und R. Stelzer, *Product Lifecycle Management*. Berlin: Springer, 2009.

[18] W. Bauer, S. Schlund, und D. Marrenbach, “Industrie 4.0 –Volkswirtschaftliches Potenzialfür Deutschland,” Berlin, 2014.

[19] Bitkom, “Rechtliche Rahmenbedingungen von Industrie 4.0: Stellungnahme,” Berlin, 2016.

[20] F. Klocke *et al.,* “Vernetzte adaptive Produktion,” in *AWK Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium 2017: Internet of Production für agile Unternehmen*, Aachen, 2017, S. 263-286.

**Danksagung**
Das WZL dankt den Mitautoren für die Bereitstellung der Inhalte und Beispiele aus den jeweiligen Unternehmen zur Erstellung des vorliegenden Berichts.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 3.1:

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT
Dr.-Ing. J. Brimmers, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Dr.-Ing. G. Kappmeyer, Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG
Dr.-Ing. C. Löpenhaus, Cerobear GmbH
Dr.-Ing. F. Scheffler, Klingelnberg AG
Dr.-Ing. U. Thies, Daimler AG
N. Troß., Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
J. Wemhöner, Cerobear GmbH
Dr.-Ing. H. Yakaria, ZF Friedrichshafen AG

## 3.2 Predictive Quality – Data Analytics zur Steigerung unternehmerischer Nachhaltigkeit

*R. H. Schmitt, R. Kurzhals, R. Kiesel, G. Nilgen, P. Schlegel, E. Dietrich, J. Krauß, A. Latz, M. Ellerich, N. Miller*

### Gliederung

1 Einleitung ....291

2 Predictive Quality im Kontext unternehmerischer Nachhaltigkeit ....292
2.1 Data Analytics in produzierenden Unternehmen ....292
2.2 Bedeutung für die Qualität – Predictive Quality ....294
2.3 Synergetische Potenziale von Predictive Quality ....295

3 Produktbezogene Anwendungsbeispiele ....297
3.1 Digital Diagnosis Assistance für Kundendiensttechnikerinnen und -technikern ....298
3.2 Predictive Maintenance – Dynamisierung von Kalibrierintervallen ....301

4 Prozessbezogene Anwendungsbeispiele ....304
4.1 Ausschussprognosen in Produktionsketten ....305
4.2 Datengetriebene Dynamisierung von Stichproben ....307
4.3 KI-basierte Analyse der Produktionsqualität ....309

5 Voraussetzungen für die Realisierung ....312

6 Herausforderungen bei der Umsetzung ....313
6.1 Technische Herausforderungen ....313
6.2 Unternehmenskulturelle und betriebswirtschaftliche Herausforderungen ....314

7 Zusammenfassung und Ausblick ....314

8 Literatur ....316

## Kurzfassung

**Predictive Quality – Data Analytics zur Steigerung unternehmerischer Nachhaltigkeit**

Zunehmende Produktkomplexität und -vielfalt, komplexere Herstellungsprozesse und steigende Nachhaltigkeitsforderungen stellen zentrale Herausforderungen für die kontinuierliche Verbesserung der prozess- und produktbezogenen Qualität dar. Predictive Quality beschreibt in diesem Zusammenhang die Befähigung des Anwendenden zur Optimierung der produkt- und prozessbezogenen Qualität durch die Nutzung datengetriebener Prognosen als Entscheidungsgrundlage für Handlungsmaßnahmen. Indem Anwendende in die Lage versetzt werden, zukünftige Ereignisse in ihrem Sinne zu steuern, lassen sich in der Praxis vielfältige Potenziale realisieren. Durch das Ausschöpfen dieser Potenziale lässt sich neben der Optimierung von produkt- und prozessbezogener Qualität auch eine Steigerung der unternehmerischen Nachhaltigkeit im Sinne eines synergetischen Zusammenspiels erzielen. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird anhand von fünf Anwendungsbeispielen aus unterschiedlichen Branchen und Domänen exemplarisch gezeigt, wie sich durch die Anwendung prädiktiver Data Analytics Methoden konkrete Mehrwerte zur Steigerung unternehmerischer Nachhaltigkeit für produzierende Unternehmen schaffen lassen.

## Abstract

**Predictive Quality - Data Analytics for increasing corporate sustainability**

Increasing product complexity and variety, more complex manufacturing processes and rising sustainability requirements are major challenges for the continuous improvement of process- and product-related quality. In this context, predictive quality describes the empowerment of the user to optimize product and process-related quality by using data-driven predictions as a basis for decision-making and action. By enabling the user to control future events in his or her interest, a wide range of potentials can be realized in practice. By tapping this potential, it is possible to not only optimize product- and process-related quality, but also to increase corporate sustainability in the sense of a synergetic approach. In this paper, five use cases from different industries and domains are presented to show how the application of predictive data analytics methods can create actual added value for increasing corporate sustainability in manufacturing companies.

# 1 Einleitung

Um im Wettbewerb produzierender Unternehmen auf globalen Märkten dauerhaft eine Vorreiterrolle einzunehmen, ist die größtmögliche Realisierung von Potenzialen der Digitalisierung unabdingbar. Im Zuge dieser Digitalisierung führt eine immer stärkere Vernetzung von Lieferfirmen, produzierenden Unternehmen und dem Kundenkreis sowie die Nutzung einer steigenden Anzahl unterschiedlicher Informationskanäle zu einem rasanten *Anstieg der Datenverfügbarkeit*. Über eine starke Hebelwirkung zur kontinuierlichen *Verbesserung der produkt- und prozessbezogenen Qualität* verfügt die konsequente Nutzung des Wissens, welches in den exponentiell ansteigenden Datenmengen steckt. Gleichzeitig kann die Verwendung dieses Wissens genutzt werden, um den stetig zunehmenden Nachhaltigkeitsforderungen aus Bevölkerung und Politik zu begegnen. *Unternehmerische Nachhaltigkeit* bezeichnet in diesem Kontext die Befriedigung der Bedürfnisse der direkten und indirekten Stakeholder (z. B. Anteilsinhabende, Mitarbeitende), ohne die Bedürfniserfüllung zukünftiger Stakeholder zu kompromittieren [1]. Dazu erfordert eine nachhaltige Entwicklung die gleichzeitige und gleichberechtigte Einbeziehung der miteinander in Wechselwirkung stehenden ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekte der Unternehmensstrategie [2, 3].

Um die für das Unternehmen, die Prozesse und die Produkte richtigen Entscheidungen zu treffen, gilt es im Rahmen entsprechender Datenanalysen die für den Anwendungsfall relevanten Prognosen zu treffen. Hierbei liegen die größten Herausforderungen neben der kontextspezifischen Datenauswahl und Aufbereitung vor allem in der *Datenintegration* im Sinne einer lückenlosen Verknüpfung verschiedener Datenpunkte und dem Referenzieren auf individuelle Entitäten wie z. B. das physische Produkt [4]. Um diesen Herausforderungen zu begegnen und die Potenziale zu heben, forcieren eine Vielzahl an Unternehmen die Anwendung systematisierter *Data Analytics* Ansätze.

Dabei beschreibt *Predictive Quality* (dt. prädiktive Qualität) die Befähigung des Anwendenden zu einer datengetriebenen Vorhersage der produkt- und prozessbezogenen Qualität in der Herstellung und Nutzung physischer Produkte. Predictive Quality verfolgt so das übergeordnete Ziel, den Anwendenden in die Lage zu versetzen, *auf Basis prädiktiver Analysen präskriptiv zu handeln* und so zukünftige qualitätsbeeinflussende Ereignisse in dessen Sinne zu steuern. Inwiefern der zunehmende Einsatz von Data Analytics in der Qualität bestehende Prinzipien und Methoden ergänzt oder sogar ersetzt ist bisher nur unzureichend geklärt. Der vorliegende Beitrag geht dieser Fragestellung nach, stellt Lösungsansätze für die erfolgreiche Realisierung vor und zeigt auf, wie Predictive Quality Ansätze zur Steigerung der unternehmerischen Nachhaltigkeit beitragen können.

Auf Basis einer Untersuchung der *synergetischen Potenziale* von Predictive Quality Ansätzen wird die Realisierung dieser durch *konkrete Anwendungsbeispiele* aus unterschiedlichen Branchen exemplarisch vorgestellt. In diesem Zusammenhang werden neben den Potenzialen auch Risiken und Einschränkungen bei der Implementierung beleuchtet. Aufbauend darauf werden die zugrundeliegenden *Voraussetzungen* für eine erfolgreiche Umsetzung von Predictive Quality abgeleitet und die größten *Herausforderungen* bei der Umsetzung herausgearbeitet.

Der Beitrag ist wie folgt strukturiert: Im Rahmen von Kapitel 2 wird der Begriff Predictive Quality definiert und durch die Diskussion der vielfältigen Potenziale motiviert. Eine Darstellung von Anwendungsbeispielen mit Fokus auf der Steigerung der produktbezogenen Qualität erfolgt in Kapitel 3. Dagegen werden in Kapitel 4 Anwendungsbeispiele prädiktiver Data Analytics Methoden mit Fokus auf der prozessbezogenen Qualität thematisiert.

Die beschriebenen Anwendungsbeispiele entstammen unterschiedlichen Branchen und werden in verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus verortet. Hierdurch wird sowohl die branchenübergreifende Relevanz als auch die breite Anwendbarkeit der entwickelten Methoden verdeutlicht.

Ausgehend von den vorgestellten Anwendungsbeispielen werden in Kapitel 5 konkrete Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung von Predictive Quality Ansätzen abgeleitet. Hierbei liegt der Fokus sowohl auf der Datenbasis selbst als auch auf dem Menschen als Nutzenden und Wissenden. Anschließend werden in Kapitel 6 die größten technischen sowie unternehmenskulturellen und betriebswirtschaftlichen Herausforderungen bei der Umsetzung diskutiert. Kapitel 7 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Entwicklungen.

## 2 Predictive Quality im Kontext unternehmerischer Nachhaltigkeit

Im Rahmen des folgenden Kapitels wird die Bedeutung von Data Analytics für die Qualität diskutiert, der Begriff Predictive Quality definiert und ein Auszug der vielfältigen Potenziale solcher Anwendungen dargestellt. Besonderer Fokus liegt hierbei auf den synergetischen Potenzialen, welche sich neben der Optimierung von produkt- und prozessbezogener Qualität für die Steigerung unternehmerischer Nachhaltigkeit ergeben.

### 2.1 Data Analytics in produzierenden Unternehmen

Um das Verständnis von Produkten und Prozessen zu verbessern und Entscheidungen zu unterstützen, sollen relevante Informationen aus Rohdaten extrahiert und Wissen abgeleitet werden [5, 6]. Um diese Entscheidungen im Unternehmen auf Basis des in den Daten enthaltenen Wissens zu treffen, ist Data Analytics als Werkzeug zur Untersuchung von großen Datenmengen von fundamentaler Bedeutung. Data Analytics beschreibt dabei den Prozess der *Datenuntersuchung*, des *Datenverständnisses* und des *Erkenntnisgewinns*. Das Ziel von Data Analytics ist die Identifizierung von unbekannten Mustern und Zusammenhängen zwischen verschiedenen Variablen durch die Analyse von Rohdaten [7].

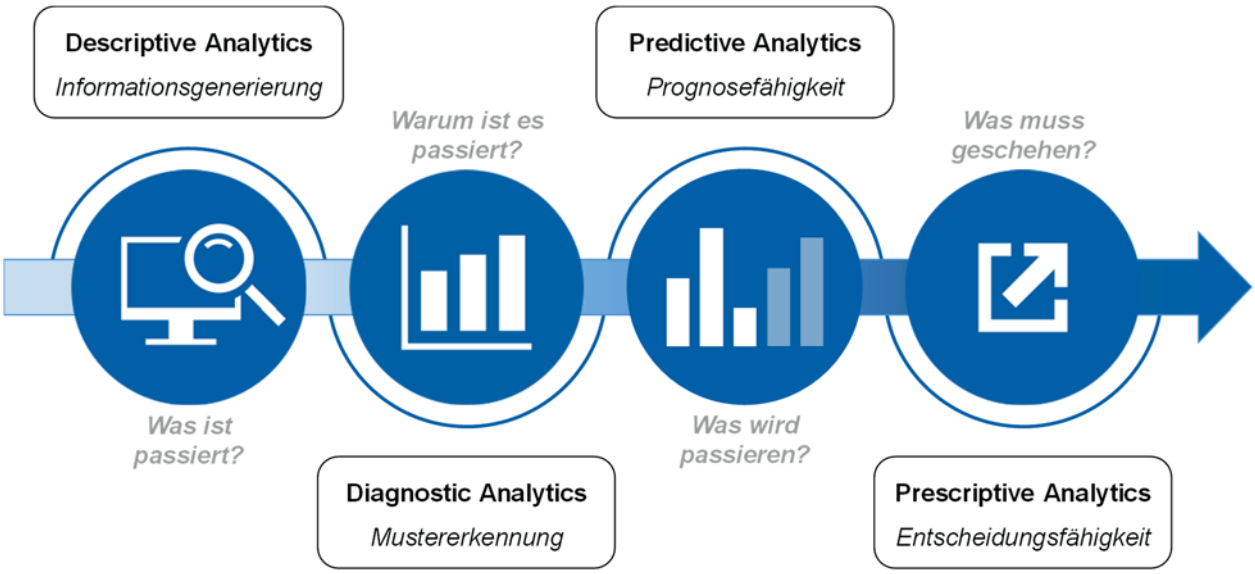



*Bild 1: Data Analytics in produzierenden Unternehmen*

Bei der Umsetzung dieser Entscheidungsunterstützung in Form von lernenden Assistenzsystemen erfolgt die Datenauswahl und -aufbereitung sehr anwendungsspezifisch. Auch der Umfang und die Komplexität der eingesetzten Verfahren der Datenanalyse hängen stark von verschiedenen Faktoren wie z.B. Einsatzzweck, Expertise und verfügbaren Ressourcen ab. Entsprechend vielfältig ist die Menge an potenziellen Verfahren, welche sich von statistischen Methoden bis hin zu komplexen Machine Learning-Modellen erstrecken (ML-Modelle). Prinzipiell unterscheidet man zwischen vier unterschiedlichen, teilweise aufeinander aufbauenden Stufen der Datenanalyse: *Descriptive Analytics, Diagnostic Analytics, Predictive Analytics* und *Prescriptive Analytics* [8]. Die einzelnen Stufen sind in Bild 1 dargestellt [9].

*Descriptive Analytics* beschreibt die Interpretation historischer Daten mit dem Ziel, ein besseres Verständnis eines in der Vergangenheit liegenden Prozesses aufzubauen. Das generierte Wissen lässt sich beispielsweise zur Erstellung und Auswertung von Kennzahlen nutzen. *Diagnostic Analytics* hat zum Ziel, auf Basis historischer Daten Wirkbeziehungen zwischen bestimmten Ereignissen zu ermitteln. Kennzeichnend ist analog zu *Descriptive Analytics* ein rückwärts gerichteter Blick, mit dem Unterschied, dass eine Ursachenfindung angestrebt wird. Während sich die beiden ersten Data Analytics Stufen auf einen nicht mehr beeinflussbaren Zeitpunkt und damit ausschließlich auf historische Vorkommnisse beziehen, liegt der Fokus von *Predictive Analytics* nun auf der Betrachtung von zukünftig mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eintretenden Ereignissen. Auf Basis des gewonnenen Wissens werden nun zukünftige Ereignisse oder Zustände prognostiziert. *Prescriptive Analytics* ermöglicht es dann, aufbauend auf den Erkenntnissen der Prognosemodelle, automatisiert Entscheidungen und Maßnahmen abzuleiten. Jede Stufe der Datenanalyse zielt letztendlich darauf ab den Anwendenden zu präskriptivem Handeln und damit zu einer zielgerichteten Beeinflussung von Prozessen zu befähigen. Die Unterscheidung liegt im Wissensgehalt, mit dem die Informationen den Anwendenden zur Verfügung gestellt werden.

Die Einsatzmöglichkeiten und Potenziale von Data Analytics sind im Sinne einer datenbasierten Entscheidungsfindung in produzierenden Unternehmen so enorm wie vielfältig (vgl. Kapitel 2.3), wobei der Grad der tatsächlichen Umsetzung stark von der jeweiligen Unternehmensgröße und Industriebranche abhängt [10]. So sind laut einer Studie des McKinsey Global Institute (MGI) in der industriellen Fertigung nur etwa 20 bis 30 Prozent des Potenzials in der Anwendung von Data Analytics Methoden ausgeschöpft [11]. Zu den Anwendungen gehören beispielsweise der Einsatz von Data Analytics in der Produktionsplanung zur Steigerung der Termintreue und Lieferfähigkeit oder der Einsatz in der Auftragsabwicklung zur softwaretechnischen Unterstützung der Angebotserstellung und Beschaffung durch Analyse und Prognose relevanter Daten [10, 12]. Predictive Maintenance ist ein weiteres prominentes Anwendungsbeispiel, durch dessen Einsatz beispielsweise das Unternehmen Trumpf verbesserte Prozesstransparenz, Produktivitätssteigerung und optimierte Serviceeinsätze erzielen konnte [13].

Die erfolgreiche Umsetzung von Data Analytics Methoden in produzierenden Unternehmen geht jedoch weit über die reine Algorithmik hinaus. Neben der eigentlichen Datenauswertung muss für die erfolgreiche Akquise, Vorverarbeitung und Analyse im Unternehmen auch eine entsprechende *Infrastruktur* geschaffen werden. Des Weiteren müssen geeignete Schnittstellen geschaffen werden, um das gewonnene Wissen dem Menschen als Entscheidungsunterstützung zugänglich zu machen. Eine solche Infrastruktur bietet das *Internet of Production* (IoP). Dieses beschreibt über die Definition von Aggregationsebenen die Veredelung von Rohdaten hin zu aufbereitetem Wissen, welches für

den Menschen unmittelbar nutzbar ist [14]. Auch für eine erfolgreiche Umsetzung von Data Analytics in der Qualität und dem damit verbundenen Einsatz datengetriebener prädiktiver Methoden bietet das IoP die notwendige IT-Infrastruktur.

## 2.2 Bedeutung für die Qualität – Predictive Quality

Die Qualität eines Produktes hängt maßgeblich vom Zusammenspiel der einzelnen Produktionsschritte und dem Zustand der jeweilig verwendeten Komponenten ab. Aufgrund steigender Komplexität in den Produktionsabläufen steigt die Anzahl der immanenten Wechselwirkungen einzelner Prozesse an. Darüber hinaus führt die steigende Individualisierung der Produkte zu einer deutlichen Erhöhung der Prozessvarianz. Ein datengetriebener prädiktiver Ansatz ermöglicht durch den Blick in die Zukunft eine genauere Betrachtung der qualitätsrelevanten Faktoren. Anstatt einer reinen Beurteilung anhand der Prozessdaten können auch vorhandene Informationen über Zwischenerzeugnisse und die individuelle Baugruppe berücksichtigt werden. Predictive Quality erweitert den Fokus der Datenanalyse darüber hinaus, sodass neben der Herstellung auch die Produktnutzung als weitere Datenquelle und Anwendungsfeld mit in den Betrachtungsrahmen aufgenommen wird. Der Einsatz von Data Analytics in der Qualität ermöglicht so neben der Optimierung von Prozessen in Herstellung und Nutzung auch die Verbesserung des Grads mit welchem das Produkt die Kundenanforderungen erfüllt. [15, 16]

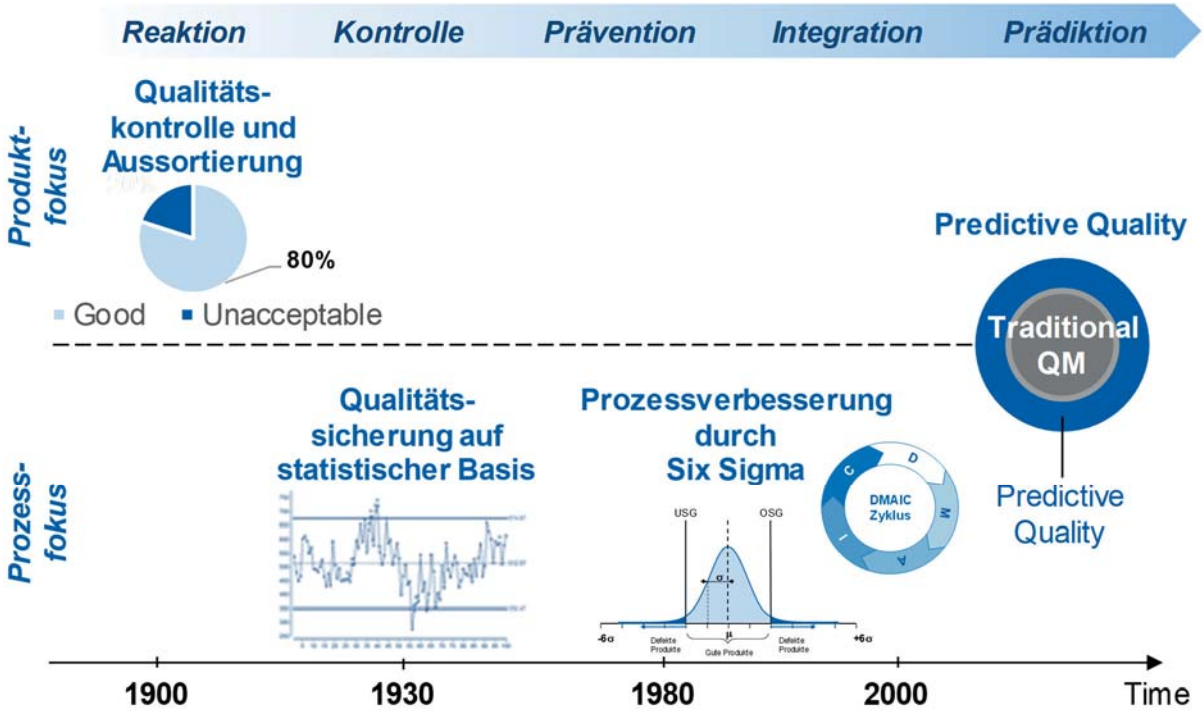



*Bild 2: Evolution der Qualität in produzierenden Unternehmen*

Mit dem in Bild 2 dargestellten Schwerpunktwechsel von reaktiv hin zu prädiktiv, beginnt eine neue Entwicklungs-Ära in der Qualität, in welcher aktuell ein erneuter Paradigmenwechsel vollzogen wird. Dieser Paradigmenwechsel ist dabei nicht als eine Ablösung zu verstehen, sondern vielmehr als eine Ergänzung zu bestehenden Methoden. Mit der effektiven Nutzung der heutzutage vorhandenen Daten und speziell der zunehmenden Verfügbarkeit von fertigungs- und nutzungsspezifischen Informationen zu jedem produzierten Produkt, rückt der *Produktfokus* wieder stärker in den Mittelpunkt. Zentrale Voraussetzung ist in diesem Zusammenhang die Nachverfolgbarkeit einzelner Produkte in den

Daten von der Produktion bis zum Kundenkreis, sodass die Datenpunkte sinnvoll miteinander verknüpft und analysiert werden können.

Predictive Quality befähigt somit den Anwendenden zu einer datengetriebenen Vorhersage der prozess- und der produktbezogenen Qualität. Übergeordnetes Ziel ist dabei die *Optimierung von produkt- und prozessbezogener Qualität* durch die Nutzung der Vorhersage als Entscheidungsgrundlage für Maßnahmen. Dies schließt sowohl die Ableitung von Handlungsmaßnahmen durch den Anwendenden selbst als auch die präskriptive Bereitstellung von Handlungsempfehlungen durch ein lernendes Assistenzsystem ein. Die beiden Zielgrößen sind dabei interdependent, so ist eine hohe Prozessqualität eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für eine hohe Produktqualität. Der Wert von Predictive Quality liegt also nicht in den Daten selbst, sondern in den Erkenntnissen, da diese unmittelbar in die Entscheidung miteinfließen.

Von zentraler Bedeutung ist hierbei der angestrebte *Prognosehorizont*, mit dessen zunehmender Länge die Reaktionsmöglichkeiten zwar zunehmen, gleichzeitig jedoch die Prognosegüte stark abnimmt. Die genaue Positionierung innerhalb dieses Spannungsfelds hängt stark vom jeweiligen Anwendungsfall ab, prinzipiell ist jedoch ein Vorhersagezeitpunkt mit möglichst hoher Prognosegüte anzustreben, an dem mittels geeigneter Korrekturmaßnahmen noch reagiert werden kann.

Analog zum Umsetzungsgrad von Data Analytics in anderen Unternehmensteilen werden auch im Rahmen der Qualität bisher nur vereinzelte Lösungen aktiv genutzt [17]. Für Predictive Quality sind exemplarisch einige Anwendungsbeispiele zu nennen. So ermöglicht z. B. eine systematische Verwertung von Online-Kundienfeedback Daten, das eigene Produktverständnis zu verbessern und akute Qualitätsprobleme schneller zu ermitteln als dies über herkömmliche Reklamations- und Feedbackschleifen erfolgen kann. Darüber hinaus können die gesammelten Informationen als Indikator für die Meinung von Kundinnen und Kunden genutzt werden, um Dissonanzen in der Qualitätswahrnehmung zukünftiger Produktreihen besser vorherzusehen und zu vermeiden [18]. Die Nutzung von Qualitätsdaten in Form von systematischen Vorhersagen auf Basis von Messwerten aus Qualitätssensoren und vor allem von funktionsübergreifenden Daten dient als Basis für präventive Qualitätsmaßnahmen sowie einer Deduktion von optimalen Parametern [15]. Durch die Verwendung historischer Festigkeits- und Zuverlässigkeitsdaten lassen sich sowohl Testpläne kontrollieren und dynamisch anpassen als auch zukünftige Leistungs- und Garantiekosten vorhersagen.

Mit Blick auf das *Aachener Qualitätsmanagementmodell* wird deutlich, dass ein Großteil der Aktivitäten innerhalb des Qualitätsmanagements einen datenorientierten Charakter aufweisen [19]. Nahezu alle Entscheidungsprozesse im Qualitätsmanagement beruhen auf einer umfangreichen Datenerhebung und -analyse. Predictive Quality ist somit keinesfalls als eine Ablösung zu verstehen, sondern vielmehr als eine *Ergänzung* zu herkömmlichen Methoden.

## 2.3 Synergetische Potenziale von Predictive Quality

Mit der Realisierung von Data Analytics Anwendungen lassen sich neben Potenzialen für die Optimierung produkt- und prozessbezogener Qualität durch Predictive Quality auch Potenziale zu Steigerung der unternehmerischen Nachhaltigkeit heben. Konkret liegen diese Potenziale vor allem in den *Mehrwerten*, die sich beim Adressieren aktueller Problemstellungen durch datengetriebene Methoden gegenüber dem Einsatz klassischer (Qualitäts-)Methoden ergeben. Der Mehrwert sei an dieser Stelle definiert als der Zu-

wachs an Wert, welcher durch die konkrete Umsetzung datengetriebener Methoden generiert wird. Eine Quantifizierung der Mehrwerte ist i. d. R. komplex und sehr kontextspezifisch. Mögliche Vorgehensweisen hierfür werden exemplarisch in Anwendungsbeispielen in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellt. Unabhängig von konkreten Einzelanwendungen wurden im Dialog mit produzierenden Unternehmen die in Bild 3 dargestellten übergeordnete Potenziale für verschiedene Zielstellungen identifiziert.

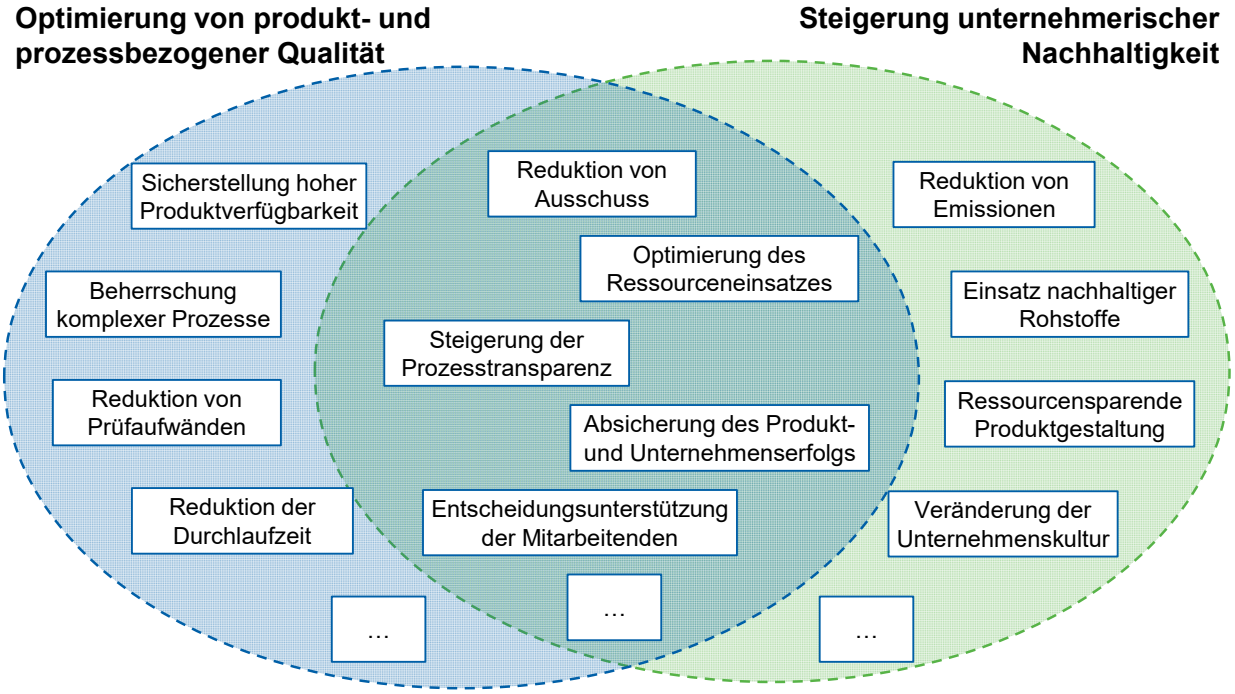



*Bild 3: Übergeordnete Potenziale von Data Analytics für produzierende Unternehmen für verschiedene Zielstellungen*

Einen Auszug vielversprechender Potenziale von Predictive Quality und damit Data Analytics aus der Perspektive der Qualität ist im linken Bereich in Bild 3 dargestellt. Durch den immer stärker werdenden Verbund informations- und softwaretechnischer Komponenten mit mechanischen und elektronischen Teilen kommt es zu einer zunehmenden Produktkomplexität und -vielfalt. Predictive Quality verfügt über das Potenzial eine *hohe Produktverfügbarkeit* trotz steigender Komplexität bei Kunden sicherzustellen. So kann der Kundenkreis bspw. durch Condition Monitoring oder prädiktive Wartung (Predictive Maintenance) vor negativen Erfahrungen mit dem Produkt geschützt werden. Hieraus lassen sich wiederum Wettbewerbsvorteile generieren und höhere Preise rechtfertigen. Predictive Quality wird so langfristig zum Enabler für neue Geschäftsmodelle wie die Subskription, indem anstatt für das Produkt selbst für dessen Verfügbarkeit bezahlt wird. Eng verknüpft mit der steigenden Produktkomplexität und -vielfalt ist die zunehmende Komplexität der Herstellungsprozesse. Hinsichtlich der prozessbezogenen Qualität liegen die Potenziale von Predictive Quality u. a. in einer besseren *Beherrschung komplexer Prozesse* sowie der *Reduktion von Prüfaufwänden*. Durch diese Einsparung an zusätzlichen Prozessschritten der Qualitätsprüfung lassen sich außerdem *Durchlaufzeiten reduzieren*. Mit einer verbesserten Prozessbeherrschung gehen überdies eine Reduzierung von Qualitätskosten verursacht durch Renommeeverluste sowie interne und externe Nacharbeit einher. Durch die Bereitstellung der relevanten Informationen birgt Predictive Quality hier auch das Potenzial, die Mitarbeitenden in Bezug auf qualitätsgetriebene Kostenverursachung zu sensibilisieren.

Im rechten Bereich der Darstellung in Bild 3 finden sich übergeordnete Potenziale von Data Analytics zur Steigerung unternehmerischer Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 1). Diese gewinnen für produzierende Unternehmen insbesondere durch zunehmend konkretere Nachhaltigkeitsforderungen aus Bevölkerung und Politik vermehrt an Bedeutung [20]. So lässt sich bspw. die mittels Datenanalyse gewonnene Transparenz in Bezug auf die Emissionen der Produktionsprozesse sowie des Produktionssystems dazu nutzen, durch Maßnahmenableitung *Emissionen gezielt zu reduzieren* und so die Ökobilanz des Unternehmens zu verbessern. Auf Produktebene führt jene Transparenz durch Data Analytics zu weiteren Potenzialen, wie die Möglichkeit zum gezielten *Einsatz nachhaltiger Rohstoffe* und damit auch zu einer *ressourcenschonenden Produktgestaltung*. Im Hinblick auf die Unternehmenskultur kann der gezielte Einsatz von Datenanalysen und die daraus gewonnenen Erkenntnisse dazu genutzt werden, das Bewusstsein der Mitarbeitenden in Bezug auf Nachhaltigkeitsaspekte zu sensibilisieren und somit eine langfristige *Veränderung der Unternehmenskultur* anzustoßen.

Bei näherer Betrachtung der Potenziale von Data Analytics fällt auf, dass die beiden skizzierten Bereiche eine große Schnittmenge aufweisen (Bild 3). Dies gilt insbesondere für Potenziale von Predictive Quality, welche im Sinne eines synergetischen Zusammenspiels neben der Optimierung von produkt- und prozessbezogener Qualität auch eine Steigerung der unternehmerischen Nachhaltigkeit bewirken können. Eng verknüpft mit der Prozessbeherrschung aus Sicht der Qualität ist hierbei die *Reduktion von Ausschuss* sowie die *Optimierung des Ressourceneinsatzes* zu nennen, welche vor allem ökologische Nachhaltigkeitsaspekte im Unternehmen adressieren. Predictive Quality Ansätze verfügen darüber hinaus über das Potenzial, durch eine *gesteigerte Prozesstransparenz*, z. B. in Bezug auf komplexe Wirkzusammenhänge, (Nachhaltigkeits-)KPI gezielt zu optimieren. Hiermit werden neben ökologischen auch ökonomische Nachhaltigkeitsaspekte adressiert. Vor einem betriebswirtschaftlichen und damit ökonomischen Hintergrund bieten Predictive Quality Anwendungen außerdem das Potenzial den Produkt- und damit den *Unternehmenserfolg langfristig abzusichern*. Indem Mitarbeitende durch Predictive Quality in die Lage versetzt werden, zukünftige qualitätsbeeinflussende Ereignisse in deren Sinne zu steuern, eröffnen sich verschiedene Möglichkeiten zur *aktiven Entscheidungsunterstützung der Mitarbeitenden* im Produktionsumfeld. Eine solche Unterstützung verfügt über das Potenzial, Unsicherheiten der Mitarbeitenden und damit Stress zu reduzieren und adressiert damit primär die Verbesserung sozialer Nachhaltigkeitsaspekte.

In den nachfolgenden Kapiteln 3 und 4 werden exemplarisch Ansätze vorgestellt wie die beschriebenen Potenziale realisiert werden können.

## 3 Produktbezogene Anwendungsbeispiele

Ziel der im Folgenden vorgestellten Anwendungsbeispiele ist das Treffen präskriptiver Entscheidungen zur *Verbesserung der Produktqualität und -verfügbarkeit* auf Basis datengetriebener Vorhersagen über das Produktverhalten. Beide Anwendungsbeispiele lassen sich in der Nutzungsphase verorten (vgl. Bild 4). Während mit der Erhöhung der Produktverfügbarkeit bei gleichzeitiger Kostenreduktion die Zielgrößen der beiden Ansätze einen hohen Überdeckungsgrad aufweisen, unterscheiden sich sowohl die konkrete Vorgehensweise zur Zielerreichung als auch der Implementierungsfortschritt voneinander. Weitere Unterschiede liegen in den Anforderungen der Lösungsansätze an die Echtzeitverfügbarkeit der Vorhersagen sowie im Prognosehorizont.

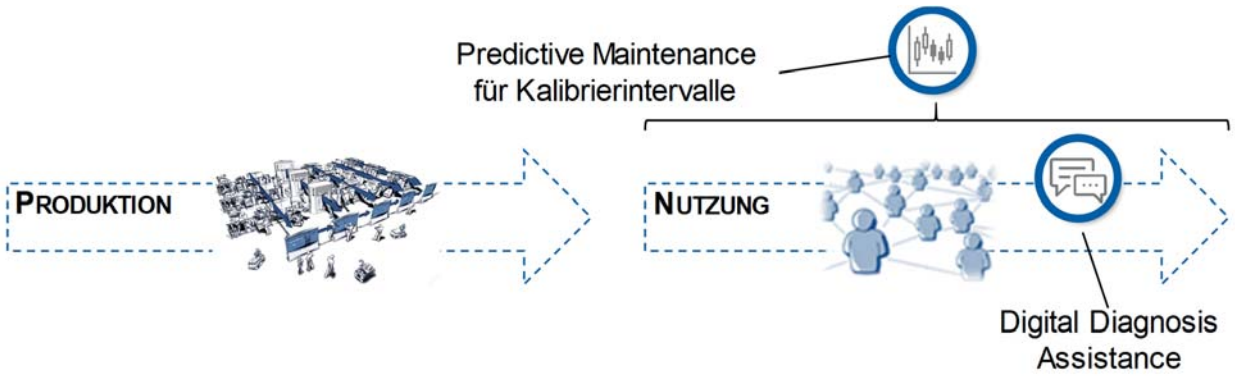



*Bild 4: Verortung der produktbezogenen Anwendungsbeispiele in Produktion- und Nutzungsphase*

Das erste der beiden Anwendungsbeispiele entstammt der Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Miele & Cie. KG, eines der führenden Herstellerunternehmen von Haushalts- und Gewerbegeräten. Hierin wird die Befähigung der Kundendiensttechnikerinnen und -techniker zu einer schnellen, datenbasierten Fehlerbehebung vor Ort bei Kundinnen und Kunden durch ein *Digital Diagnosis Assistance* System beschrieben. Aus der Kooperation mit der IconPro GmbH, einem Softwareentwickler und Digitalisierungs-Enabler für produzierende Unternehmen, geht das zweite Anwendungsbeispiel hervor. Darin wird der Aufbau einer *Predictive Maintenance Plattform* zur datenbasierten Prognose der Kalibrierintervalle von Koordinatenmessgeräten und einer entsprechenden Dynamisierung der Kalibrierung beschrieben.

### 3.1 Digital Diagnosis Assistance für Kundendiensttechnikerinnen und -techniker

*Ausgangssituation, Zielstellung und Potenziale*

Die Miele & Cie. KG ist weltweit führend im Angebot von Premium-Hausgeräten und -Elektrogeräten für den gewerblichen Einsatz. Mit über 20.000 Mitarbeitenden erwirtschaftete er im Geschäftsjahr 2018/2019 einen Umsatz von 4,16 Mrd. Euro. Für den Fall, dass Wartungen für die Geräte im Feld anfallen, stellt Miele ein umfangreiches Netz an Kundendiensttechnikerinnen und –technikern (KD-Techniker:innen) bereit, die in entsprechenden Fällen Fehler beheben und Reparaturen durchführen. Üblicherweise gestaltet sich der Service-Einsatz bei Kundinnen und Kunden wie folgt:

1. Verbale Fehlerbeschreibung durch die Kundinnen und Kunden entgegennehmen (ggf. Abgleich mit Auftragsdaten des Kundendienst-Centers, bei dem die Kundinnen und Kunden vorher anriefen)
2. Überprüfung der Anwendungs- und Einbausituation des Gerätes, Ablesen des Gerätedisplays mit Fehlercodeangabe
3. Verbindung des Gerätes mit Kundendienst-Laptops, Auslesen von Fehlerspeicher und Sensordaten
4. Diagnose des Problems unter Berücksichtigung des Techniker-spezifischen Wissens und seiner Erfahrung

Dieser Prozess bietet die Gefahr der Fehldiagnose, wodurch falsche oder zu viele Komponenten getauscht werden oder ein weiterer Kundendiensteinsatz vor Ort erforderlich wird.

Mit dem Einsatz eines datengetriebenen, kontinuierlich lernenden Assistenzsystems (Digital Diagnosis Assistent, DDA) soll die Wahrscheinlichkeit eines Fehltausches verringert und damit auch unabhängig vom Erfahrungswissen der KD-Techniker:innen die Erst-Erledigungsquote bei den Einsätzen erhöht werden. Der DDA wird dazu mit historischen Daten von Service-Einsätzen trainiert und kann so von den Kundendiensttechniker:innen genutzt werden, um bei Reparaturentscheidungen unterstützt zu werden.

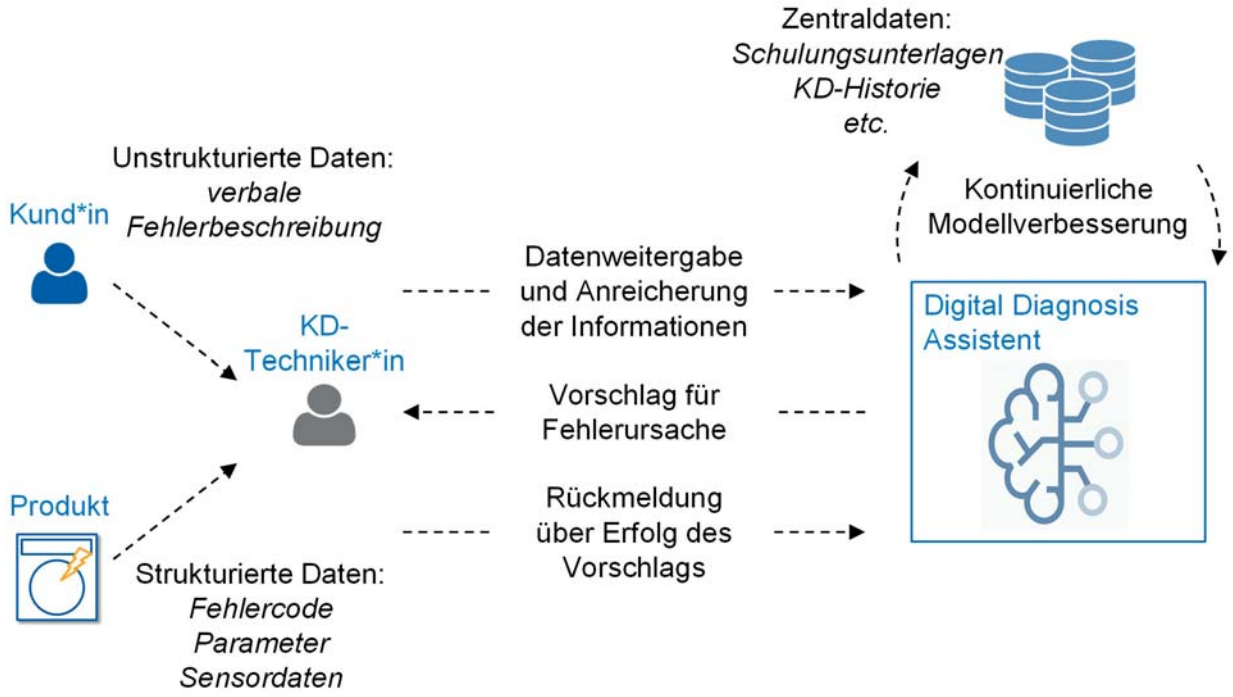



*Bild 5: Konzept des DDA der Miele & Cie. KG (Quelle: Miele)*

Wie in Bild 5 dargestellt bekommen die Kundendiensttechniker:innen als Diagnoseergebnis eine Vorschlagsliste darüber, welcher Komponententausch mit welcher quantitativen Wahrscheinlichkeit („Prädiktion“) das Problem beheben wird. Die Prädiktionsqualität des Systems wird laufend verbessert, indem die Kundendiensttechniker:innen unmittelbar nach Komponententausch den Erfolg oder Misserfolg des Vorschlags bei der Fehlerbehebung dem DDA direkt rückmeldet.

*Vorgehen und erzielte Mehrwerte*

Von zentraler Bedeutung für den Erfolg des DDA ist die Auswahl einer qualitativ wie quantitativ ausreichenden Datenbasis, die für das Training eines entsprechenden Modells genutzt werden kann. Im konkreten Fall liegen sowohl strukturierte als auch unstrukturierte Daten vor. Diese Daten lassen sich unterteilen in solche, die vor Ort während des Einsatzes aufgenommen werden und solche, die unabhängig vom Einsatz zentral vorliegen. Beispiele hierfür sind:

<u>Vor-Ort-Daten/Einsatz-Daten:</u>

- Verbale Fehlermeldung (z.T. dokumentiert durch Servicecenter bei Auftragsannahme), unstrukturiert
- Beobachtungen der KD-Techniker:innen (v.a. zu Umgebung und Einbau des Gerätes), unstrukturiert

- Fehlercode, strukturiert
- Angaben aus Fehlerspeicher und Sensordaten, strukturiert
- Rückmeldung der KD-Techniker:innen über Erfolg des Vorschlags, strukturiert

Zentraldaten (Datenbankpflege):

- Angaben aus KD-Berichten vergangener Einsätze, auch anderer Mitarbeitenden, teilw. strukturiert
- Montagehinweise, Schulungs- und Expertenwissen, teilw. strukturiert

Diese Daten laufen in der Kundendienst-Zentrale zusammen, werden dort konsolidiert und für die Verbesserung der DDA-Lösung kontinuierlich genutzt.

Die DDA-Lösung wurde in Form eines Proof of Concepts realisiert, das in Form eines Feldexperimentes mit 80 Kundendiensttechniker:innen unterschiedlichen Alters und Erfahrung, verteilt über ganz Deutschland, durchgeführt wurde. Produktseitig wurden zu Beginn Daten von zwei Pilotgeräten genutzt und diese über mehrere Monate mit weiteren Daten angereichert. Die eine Hälfte der Technikerinnen und Techniker nutzte die DDA-Lösung, wohingegen die andere Hälfte entlang des klassischen Prozesses agierte.

Als KPI für den Vergleich der beiden Gruppen wurde primär die Effizienz, also die Zielgenauigkeit der Assistenz- bzw. der Technikerprognose herangezogen. Diese Zielgenauigkeit bewertet den Erfolg der Problembehebung infolge von KD-Einsätzen. Das Ergebnis ist in Bild 6 dargestellt, in welcher der inverse Wert, also nicht erfolgreiche Kundendiensteinsätze infolge von Prognoseungenauigkeiten durch die Technikerinnen und Techniker bzw. das Assistenzsystem, über die Monate des Vergleichs aufgetragen sind. Am letzten Balkentupel für den Durchschnitt zeigt sich, dass sich die Zielgenauigkeit der Prognose bei der Gruppe „mit DDA“ im Vergleich zu den Technikerinnen und Technikern ohne DDA-Lösung um knapp die Hälfte (47%) verbessert hat (dunkelblaue Säulen). Eine anhand von Aufzeichnungen durchgeführte Nachbetrachtung der DDA-Prognosen an sich, also der reinen Systemempfehlung, zeigte, dass bei 100%iger Beachtung sogar eine Steigerung der Zielgenauigkeit der Prognose bis zu 85% möglich gewesen wäre (gelbe Säulen).

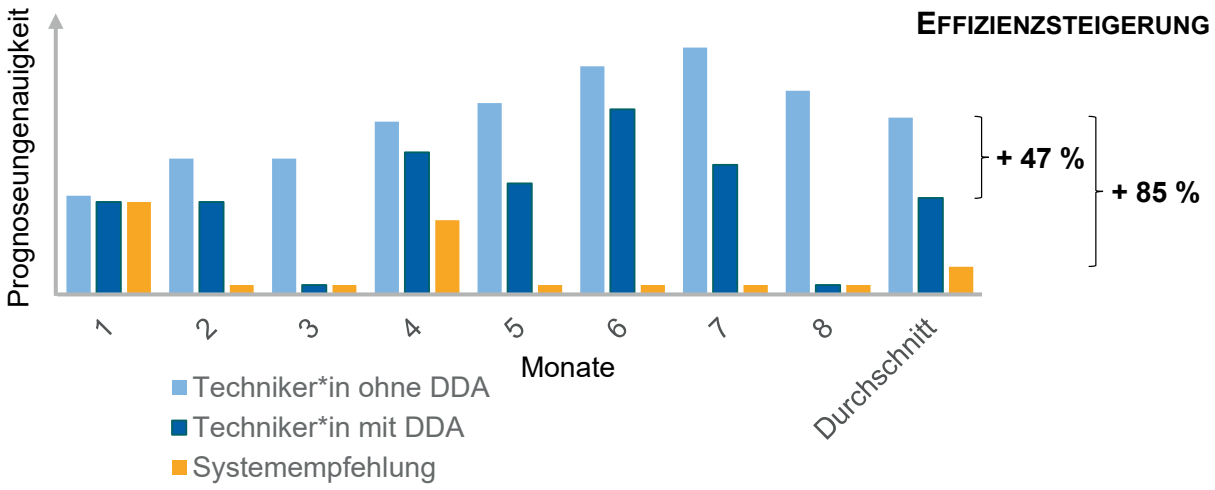



*Bild 6: Vergleich der Prognoseungenauigkeit der unterschiedlichen Gruppen (Quelle: Miele)*

Trotzdem ist es für die Akzeptanz durch die KD-Techniker:innen und damit den Erfolg des DDA wichtig, den Assistenz- und Vorschlagscharakter des Systems zu betonen.

Miele wird auch in Zukunft weder auf die Erfahrung der Technikerinnen und Techniker noch deren persönlichen Kontakt mit dem Kundenkreis verzichten.

*Nächste Schritte*

Die Ergebnisse zeigen, dass sich durch den Einsatz des DDA neben der Effizienz auch die Quote der Ersterledigungsfahrten, also der Anteil, den die Anzahl Ersterledigungsfahrten an der Anzahl aller Kundendienstfahrten einnimmt, noch einmal steigern lässt („noch einmal", weil sich diese Quote bereits vorher schon auf einem im Branchenvergleich hohen Niveau befand). Mittelbar verringert sich durch den Einsatz einer solchen datengetriebenen Lösung der Carbon Footprint der Kundendienstflotte und leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Nachhaltigkeitsstrategie von Miele. In den nächsten Schritten wird Miele daher das erfolgreiche Proof of Concept auf weitere Produkte und Unternehmensbereiche übertragen, um eine Breitenwirkung der Mehrwerte zu erzielen.

Basierend auf diesem Szenario ist zukünftig eine weitere Stufe der Prädiktion denkbar, die eine Fehlervermeidung statt der Fehlerbehebung unterstützt. In einer Welt der vernetzten Hausgeräte ist hierzu ein kontinuierlicher Datenstrom zwischen Endgerät und DDA notwendig, wobei dazu die erforderlichen datenschutzrechtlichen Rahmenbedingungen gegeben sein müssen und gleichzeitig das Einverständnis der jeweiligen Endkundinnen und -kunden zu einer solchen Datennutzung vorliegen muss. In einem solchen Szenario könnte dann der DDA nach Auswertung und Interpretation der Daten Empfehlungen für einen Komponententausch oder ein Softwareupdate aussprechen, bevor das Hausgerät in Störung geht. Diese Empfehlung wird dann in der Kundendienstzentrale in ein konkretes Auftragsangebot für die Kundinnen und Kunden zum präventiven Tausch oder das Aufspielen eines Softwareupdates umgewandelt. Mit diesem Ansatz ließen sich sogar neue Geschäftsmodelle entwickeln.

## 3.2 Predictive Maintenance – Dynamisierung von Kalibrierintervallen

*Ausgangssituation, Zielstellung und Potenziale*

Insbesondere industrielle Messprozesse sind für qualitativ hochwertige Produkte von großer Relevanz. Für jeden Anwendungsfall muss nachgewiesen werden, dass die jeweiligen Messprozesse geeignet sind. Dies wird über eine Wartung und Kalibrierung der Messprozesse sowie der eingesetzten Messgeräte nach festgelegten Intervallen erreicht. Eine vorausschauende dynamische Wartung oder Kalibrierung verfügt für Messprozesse aller Art über großes Potenzial zur Optimierung hinsichtlich Kosten, Verfügbarkeit und Qualität. Koordinatenmessgeräte (KMG) bilden zwar eine zentrale Referenz der Qualitätssicherung in vielen Unternehmen, sind jedoch sowohl in Investition als auch Betrieb kostenintensiv. In der Regel werden auch diese Messgeräte ohne Rücksicht auf die individuelle Aufgabe und den individuellen Nutzungsgrad je nach Spezifikation im Unternehmen nach festen Intervallen meist einmal jährlich gewartet und neu kalibriert. Das verursacht den angesprochenen Aufwand, hohe Stillstandzeiten und bietet darüber hinaus keine weitere Erkenntnis zum Einsatzverhalten des Geräts in der Produktion. Ziel muss es daher sein, diese Intervalle spezifisch hinsichtlich Gerät, Auslastung, Betriebsbedingungen und Messanforderungen zu dynamisieren und gleichzeitig die erhobenen Daten zur Prozessoptimierung nutzbar zu machen.

Durch das Trainieren eines entsprechenden lernenden prädiktiven Modells mit historischen Daten, kann neues Wissen über das Verhalten des Messgerätes gewonnen werden und so die Wartungs- bzw. Kalibrierintervalle dynamisiert werden:

- So kann es erforderlich sein, dass bei einer hohen Auslastung oder aufgrund von Abnutzungen oder Beschädigungen das Gerät früher als im jährlichen Rhythmus gewartet und kalibriert werden muss. Dies erhöht zwar die Kosten, die aber den Ausfallzeiten und den damit verbundenen Unannehmlichkeiten (z.B. Stillstandzeiten, falsch gemessene Teile usw.) gegenzurechnen sind.
- Andererseits werden die Geräte zu oft gewartet und neu kalibriert, obwohl dies nicht erforderlich wäre, so dass sich Wartungs- und Kalibrierkosten einsparen lassen.

Um den in Bild 7 kostenoptimalen Bereich zu erreichen, muss das Verhalten von Messprozessen mit geeigneten Verfahren beobachtet werden. Anschließend soll auf Basis historischer Daten das prädiktive ML-Modell (Machine Learning) zur Erkennung von frühen Abweichungssignalen trainiert werden. Mit diesen Erkenntnissen können dann in der Folge die Prüf- bzw. Kalibrierintervalle variabel gestaltet werden, ohne an Sicherheit bzgl. der Messbeständigkeit zu verlieren bzw. diese sogar noch zu erhöhen.

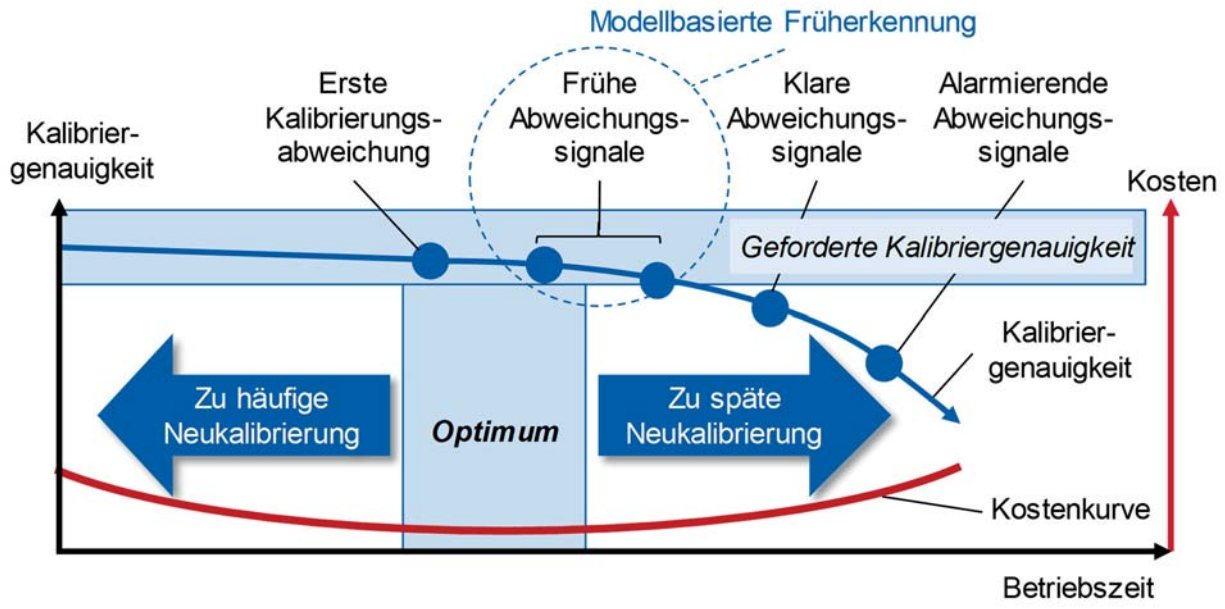



*Bild 7: Predictive Maintenance für kostenoptimale Kalibrierung von KMGs (Quelle: IconPro)*

*Vorgehen und erzielte Mehrwerte*

Um eine nutzungsabhängige Wartung und Kalibrierung zu erreichen, muss das Verhalten der betrachteten Messprozesse mit geeigneten Verfahren und entsprechender Sensorik beobachtet werden:

- Automatisierte Stabilitätsüberwachung mittels Normale
- Überwachung von internen Parametern und Sensoren (Vorschub, Luftdruck, Temperatur etc.)
- Überwachung über externe Sensorik (Vibrationen, Umgebungs- oder Bauteiltemperatur etc.)

Daraus lassen sich die unterschiedlichen Datenquellen, Datenflüsse sowie eine Architektur ableiten, welche in Bild 8 dargestellt ist. Die Mess- und Maschinendaten werden lokal aufgenommen und in regelmäßigen Abständen in eine Cloud-Architektur übertragen. Die

Q-DAS Software solara.MP liefert auf Basis der Messdaten die aktuellen MSA/ VDA 5 Ergebnisse. Basierend auf einem anhand historischer Daten trainierten und mit den aktuellen Maschinendaten bzw. MSA/ VDA 5 Ergebnissen gefütterten MLModells lassen sich Vorhersagen zu Kalibrierzeitpunkten erstellen. Diese Vorhersagen werden in Form von Empfehlungen für das nächste Kalibrierdatum neben dem Status der Messsystemeignung den Nutzenden über ein Web Dashboard zur Verfügung gestellt. Dadurch werden Servicetermine besser planbar, die notwendigen Wartungsarbeiten sind im Voraus bekannt und es können Arbeiten für mehrere Maschinen gebündelt und Stillstandszeiten reduziert werden.

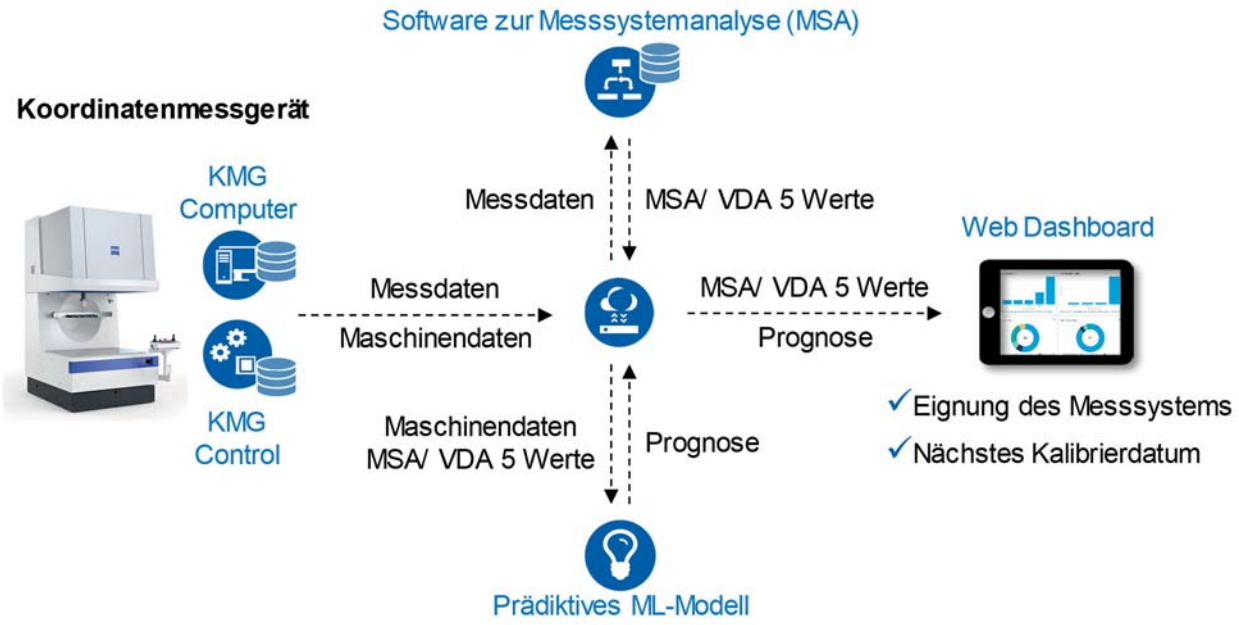



*Bild 8: Infrastruktur und Datenflüsse bei der Dynamisierung von Kalibrierintervallen (Quelle: IconPro)*

*Softwareunterstützung und nächste Schritte*

Die Softwarelösung IconPro Apollo bietet hier eine herstellübergreifende Lösung. Die Software ist modular aufgebaut und kann neben einer reinen Cloud-Lösung auch on-premise mit eigener Serverstruktur betrieben werden. Die aufgenommenen Daten stellen die Basis eines umfassenden Condition-Monitorings für die angeschlossenen KMGs dar. Dabei wird der Zustand des Messgerätes über ein Web-Interface live abgebildet und kann nutzenspezifisch visualisiert werden. Die Übersichten zu den gewünschten Informationen sind in Form von Dashboards personalisierbar und können beispielsweise mit eigenen Auswertungen oder Warngrenzen etc. versehen werden (Bild 9). Die eingebundenen Ressourcen lassen sich durch die berechtigten Nutzenden jederzeit und unabhängig vom Endgerät z.B. durch das Hinzufügen neuer Ressourcen verwalten.

Auf dieser Basis kann mit dem nächsten Modul der Softwarelösung eine Vorhersage zur Messstabilität in der Zukunft abgeleitet werden. Die Daten werden dazu automatisiert verarbeitet. Auf dieser Basis wird das Verhalten des Messgeräts in der Zukunft vorhergesagt und in den Dashboards visualisiert. Außerdem lässt sich der Nutzungsgrad und die Belastung des jeweiligen KMGs ableiten. Somit können je nach Datenbasis auch die von Verschleiß betroffenen Baugruppen eines Geräts analysiert und identifiziert werden. Diese Vorhersage ermöglicht einen dynamischen Wartungs- und Kalibrierungszyklus mit

minimalen Kosten und minimalem Stillstand. Das Modell wird dabei durch jede Zwischenmessung optimiert und ist in Langzeitmessungen in der industriellen Anwendung validiert worden.

Aktuell ist die Anbindung anderer Messgeräte (Verzahnung, Oberfläche etc.) in der Entwicklung. Eine Erweiterung auf Werkzeugmaschinen ist in einer Pilotinstallation bereits umgesetzt.

*Bild 9: Beispielhafte Dashboards zum Verhalten des Messgeräts und den empfohlenen zukünftigen Kalibrierintervallen (Quelle: IconPro Apollo)*

## 4 Prozessbezogene Anwendungsbeispiele

Präskriptive Entscheidungen auf Basis von datengetriebenen Vorhersagen über das *Prozessverhalten* zu treffen ist das übergeordnete Ziel der im Folgenden vorgestellten Anwendungsbeispiele. Ihrer prozessbezogenen Definition entsprechend lassen sich die Anwendungsbeispiele im Produktionsprozess verorten (vgl. Bild 10). Analog zum vorangegangenen Kapitel unterscheiden sich die vorgestellten Lösungen sowohl in der Vorgehensweise zur Zielerreichung als auch im Implementierungsfortschritt stark voneinander. Weitere Unterschiede liegen in den Anforderungen der Lösungsansätze an die Echtzeitverfügbarkeit der Vorhersagen sowie im Prognosehorizont. Neben den genannten Unterschieden ähneln sich jedoch die Zielgrößen der individuellen Anwendungsbeispiele wie z. B Ausschussminimierung und Steigerung der Prozessrobustheit sehr stark.

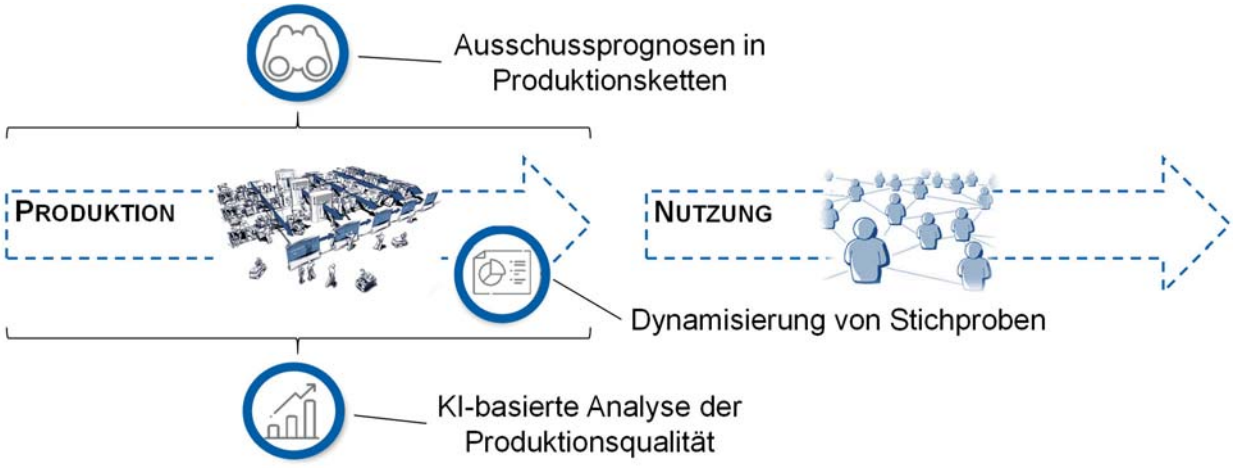



*Bild 10: Verortung der prozessbezogenen Anwendungsbeispiele Produktion- und Nutzungsphase*

Das erste der drei Anwendungsbeispiele entstammt der Kooperation mit der Lumileds Germany GmbH, einer der führenden Herstellerfirmen von Automobilbeleuchtung und LED Komponenten. Die Zielstellung beschreibt primär die *Senkung der Ausschussrate* in der Produktion von Autolampen durch das Training und Deployment prädiktiver Grey-Box-Modelle zur Ermittlung optimaler Prozessparameter. Aus einer Kooperation der Unternehmen TCG Unitech GmbH, einem österreichischen Automobilzulieferunternehmen, und der Q-DAS GmbH, führend Angebot von Statistik-Software und Dienstleistungen für die Qualitätssicherung in der industriellen Produktion, geht das zweite Anwendungsbeispiel hervor. Der Fokus liegt hierbei auf einer *datenbasierten Dynamisierung von Stichproben* in der Montage zur Reduzierung des Prüfaufwandes und einer damit verbundenen Kosteneinsparung. Das dritte Anwendungsbeispiel entstammt einem gemeinsamen Projekt der Otto Fuchs KG, einem führenden, international tätigen Unternehmen der NE-Metallindustrie, und der Westphalia DataLab GmbH (WDL). Ziel ist die *KI-basierte Analyse der Produktionsqualität* um qualitätsbeeinflussende Parameter aufzudecken und so frühzeitig gezielt Maßnahmen zur Verbesserung im Produktionsprozess einzuleiten.

## 4.1 Ausschussprognosen in Produktionsketten

*Ausgangssituation, Zielstellung und Potenziale*

Die Lumileds Germany GmbH ist einer der führenden Herstellerfirmen von Automobilbeleuchtung und LED Komponenten. Am Standort Aachen entwickelt und produziert Lumileds in einem mehrstufigen Fertigungsprozess ca. 100 Millionen Autolampen pro Jahr. In der jüngeren Vergangenheit kam es vermehrt zu Schwankungen in der Maschinenverfügbarkeit sowie einer Erhöhung der Ausfallraten bestimmter Teile ohne Identifikation der Hauptursachen. Aufgrund einer kontinuierlichen Akquise von Prozess- und Produktdaten entlang der Fertigungslinie steht über das MES eine breite Datenbasis für die Anwendung von Data Analytics Methoden zur Verfügung. Das sog. „Softlabeling“ der Daten erlaubt eine Betrachtung der Fertigungshistorie auf Produktebene, d.h. jedem individuellen Produkt lassen sich die zugehörigen Datenpunkte zuordnen. Aktuell wird die Datenbasis bereits für eine SPC einzelner Messwerte angewandt, jedoch ohne Betrachtung der gesamten Fertigungskette.

Im Rahmen des Lösungsansatzes wird auf Basis der MES-Daten der gesamten Fertigungskette ein prädiktives Grey-Box Modell trainiert (vgl. Bild 11). Ziel ist die Bildung eines Prognosemodells zur Vorhersage von Ausschussteilen im letzten Prozessschritt der Fertigungskette, da diese im Vergleich zur Entstehung in früheren Schritten teuer sind. Mithilfe dessen lassen sich die Haupteinflussgrößen entlang der Prozesskette auf die Ausschussrate im letzten Fertigungsschritt identifizieren und erste Handlungsempfehlungen ableiten. Durch die Identifikation der Einflussgrößen ergeben sich Potenziale, die sich wie folgt zusammenfassen lassen:

- Ableitung allgemeiner Handlungsempfehlungen für die Parametereinstellung in allen Fertigungsschritten
- Vermeidung von teurerem Ausschuss in späten Phasen der Produktion durch Anpassung von Grenzwerten (z. B. Anpassung von Prozessparametern in vorgelagerten Fertigungsschritten)
- Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit bei Prozessschwankungen (Voraussetzung ist eine online-Auswertung durch das Modell)

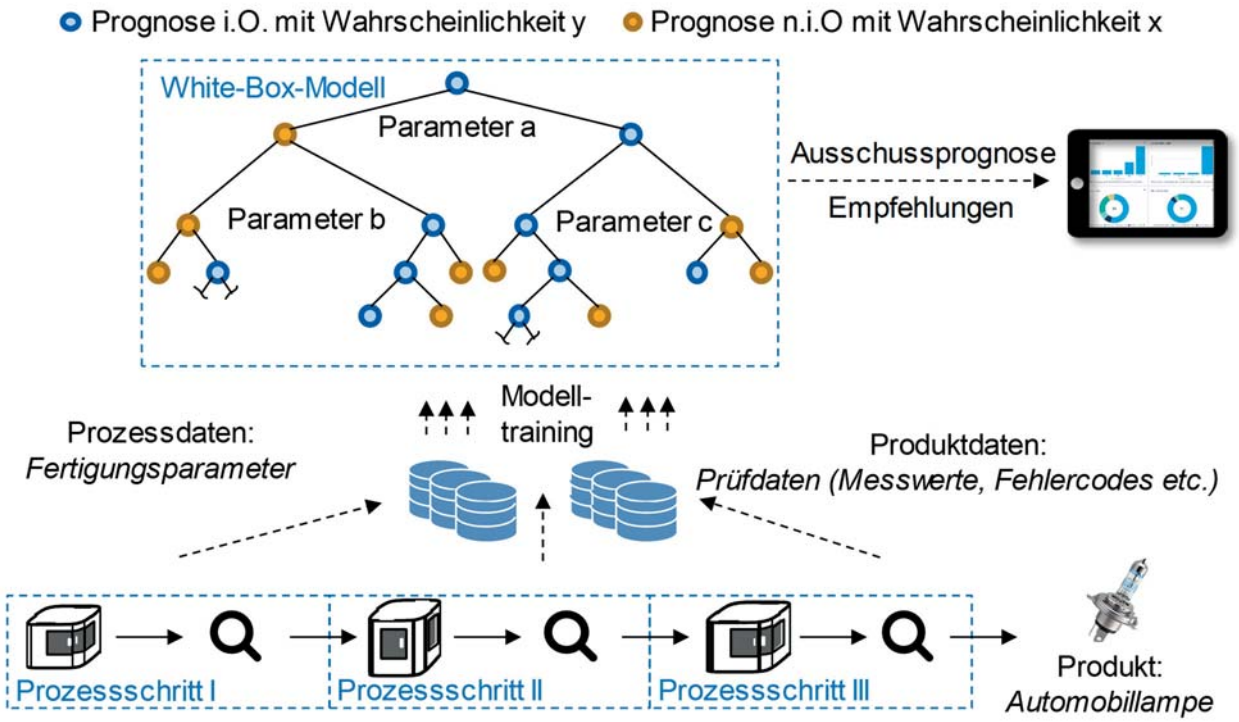



*Bild 11: Ausschussprognosen in Produktionsketten am Beispiel eines Entscheidungsbaums*

*Vorgehen und erzielte Mehrwerte*

Grundsätzlich herrscht im vorliegenden Anwendungsfall die Ausgangssituation, dass die zu analysierenden Daten zum einen bereits gesammelt in einem System (MES) gespeichert sind und sich größere Datenintegrationsaufwände erübrigen. Zum anderen lässt sich jeder Datenpunkt aufgrund des eingangs erwähnten Softlabelings mit individuellen Werkstücken verknüpfen. Dies bildet eine Grundvoraussetzung für die prädiktive Analyse der Daten hinsichtlich der Zielgröße „Fertigungsausschuss“. Das angewendete Vorgehen basiert im Kern auf dem Analyseprozess des CRISP-DM, dem „Cross Industry Standard Process for Data Mining“:

1. Festlegen des Betrachtungsrahmens: Der Analysezeitraum wird festgelegt und die häufigsten Fehlertypen im letzten Fertigungsschritt werden als Zielgrößen ausgewählt.
2. Sichtung der Daten: Es findet eine Überprüfung der Qualität und Reliabilität der Produkt- und Prozessdaten aus dem MES statt.
3. Datenvorverarbeitung: Es wird ein Datensatz als Basis für die Modellbildung zusammengestellt.
4. Modellierung: Aufgrund guter Interpretierbarkeit wird der Entscheidungsbaum als Analysemethode ausgewählt. Während des Trainings findet eine iterative Anpassung der Parameter statt.
5. Evaluation der gebildeten Modelle: Über 75 % der Ausfälle können durch das Modell abgebildet werden (Recall der Klasse „Fehler“ > 75 %), wodurch die Anwendenden theoretisch in die Lage versetzt werden diese Ausfälle zu eliminieren.
6. Ableitung von Handlungsempfehlungen: In Abhängigkeit vom jeweiligen Fehlertyp lassen sich durch das Prognosemodell konkrete Einstellungsempfehlungen für verschiedene Prozessparameter ableiten (vgl. Bild 11).

Die Untersuchung der langfristigen Auswirkungen auf die Ausschussquote durch Anwendung in der realen Produktionsumgebung befindet sich in der aktuellen Umsetzung.

Neben der Modellierung durch einen Entscheidungsbaum wurde bei der Lumileds Germany GmbH eine Live-Visualisierung aktueller Prozessdaten im Regelkartenformat implementiert. Zusätzlich zu der statistikbasierten farblichen Kennzeichnung (grün/gelb/rot) innerhalb dieser Regelkarten werden den Mitarbeitenden festgelegte Handlungsempfehlungen vorgelegt. Dabei werden Handlungsmaßnahmen schon vor der Verletzung einer Eingriffsgrenze getriggert, wodurch die Ausschussreduktion weiter gesteigert werden konnte.

*Nächste Schritte*

Das weitere Vorgehen umfasst mehrere Schritte. Dies betrifft zum einen das Schließen von Lücken in der Datenaufnahme entlang der Fertigungskette wie z. B. die Erfassung von Einflüssen der Mitarbeitenden durch manuelles Einrichten des Fertigungsprozesses. Darüber hinaus wird die Weiterentwicklung der Visualisierung in Form eines „prozesszentrierten“ Entscheidungsbaums, dessen Knotenpunkte sich an der Struktur des Fertigungsprozesses orientieren, zu einer anwendungsfreundlicheren Entscheidungsunterstützung führen. Da Entscheidungsbäume aufgrund ihrer Beschaffenheit weder besonders robust bei zeitabhängigen Zusammenhängen, noch besonders geeignet für den Einsatz in automatisierten Anwendungen sind, stellt das Testen von Black-Box-Modellen als Alternative einen weiteren nächsten Schritt dar. Unter der Voraussetzung, dass die Datenqualität weiter verbessert wird, versprechen Training und Deployment solcher Modelle eine erhöhte Prognosegenauigkeit. Die Umsetzung in konkrete Handlungsempfehlungen gestaltet sich aufgrund fehlender Transparenz jedoch deutlich komplexer.

## 4.2 Datengetriebene Dynamisierung von Stichproben

*Ausgangssituation, Zielstellung und Potenziale*

Die TCG Unitech GmbH ist ein österreichisches Automobilzulieferunternehmen, welches unter anderem Druckguss- sowie Spritzgussteile entwickelt und produziert. Die hohen Anforderungen des Kundenkreises an Produktqualität und Liefertreue stellen dabei eine besondere Herausforderung für die kontinuierliche Qualitätssicherung dar. Anhand eines konkreten Beispiels bedeutet dies, dass für besondere Merkmale eines Abschlussdeckels von Kundenseite eine Null-ppm-Absicherung gefordert wurde. Dies ließ sich zum damaligen Zeitpunkt nur durch eine 100%-Prüfung mittels 3D-Koordinatenmessgerät (3D-KMG) realisieren, welche wiederum mit hohen Prüfaufwänden und Kosten verbunden ist [21].

Hier setzt der Lösungsansatz der Prüfdynamisierung an, welcher in einem Kooperationsprojekt mit der Q-DAS GmbH für eine Fertigungslinie erfolgreich umgesetzt wurde. Die Prüfdynamisierung basiert auf der Anwendung der Statistical Process Control (SPC), also der kontinuierlichen Überwachung bestimmter Qualitätsmerkmale mittels statistischer Prozessregelung. Hierzu werden definierte Produktmerkmale regelmäßig gemessen und im Falle von Abweichungen wird korrigierend in den Prozess eingegriffen.

Im Gegensatz zur herkömmlichen SPC, bei der im Falle von stabilen Prozessen keine weiteren Maßnahmen automatisiert eingeleitet werden, erfolgt im Rahmen der Prüfdynamisierung nach DIN ISO 2859 – Teil 3 die Prüfung stabiler Merkmale gezielt seltener. Das Hauptziel dieses sog. Skip-lot-Stichprobenverfahrens ist es, durch den Verzicht auf

die Prüfung eines Merkmals oder des ganzen Teils den Gesamtprüfaufwand zu verringern [22]. Die Ziele der Prüfdynamisierung lassen sich wie folgt zusammenfassen (vgl. Bild 12):

- Reduktion der Prüfhäufigkeit von stabilen Merkmalen (Auslassen von Merkmalen)
- Erhöhung der Prüfhäufigkeit von instabilen Merkmalen
- Messungen werden ausgelassen (Skip)
- Gewährleistung des ppm-Ziels „Null Fehler“

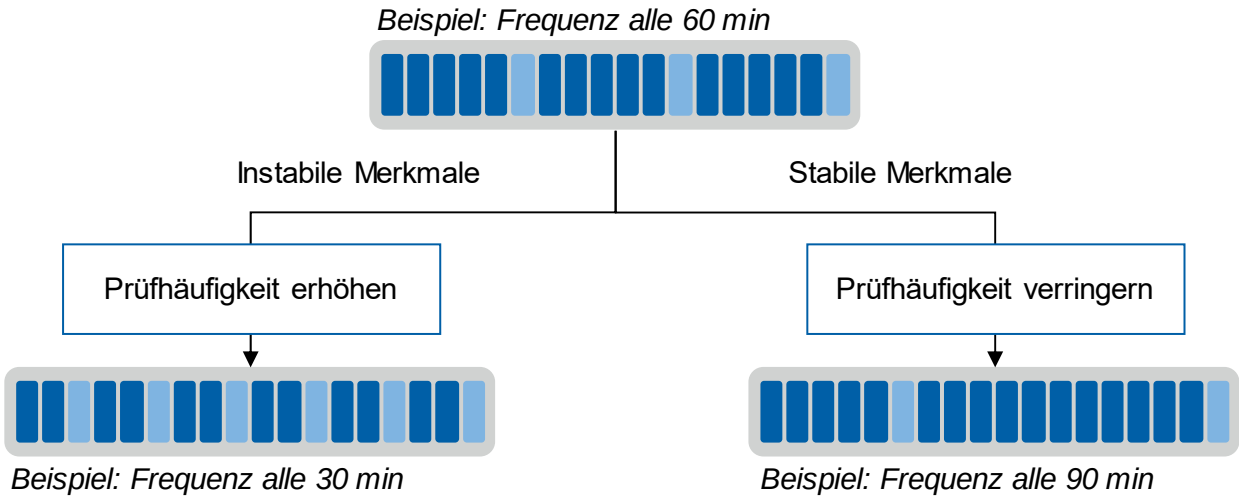



*Bild 12: Prinzip der dynamischen Anpassung der Prüfhäufigkeit (Quelle: Q-DAS)*

Durch den Einsatz des Verfahrens lassen sich Kosteneinsparungen sowohl in Bezug auf die Erstinvestitionen als auch im laufenden Messbetrieb realisieren. Darüber hinaus können Wartungsaufwände durch ungeplante Anlagenstopps reduziert und Anlagenpersonal effizienter eingesetzt werden. Durch den Fokus auf besonders problembehaftete Merkmale lässt sich außerdem die Transparenz bezüglich der Prozessqualität erhöhen.

*Vorgehen und erzielte Mehrwerte*

Das Verfahren zur Dynamisierung basiert auf der DIN ISO 2859 – Teil 3. Wie in Bild 13 dargestellt, wird zunächst mit der sog. Grundqualifizierung begonnen, in welcher geprüft wird wie „stabil“ die Merkmalsausprägung der untersuchten Teile ist. Nach einer definierten Anzahl von geprüften Teilen und sobald die statistischen Anforderungen an die Grundqualifizierung erfüllt sind, beginnt die nächste Phase der Optimierung. In dieser Phase werden weitere Teile geprüft und erst im Falle, dass die Stabilität der Merkmale auch weiterhin bestätigt wird, beginnt das Skippen, also das Auslassen von Prüfungen.

Eine Rückkehr in den Ausgangszustand der Grundqualifizierung wird durch unterschiedliche dynamisierungsrelevante Störevents getriggert (vgl. Bild 13). Zum einen erfolgt dies durch eine Verletzung der Eingriffsgrenzen, welche sich aus den Messdaten des 3D-KMGs ergeben. Zum anderen werden auch Daten aus den vorgelagerten Prozessschritten, der Fertigung und Reinigung des Bauteils, erhoben und hinsichtlich ihrer Relevanz für die Prüfdynamisierung analysiert. Dynamisierungsrelevante Informationen aus der Fertigung im CNC Bearbeitungszentrum kommen u. a. von Werkzeugbruchsensoren, der Auflagenkontrolle und Sensorik zur Messung der MMS.

Um die Verknüpfung verschiedener dynamisierungsrelevanter Störevents mit dem individuellen Bauteil zu schaffen war es initial notwendig eine Integration der Prozessdaten aus unterschiedlichen Systemen zu realisieren. Neben der Migration des bestehenden

Datenbestandes aus dem Altsystem gehörte hierzu die Schaffung von Systemschnittstellen sowie eine zentrale Datenhaltung über die Prozesskette hinweg.

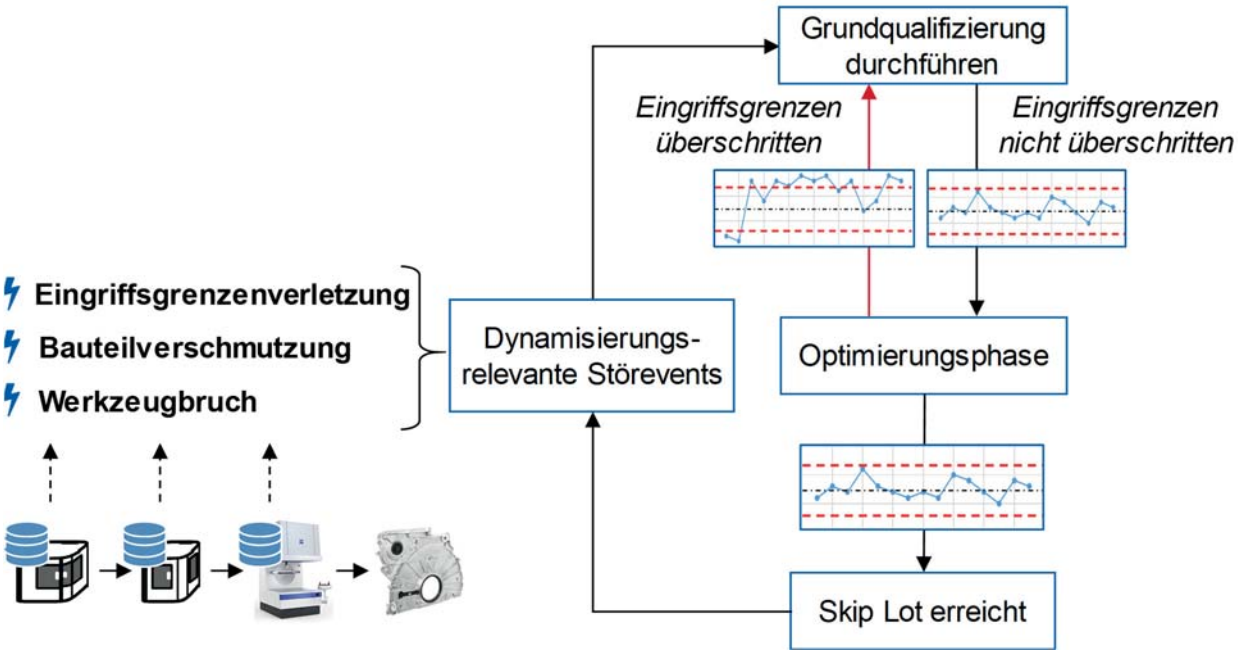



*Bild 13: Das Verfahren der dynamisierten Stichprobenprüfung (Quelle: TCG Unitech)*

Das vorgestellte Anwendungsbeispiel bietet eine statistisch abgesicherte Vorhersage auf Basis von Prozessdaten, inwieweit von einer i. O. Prüfung bestimmter Prüfmerkmale ausgegangen werden kann. Hierzu wird die klassische SPC durch Vernetzung der Prozessschritte und Analyse von dynamisierungsrelevanten Daten sinnvoll ergänzt. Die Entscheidungsunterstützung des Menschen erfolgt durch eine konkrete Empfehlung ab wann die Prüfung bestimmter Merkmale bzw. Bauteile ausgelassen werden kann. Darüber hinaus wird die Aufmerksamkeit auf besonders instabile Prüfmerkmale gelenkt, wodurch die Transparenz der Prozessqualität erhöht wird. Neben der Schonung von Ressourcen in Bezug auf Messtechnik und Personal im Sinne eines unternehmerisch nachhaltigen Handelns ergeben sich auch rein monetäre Mehrwerte. So konnten ca. 240.000 € bei Erstinvestitionen und ca. 20.000 € laufende Kosten pro Jahr eingespart werden. [21]

*Nächste Schritte*

Neben der Übertragung des Systems zur Prüfdynamisierung von der Pilotlinie auf weitere Fertigungslinien steht die automatisierte Weiterverarbeitung der Statistikergebnisse und damit die Datenrückführung in die Fertigungsanlage im Fokus des weiteren Vorgehens [21]. So sollen im Rahmen kommender Projekte basierend auf den Statistikergebnissen Korrektur- und Kompensationswerte prognostiziert werden. Anschließend ist die Realisierung eines Feedback-Loops zur automatisierten Übertragung dieser Werte in die Fertigungsanlage geplant, um so qualitätssteuernd in den Fertigungsprozess eingreifen zu können. Durch die Automatisierung des präskriptiven Handelns soll die Entscheidungsunterstützung des Menschen so weiter verbessert werden.

## 4.3 KI-basierte Analyse der Produktionsqualität

*Ausgangssituation, Zielstellung und Potenziale*

Die Otto Fuchs KG ist ein führendes, international tätiges Unternehmen der NE-Metallindustrie. Das Unternehmen produziert Komponenten für die Luft- und Raumfahrt- sowie Automobilindustrie. Die Otto Fuchs KG fertigt auf eigener Werkstoffbasis hochwertige Halbzeuge und Endprodukte, insbesondere metallurgisch anspruchsvolle Schmiedeprodukte, Strangpresserzeugnisse und gewalzte Ringe aus Aluminium-, Magnesium-, Kupfer-, Titan- und Nickellegierungen. Die Teile werden in verschiedenen Kontexten eingesetzt, in denen es auf Sicherheit, Leichtbau, Zuverlässigkeit und Lebensdauer ankommt.

Das untersuchte Produkt wird in mehreren Prozessschritten gefertigt. Je nach Prozessschritt werden die Maschinenparameter direkt (einfacher Prozess) oder indirekt als Sollwerte / Sollkurven (komplexer Prozess) übergeben. Um die Qualität der produzierten Produkte und somit eine hohe Zuverlässigkeit und lange Lebensdauer zu gewährleisten, führt die Otto Fuchs KG am Ende des Produktionsprozesses an allen Teilen eine Stichprobe der Produkteigenschaften durch. Um die Qualität und dessen Schwankungen zu kontrollieren und den Produktionsprozess zu optimieren, werden die Prozessdaten insbesondere batchweise mit Excel statistisch analysiert. Während eindeutige Abhängigkeiten durch klassische Analysemethoden aufgezeigt werden können, bleiben mehrdimensionale Zusammenhänge in komplexen Prozessen verborgen. Daher konnten bestimmte festgestellte Qualitätsschwankungen zwischen verschiedenen Produktionsbatches und zwischen Teilen innerhalb eines Batches nicht eindeutig einem Prozessparameter zugeordnet werden. Somit konnten die Qualitätsschwankungen im Produktionsprozess nicht verringert werden.

Um diese Herausforderung zu lösen, wurde ein gemeinsames Projekt mit der Westphalia DataLab GmbH (WDL) initiiert. Ziel des Projektes war es, durch den Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens (Machine Learning, ML): (1) die Qualität der produzierten Teile vorherzusagen und (2) Abhängigkeiten zwischen Prozessparametern und der Produktqualität batchübergreifend zu untersuchen. So sollen qualitätsbeeinflussende Parameter aufgedeckt werden, sodass frühzeitig gezielt Maßnahmen zur Verbesserung im Produktionsprozess getroffen werden können.

Das WDL ist ein auf Data Science spezialisiertes Softwareentwicklungs- und Consulting Start-Up mit tiefgreifender Expertise in den Bereichen Künstliche Intelligenz und Machine Learning. Neben eigenen Software as a Service (SaaS) Produktlösungen bietet das WDL Data Science und KI Consulting für Unternehmen aller Branchen an. Hierbei bedient das WDL unterschiedlichste Use Cases: von der Feedback-Analyse von Kundinnen und Kunden über Fragestellungen im Bereich der KI-unterstützten Optimierung bis hin zur Vorhersage von Maschinenausfällen (Predictive Maintenance).

*Vorgehen und erzielte Mehrwerte*

Zur Erstellung der Machine Learning Modelle wurden verschiedene Daten konsolidiert und miteinander verknüpft. In gerade dieser ganzheitlichen genaueren Betrachtung mehrerer Datenquellen und Maschinenparameter liegt ein entscheidender Vorteil gegenüber den bestehenden Methoden. Denn erst so können komplexe Zusammenhänge aufgedeckt und Abhängigkeiten sichtbar gemacht werden.

Allen voran wurden die genauen Maschinenparameter für die komplexen Fertigungsprozesse anhand von Sensordaten ausgelesen. Basierend auf den vorliegenden Sensordaten wurden über 20 verschiedene Zeitreiheneigenschaften (z.B. Mittelwert, Standardabweichung, etc.) abgeleitet. Diese Daten wurden um Informationen über den Maschinentyp, den Betreiber der Maschine, Qualitätsprüfer und weitere Prozessparameter (z.B.

Temperatur) erweitert. Zudem wurden die gemessenen Produkteigenschaften aus den durchgeführten Stichproben in zwei Qualitätsstufen (0: ausreichende Qualität, 1: gute Qualität) kategorisiert.

Ähnlich zum Anwendungsbeispiel in Kapitel 4.1 wurden mithilfe der aufbereiteten Daten baumbasierte Machine Learning Modelle trainiert, welche nicht nur die Qualität eines produzierten Teils vorhersagen (Wahrscheinlichkeit für deren Qualität), sondern auch die Wichtigkeit der verschiedenen Features (Prozessparameter, Zeitreiheneigenschaften, etc.) in Hinblick auf die Qualität des Produkts bewerten. So kann unter anderem zwischen wichtigen und unwichtigen Einflussfaktoren unterschieden werden. Die Machine Learning Modelle konnten in diesem Fall die Qualitätskategorien mit einer Genauigkeit von 97% bestimmen.

Dank der erhaltenen Erkenntnisse wird eine gezielte Fehlersuche ermöglicht und eine zuverlässige Identifikation von Teilen und Batches mit geringer Qualität ermöglicht. Dadurch kann die Otto Fuchs KG ihren Produktionsprozess schneller verbessern und stabilisieren. Fehlern kann gezielt entgegengewirkt werden, der Output wird maximiert. Das spart wertvolle Zeit und Kosten und steigert die Ressourceneffizienz durch einen sparsamen Umgang mit Rohstoffen und Energie.

*Nächste Schritte*

Aufbauend auf den Projektergebnissen, wird das WDL für die Ingenieurinnen und Ingenieure der Otto Fuchs KG eine interaktive Softwarelösung entwickeln und für die Nutzung im Regelbetrieb implementieren. Durch die Softwarelösung profitieren die Fachkräfte der Otto Fuchs KG vom kontinuierlichen Einsatz von Machine Learning Modellen. Dies gelingt durch eine benutzerfreundliche graphische Oberfläche und ganz ohne Data Science Kenntnisse.

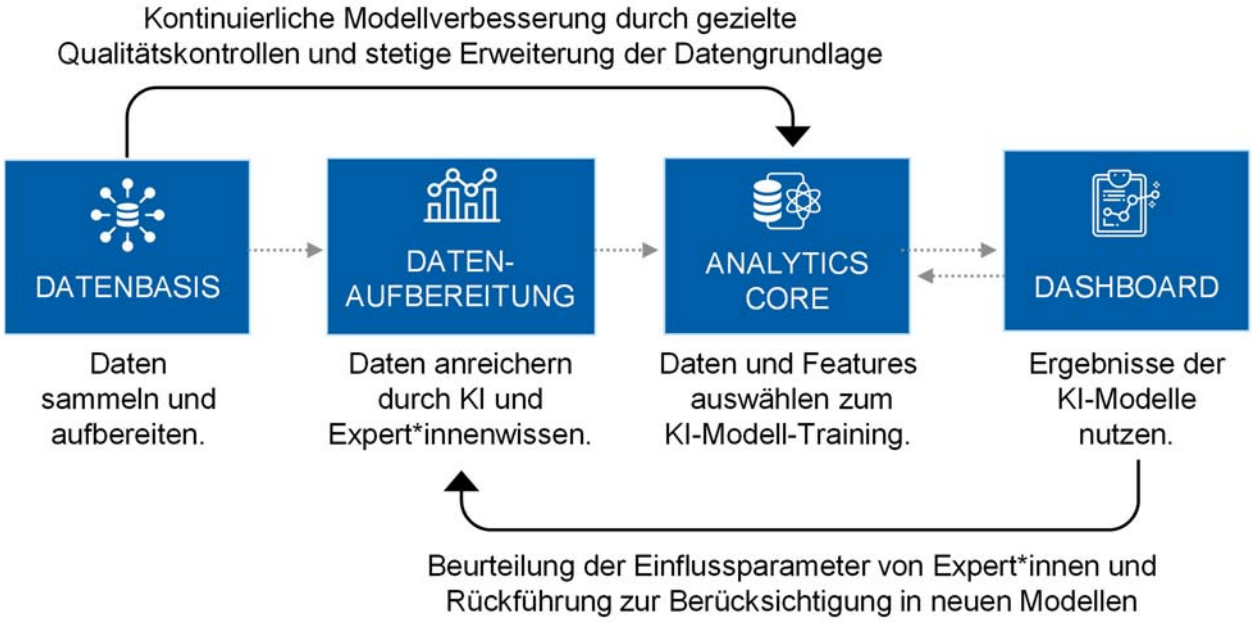



*Bild 14: Konzeptioneller Aufbau der Predictive Quality Softwarelösung*

Die Softwarelösung unterstützt dabei die in Bild 14 dargestellten Schritte. Insbesondere werden hierbei die folgenden Bereiche adressiert:

- Datenmanagement: Daten-Pipeline zur automatisierten Übertragung, Aktualisierung und Aufbereitung der Daten
- Einbezug von Expertenwissen zur Korrektur fehlerhafter und Ergänzung fehlender Werte durch die Nutzenden (1) und zur Anreicherung der Datengrundlage mit zusätzlichen, eigens definierten Features aus den Zeitreihen (2)
- Predictive Quality Analytics Core: Filtern der Daten, Auswahl der Features und Trainieren der Machine Learning Modelle
- Visualisierung, Exploration und Validation der KI-basierten Analyseergebnisse

Der kontinuierliche Einbezug des Expertenwissens ermöglicht eine laufende Verbesserung der Performance der Qualitätsprognose-Modelle. Denn entscheidend für die Wirksamkeit des Modells ist neben dem initialen auch das wiederkehrende „Lernen“ der Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und Zeitreiheneigenschaften sowie den gefertigten Teilen mit Qualitätsklassifikation.

## 5 Voraussetzungen für die Realisierung

Die dargestellten Anwendungsbeispiele zeigen, dass die Entscheidungsunterstützung des Menschen durch eine erfolgreiche Umsetzung datengetriebener Qualitätsprognosen in verschiedenen Bereichen möglich ist. Der Erfolg der Umsetzung liegt dabei in der Realisierung der in den Datenmengen steckenden Potenziale. Diese Datenmengen werden im Analysekontext häufig durch die 5 V charakterisiert: *Volume*, *Velocity*, *Variety*, *Veracity* und *Value* [23]. Für eine erfolgreiche Realisierung lassen sich aus den Anwendungsbeispielen und den charakteristischen 5 V großer Datenmengen unterschiedliche Voraussetzungen ableiten:

1. Motivation, Erwartungshaltung und Akzeptanz
2. Auswahl und Bewertung des Use Cases
3. Technische Voraussetzungen
4. Expertise & Zertifizierung

Zu Beginn ist eine klare Definition der *Motivation* des Unternehmens notwendig. Der Einsatz von Machine Learning als Teilbereich der Künstlichen Intelligenz (KI) kann beispielsweise dadurch motiviert sein, dass das Unternehmen in der Außenwirkung als innovativ wahrgenommen werden möchte. Die Zielstellungen hinter den zu entwickelnden Lösungen weichen in diesem Fall stark von anderen Motivationen wie dem Aufbau von Expertise oder der tatsächlichen Prozessverbesserung ab. Darüber hinaus scheitern Projekte durch eine unverhältnismäßige *Erwartungshaltung* darüber, was durch den Einsatz von ML erreicht werden kann, weshalb schon bei der Klärung der Motivation eine realistische Einschätzung der Möglichkeiten sichergestellt werden muss. Neben dem Verständnis zur Motivation und einer klaren Erwartungshaltung stellt die *Akzeptanz* bei den involvierten Mitarbeitenden eine zentrale Voraussetzung dar: Nur wenn von Anfang an die Vorbehalte ernst genommen werden und im besten Fall Begeisterung für das Thema geschaffen wird, kann ein entsprechendes Vorhaben erfolgreich werden.

Die zweite Säule notwendiger Voraussetzungen stellt die *Auswahl* eines erfolgversprechenden *Use Cases* dar. Die Unterschiede zwischen verschiedenen Use Cases sind teils signifikant, bspw. in Hinsicht auf die technische Realisierbarkeit oder den wirtschaftlichen Mehrwert [24]. Die strukturierte strategische und technische Bewertung der unterschiedlichen Use Cases sowie eine entsprechende Auswahl stellen daher weitere Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung und die Generierung von *Value* dar [25, 26].

Die Performanz eines Systems zur Vorhersage der Qualität hängt im großen Maße von den technischen Voraussetzungen ab. Zunächst ist eine ausreichende *Digitalisierung und Vernetzung* der zu betrachtenden Prozesse notwendig. Hierzu zählen unter anderem verfügbare Sensorik, hardware- wie softwareseitige Schnittstellen, eine Datenbankinfrastruktur sowie Datenintegration. Soll die Produktqualität vorhergesagt werden, sind darüber hinaus ausreichend *Instanzen* der vorherzusagenden Größen in den Daten notwendig – beispielsweise ausreichend hergestellte n.i.O- und i.O.-Produkte und zugehörige Datensätze (*Volume* & *Variety*). Doch selbst wenn ausreichend Instanzen, also Produkte, erzeugt worden sind, kann ein Vorhaben scheitern, wenn die *Rückverfolgbarkeit* der Daten, bspw. über eineindeutige Produkt-IDs, nicht gewährleistet ist. Eine weitere technische Voraussetzung liegt in der Auswahl der Algorithmen sowie der Schaffung entsprechender Rechenkapazitäten, um die jeweils geforderte Analysegeschwindigkeit zu realisieren (*Velocity*). Das größte Hindernis für Unternehmen stellt allerdings noch immer die Datenqualität dar (*Veracity*). Die entsprechende Aufbereitung der Daten erzeugt den größten Arbeitsanteil in der Projektdurchführung - trotz unterschiedlicher Unterstützungsansätze, wie verschiedene Softwareumgebungen. [27]

Für die erfolgreiche Entwicklung eines Systems zur Qualitätsvorhersage ist eine Domänenexpertise bspw. zu den Produktionsabläufen und Produkten unabdingbar. Auf der anderen Seite ist *Expertise* aus dem Bereich *Data Science* notwendig, die entweder unternehmensintern aufgebaut oder zunächst über externe Partner abgebildet werden kann [28]. Selbst wenn alle erwähnten Voraussetzungen erfüllt sind, ein erfolgreiches Proof of Concept erarbeitet und ein Demonstrator entwickelt wird, kann das Vorhaben scheitern. Die Ursache hierfür liegt in der eingeschränkten Transparenz und damit einhergehenden Problemen in der *Zertifizierung* der Prozesse und Produkte [29]. Aus diesem Grund werden derzeit verschiedene Ansätze erarbeitet, wie durch ML unterstützte Produkte und Prozesse weiterhin zertifiziert werden können [30, 31]. Gleichzeitig wird an der Transparenzerhöhung lernender Assistenzsysteme zur besseren Erklärbarkeit und Nachvollziehbarkeit gearbeitet [32]. Für den jeweiligen Use Case ist daher zu prüfen, ob es durch die entwickelte Lösung zu Problemen bei der Zertifizierung kommen kann.

# 6 Herausforderungen bei der Umsetzung

Die übergeordneten Herausforderungen bei einer erfolgreichen Umsetzung datengetriebener Entscheidungsunterstützung durch Qualitätsprognosen lassen sich in *technische* und *unternehmenskulturelle bzw. betriebswirtschaftliche Herausforderungen* untergliedern.

## 6.1 Technische Herausforderungen

Im Zentrum der technischen Herausforderungen steht dabei die *Datenakquise* von Rohdaten aus verschiedenen Domänen. Diese umfasst zum einen die Akquise und Integration unterschiedlicher Datentypen (strukturiert vs. unstrukturiert) ohne den Verlust von kontext-relevanten Metainformationen. Zum anderen bringt die Extraktion von Daten aus verschiedenen heterogenen Datenquellen selbst einige Stolpersteine mit sich. Hier sieht das Aachener Internet of Production für die Verwaltung des Datenzugriffs auf verschiedene proprietäre Systeme eine sogenannte Middleware+ vor, um letztendlich einen Data Lake als Grundlage für anwendungsspezifische Analysen zu schaffen [14]. Um gezielt fehlende Daten auf dem Shopfloor aufzuzeichnen, kann auch Retrofitting von veralteter Technik oder Fremdmaschinen notwendig sein.

Aufbauend auf der Datenakquise bringt die *Datenanalyse* weitere Herausforderungen mit sich. Diese umfassen neben der Auswahl der richtigen Daten die Anwendung von Data Analytics Methoden selbst. Die Tatsache, dass häufig nicht alle relevanten Informationen in den Daten abgebildet sind, stellt eine weitere Hürde für den erfolgreichen Einsatz prädiktiver Modelle dar. Die zentrale Herausforderung für Unternehmen steckt in der Nutzbarmachung des Wissens, welches den Mitarbeitenden inhärent ist. Die zentrale Herausforderung ist dabei die technische Umsetzung der Überführung von Wissen der Mitarbeitenden in prädiktive Modelle bzw. Assistenzsysteme.

Die *Ableitung geeigneter Maßnahmen* aus den durch die Datenanalyse gewonnen Erkenntnissen stellt die Unternehmen ebenfalls vor Herausforderungen. Dabei liegt die größte Schwierigkeit in der Übersetzung der Prognosen in konkrete Handlungsempfehlungen, solange diese nicht präskriptiv durch ein lernendes Assistenzsystem bereitgestellt werden. Weitere Herausforderungen liegen in der Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf ähnliche Produkte oder Anwendungen sowie der Interpretation im Falle von intransparenten Prognosemodellen mit Black-Box Charakter.

### 6.2 Unternehmenskulturelle und betriebswirtschaftliche Herausforderungen

Eine der größten *unternehmensinternen* Herausforderungen ist die Überführung der übergeordneten Qualitäts- und Nachhaltigkeitsaspekte der Unternehmensstrategie (z. B. in Form von Leitbildern) in konkrete Predictive Quality Initiativen und Anwendungen. Ein hochrelevanter Faktor ist in diesem Zusammenhang die Einbindung der *Mitarbeitenden*. So muss für den erfolgreichen Einsatz datengetriebener Entscheidungsunterstützung ein Umdenken bei den Mitarbeitenden erfolgen. Dies kann nur über die gezielte Förderung des Vertrauens in die Leistungsfähigkeit solcher Systeme geschehen. Neben der reinen Akzeptanzförderung bei den Mitarbeitenden ist unternehmensintern häufig auch ein Nachweis und die Anerkennung des sozialen, ökologischen oder ökonomischen Nutzens solcher Anwendungen zur Rechtfertigung entsprechender Investitionsvolumen zu erbringen.

*Außerhalb* des eigenen Unternehmens entstehen die größten Herausforderungen bei der Einbindung des *Kundenkreises* und der *Lieferfirmen*. So müssen für eine domänenübergreifende Datennutzung häufig Kunden zum Teilen ihrer Daten überzeugt werden, z. B. durch Darlegen der für sie entstehenden Mehrwerte. In diesem Zusammenhang gilt es auch rechtliche Fragen bezüglich der aufgezeichneten Daten zu klären: Wer sind Inhabende der Daten? Wer darf die Daten für welche Zwecke nutzen? Analog zur eigenen Belegschaft muss in diesem Zusammenhang auch ein Umdenken beim Kundenkreis durch die aktive Förderung des Vertrauens in datengetriebene Unterstützungssysteme erfolgen. Dies gilt in besonderem Maße für den Einsatz neuer Geschäftsmodelle. Neben dem Kundenkreis stellt auch die Einbindung der Lieferfirmen für eine domänenübergreifende Datennutzung häufig eine Herausforderung dar. Zugriff auf die Daten des Zulieferunternehmens lassen sich durch festgeschriebene vertragliche Verpflichtungen oder durch Darlegen der entstehenden Mehrwerte für den Kundenkreis realisieren.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Zunehmende Produktkomplexität und -vielfalt, komplexere Herstellungsprozesse und steigende Nachhaltigkeitsforderungen aus Bevölkerung und Politik stellen zentrale Herausforderungen für die kontinuierliche Verbesserung der prozess- und produktbezogenen Qualität dar. Zur Bewältigung dieser Herausforderungen wurden in der Vergangenheit bereits Ansätze zur Extraktion und Nutzung des Wissens verfolgt, welches in aufge-

zeichneten Daten steckt. Data Analytics bietet nun ein Werkzeug, die exponentiell ansteigende Datenmenge im Rahmen von anwendungsspezifischen Analysen noch umfangreicher zur systematischen Entscheidungsunterstützung zu nutzen.

Predictive Quality beschreibt in diesem Zusammenhang die Befähigung des Anwendenden zur Optimierung der produkt- und prozessbezogenen Qualität durch die Nutzung datengetriebener Prognosen als Entscheidungsgrundlage für Handlungsmaßnahmen. Durch die Befähigung der Anwendenden, zukünftige Ereignisse in ihrem Sinne zu steuern, lassen sich in der Praxis vielfältige Potenziale realisieren. Durch das Ausschöpfen dieser Potenziale lässt sich neben der Optimierung von produkt- und prozessbezogener Qualität auch eine Steigerung der unternehmerischen Nachhaltigkeit im Sinne eines synergetischen Zusammenspiels erzielen. Übergeordnetes Ziel ist hierbei die Realisierung konkreter Mehrwerte im Sinne der Umsetzung sozialer, ökologischer und ökonomischer Aspekte der Unternehmensstrategie. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wurde anhand von fünf Anwendungsbeispielen aus unterschiedlichen Branchen und Domänen exemplarisch gezeigt, wie sich durch die Anwendung prädiktiver Data Analytics Methoden diese Mehrwerte realisieren lassen.

In diesem Zusammenhang wurden neben den Mehrwerten datengetriebener Prognosen auch die dafür zu schaffenden Voraussetzungen sowie Herausforderungen bei der Implementierung behandelt. Die für eine erfolgreiche Umsetzung identifizierten Voraussetzungen beinhalten den Faktor Mensch und dessen Expertise, Motivation und Erwartungshaltung. Weitere tragende Faktoren sind die Auswahl von erfolgsversprechenden Use Cases sowie die Schaffung der richtigen (daten-)technischen Voraussetzungen. Die größten identifizierten technischen Herausforderungen liegen in der Akquise und Integration unterschiedlicher Datentypen aus heterogenen Datenquellen ohne den Verlust von kontext-relevanten Metainformationen. Weitere unternehmenskulturelle Herausforderungen liegen in der Förderung des Vertrauens von unternehmensexternen wie internen Handelnden in datengetriebene Assistenzsysteme und des damit verbundenen Umdenkens.

Der Beitrag zeigt, dass Predictive Quality in seiner Funktion als datengetriebene Entscheidungsunterstützung zur Verbesserung der produkt- und prozessbezogenen Qualität bereits in unterschiedlichen Domänen und Branchen erfolgreich eingesetzt wird. Neben der Optimierung von produkt- und prozessbezogener Qualität lassen sich auch konkrete Mehrwerte zur Steigerung der unternehmerischen Nachhaltigkeit realisieren, wie z. B. die signifikante Reduktion des Carbon Footprint einer Kundendienstflotte. Hierzu zählen beispielsweise die Reduktion von Ausschuss und Emissionen sowie die Optimierung des Ressourceneinsatzes in der Produktion.

Die vorgestellten Anwendungsbeispiele basieren übergreifend auf prädiktiven Analysemodellen und unterscheiden sich neben dem Realisierungsstand primär im Grad der bereitgestellten präskriptiven Handlungsempfehlungen. Es ist daher zu erwarten, dass neben einer weiteren Automatisierung von Predictive Quality Anwendungen im Allgemeinen vor allem die Realisierung des letzten Schritts von prädiktiv zu präskriptiv (Prescriptive Quality) fokussiert wird. Diese verfügt über das Potenzial, die kontinuierliche Verbesserung von produkt- und prozessbezogener Qualität weiter zu beschleunigen sowie die Produktion nachhaltiger und resilienter zu machen.

# 8 Literatur


[1] T. Dyllick und K. Hockerts, “Beyond the business case for corporate sustainability,” *Bus. Strat. Env.*, Jg. 11, Nr. 2, S. 130–141, 2002, doi: 10.1002/bse.323.

[2] E. Hoffmann, M. Rotter, und J. Knopf, “Handlungsfelder unternehmerischer Nachhaltigkeit: Praxisbeispiele und Entwicklungsbedarf,” Berlin, Germany, 2011.

[3] G. Walther, *Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke: Überbetriebliche Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Habil.-Schr., 2009, Wiesbaden: Gabler, 2010. [Online]. Verfügbar: http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=752097

[4] G. Köksal, İ. Batmaz, und M. C. Testik, “A review of data mining applications for quality improvement in manufacturing industry,” *Expert Systems with Applications*, Jg. 38, Nr. 10, S. 13448–13467, 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2011.04.063.

[5] Z. Ge, Z. Song, S. X. Ding, und A. B. Haung, “Data Mining and Analytics in the Process Industry: The Role of Machine Learning,” *IEEE Special Section on data-driven monitoring, fault diagnosis and control of cyber-physical systems*, Jg. 5, Nr. 5, S. 20590–20616, 2017.

[6] R. Schmitt, *Smart Quality - QM im Zeitalter von Industrie 4.0: 20. Business Forum Qualität; 12. und 13. September 2016, Aachen, Business Forum Qualität,* Aachen: Apprimus Verlag, 2016.

[7] L. Cattaneo, L. Fumagalli, M. Macchi, und E. Negri, “Clarifying Data Analytics Concepts for Industrial Engineering,” *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 51, Nr. 11, S. 820-825 DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.440, 2018.

[8] N. Lin, *Applied business analytics. Integrating business process, big data, and advanced analytics*. Upper Saddle River: Safari Books, 2015. [Online]. Verfügbar: https://proquest.safaribooksonline.com/book/databases/business-intelligence/9780133481549

[9] C. L. Stimmel, *Big data analytics strategies for the smart grid. Boca Raton, FL: CRC Press*. Leipzig: Auerbach Verlag, 2014. [Online]. Verfügbar: http://alvarestech.com/temp/Industry4.0/2019/Carol%20L.%20Stimmel%20-%20Big%20Data%20Analyt-ics%20Strategies%20for%20the%20Smart%20Grid%20(2014,%20Auerbach%20Publications,CRC%20Press).pdf

[10] R. Wöstmann, F. Nöhring, J. Deuse, R. Klinkenberg, und T. Lacke, “Big Data Analytics in der Auftragsabwicklung. Erschließung ungenutzter Potenziale in der variantenreichen Kleinserienfertigung,” *Industrie Management 4.0*, Jg. 33, Nr. 4, 2017. [Online]. Verfügbar: https://www.industrie-management.de/node/104

[11] McKinsey&Company, “The Age of Analytics. Competing in a data-driven World,” 2016.

[12] M. Veigt, B. Staar, S. Schukraft, und M. Freitag, “Data Analytics in der Produktionsplanung. Einsatz von Data-Analytics-Methoden zur Identifikation von Einflussfaktoren auf die Termintreue,” *wt-online*, Jg. 109, Nr. 4, S. 230-234, 2019.

[13] I. Hübner, “Aus der Praxis: Predictive Maintenance bei Trumpf,” *Digital Factory Journal*, Jg. 2, Nr. 3, S. 57–59, 2018. [Online]. Verfügbar: https://www.smart-production.de/fileadmin/dokumente/dfj/dfj_Magazin/Heftarchiv/DFJ_3_2018.pdf

[14] C. Brecher, R. H. Schmitt, und F. Klocke, Hrsg., *Internet of Production für agile Unternehmen: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017, 18. bis 19. Mai*. Aachen: Apprimus Verlag (Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren, 978-3-86359-512-8), 2017.

[15] R. Refflinghaus, C. Kern, und S. Klute-Wenig, “Qualitätsmanagement 4.0 - Status quo! Quo vadis? Bericht zur GQW-Jahrestagung 2016 in Kassel. Gesellschaft für Qualitätswissenschaft; Gesellschaft für Qualitätswissenschaft Jahrestagung; GQW-Jahrestagung,” *Kassel: Kassel University Press (Kasseler Schriftenreihe Qualitätsmanagement, Band 6)*, Jg. 6, 2016.

[16] G. Schuh und M. Riesener, *Produktkomplexität managen.* München: Carl Hanser Verlag, 2017.

[17] V. Dirlea, R. Kidambi, S. Krubasik, und C. Sachseneder, “Quality 4.0 Preventive, Holistic, Future-Proof. Hg. v. ATKearney,” 2017. [Online]. Verfügbar: https://www.at-kearney.com/industrial-goods-services/article?/a/quality-4-0-preventive-holistic-future-proof

[18] R. Schmitt, V. Heinrichs, und M. C. Laass, “Die Meinung immer dabei. Wie Beiträge aus Sozialen Netzwerken Unternehmen nutzen können,” *QZ Qualität und Zuverlässigkeit*, Jg. 59, Nr. 6, 2014. [Online]. Verfügbar: https://www.qz-online.de/qz-zeitschrift/archiv/artikel/wie-beitraege-aus-sozialen-netzwerken-unternehmen-nutzen-koennen-737318.html

[19] T. Pfeifer und R. Schmitt, *Masing Handbuch Qualitätsmanagement,* München: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2014.

[20] Initiative Lieferkettengesetz, *70 Ökonom*innen fordern Lieferkettengesetz.* [Online]. Verfügbar: https://lieferkettengesetz.de/presse/ (zugegriffen: Jan. 18 2021).

[21] H. Kerbl, “Industrie 4.0 in Sichtweite: Kostensenkung durch Dynamisierung von Stichprobenplänen,” *QZ Qualität und Zuverlässigkeit*, Jg. 64, Nr. 5, S. 56–58, 2019.

[22] *Annahmestichprobenprüfung anhand der Anzahl fehlerhafter Einheiten oder Fehler (Attributprüfung): Teil 3: Skip-Lot-Verfahren*, DIN ISO 2859-3, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2007-10-00.

[23] Ishwarappa und J. Anuradha, “A Brief Introduction on Big Data 5Vs Characteristics and Hadoop Technology,” *Procedia Computer Science*, Jg. 48, s. 319–324, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.04.188.

[24] J. Krauß, J. Dorißen, H. Mende, M. Frye, und R. H. Schmitt, “Machine Learning and Artificial Intelligence in Production: Application Areas and Publicly Available Data Sets,” in *PRODUCTION AT THE LEADING EDGE OF TECHNOLOGY: Proceedings of the 9th*, J. P. Wulfsberg, W. Hintze, und B.-A. Behrens, Hrsg., [S.l.]: SPRINGER VIEWEG, 2019, S. 493–501.

[25] Fraunhofer-Gesellschaft, *AI Kick-Starter Bundle.* [Online]. Verfügbar: https://www.bigdata.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/produktion_industrie/ai-kick-starter-bundle.html (zugegriffen: Feb. 11 2020).

[26] WGP, *KI-Starthilfe für Unternehmen.* [Online]. Verfügbar: https://wgp.de/de/ki-starthilfe-unternehmen/ (zugegriffen: Feb. 11 2020).

[27] J. Krauß, M. Frye, G. T. D. Beck, und R. H. Schmitt, “Selection and Application of Machine Learning- Algorithms in Production Quality,” in *Technologien für die intelligente Automation : technologies for intelligent automation*, Band 9, *MACHINE LEARNING FOR CYBER PHYSICAL SYSTEMS: Selected papers from the*, J. Beyerer, Hrsg., [S.l.], Berlin, Germany: MORGAN KAUFMANN; SPRINGER VIEWEG, 2019, S. 46–57.

[28] K. Stockinger, T. Stadelmann, und A. Ruckstuhl, “Data Scientist als Beruf,” in *Edition HMD, Big Data: Grundlagen, Systeme und Nutzungspotenziale*, D. Fasel und A. Meier, Hrsg., Wiesbaden: SPRINGER VIEWEG, 2016, S. 59–81.

[29] T. C. Brandstätter, J. Krauß, und R. H. Schmitt, “Certification of AI-Supported Production Processes,” in *PRODUCTION AT THE LEADING EDGE OF TECHNOLOGY: Proceedings of the 9th*, J. P. Wulfsberg, W. Hintze, und B.-A. Behrens, Hrsg., [S.l.]: SPRINGER VIEWEG, 2019, S. 553–561.

[30] KI Bundesverband e.V., *Künstliche Intelligenz: Situation und Maßnahmenkatalog*. Berlin, Germany, 2018. [Online]. Verfügbar: https://ki-verband.de/wp-content/uploads/2018/06/KI-Verband-Positionspapier-25062018.pdf

[31] DIN e. V., *Künstliche Intelligenz: Ohne Normen und Standards geht es nicht.* [Online]. Verfügbar: https://www.din.de/de/forschung-und-innovation/themen/kuenstliche-intelligenz (zugegriffen: Feb. 11 2020).

[32] W. Samek, G. Montavon, A. Vedaldi, L. K. Hansen, und K.-R. Müller, *Explainable AI: Interpreting, Explaining and Visualizing Deep Learning*. Cham: Springer International Publishing, 2019.

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC-2023 Internet of Production – 390621612.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 3.2:

Prof. Dr.-Ing. R. Schmitt, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT

Dr.-Ing. E. Dietrich, IconPro GmbH

Dr.-Ing. M. Ellerich, Neuman & Esser Group

R. Kiesel, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

J. Krauß, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Prof. Dr. R. Kurzhals, Westphalia DataLab GmbH

A. Latz, Lumileds Germany GmbH, Aachen

Dr.-Ing. N. Miller, Scheidt & Bachmann GmbH

G. Nilgen, Miele & Cie. KG

P. Schlegel, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

## 3.3 Worldwide Lab – Transformation durch Lernen im Netzwerk

*G. Schuh, P. Burggräf, S. Gottschalk, A. Gützlaff, M. Dannapfel, T. Adlon, K. Thomas, M. Ebade Esfahani, C. Geukes, J. Uelpenich, M. Welsing, A. Klein, S. Tschöpe, M. Henrichs, W. Weber, J. Holtbrügge, C. Benninghaus, S. Feike, P. Mairl, N. Hülsmann*

### Gliederung

1 Herausforderungen des Wandels für produzierende Unternehmen .....321

2 Funktionsweise und Potenziale eines Worldwide Labs .....323

3 Herausforderungen bei der Umsetzung eines Worldwide Labs .....326

4 Die Umsetzungsstrategie des Worldwide Labs für produzierende Unternehmen..328

4.1 Schnellere Datenverfügbarkeit .....329

4.2 Adaptive Prozesse .....332

4.3 Agile Organisation .....336

5 Zusammenfassung .....342

6 Literatur .....344

## Kurzfassung

### Worldwide Lab – Transformation durch Lernen im Netzwerk

Für international agierende Produktionsunternehmen lag der Fokus in den letzten Jahren vorwiegend auf der Globalisierung der Produktionsnetzwerke und der Erzielung von Kostenvorteilen. Die aktuellen Herausforderungen bestehen jedoch aus den Themen der Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Durch den technologischen Fortschritt sind die Unternehmen einem immer schneller werdenden Wandel ihres Umfeldes ausgesetzt und hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit sind ein wichtiges Kriterium für nachhaltigen Unternehmenserfolg. Unternehmen müssen wirtschaftlich agieren und gleichzeitig neue Technologien und Geschäftsmodelle entwickeln, um auch zukünftig nachhaltig wettbewerbsfähig zu sein. Die historisch gewachsenen globalen Produktionsnetzwerke bieten dabei die Möglichkeit die Innovationsfähigkeit zu steigern. Das Zusammenführen der Daten aller Produktionsstandorte ermöglicht eine vollständige Datentransparenz und Informationsverfügbarkeit, sodass erfolgsversprechende, lokal entwickelte Lösungsansätze für die genannten Herausforderungen schnell identifiziert werden können. Im Rahmen des Forschungsprojektes Internet of Production (IoP) wurde das Konzept des Worldwide Labs erarbeitet. Zur Realisierung des Worldwide Labs müssen alle Datenpunkte eines globalen Produktionsnetzwerkes verfügbar gemacht werden und wie experimentelle Beobachtungen behandelt werden, damit die Erfolgsfaktoren von Lösungsansätzen verstanden werden können. Durch die Verlinkung der Daten aller Standorte kann die Anzahl an beobachteten Faktoren enorm gesteigert werden. Zur erfolgreichen Implementierung und Nutzung des Worldwide Labs muss eine *schnellere Datenverfügbarkeit* erreicht werden und das Unternehmen in *adaptiven Prozessen* operieren, die von einer *agilen Organisation* umgesetzt werden. Die verschiedenen Aspekte zur Einführung des Worldwide Labs werden in den Unterkapiteln anhand von Praxisbeispielen erklärt.



## Abstract

### Worldwide Lab - Transformation by learning within the network

For internationally operating production companies, the focus in recent years has been primarily on the globalization of production networks and the achievement of cost advantages. However, the current challenges are the topics of digitalization and sustainability. Due to technological progress, companies are exposed to increasingly faster changes in their environment and high flexibility and adaptability are important criteria for sustainable business success. Companies must operate economically and at the same time develop new technologies and business models to remain sustainably competitive in the future. The historically grown global production networks offer the chance to increase innovation capability. Bringing together data from all production sites enables complete data transparency and information availability, so that promising, locally developed solutions to the stated challenges can be quickly identified. The concept of the Worldwide Lab was developed as part of the Internet of Production (IoP) research project. To realize the Worldwide Lab, all data points of a global product network have to be made available and treated like experimental observations in order to understand the success factors of potential solutions. By linking the data of all sites, the number of observed factors can be increased enormously. To successfully implement and use the Worldwide Lab, *faster data availability* must be achieved and the company must operate in *adaptive processes* realized by an *agile organization*. The various aspects of implementing the Worldwide Lab are explained in the subsections using practical examples.

# 1 Herausforderungen des Wandels für produzierende Unternehmen

Der Produktionssektor wurde im vergangenen Jahrhundert insbesondere durch eine zunehmende Globalisierung und Expansion der Produktionsnetzwerke geprägt. Das Paradigma der dritten industriellen Revolution bestand aus immer größeren Skalenvorteilen, indem Prozesse automatisiert, elektrifiziert und computerisiert und dadurch Produktionsmengen stetig gesteigert werden konnten. Die ökonomischen Aktivitäten erfolgreicher Unternehmen wurden auf die globale Vernetzung ausgerichtet und Lieferketten länderübergreifend aufgebaut. [1] Aus strategischen Gesichtspunkten wurden neue Standorte im Produktionsnetzwerk hauptsächlich aus Kostenvorteilen bei gleichzeitiger Erzielung von Mengenvorteilen ausgewählt. [2] Dies hatte zur Folge, dass die durchgehende Verflechtung von Transport- und Lieferketten zu einer stärkeren Abhängigkeit vom internationalen Gütertransport führt. Der Welthandel stieg im Zuge dessen sogar proportional stärker als die Weltwirtschaftsleistung. [3, S. 4] Der zeitliche Verlauf dieser zunehmenden Verflechtungen im Rahmen der Globalisierung ist in Bild 1 dargestellt.

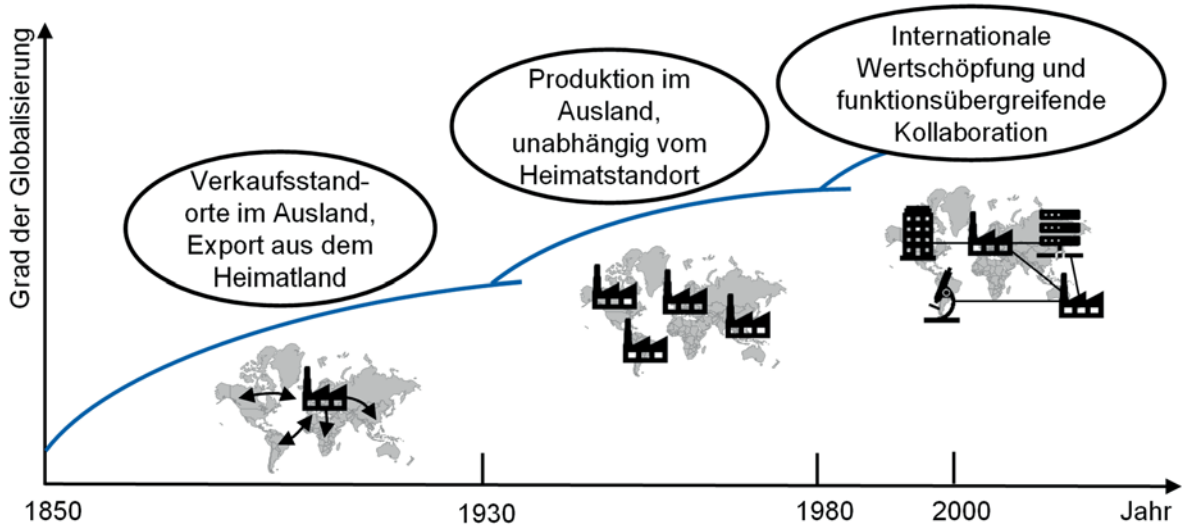



*Bild 1: Die Globalisierung führt zu steigenden unternehmerischen Verflechtungen [4]*

Die heutige Verflechtung unternehmerischen Handelns beschränkt sich nicht nur auf Lieferketten im eigenen Produktionsnetzwerk, sondern weist auch politische, wirtschaftliche, soziale und ökologische Auswirkungen auf. So sind in der politischen Dimension Freihandelsabkommen und die sukzessive Öffnung der Märkte für eine Verstärkung dieser Verflechtung verantwortlich. Auf der anderen Seite führen Handelskonflikte und protektionistische Entwicklungen häufig zu großen Unsicherheiten und Schwankungen im weltweiten Wirtschaftsraum. [5]

Auf wirtschaftlicher Ebene werden die strukturellen Veränderungen im Wettbewerb durch die zunehmende Schnelligkeit des Wandels geprägt. Im Zuge dessen gerät die Produktindividualisierung und damit einhergehend die zunehmende Bedeutung von Kundschaftsanforderungen in den Vordergrund. [6, 7, S. 12] Innerhalb kürzester Zeit entsteht neue, ernstzunehmende Konkurrenz im globalen Markt, die insbesondere in der Technologie-branche durch die Sammlung und Verarbeitung von Konsumierenden- und Kundschafts-daten neue Geschäftsmodelle entwickeln und einen neuen und starken Wettbewerbs-druck erzeugen.

Zudem werden produzierende Unternehmen vermehrt hinsichtlich der Nachhaltigkeitsziele in ihren unternehmerischen Geschäftsmodellen bewertet. [8] Die soziale Verantwortung wird einerseits durch strengere Regularien und Richtlinien politisch vorgegeben. Andererseits führen Veränderungen im Konsumierenden- und Investierendenverhalten zu gesellschaftlichen Anforderungen für mehr Nachhaltigkeit. Dabei wird häufig die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit fokussiert, wobei der Druck auf nachhaltiges Wirtschaften durch die öffentliche Debatte über den Umgang mit dem Klimawandel weiter verstärkt wird. Dies führt bei einem Großteil der Unternehmen bereits heute zu einem neuen Denken und Handeln. Darüber hinaus zeigen sich die ökologischen Auswirkungen bereits heute durch Störungen von Zulieferketten und Absatzmärkten. [9]

Folglich werden eine Dezentralisierung der Produktion und die Fokussierung auf lokale, individuelle Märkte ersichtlich. Es zeichnet sich auf der einen Seite ab, dass das Ende der globalen Lieferketten vermehrt neue, digitale Wertschöpfungsnetzwerke hervorbringt. Auf der anderen Seite erzeugt die konsequente Umsetzung der gesetzten Nachhaltigkeitsziele fundamental neue Geschäftsprozesse in der Unternehmenslandschaft. Die starken Änderungen des unternehmerischen Umfelds erfordern daher eine hohe Flexibilität der Unternehmen. Die Gestaltung agiler Produktionsnetzwerke ist eine Möglichkeit die benötigte Flexibilität sicherzustellen, um sich im hochvolatilen Umfeld wirtschaftlich zu behaupten. [10] Es ist notwendig, dass dem Strukturwandel nicht nur passiv begegnet wird. Die Dimensionen der Veränderung für produzierende und global agierende Unternehmen betreffen sowohl bestehende Absatzmärkte als auch Prozesse und Produkte im heutigen Geschäftsumfeld.

Als Beispiel für eine starke, digitale Innovationsfähigkeit kann das Unternehmen Amazon genannt werden. Durch die ganzheitliche Vernetzung der Geschäftsstrukturen können Informationen gesammelt, interne Abläufe wie bspw. die Liefergeschwindigkeit verbessert und schnell auf sich ändernde Kundschaftsbedürfnisse reagiert werden. Drei Prinzipien sind dabei für den Erfolg des Unternehmens ausschlaggebend: [11–14]

- Embrace data: Wettbewerbsvorteile werden durch das Sammeln und Analysieren von Daten aller Einzelaktivitäten geschaffen und neue Geschäftsbereiche erschlossen.
- Democratise data: Der Zugang zu den Daten- und Informationsbereichen sowie den entsprechenden Hilfsmitteln wird sämtlichen Mitarbeitenden ermöglicht, damit eigene Ideen in einer Laborumgebung erprobt werden können.
- Learn from data: Daten und Informationen werden insbesondere dazu genutzt, um in hoher Frequenz neue Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle zu entwickeln.

Neue Herausforderungen für produzierende Unternehmen werden nicht durch klassische Lösungsansätze behoben, da im Zeitalter der Digitalisierung und Nachhaltigkeit neue Regeln gelten. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird daher die Frage beantwortet, wie das vorgestellte Beispiel Potentiale für global produzierende Unternehmen aufzeigt. Die Hypothese des vorliegenden Beitrags lautet:

**Durch die digitale Verknüpfung aller Einzelaktivitäten können Unternehmen wie in einem weltweiten Labor lernen den aktuellen Strukturwandeln nachhaltig für sich zu nutzen, indem Potenziale für datenbasierte Wettbewerbsvorteile genutzt und Erkenntnisse über die notwendige, technologische Durchschlagskraft entwickelt werden.**

## 2 Funktionsweise und Potenziale eines Worldwide Labs

Der Erfolg Amazons ist stark mit dem Nutzen der Daten verknüpft. Es lassen sich enorme Potenziale realisieren, wenn es Unternehmen gelingt, Daten standortübergreifend zu verknüpfen. Der dadurch entstehende Datengewinn lässt sich mit einem Labor vergleichen, dessen Kapazitäten sich durch Kooperationen mit anderen Forschungseinrichtungen um ein Vielfaches erhöht haben. Dies ermöglicht eine höhere Anzahl an durchführbaren Experimenten und damit auch einen größeren Erkenntnisgewinn. So sagt Jeff Bezos (CEO von Amazon): „Wenn Du die Anzahl Deiner jährlichen Experimente verdoppelst, wirst Du Deine Innovationsfähigkeit verdoppeln." [15] Übertragen auf die produzierende Industrie bedeutet dies, dass die hohe Zahl an Experimenten in einem dynamischen Unternehmensumfeld es ermöglicht, in hoher Frequenz verschiedene Lösungsansätze zeiteffizient zu erproben. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Grundidee des Worldwide Labs erläutert und damit einhergehende Potenziale aufgezeigt. Des Weiteren werden die Gründe dargelegt, weshalb die aktuellen Strukturen der produzierenden Industrie noch nicht ausreichend zur Erfüllung der beschriebenen Vision des Worldwide Labs sind, um dann anschließend auf die notwendigen Entwicklungsschritte einzugehen. Setzt ein Unternehmen die Idee eines Worldwide Labs konsequent um, ist es in der Lage auf globaler Ebene jeden Prozess oder Vorgang messbar zu machen, daraus Kennzahlen und Analysen abzuleiten und dadurch Einspar- bzw. Optimierungspotenziale zu identifizieren. [16]

Auf die Analogie in der Funktionsweise des Worldwide Labs zu der eines Labors ist alleine aufgrund der Namensgebung schon schnell geschlossen. In einem Labor ist man im Gegensatz zu der Außenwelt in der Lage die Randbedingungen beeinflussen und konstant halten zu können. Dadurch können Erkenntnisse durch die Variation eines einzelnen Einflussfaktors gewonnen werden. Sobald sich mehrere Einflussfaktoren gleichzeitig verändern, lassen sich daraus keine klaren Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge mehr gewinnen. Jedoch gilt auch, dass mit einer höheren Anzahl an Experimenten die Erkenntnisse fundierter werden. [17] Da die Variation an Randbedingungen und Einflussfaktoren im realen Fabrikbetrieb oder innerhalb eines globalen Produktionsnetzwerkes enorm hoch ist, ist ein Erkenntnisgewinn extrem herausfordernd. Diese Herausforderung ist sogar so groß, dass eine praktische Umsetzung im Prinzip gar nicht möglich ist. Denn mit jeder neuen bzw. veränderten Randbedingung wächst die Anzahl der möglichen Kombinationen exponentiell. Kein Labor dieser Welt hat die notwendigen Kapazitäten all diese möglichen Kombinationen zu untersuchen. [18] Genau an diesem Punkt wird das Potenzial des Worldwide Labs gegenüber konventionellen Experimenten deutlich. Durch die Vernetzung im Rahmen von Industrie 4.0 steigt die Anzahl an verfügbaren Produktionsdaten und somit auch die möglichen experimentellen Einflussfaktoren. Durch die Verwendung der Daten aller Produktionsvorgänge und -prozesse wird die Anzahl an Daten-

mengen, die durch konventionelle Experimente erzielbar sind um ein Vielfaches übertroffen. Wie mächtig diese Vorgehensweise ist und zukünftig sein kann, wird in Bild 2 deutlich. [16]

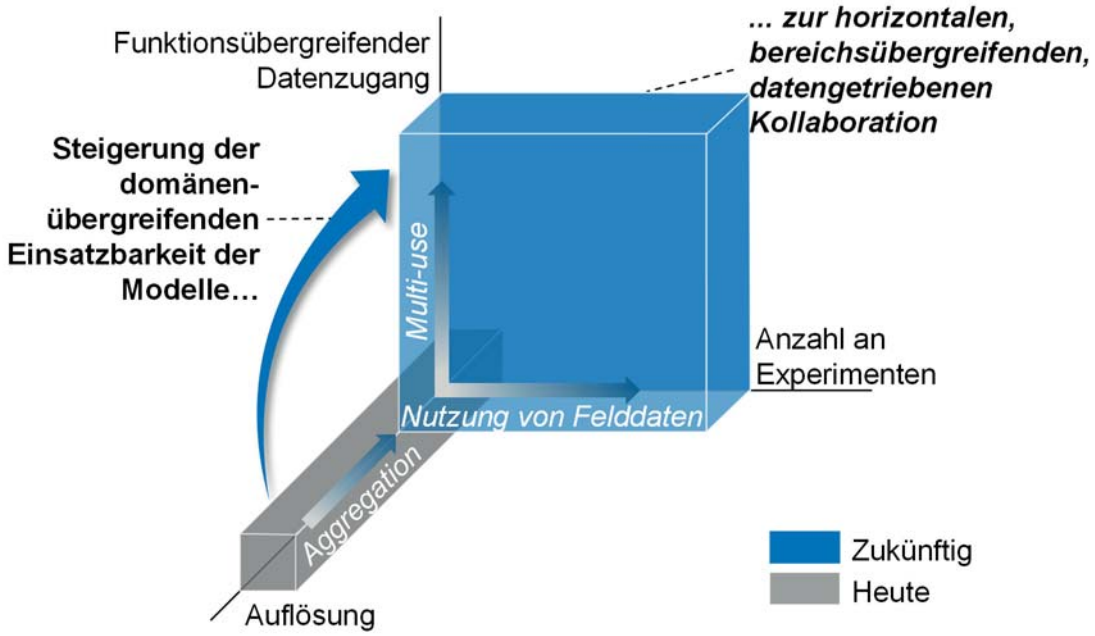



*Bild 2: Vision des Internet of Production und Grundgedanke des Worldwide Labs [16]*

Die Implementation der Arbeitsweise eines Labors in das Unternehmen ist für den Erfolg des Worldwide Labs jedoch genauso essenziell wie die Thematik der Datenverfügbarkeit. Dazu ist in Bild 3 der Arbeitszyklus eines Labors mit seinen jeweiligen Phasen dargestellt. In der ersten Arbeitsphase „Measure“ wird ein Experiment durchgeführt und die zuvor definierten Einflussfaktoren gemessen und dokumentiert. In der darauffolgenden Phase „Analyze“ werden die zuvor erhobenen Daten auf möglicherweise bestehende Zusammenhänge analysiert und zur Validierung der zuvor aufgestellten Hypothesen verwendet. Falls sich die zuvor aufgestellten Wirkungsbeziehungen bestätigen, wird die letzte Phase des Arbeitszyklus eingeleitet. In der Phase „Scale“ wird das experimentell bestätigte Ergebnis nun im größeren Zusammenhang erforscht oder verwendet. Dies kann je nach Wissenschaftsdisziplin Unterschiedliches bedeuten. Denkbar wäre z.B., dass eine chemische Reaktion in ein neues Herstellungsverfahren integriert wird oder ein psychologischer Effekt in eine neue Marketingkampagne einfließt. Im produktionstechnischen Kontext des Worldwide Labs könnte beispielsweiße ein neues Fertigungsfahren oder ein neuer Betriebsablauf eingeführt werden. Um erfolgreiche Lösungen bei sich zu implementieren, reicht für Unternehmen oft der interne Blick aus. Konzepte, die an anderen Standorten sehr gut funktionieren, können auf den eigenen Standort übertragen werden.[19] Wichtig ist dabei jedoch die Funktionsweise des Konzeptes vollständig erfasst zu haben. Werden einzelne wichtige Einflussfaktoren übersehen, kann das dazu führen, dass das Konzept an dem neuen Standort scheitert und nicht die erhofften Vorteile mit sich bringt.

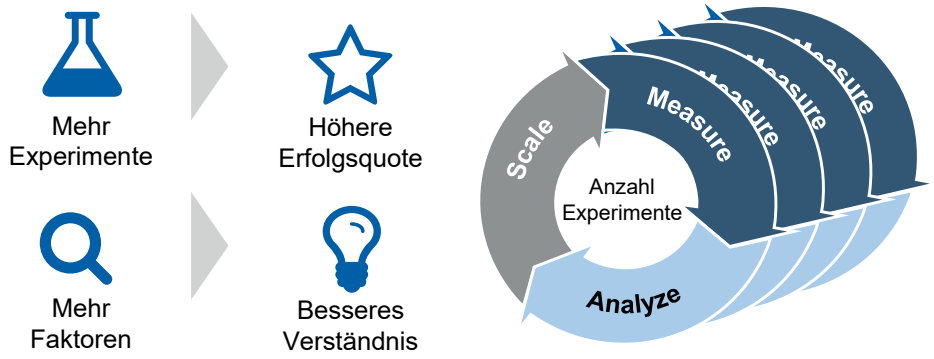



*Bild 3: Skizzierung der Funktion und Arbeitsweise eines Labors*

Die folgenden Potenziale ergeben sich für produzierende Unternehmen bei der konsequenten Umsetzung des Worldwide Lab Gedankens:

- Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit
- Verbesserung der Effizenz und Wirkungsmeachanismen
- Steigerung der der Innovationsfähigkeit

Die Verknüpfung der Daten aller globalen Produktionsstandorte vereinfacht den Datenaustausch zwischen diesen enorm und ist damit effizienzsteigernd. Dank dieser erhöhten vertikalen und horizontalen Transparenz werden sowohl inter- als auch intrasystematische Effizienzen gesteigert. [20] Die Verbesserung der Innovationsfähigkeit der Produktion kann durch einen funktionsübergreifenden Informationsaustausch erfolgen, da dieser die domänenspezifischen Restriktionen und Fähigkeiten für alle Agierenden nachvollziehbar macht. Die damit geschaffene Basis für einen schnelleren Austausch zwischen den Fachbereichen ermöglicht die Identifikation und Umsetzung von Innovationen. Zusätzlich kann durch die transparente Datenbasis hinreichend schnell abgeschätzt werden, welche Produktionskapazitäten für neue Produkte zur Verfügung stehen. Dies ermöglicht eine schnellere Reaktion auf veränderte Anforderungen der Märkte. Die Verwendung von Daten anderer Entitäten kann somit beispielweiße bei der Beurteilung der richtigen Antwort auf die Marktveränderung helfen. Dabei werden ähnliche Prozesse in anderen Standorten begutachtet, um Planungsschlüsse ziehen zu können und um neue Produktionsvorgänge daran zu orientieren. [21]

## 3 Herausforderungen bei der Umsetzung eines Worldwide Labs

Produzierende Unternehmen stehen vor Herausforderungen, die dem Innovators Dilemma ähneln. Zum einem sind sie verpflichtet jedes Jahr ausreichende Gewinne mit existierenden Produkten und Prozessen zu erwirtschaften. Nur so kann das mittelfristige Bestehen des Unternehmens gesichert werden. Zum anderen müssen jedoch neue disruptive Geschäftsmodelle und Produkte entwickelt werden, die eine Antwort auf die Herausforderungen des 21. Jahrhundert liefern. Diese neuen Lösungen sind jedoch in ihrer Entwicklung teuer und können sogar dazu führen, dass bestehende, profitable Geschäftsbereiche eines Unternehmens kannibalisiert werden. [22] Dieses Dilemma wird am Beispiel von Kodak in Bild 4 verdeutlicht. Obwohl das Unternehmen als eines der ersten eine digitale Kamera entwickelt hat, konnte dieser neue Markt nicht gewonnen werden, da die Entscheider die profitable Produktion von Fotofilmen nicht aufgeben wollten. [23] Innovationen sind notwendig, da alle Unternehmen durch das moralische und wirtschaftliche Imperativ der Nachhaltigkeit dazu getrieben werden, Produktionsprozesse und Produkte so weiterzuentwickeln, dass Ressourcen und Umwelt stärker geschont werden. [24] Zielgruppen werden in Zukunft Produkte, die in Bereichen der sozialen und ökologischen Nachhaltigkeit eine auffallende Schadschöpfung verursachen, nicht mehr akzeptieren. Gesetzgebende und Regulierende folgen bereits jetzt dem Druck der Öffentlichkeit und entwickeln zunehmend verschärfte Auflagen, wie es durch das Lieferkettengesetzt oder die $CO_2$-Steuer bereits der Fall ist. [25] Unternehmen sollten daher in Zukunft in der Lage sein ihre Produkte in Kreisläufen anzubieten und dafür bereits verkaufte Einheiten wieder zurückzunehmen und aufzubereiten. Auch können dezentrale Strukturen dafür sorgen, dass eine größere Nähe zur Kundschaft geschaffen wird und gleichzeitig eine Rückführung von Produkten und Rohstoffen im Sinne der Circular Economy erleichtert wird. Zudem müssen Prozesse geschaffen werden, die es erlauben auf die variablen Eingangsgrößen von recyceltem Material und Produktrückläufern einzugehen. Eine genaue Anleitung zur Umsetzung von Lösungen, die diesen Anforderungen gerecht werden, ist aktuell noch nicht bekannt. [26] Daher ist es umso wichtiger, dass Unternehmen mögliche Ansätze in ihrem weltweiten Netzwerk erproben und die Ergebnisse in einem Worldwide Lab zusammenführen.

*Bild 4: Verdeutlichung des Dilemmas von produzierenden Unternehmen am Beispiel Kodak*

Trotz der beschriebenen Potentiale und Notwendigkeit für ein Worldwide Lab ist der Aufbau der dafür benötigten Infrastruktur und Organisation mit Herausforderungen verbunden. Zunächst muss festgehalten werden, dass globale Produktionsnetzwerke zu den

komplexesten und dynamischsten Systemen gehören, die von Menschen je kreiert wurden. [27] Bei nur sehr wenigen Unternehmen wurden die global verteilten Produktionsstandorte einheitlich geplant und aufgebaut. In der Regel sind solche Strukturen das Ergebnis von historischen Entwicklungen, wie z.B. Firmenübernahmen, unvollständigen Expansionsplänen, Joint Venture Aktivitäten und wechselnden Unternehmensstrategien. Bedingt durch diese Anzahl an diversen Einflussfaktoren herrscht meist eine starke Heterogenität bzgl. der Produktions- und Geschäftsprozesse an den einzelnen Standorten. Dadurch wird die benötigte Transparenz und Datenoffenheit, welche für das Worldwide Lab benötigt wird, sowohl technisch als auch organisatorisch reduziert. [3]

Diese Charakteristiken finden sich ebenfalls in der IT-Landschaft der produzierenden Unternehmen wieder. Unternehmenssoftware spiegelt die Struktur der zu unterstützenden Geschäftsprozesse und Unternehmenseinheiten. Abläufe in der Datenverarbeitung entsprechen meist der Art und Weise, in der die Daten prozessbedingt im Unternehmen erzeugt und benötigt werden. Auch die Zugriffsrechte und -mechanismen orientieren sich deshalb an den Einheiten und Einteilungen innerhalb einer Organisation. [28] Diese Gestaltung von IT-Systemen ist sinnvoll, da so bestehende Prozesse bestmöglich unterstützt werden. Problematiken entstehen jedoch, falls die Anwendenden im Unternehmen außerhalb der geplanten und programmierten Abläufe agieren möchten. In solchen Fällen weisen IT-Programme meist keine ausreichende Flexibilität auf, um auf die neuen Anforderungen zu reagieren. Eine Umgestaltung der zugehörigen EDV-Strukturen ist dann nur mit beachtlichen zeitlichen und monetären Aufwänden möglich. So wird durch die Digitalisierung zwar die Effizienz und Geschwindigkeit von bestehenden Prozessen erhöht, die Flexibilität und Agilität der betroffenen Geschäftsbereiche jedoch teilweise reduziert. Des Weiteren entstehen meist abgeschlossene IT-Strukturen, welche auch als Informationssilos bezeichnet werden. Diese Silos ähneln dabei den organisatorischen Bereichen der Firmen. Dies ist bereits an den Namen der Systeme erkennbar wie z.B. Manufacturing Execution System, Supply Chain Management Systeme, Customer Relationship Management oder ähnliche. Besonders ältere Systeme sind oft nicht dafür konzipiert worden Daten über automatisierbare Schnittstellen für andere Parteien oder Systeme bereitzustellen. Daher stellen solche geschlossenen IT-Systeme eine weitere Herausforderung für die Implementierung des Worldwide Labs dar. [29]

Verschärft wird diese Herausforderung dadurch, dass viele Firmen aus der produzierenden Industrie unter einem starken Kostendruck und mit geringen Margen operieren. Du Nutzung von bereits abgeschriebener Infrastruktur ist dabei ein zentraler Baustein für die Wirtschaftlichkeit der Unternehmung. Bei einer solcher Ausgangslage ist es schwierig einen unmittelbaren Mehrwert aus verfügbaren Daten zu erzeugen. [30, 31] Das kann dadurch verdeutlicht werden, dass Ansätze zur Nutzung neuer Datenquellen im Industrie 4.0-Kontext nur in wenigen Unternehmen über einen Beta- oder Pilotenstatus hinauskommen. Dies steht in einem starken Kontrast zu den Aussagen vieler Führungskräfte in der Produktion, welche die Realisierung von digitalen Lösungen als oberste Priorität nennen. [32] So fehlt es in vielen Betrieben an Organisationseinheiten, welche darauf ausgerichtet sind ihre Entscheidungen an der Analyse von Big Data und ähnlichen Informationsquellen auszurichten. Meist sind die Beschäftigten in den verschiedenen Fachbereichen nicht für solche Tätigkeiten ausgebildet und bei der Unterstützung durch externe Fachkräfte können Reibungsverluste auftreten. Daher bietet die simultane Verbesserung von technischen und organisatorischen Schwachstellen, die höchste Wahrscheinlichkeit ein Worldwide Lab erfolgreich einzuführen. Im folgenden Kapitel werden die Schritte und Handlungsfelder vorstellt, die für die Umsetzung eines Worldwide Labs und der Entwicklung von nachhaltigen Wertschöpfungsprozessen notwendig sind.

# 4 Die Umsetzungsstrategie des Worldwide Labs für produzierende Unternehmen

Die Umsetzung des Worldwide Labs ist insbesondere aufgrund der zuvor erläuterten Herausforderungen in Unternehmen nur dann möglich, wenn die Strategie der Umsetzung auf die Arbeitsweise eines solchen Labors und die daraus resultierenden Handlungsfelder ausgelegt wird. Wie die spezifische Arbeitsweise eines Labors auf die notwendigen Handlungsfelder eines Worldwide Labs übertragen wird ist in Bild 5 dargestellt.

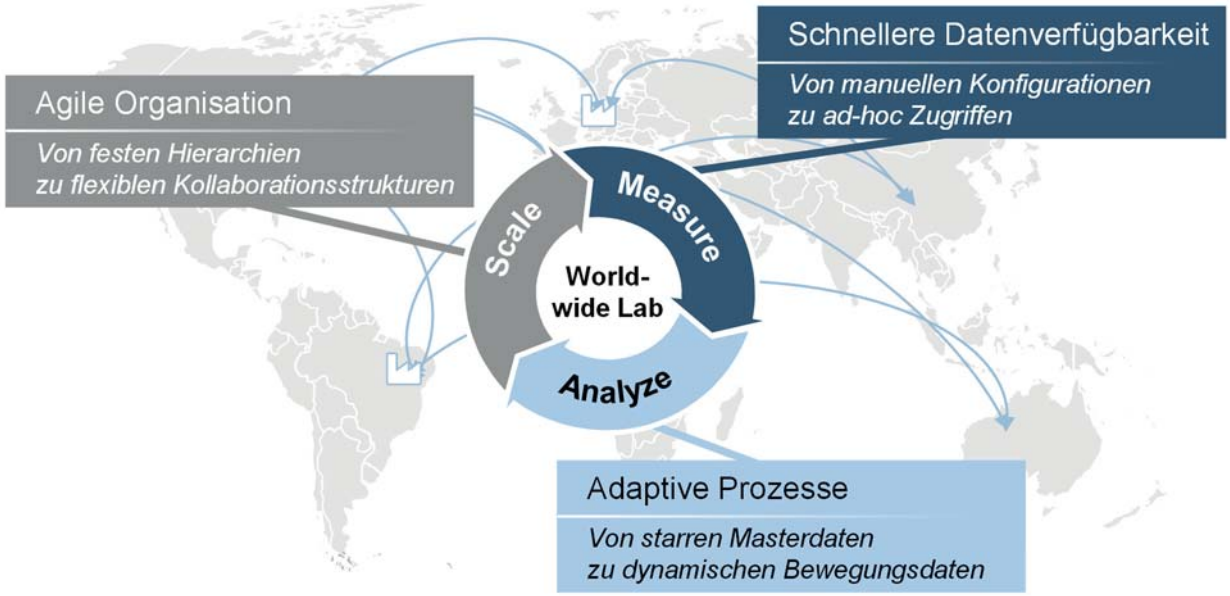



*Bild 5: Die spezifische Arbeitsweise eines Labors wird auf die notwendigen Handlungsfelder zur Einführung eines Worldwide Labs übertragen*

Im ersten Arbeitsschritt „Measure“ werden die entsprechenden Unternehmens- und Produktionsdaten in ein nutzbares Format übertragen. Das Ziel ist die Reduzierung der manuellen Konfigurationsarbeit der potentiellen Nutzerinnen und Nutzer, um schnelle ad hoc Zugriffe zu ermöglichen. Dies ist eine vornehmlich technische Aufgabe, die je nach Unternehmensbedürfnissen unterschiedlich gelöst werden kann. In Kapitel 4.1 wird dieses Vorgehen näher erläutert und an Unternehmensbeispielen verdeutlicht. Im zweiten Arbeitsschritt „Analyze“ erfolgt die Auswertung der Daten über adaptive und lernende Prozesse, die in der Lage sind, aus den nutzbaren Daten Erkenntnisse für das Unternehmen zu gewinnen und entsprechende Maßnahmen abzuleiten. Eine reine Erfassung der Daten ist für ein Unternehmen nicht zwangsläufig mit einem konkreten Mehrwert verbunden. Erfolgsentscheidend ist die Antizipation und Realisierung von Erkenntnissen aus den Daten und Informationen, sodass wertschöpfende Tätigkeiten optimiert, Maßnahmen abgeleitet und ein Mehrwert geschaffen werden kann. Bei den zu untersuchenden Informationen ist ein Prozessbezug notwendig, da im agilen Umfeld stets aktuelle Vorgänge mit einbezogen werden müssen und dies durch den Prozessbezug gewährleistet werden kann. Bei einer reinen Untersuchung von Masterdaten entsteht die Gefahr, dass veraltete und nicht relevante Aspekte anstelle von neusten Entwicklungen berücksichtigt werden. Somit sollten vor allem dynamische Bewegungsdaten anstelle von starren Masterdaten im Fokus der Analyse und lernenden Prozesse stehen. Dieses Handlungsfeld wird in Kapitel 4.2 ausführlich verdeutlicht und anhand von Beispielen aus der betrieblichen Praxis erläutert. Die letzte Phase im Arbeitszyklus eines Worldwide Labs ist die Aufgabe „Scale“. Dies bedeutet, dass die abgeleiteten Optimierungsmaßnahmen aus der Analysephase

im gesamten, globalen Produktionsnetzwerk implementiert und ausgerollt werden. Diese Aufgabe benötigt je nach Maßnahme und Skalierungsaufwand unterschiedliche Kapazitäten, Fähigkeiten und Zeiträume. Ein Enabler für die Skalierung im Unternehmen sind flexible Teams in einer agilen Organisation. Anstelle von festen, hierarchischen Organisationseinheiten werden flexible Kollaborationsstrukturen geschaffen. Nur mit einer schnellen Anpassung und Zusammenführung der notwendigen Arbeitskräfte für die zuvor definierten Maßnahmen kann die erforderliche Geschwindigkeit für die Umsetzung im Skalierungsprozess erfolgen. In Kapitel 4.3 wird vorgestellt, wie diese organisatorische Umgestaltung gelingen kann und welche Vorgehensweise beispielhaft von Unternehmen gewählt wurden.

## 4.1 Schnellere Datenverfügbarkeit

In einer modernen Fabrik erfolgt mittlerweile die Organisation und Steuerung durch den Einsatz interaktiver Dashboards. Zusammen mit dem wachsenden Einsatz von Manufacturing Execution Systemen (MES) in den 90er Jahren wurden solche Systeme unter dem Namen SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) bekannt und eingesetzt. [33] Dabei werden die eingesetzten IT-Systeme an den verschieden Standorten des Unternehmens zum Teil durchaus unterschiedlich verwendet. Gründe hierfür sind meist historische und organisatorische Entwicklungen, wie die Übernahme von neuen Firmen und die Entscheidungsbefugnisse der lokalen Führungskräfte. [34] Durch die unterschiedlichen Standards der IT-Systeme an den verschiedenen Produktionsstandorten wird ein Datenaustausch zwischen diesen erschwert und somit kommen die Vorteile der SCADA-Systeme nur auf lokaler Ebene zur Geltung. [35] Ein globales Management der Entitäten ähnlich zu einem SCADA-Dashboard scheitert meist an der Datenverfügbarkeit.

Ein Lösungsansatz, der den Weg für den Datenaustausch im Produktionsnetzwerk ebnet und damit das Problem der Datenverfügbarkeit behandelt ist die Middleware des Internet of Production (IoP). Das IoP differiert zwischen drei verschiedenen Datenebenen. Die unterste Datenebene, die sogenannte „Raw Data“- Ebene bezeichnet die gespeicherten Daten in ihren jeweiligen nativen Anwendungssystemen, wie z.B. einen MES oder ERP-System. Für die Verbindung dieser Daten ist die mittlere „Smart Data“- Ebene verantwortlich, in der eine Middleware und passende Algorithmen domänen- und funktionsübergreifende Datenmodelle erzeugen. Diese Datenmodelle bilden den Ausgangspunkt für Grafiken, Analysen und Prognosen in der „Smart Expert“- Ebene, die die entscheidungsbefugte Person im Produktionssystem bei der Entscheidungsfindung unterstützt. Um den Anforderungen des dynamischen Umfeldes eines globalen Produktionsnetzwerks gerecht zu werden, können so die Daten prozessbezogen miteinander verknüpft werden. Zur Erleichterung einer solchen Verknüpfung bieten sich standardisierte Datenbausteine an, welche bereits in der Middleware definiert sind. [36] Deren Vorteil liegt in ihren klaren Anknüpfungspunkten, die für den Datenfluss unabdingbar sind. Die „Smart Expert“-Ebene bezieht ihre Datenbasis aus den gesamten Daten in der Middleware. Die bereits erwähnte vollumfängliche Entscheidungsunterstützung der „Smart Expert“- Ebene wird durch berechnete Produktivitätskennzahlen und visualisierte Datenflüsse bereitgestellt. Im Rahmen des IoP werden diese Art der Datenbündel auch als Global Control Center bezeichnet (vgl. Bild 6). Die Informationsbereitstellung sowie die graphische Visualisierung kann an die jeweiligen Wünsche und Anforderungen der Nutzenden angepasst werden. Für die Aggregation der benötigten Informationslevel und die Identifikation der geeigneten Detaillierungslevel eignet sich die Verwendung eines digitalen Schattens. [37]

Dabei ist ein digitaler Schatten definiert, als eine Menge von Modellen und Datenspuren, die neben dem reinen Datensatz auch kontextbeschreibende Metadaten zum jeweiligen Verwendungszweck enthalten. [38]

Das Global Control Center soll also automatisiert generierte Kennzahlen und Analysen zur Verfügung stellen, so dass die Verantwortlichen sich auf das Ableiten von Entscheidungen konzentrieren können und nicht mit der Datenverarbeitung beschäftigt sind. Im Gegensatz zu auf BI-Dashboards angezeigten reinen Kennzahlen, sind Informationen der „Smart Expert"- Ebene das Ergebnis einer tiefergehenden Datenanalyse mittels maschinellen Lernalgorithmen und regelbasierten Verarbeitungsvorschriften. Die Anwendung wird zudem vereinfacht, indem wesentliche Geschehnisse und Ergebnisse Nutzenden per „Push Notification" mitgeteilt werden und dadurch die Menge der reaktiven Analysen verringert wird. Zusätzlich wird der Bedienungs- und Implementierungsaufwand ganz wesentlich reduziert, in dem die unterschiedlichen Funktionen der „Smart Expert"-Ebene in domänen- und funktionsspezifische Apps unterteilt werden. Dieses Design des Dashboards macht die Bedienung des Global Control Centers intuitiv, denn Nutzende müssen nur die zu seiner Fragestellung passende App verwenden, um die bestmögliche Entscheidungsunterstützung für sein Problem zu erhalten. Durch die Datenverfügbarkeit innerhalb des gesamten Unternehmens ist eine globale standortübergreifende Steuerung des gesamten Produktionsnetzwerkes möglich.

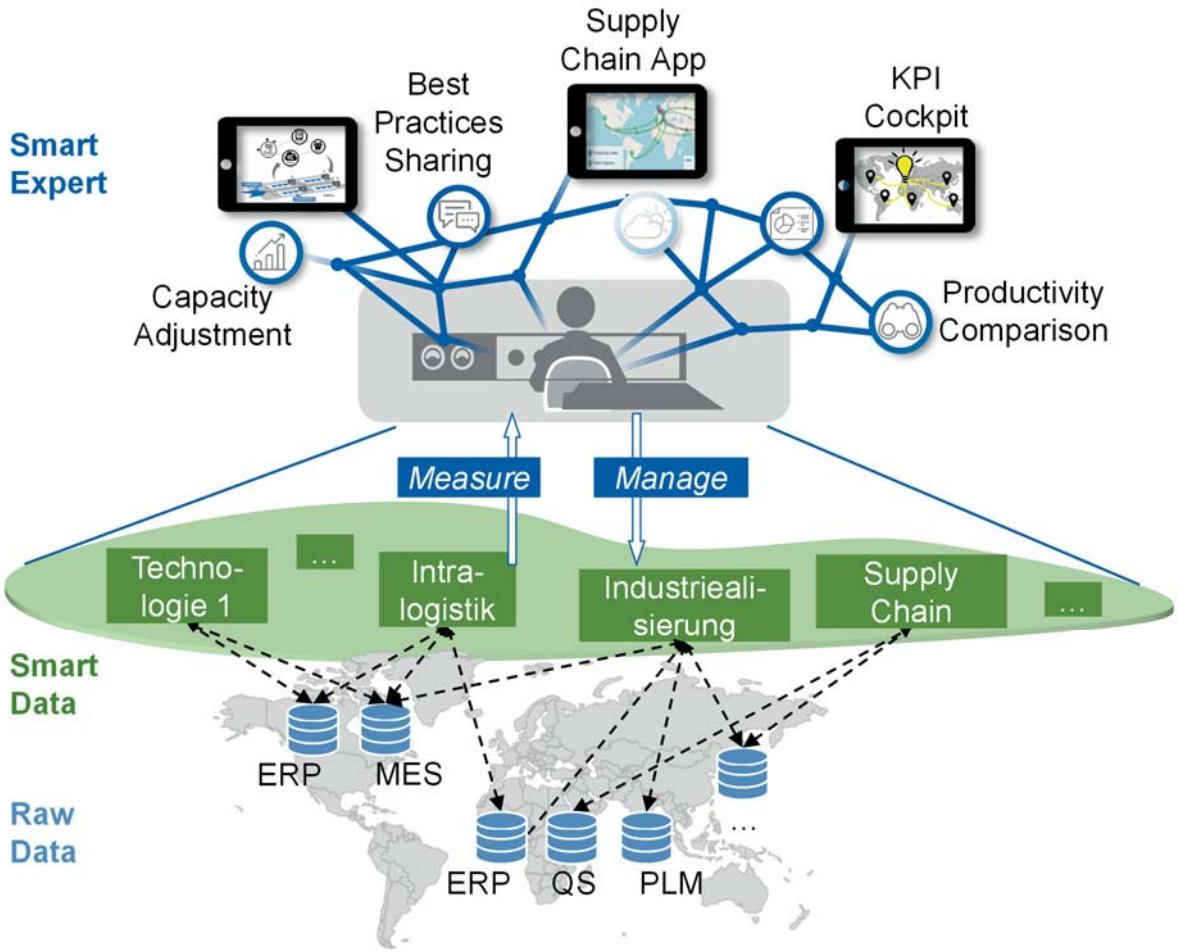



*Bild 6: Skizzierte Veranschaulichung des Globalen Leitstands im Kontext des Internet of Production*

Softwarelösungen für den Datenaustausch zwischen unterschiedlichen IT-Systemen zu entwickeln ist herausfordernd und Teil der Informatikforschung. [39] Die Verwirklichung

der Vision von einfachen „Plug & Play“ Lösungen ist enorm aufwändig, denn zusätzlich zur technischen Umsetzung und dem Beachten zahlreicher Sicherheitsaspekte muss auch die Organisation und Systematisierung der auszutauschenden Informationen erfolgen. Die Eigenschaften einer solchen Systematik sind stark von der Unternehmensorganisation, den jeweiligen Geschäftsprozessen und den branchenspezifischen Besonderheiten geprägt. [40] Der Aufbau einer Middleware ist also kein standardisierter Prozess. Vielmehr ist die Vorgehensweise abhängig vom Einzelfall, um die jeweilige optimale Lösung zu finden. Die Entwicklung einer solchen Middleware Architektur sollte also immer in enger Abstimmung mit dem jeweiligen Unternehmen erfolgen. [41] Dass sich die Vorgehensweisen dabei durchaus unterscheiden können, zeigen die Beispiele der Firmen Henkel AG & Co. KGaA und Hilti AG (vgl. Bild 7)

Die Firma Henkel hat für den Aufbau ihrer Middleware das Ziel einer Self-Analytics Plattform verfolgt. Dafür wurden alle wichtigen IT-Systeme an einen zentralen Data Lake angebunden. Ein solcher Data Lake ist ein Speicherort, an dem alle Daten als Rohkopien in ihrem natürlichen Format gespeichert sind und für weiterführende Aufgaben, wie Visualisierung und Analyse, zur Verfügung stehen. [42] Zusätzlich können alle Datenquellen kommentiert und mit „Tag“-Markierungen erweitert werden. Auf diese Weise soll verhindert werden, dass der Data Lake zu einem Data Swamp wird, der für Nutzende nur bedingt bedienbar ist. [43] Ein großer Unterschied zu konventionellen Datenspeicherungen besteht bei einem solchen Data Lake durch die Vorgabe des „schema on read“. Diese Vorgabe bedeutet, dass eine mögliche Datenstruktur erst beim Abruf der Daten erzeugt wird. Die Alternative dazu, ist ein „schema on write“ bei dem bereits bei der Datenspeicherung eine Struktur vorgeben wird. Um den Nutzen der Plattform zu maximieren, ist der Zugriff auf die Inhalte für einen Großteil der Mitarbeitenden verfügbar. Somit kann jede Arbeitskraft, nach ihrem Bedarf, individuelle und passende Analysen anfertigen. Ein Vorteil dieses Ansatzes ist es, dass der Data Lake mit jeder neuen Anwendung, die angebunden wird, und jeder Applikation und Analyse die von den Nutzenden erstellt wird organisch und nach Bedarf wachsen kann. Dadurch das jede erstellte Applikation für alle Nutzenden verfügbar ist, kann die gesamte Plattform mit der Zeit überproportional wachsen.

Im Gegensatz dazu hat sich die Firma Hilti für eine Architektur eines Data Warehouse mit standardisierten Datenbausteinen für einen Datastream entschieden. Ähnlich zu einem Data Lake ist ein Data Warehouse ein zentraler Aufbewahrungsort für aktuelle und historische Daten aus unterschiedlichen Datenquellen. Der Unterschied liegt darin, dass im Data Warehouse die Daten nach einer vordefinierten Logik gespeichert und in ein standardisiertes Datenformat formatiert werden. Somit arbeitet ein Data Warehouse nach dem zuvor erwähnten Prinzip des „schema on write“. [44] Die vordefinierten Datenelemente vereinfachen anschließend die Interpretation der Daten. Ein weiterer Vorteil liegt in der besseren Skalierbar- und Wartbarkeit. Um davon jedoch langfristig profitieren zu können, muss diese Architektur an die Struktur eines Data Warehouse anpassen, was zunächst mit hohen Investitionen verbunden ist. [45]

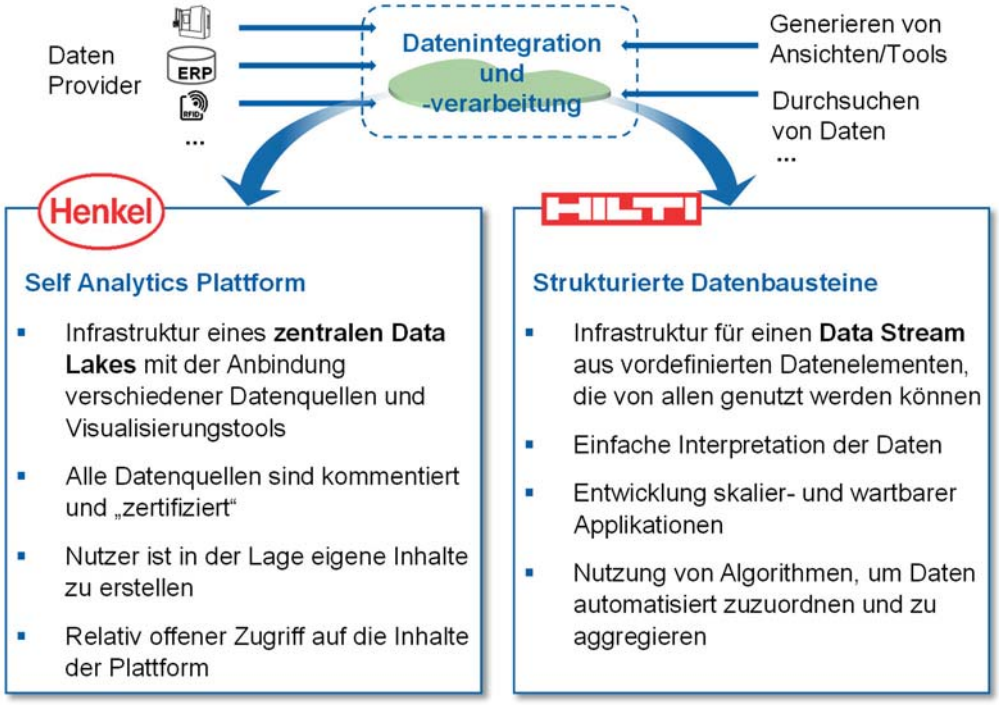



*Bild 7: Unterschiedliche Ansätze der Firmen Henkel und Hilti zur Integration und Verarbeitung der weltweiten Produktionsdaten*

Eine weitere Möglichkeit eine Architektur aufzubauen ist die Vereinheitlichung der Standards und Ausprägungen der eingesetzten IT-Systeme an den verschiedenen Standorten des Unternehmens. Dadurch werden Schnittstellenverluste zwischen den Produktionsstandorten vermieden und der Datenaustausch verbessert.[40] Erfolgreich vorgemacht hat dies die Firma GKN Powder Metallurgy, Inc. durch die Implementation des gleichen MES an allen Produktionsstandorten. Dies bringt mehrere Vorteile mit sich, wie die bessere Verknüpfung der Standorte und die damit vereinfachte Berechnung einheitlicher KPIs. Zudem kann nun eine bessere globale Abstimmung zwischen den Standorten erfolgen. Mit dieser Vorgehensweise wird ein Wandel zu einer digitalen Kultur angestrebt, in der zeitraubende und ineffiziente Meetings zum Informationsaustausch durch eine standardisierte Echtzeitauswertung substituiert werden. Statt eine aufwändige Middleware Architektur entwickeln zu müssen, kann GKN die täglichen Austauschrunden in der Produktion immer mit den gleichen digitalen Tools und KPIs durchführen. Um jedoch zu diesem Punkt zu gelangen ist es notwendig globale Standards in der IT-Landschaft aller Produktionsstandorte einzuführen. [46]

## 4.2 Adaptive Prozesse

Die in Kapitel 2 erläuterten Potenziale des Worldwide Labs werden durch eine sinnvolle Vernetzung weltweit verfügbarer Felddaten und neuen Möglichkeiten des Lernens in Produktionsnetzwerken ermöglicht. Die immense Steigerung der Datenmengen und deren Verfügbarkeit sowie der zunehmende Anteil an Echtzeitdaten erlauben es, jeden Vorgang in der realen Produktion als ein mögliches Experiment zu betrachten. Experimente in den Ingenieurswissenschaften berücksichtigen meistens eine Vielzahl veränderbarer Einflussfaktoren. Jedoch nimmt die Anzahl der benötigten Experimente mit einer steigenden Anzahl an zu beobachtenden Faktoren exponentiell zu. [47] Die notwendige Rechenleistung begrenzt die Anzahl gleichzeitig durchführbarer Experimente durch Ressourcenengpässe. Darüber hinaus ist die Menge der verfügbaren Daten in der Regel limitiert, wodurch die Berechnung und Umsetzung eines Experiments häufig dadurch reduziert

wird, dass weniger sich ändernde Systemparameter in Betracht gezogen werden. Mit einer solchen Vorgehensweise können jedoch nur kleine Modelle und Anwendungsfälle experimentell untersucht werden, welche lediglich einen Teilbereich der Aktivitäten in globalen Produktionsnetzwerken abdecken. Bereichsübergreifenden Datenmodelle benötigen eine höhere Auflösung und folglich eine größere Anzahl an Experimenten. Durch die zunehmende Sammlung von verfügbaren Felddaten kann jeder Vorgang in der Produktion als ein reales Experiment betrachtet werden. Ziel ist es, das gesamte Produktionsnetzwerk als ein Labor zu betrachten, welches die notwendige Menge an Experimenten realisieren und umsetzen kann. Die Nutzung dieser Daten und Informationen mit neuen, explorativen Forschungsmethoden in Kombination mit konventionellen, axiomatischen Ansätzen hebt die Verbindung von Wissenschaft und Industrie auf eine neue Stufe der Zusammenarbeit.

Darüber hinaus ist die situationsspezifische Verknüpfung von Produktionsdaten und -wissen ein weiteres Ziel des Worldwide Labs. [48] Je nach spezifischer Fragestellung können die jeweils relevanten Daten für eine tiefergehende Analyse durch das Worldwide Lab bereitgestellt werden. Ein Anwendungsbeispiel ist die Allokation von Baugruppen, wobei beispielsweise die folgenden Daten aus unterschiedlichen Systemen benötigt und zu Analysezwecken miteinander verbunden werden:

- Aktuelle Produktionsallokationen (ERP)
- Auslastung und Status der Produktionskapazitäten (MES)
- Warenflüsse und -bestände (WMS und SCM)
- Produktinformationen (PLM)
- Betriebswirtschaftliche und finanzielle Ausgangssituation der bisherigen Konfiguration (ERP, Controlling und Bloomberg)

Für die umfangreiche Analyse und Visualisierung dieser Datenbasis ist ein gewisser Grad an Datenverfügbarkeit und -mengen notwendig. Die klassischen Funktionalitäten des Global Control Centers übersteigen dabei die klassischen Darstellungsmöglichkeiten für Kennzahlen. Es existieren bereits etablierte Software-Tools, wie z.B. Tableau und PowerBI, welche für diese Aufgabe bereits passende Werkzeuge bieten. Sie bieten jedoch keine automatisierte Weiterverarbeitung mit fortgeschrittenen Algorithmen. Zwei Beispiele für Applikationen, die diese Art der Datenverarbeitung ermöglichen, sind die vom WZL der RWTH Aachen entwickelten Apps „KI-Tool“ und „OptiWo“.

Das „KI-Tool“ hilft Unternehmen dabei, das Potential von KI abzuschätzen und aufwandsarme KI-Verfahren anzuwenden. Dafür wurde das Tool auf einem Standardvorgehen der Datenanalyse aufgebaut und erleichtert somit die Zusammenarbeit von Experten aus verschiedenen Domänen. Die folgenden Dimensionen weisen Unterschiede das „KI-Tools“ zu konventionellen Software-Tools auf: Reduzierung der Datenkomplexität, Identifikation von Einflussfaktoren, Integration von Fachwissen und Interpretation von identifizierten Mustern. [49] Dabei profitieren sämtliche Machine Learning-Algorithmen davon, dass die zu untersuchenden Daten schnell verfügbar sind und in der Regel auf eine aufwendige Datenaufbereitung verzichtet werden kann. Zudem unterstützt die künstliche Intelligenz nur bei der Entscheidung und die Kontrolle liegt zu jedem Zeitpunkt beim Menschen. [50]

Durch die Verknüpfung von datenbezogenen Analysen und Fachwissen ermöglicht die App „OptiWo“ die Entwicklung des Footprint Designs eines Produktionssystems. Die

Grundlage dessen bildet der Ermittlung der ‚Total Landed Costs' und verschiedene Optionen zur Visualisierung der Ergebnisse. Folglich können Produktionsnetzwerk-Szenarien bewertet und als Entscheidungsgrundlage für die weitere Gestaltung herangezogen werden. Kernfunktionen des Tools „OptiWo" sind neben der Darstellung des weltweiten Warenaustausches des Unternehmens auch eine Prozessvisualisierung für die Wertschöpfung eines Produktes über Standortgrenzen hinweg. Zudem kann in einer Ressourcenansicht die grafische Darstellung der Ressourcenverfügbarkeit und -auslastung angezeigt werden. Im Ergebnis können mehrere Szenario-Konfigurationen schnell miteinander verglichen und deren Auswirkungen angezeigt werden. [51]

Die IT-Architektur für die Datenanalyse sollte sukzessive aufgebaut werden, um das Ziel einer ganzheitlichen und datenbasierten Entscheidungs- und Handlungsunterstützung sicherzustellen. Auf diese Weise wird insbesondere der nicht-wertschöpfende Teil der Entscheidungsvorbereitung, wie bspw. das Suchen und Warten auf Informationen, drastisch reduziert. Um das Ziel der schnellen und tiefergehenden Analyse zu erreichen, muss zudem eine passende IT-Architektur für die verwendeten Systeme des Internet of Production (IoP) erstellt werden (siehe auch Kapitel 4.1). Die verschiedenen Ausprägungen einer solchen Vorgehensweise sind in Bild 8 dargestellt.

Die erste Ausprägung einer solchen IoP-Architektur besteht in der manuellen Konfiguration von Daten aus unterschiedlichen IT-Systemen des Unternehmens in einem tabellarischen Format. Diese tabellarischen Auszüge müssen dann wiederum händisch zu einer einheitlichen Tabelle vereint werden, welche die Grundlage für individuelle Reports darstellt. Auch Reports können meist nicht automatisiert angefertigt werden. Diese aufwendige und manuell geprägte Art der Datenanalyse und Entscheidungsvorbereitung entspricht in vielen Fällen der betrieblichen Praxis produzierender Unternehmen. [52] In den folgenden Ausbaustufen der IoP-Architektur werden die einzelnen Vorgänge zunehmend automatisiert und erweitert.

Das automatisierte Einfügen der einzelnen Reports aus unterschiedlichen IT-Systemen in eine gemeinsame Datenbasis wird bereits in der zweiten Ausprägungsstufe der Datenarchitektur ermöglicht. Ziel dabei ist, dass die Reports ebenfalls automatisiert in funktionsspezifischen Apps zur jeweiligen Entscheidungsunterstützung zur Verfügung gestellt werden.

Ein weiterer Schritt der automatisierten Datenverarbeitung in der IT-Architektur ist der automatisierte Datentransfer von den genutzten IT-Systemen in die gemeinsame Datenbasis. Dieser Schritt erfolgt in der dritten Stufe der IoP-Architektur. Zudem kann in dieser Stufe die Anzahl der miteinander vernetzten Apps um ein wesentliches erhöht werden. Diese Erweiterung ist eine notwendige Voraussetzung für die Echtzeitfähigkeit solcher Analyse-Applikationen.

Die vollständige Vernetzung aller in Anwendung befindlicher Apps wird in der finalen Ausbaustufe umgesetzt. Hier werden alle Analyse-Apps miteinander vernetzt, sodass sie die jeweiligen situativen und spezifischen Aggregationsebenen vollständig widerspiegeln.

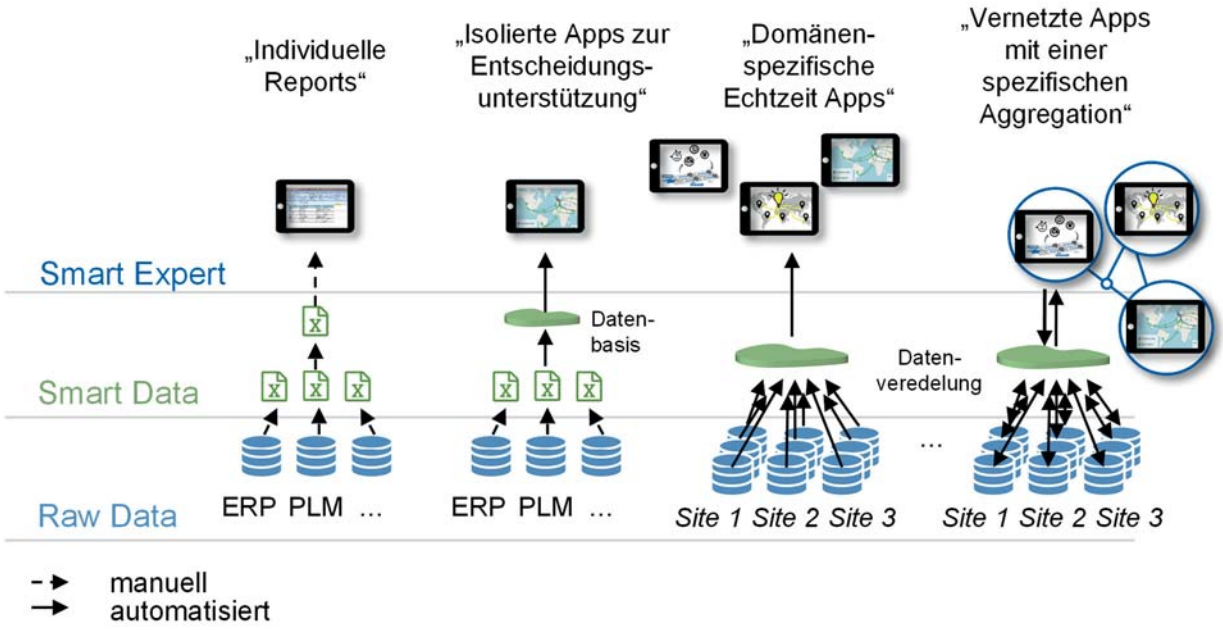



*Bild 8: Die Internet of Production-Datenarchitektur wird schrittweise implementiert*

Das Ergebnis der Zusammenfassung aller Datenverarbeitungs- und -analysetools ist das sogenannte digitale „Backbone“. Es ist für die Umsetzung des Worldwide Labs notwendig und das folgende Beispiel der Firma Henkel zeigt die Ausmaße ein solches digitales „Backbone“. Seit 2013 strebt das Unternehmen die digitale Vernetzung aller produzierenden Standorte an. Der Umsetzungsfortschritt verzeichnet seit dem initialen Start, dass über 3.500 Sensoren im Produktionsnetzwerk von Henkel miteinander vernetzt sind. Sie liefern gemeinsam mit den angebundenen Datensystemen Informationen für über 400 automatisierte ‚Dashboards‘. Diese ‚Dashboards‘ wurden von allen Nutzenden entlang der Supply Chain auf einer ‚Self Analytics-Plattform‘ erstellt. Bild 9 zeigt ein Beispiel derartiger Dashboards bei der Firma Henkel. Insgesamt arbeiten über 1.900 Nutzende mit dieser Art der Datenauswertung und greifen über 18.000 Mal am Tag auf die verfügbaren Reports zu. Die hohen Zugriffszahlen sind besonders durch die Aktualität der Informationen bedingt, da täglich über eine Million neue Datenpunkte auf der Plattform bereitgestellt werden. Die Vorteile einer solche Transparenz und der Einfluss auf die Handlungen im Unternehmen, zeigt z.B. die Überwachung der Energieeinsparung im Netzwerk. Bei Henkel wird der Energieverbrauch täglich nachverfolgt und die Performance werksübergreifend analysiert. Die jeweilige Werksleitung erhält diese Auswertungen anschließend als ‚Push-Notification‘ auf ihr mobiles Endgerät. Durch die Einführung eines online verfügbaren Energie-Monitorings konnten die Verbrauchswerte enorm verbessert werden, da durch die verbesserte Transparenz bei allen Stakeholdern ein gesteigertes Bewusstsein und Interesse für mögliche Verbesserungen erwirkt wurde. Insgesamt konnten die Einsparung dank der digitalen Überwachung um zusätzliche 14 Prozent gesteigert werden.

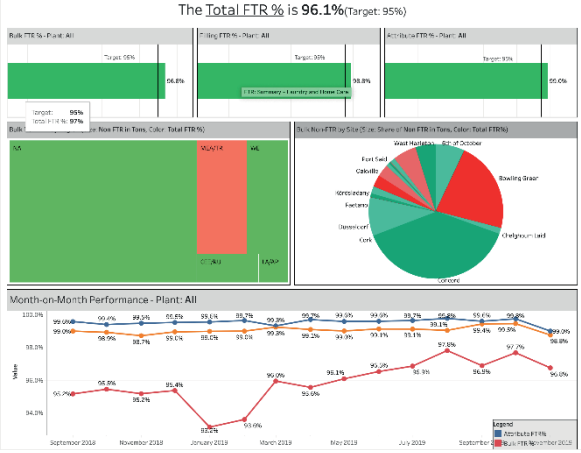



*Bild 9: Beispielhaftes Dashboard auf der Self Analytics Plattform der Firma Henkel*

## 4.3 Agile Organisation

Um das Worldwide Lab unternehmensweit einzuführen ist neben der Implementierung einer Datenarchitektur auch eine fundamentale Umgestaltung der Organisationsstruktur elementar. Die starren Hierarchien werden den neuen Anforderungen des Worldwide Labs nicht mehr gerecht, sodass eine Umwandlung hin zu dynamischen Teams notwendig ist. Nur durch neue dynamische Kollaborationsstrukturen in Kombination mit vollständiger Datentransparenz kann ein übergreifendes Prozessverständnis erzielt werden, wodurch innovative Lösungsansätze in einem Unternehmen oder sogar in einem Produktionsnetzwerk zeiteffizient im Sinne des Worldwide Labs erprobt werden können. Der Wandel der Organisationstruktur bedingt eine Reihe von technologischen und organisatorischen Anforderungen.

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten 4.1 und 4.2 dargestellt, ist die vollständige Datentransparenz eine dieser Anforderungen. Die Datentransparenz und damit einhergehende vollständige globale Informationsverfügbarkeit ermöglicht die Auflösung lokaler Strukturen und bildet somit eine Voraussetzung für ein globales Verständnis des Produktionsnetzwerkes. In Extremfällen verfügt lediglich der Maschinen-Operator über ein ganzheitliches Prozessverständnis, sodass benötigte Daten momentan nur lokal und personengebunden vorliegen (vgl. Abschnitt 4.1). [53, S. 1361-1362] Daraus resultiert eine top-down gerichtete Delegation von Entscheidungen von der obersten Hierarchieebene bis in die untersten Ebenen, da das für Entscheidungen notwendige Wissen in dem erforderlichen Umfang und in der entsprechenden Kontextsensitivität nicht auf der Ebene der jeweilig befugten Entscheidungsinstanz vorliegt. Dies bedeutet, dass beispielsweise eine Werksleitung aufgrund des mangelnden Prozessverständnisses die Verantwortung bzw. Entscheidungsbefugnis an seine Mitarbeitenden auf den unteren Hierarchieebenen delegieren muss. Das Beispiel zeigt, dass durch den wachsenden Umfang und die Kontextsensitivität des notwendigen Wissens ein Zwang zur Delegation und Dezentralisation von Entscheidungen ausgelöst wird. [54, S. 640-641] Diese ungenügende Datentransparenz und Informationsverfügbarkeit erfordert eindeutig zuordenbare Verantwortungsbereiche und erklärt die gegenwärtig starren Strukturen innerhalb einer Organisation (vgl. Bild 10 links). Diese sind geprägt durch eine möglichst klare Verantwortungszuordnung (Single Accountability) und stark strukturierte Verhältnisse entlang der Prozesse. [55, S. 273]

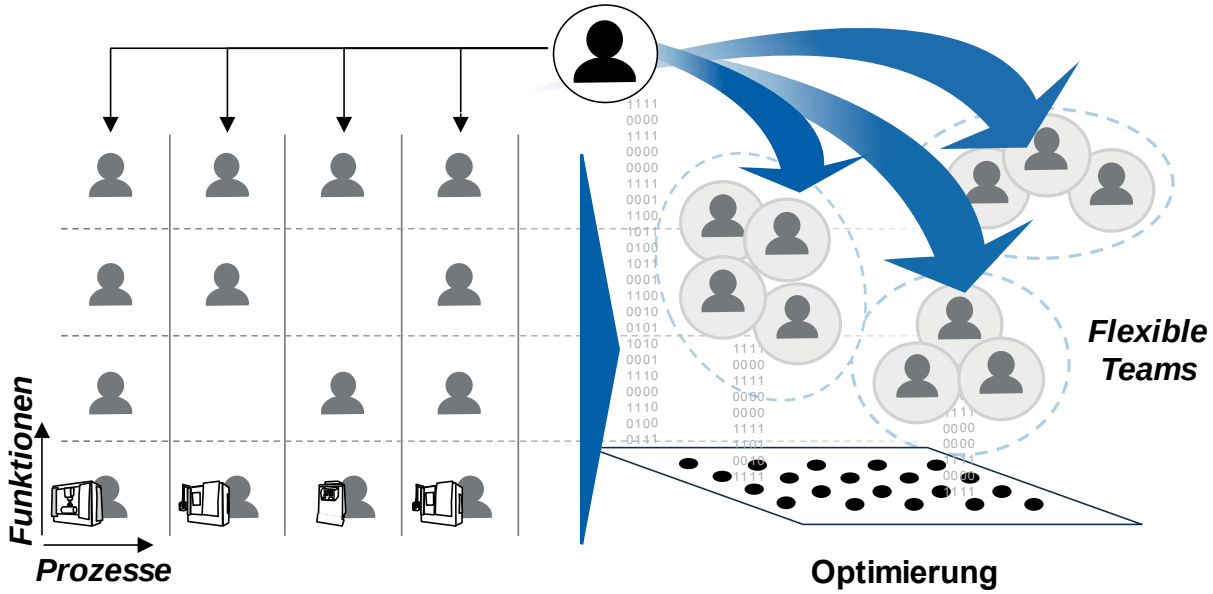



*Bild 10: Auflösen von starren Strukturierungen zur Konfiguration flexibler Teams*

Wie in den in Kapitel 4.1 und 4.2 bereits beschrieben Lösungsansetzen zur domänenübergreifenden Vernetzung und Nutzung von Datenpunkten, können diese Daten im Sinne eines Optimization Centers zur Realisierung der notwendigen, hierarchieübergreifenden Datentransparenz genutzt werden. Indem Kennzahlen über rechnergestützte Plattformen aufgenommen und aufbereitet werden, ermöglicht das Optimization Center eine automatische Bereitstellung von Prozessdaten. Dadurch wird die erforderliche Datentransparenz erreicht, sodass eine vollständige personen- und ortsunabhängige Informationsverfügbarkeit geschaffen wird. So wird Mitarbeitenden ermöglicht, sich aus den verfügbaren Informationen ein umfangreiches Prozessverständnis zu erarbeiten. Das Optimization Center fungiert als eine datenbasierte Entscheidungs- und Handlungsunterstützung, sodass personen- und ortsunabhängig Entscheidungen basierend auf allen erforderlichen Informationen getroffen werden können und die Entwicklung von Mitarbeitenden Knowhow vereinfacht wird. Daraus resultiert, dass die starren, hierarchischen Strukturen aufgelöst werden können und die Ebene der Entscheidungsautonomie freier gestaltet werden kann. Entscheidungen müssen folglich nicht mehr top-down delegiert, sondern können in der flexiblen Organisationsstruktur abteilungs- und funktionsübergreifend in dynamischen Teams entsprechend der Problemstellung getroffen werden. Innerhalb dieser dynamischen Organisation lösen sich die Rollen und Funktionen aus der Hierarchie heraus, wodurch abteilungs- und funktionsübergreifende Zusammenschlüsse aus Mitarbeitenden zu dynamischen Teams möglich sind, die sich für einen bestimmten Zeitraum zur Bearbeitung von spezifischen Fragestellungen konfigurieren können (vgl. Bild 10 rechts). Zudem befähigt das Optimization Center die Erweiterung der Führungsspanne der weisungsbefugten Instanz, da Aufgaben durch den Zugriff auf die Datenebene kompetenzorientiert koordiniert und delegiert werden können. Durch die vollständige Informationsverfügbarkeit entfällt ein Teil der koordinierenden Arbeit der weisungsbefugten Instanz, sodass die Führungsspanne erweitert werden kann. Die weisungsbefugte Instanz agiert vermehrt als Systemarchitekt und die starren Strukturen können zugunsten einer dynamischen Organisation aufgelöst werden.

Neben der lokalen Optimierung von standortinternen Prozessen und Strukturen führt die Einführung des Optimization Centers und damit die Vereinigung von Daten des gesamten

Produktionsnetzwerks auch zu einem standortübergreifenden Verbesserungspotenzial. Derzeit wird innerhalb eines Wertschöpfungsnetzwerkes meist weder bereichs- noch werksübergreifend kommuniziert oder agiert und zur Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen werden lediglich lokale, standorteigene Daten als Entscheidungsgrundlage aufbereitet und analysiert, obwohl Werke in der Regel auf denselben Funktionen und Strukturen basieren. Die fehlende standortübergreifende Zusammenarbeit und Kommunikation stellt das gesamte Produktionsnetzwerk bzgl. des Handelns im Sinne des „globalen Optimums“ vor eine große Herausforderung. [56, S. 218] Für die Umsetzung von Innovationen werden standortübergreifende Daten oder bereits durchgeführte Analysen, Maßnahmen und Erfahrungen anderer Standorte des Produktionsnetzwerks meist nicht in Betracht gezogen. Das eigenständige und isolierte Handeln einzelner Standorte resultiert häufig in einer lokalen Umsetzung von Innovationen und Verbesserungsmaßnahmen in Form von Pilotprojekten und verhindert eine Übertragung auf weitere Standorte. [57, S. 337] Diese lokale Umsetzung von Verbesserungen steht dem Handeln im Sinne des „globalen Optimums“ im Weg, da die vorhandene Datenbasis zur Überprüfung der Auswirkungen auf das globale Optimum aufgrund der fehlenden Datentransparenz unzureichend ist. [56, S. 218] Mithilfe des Optimization Centers können diese Informationsdefizite beseitigt und Daten über das gesamte Produktionsnetzwerk zur Verfügung gestellt werden. Das Optimization Center dient der Bereitstellung einer durchgängigen Datenverfügbarkeit, die nicht mehr nur den Zugriff auf die Daten eines Standortes, sondern auf die Daten aller Standorte des Produktionsnetzwerkes ermöglicht. Dadurch werden die notwendigen Prozessdaten nicht nur personen- und orts-, sondern auch werksunabhängig aufrufbar, sodass lokal auf das vollständige Prozessverständnis des gesamten Produktionsnetzwerkes zurückgegriffen werden kann (vgl. Bild 11).

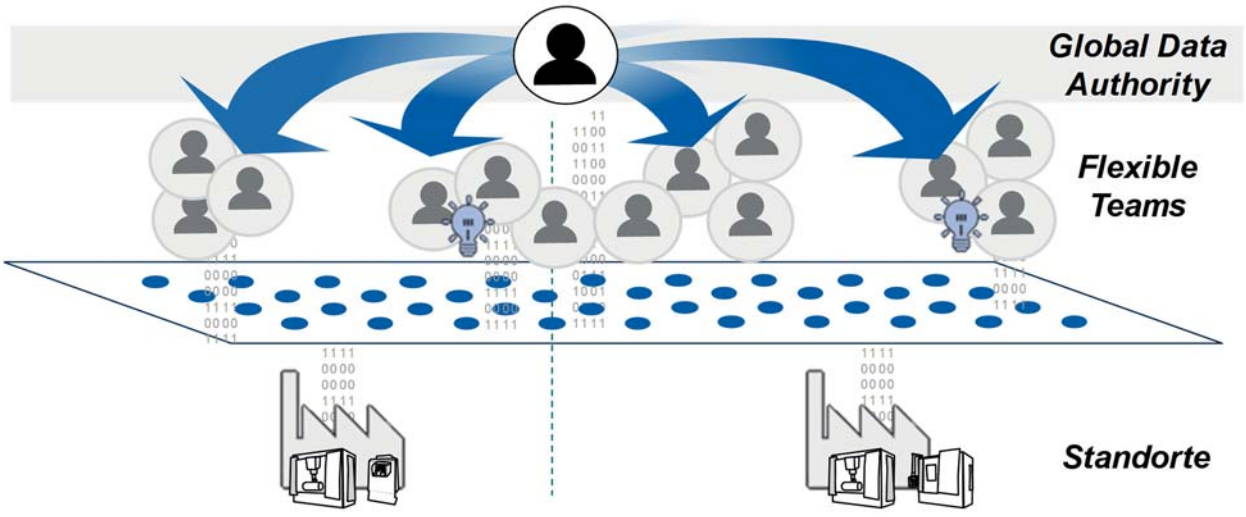



*Bild 11: Standortübergreifende Konfiguration zu flexiblen Teams durch Datentransparenz*

Durch diese Basis der standortübergreifenden Informationsverfügbarkeit verschwimmen zukünftig nicht nur Rollen und Funktionen innerhalb der Hierarchien zunehmend, sondern auch das Zusammenschließen von Mitarbeitenden innerhalb eines Produktionsnetzwerks zur spezifischen Problemlösung in dynamischen Teams wird ermöglicht. Die durchgängige Datentransparenz und vollständige Informationsverfügbarkeit befähigt die Mitarbeitenden auf das gesamte standortübergreifende Prozesswissen zuzugreifen und

dieses als Unterstützung für Entscheidungen und Handlungen im Sinne des „globalen Optimums“ einzusetzen. Um sicherzustellen, dass selbst bei Interessenskonflikten innerhalb eines dynamischen Teams Entscheidungen im Sinne des „globalen Optimums“ des Produktionsnetzwerks getroffen werden, muss eine weisungsbefugte Instanz eingesetzt werden. Die Aufgabe der weisungsbefugten Instanz „Global Data Authority“ ist, die dynamischen Teams werksübergreifend zielgerichtet zu steuern, effizient einzusetzen und Verbesserungsideen zu fördern. Die „Global Data Authority“ ist somit für die gezielte Informationsweitergabe, für die Übersetzung der Ideenverbreitung und für die Motivation, um das Lernen im Netzwerk zu fördern, verantwortlich. Standortübergreifende, dynamische Teams können folglich mithilfe des Optimization Centers auf Basis der werksübergreifenden Datengrundlage Verbesserungsideen entwickeln und hinsichtlich der globalen Effektivität erproben. Die dynamischen Teams sollten hierbei entsprechend des Scale-Gedankens auch stets die globale Effektivität und Umsetzung von Verbesserungsideen berücksichtigen, damit die Innovationen auf alle Produktionsstandorte ausgeweitet werden können.

Für die Unternehmen ergibt sich nun die Aufgabe jedes Werk zu inzentiveren im Sinne des globalen Optimums zu handeln und gleichzeitig weiterhin die Verantwortung für die lokalen Ergebnisse zu behalten. Die Fokussierung und Priorisierung globaler Optimierungsansätze darf nicht dazu führen, dass der Verantwortung für lokale Ergebnisse vernachlässigt wird. Die Hilti AG hat in diesem Zusammenhang verschiedene Ansätze entwickelt, sodass einzelne Werke lokale Entscheidungen zu Gunsten des globalen Optimums priorisieren, ohne dass die Verantwortung zur Erreichung lokaler Ziele vernachlässigt wird.

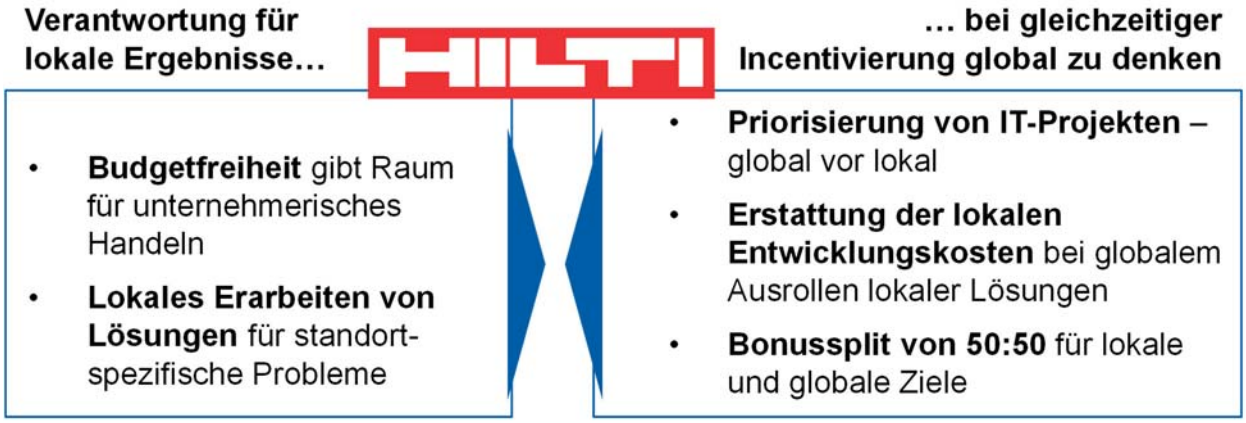



*Bild 12: Erste Ansätze der Hilti AG*

Getreu dem Motto „So viele Standards wie nötig, so wenig wie möglich.“ gewährt die Hilti AG den einzelnen Standorten Raum für unternehmerisches, freies Handeln. Die Standorte erhalten durch eine Budgetfreiheit die Möglichkeit eigene lokale Lösungen für standortspezifische Probleme zu entwickeln, um so ihre lokalen Ziele zu erreichen. Gleichzeitig soll bei der Erarbeitung lokaler Lösungen insbesondere auch stets eine globale Umsetzung der Lösung berücksichtigt werden, da Probleme häufig nicht nur standortspezifisch, sondern auch werksübergreifend auftreten. Besonderen Anreiz liefert dabei die Rückerstattung der lokal aufgewandten Entwicklungskosten im Falle eines globalen Ausrollens der Lösung. Darüber hinaus wird jedem Standort die eigenständige Entscheidung zur Entwicklung kurzfristiger, standortspezifischer Einzellösungen für verschiedene Anwen-

dungsfälle gewährt. Sollten jedoch zu einem späteren Zeitpunkt für denselben Anwendungsfall globale Lösungen entwickelt und implementiert werden, muss die lokale Lösung in dem jeweiligen Standort durch die global entwickelte Lösung ersetzt werden. Die Priorisierung von globalen Projekten, spiegelt sich somit auch in der Skalierungsstrategie von IT-Projekten wider. Neben den genannten Anreizen wird die notwendige Verantwortung für lokale Ergebnisse bei gleichzeitiger Priorisierung des globalen Optimums auch durch Messung der Leistung lokaler Einheiten anhand von cross-funktionalen KPIs, beispielsweise im Sinne eines Bonussplits von 50:50, erreicht. Durch die entwickelten Ansätze der Hilti AG wird deutlich, dass trotz der Priorisierung des globalen Optimums die Verantwortung für lokale Ergebnisse nicht vernachlässigt werden darf und stellt ein Beispiel für die erfolgreiche Umsetzung des vorgestellten Konzepts dar (vgl. Bild 12).

Ein weiteres Beispiel zeigt das Unternehmen GKN Metallurgy. Der im Unternehmen historisch gewachsene Produktionsbetrieb bedingt eine hohe Anzahl an Schichtleitenden zur Koordination. In Kombination mit dem globalen Trend des Fachkräftemangels und den daraus resultierenden Problemen bei der Maschinenbelegung, bei der Ausbildung und bei der Industrialisierung von Neuprojekten, steht das Unternehmen vor enormen Herausforderungen. Um diese Probleme zu lösen, wurde zur Aufweitung der Führungsspanne auf dem Shopfloor eine kompetenzbezogene Aufgabenzuteilung per Smartwatch eingeführt. Zunächst wurde eine Plattform mit Daten bezüglich der Mitarbeitendenkompetenzen und deren Verfügbarkeit sowie der zur Verfügung stehenden Maschinen und der jeweiligen Job Profile entwickelt. Dies ermöglicht die automatisierte und kompetenzorientierte Zuordnung von Mitarbeitenden zu neuen Aufgaben. Der dadurch entstandene Prozess kann vereinfacht an folgendem Beispiel verdeutlicht werden: Eine Maschine befindet sich ungeplant im Stillstand oder benötigt einen Umrüstvorgang. Als Reaktion darauf sucht das neu eingeführte System auf Basis einer Matrix, in der jeder Arbeitskraft individuelle Kompetenzen zugewiesen sind, die adäquateste der verfügbaren Arbeitskräfte für die notwendige Tätigkeit. Das Projekt wurde zunächst im Rahmen einer Pilotphase mit 10-15 Mitarbeitenden erprobt, um es anschließend auf Bereiche von 100 Mitarbeitenden auszuweiten. In 2020 wurde bei GKN eine globale Implementierung des Systems in 7 Werken angestrebt.

*Bild 13: Auszug der Darstellung auf der Smartwatch*

Die Einführung dieser organisatorischen Umstrukturierung hat es GKN ermöglicht die Führungsspanne pro Schichtleitung signifikant zu erhöhen. Gleichzeitig führt das System zur Entlastung von koordinierenden Aufgaben der Schichtleitung. Dieser kann mehr Zeit der Organisationsoptimierung (z.B. Schulungsbedarfe) widmen. Weiterhin können Arbeitsaufgaben individueller eingeteilt werden, sodass Kapazitäten besser nivelliert werden können und gleichzeitig die Mitarbeitendenzufriedenheit durch individuelleres Arbeiten steigt. Einen entscheidenden Faktor zur Schaffung der Mitarbeitendenakzeptanz bei der Implementierung des Systems bietet die innovative Smartwatch und der damit verbundene Gamification-Ansatz (vgl. Bild 13).

Die Beiersdorf AG bietet ein drittes Beispiel für das dargestellte Handlungsfeld. Zur crossfunktionalen und zeiteffizienten Erprobung von Produkt- und Produktionsinnovationen hat die Beiersdorf AG eine physische Kick-Start Factory erbaut (vgl. Bild 14). Die Kick-Start Factory dient zur Entwicklung und Verprobung von neuartigen (z.B. pulverbasierten) Produkten in Kleinserie, um eine Produktionstauglichkeit mit bestehenden Anlagen zu testen. Die Arbeit erfolgt abteilungsübergreifend in dynamischen Teams. Außerdem werden Produktionsinnovationen durch Automatisierung getestet, indem bislang manuelle Tätigkeiten einem Roboter übergeben werden. Insbesondere in der Prozessindustrie ist eine reibungslose Integration eines automatisierten Produktionsschritts essenziell für den Gesamtanlagen OEE. Die flexible und zielorientierte Zusammenarbeit von Experten aus dem gesamten Unternehmen innerhalb der Kick-Start Factory ermöglicht die Entwicklung und das Testen von Produkt- und Produktionsinnovationen in einem kleinen realen Rahmen, bei der gleichzeitig eine globale Skalierung der Lösungen vorbereitet wird.

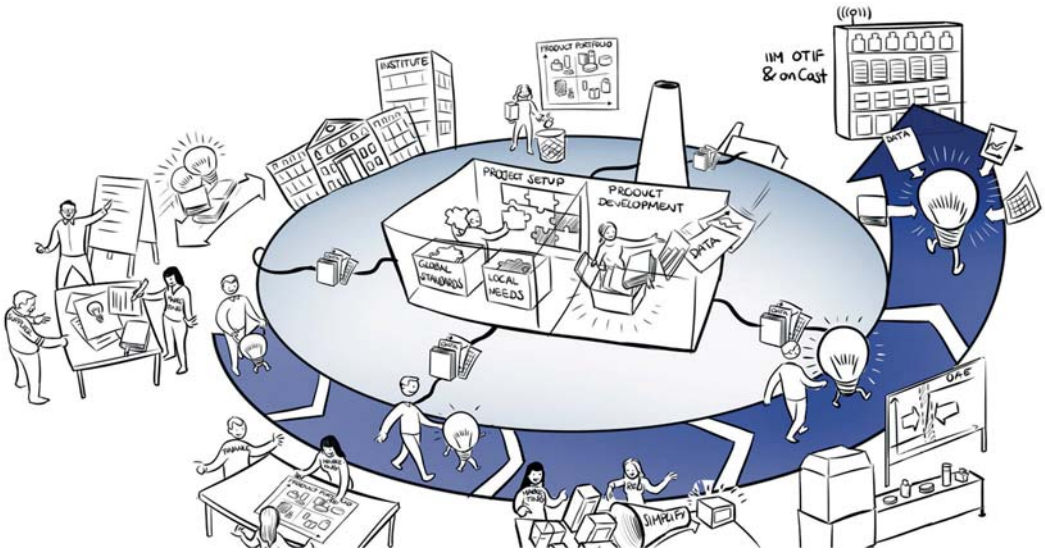



Bild 14: Schnelle Entwicklung und Verprobung von Innovationsideen im Netzwerk am Beispiel der Beiersdorf AG

# 5 Zusammenfassung

Die Herausforderungen, welche sich aus der Digitalisierung und Themen der Nachhaltigkeit ergeben, verändern das Umfeld der produzierenden Industrie enorm. Es werden neue Lösungen für Produkte und Geschäftsmodelle gefordert, um am Erfolg der Vergangenheit und der Gegenwart anzuknüpfen und diesen auch zukünftig fortzuführen. Dabei sind die Auswirkungen in der Zukunft ein nicht einfach kalkulierbares Risiko. Dennoch ist es zwingend notwendig, sich schon jetzt auf diese Ungewissheit vorzubereiten. Dabei stehen die produzierenden Unternehmen vor einem Dilemma. Sie müssen einerseits ihr Kerngeschäft weiterführen, also weiterhin nachhaltig wirtschaften und Gewinne erzielen. Andererseits müssen disruptive Innovationen und Geschäftsmodelle entwickelt werden, um auch zukünftig eine gewinnbringende Wettbewerbsfähigkeit zu erreichen. Aus dieser Herausforderung ergeben sich für etablierte Industrieunternehmen neue Möglichkeiten, ihre globalen Produktionsnetzwerke effizienter zu gestalten und durch die Analyse bestehender Daten völlig neue Lösungsansätze für aktuelle Problemstellungen zeit- und aufwandseffizient anzuwenden. Nur durch experimentelle Forschung können Antworten auf gegenwärtige und zukünftige Herausforderungen entwickelt werden, sodass den Unternehmen selbst ihre vorhandene Infrastruktur nutzen und zu einem eigenen Vorteil entwickeln müssen.

Das Konzept des Worldwide Labs soll an dieser Stelle angreifen, sämtliche Datenpunkte in globalen Produktionsnetzwerken verknüpfen und sie wie experimentelle Beobachtungsdaten behandeln. Diese Vielzahl an Experimentaldaten führt zu einer nachhaltigen Produktivitätssteigerung. Neue Lösungsansätze für zukünftige Problemstellungen können zeiteffizient bewertet und im Netzwerk implementiert werden. Dafür müssen die momentan noch vorherrschenden, starren Wertschöpfungsketten, lokale IT-Standards und unterschiedliche Prozessstandards beseitigt werden, damit Unternehmen die Standorte im Netzwerk als Elemente eines globalen, experimentellen Labors nutzen können. Ein lokaler Fokus von Verbesserungs- und Innovationsprojekten ist nicht mehr zeitgemäß. Es sollte stets das gesamte Produktionsnetzwerk betrachtet werden und im Sinne des „globalen Optimums“ gehandelt werden. Der vorliegende Beitrag hat daher einen Ansatz entwickelt, wie sowohl auf technischer als auch auf organisatorischer und prozessualer Ebene das Ziel eines Worldwide Labs erreicht werden kann und somit nachhaltig ein Mehrwert aus der neuen Datenlandschaft generiert wird (vgl. Bild 15). Dieser Ansatz besteht aus drei Säulen:

- **Schnellere Datenverfügbarkeit:** Verbindung und Analyse verschiedener, global verteilter Datenquellen und Sicherstellung der ad hoc-Verfügbarkeit der resultierenden Informationen in aggregierter Form.
- **Adaptive Prozesse:** Betrachtung eines jeden Vorgangs im Produktionsnetzwerk als Felddaten eines Experiments sowie situationsspezifische Verknüpfung von Produktionsdaten und -wissen mittels funktionsspezifischer Apps.
- **Agile Organisation:** Wandel von starren Hierarchien und Verantwortlichkeiten hin zu flexiblen Rollen und Strukturen.

Die angeführten Beispiele aus der Industrie zeigen, dass bereits einige Unternehmen Meilensteine auf dem Weg zur Etablierung eines Worldwide Labs erreicht haben. Diese zukünftigen Veränderungen bringen auch weitreichende Änderungen für die Mitarbeitenden global agierender Produktionsunternehmen mit sich. Das Kompetenzfeld der Data Science rückt weiter in den Vordergrund und es ist notwendig, Mitarbeitende in diesem Feld weiterzuentwickeln. Auch die starren, hierarchischen Organisationsstrukturen sind

nicht mehr zeitgemäß und müssen zu dynamischen Teams umgestaltet werden. Nur so kann eine für das Worldwide Lab erforderliche Flexibilität erreicht werden und das gesamte globale Produktionsnetzwerk eines Unternehmens als Bestandteil eines einzigen Labors fungieren. Der Ansatz des Worldwide Labs zeigt die Gestaltung eines Produktionsnetzwerks auf, in dem Mitarbeitende durch vollständige Informationsverfügbarkeit aus Daten und Ereignissen sowie voneinander lernen können. Das Worldwide Lab bietet produzierenden Unternehmen die Möglichkeit, ihre aktuelle globale Infrastruktur besser zu nutzen und eine Flexibilität und Innovationsfähigkeit zu erreichen, die in den meisten Fällen noch Start-ups vorbehalten ist. Durch die Implementierung eines Worldwide Labs kann die Produktivität des gesamten globalen Wertschöpfungsnetzwerks gesteigert und Unternehmen können nachhaltig aufgestellt werden.

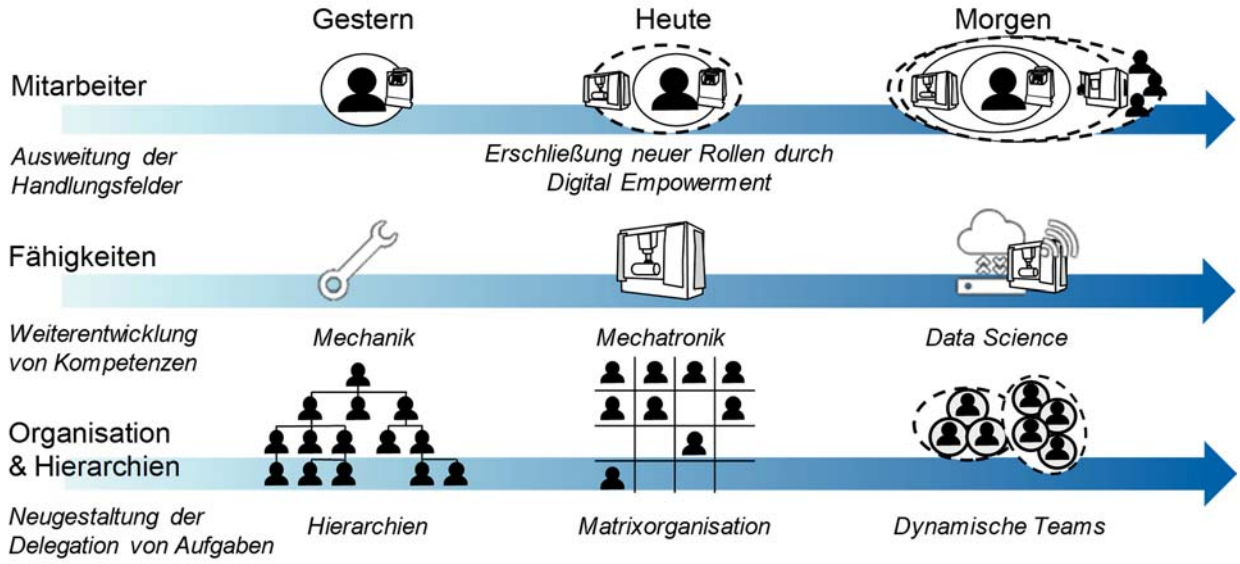



*Bild 15: Durch technologische und organisatorische Änderungen können enorme Potenziale durch das Worldwide Lab genutzt und Erfolge nachhaltig erreicht werden*

# 6 Literatur


[1] H.-D. Haas, *Internationalisierung.* [Online]. Verfügbar: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/internationalisierung-53726/version-276794 (zugegriffen: Feb. 27 2020).

[2] A. Suchanek, N. Lin-Hi, E. Feess, und J. Engelhard, *Globalisierung.* [Online]. Verfügbar: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/globalisierung-35657/version-259135 (zugegriffen: Feb. 27 2020).

[3] K. Ferdows, "Keeping up with growing complexity of managing global operations," *Int Jrnl of Op & Prod Mnagemnt*, Jg. 38, Nr. 2, S. 390–402, 2018, doi: 10.1108/IJOPM-01-2017-0019.

[4] E. Abele, T. Meyer, U. Näher, G. Strube, und R. Sykes, *Global Production*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

[5] T. Mumme, *Unternehmen leiden unter Unberechenbarkeit der Politik.* [Online]. Verfügbar: https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/brexit-trump-und-russland-unternehmen-leiden-unter-unberechenbarkeit-der-politik/23209704.html (zugegriffen: Feb. 27 2020).

[6] C. Reinert, *Über die Herausforderungen der Produktindividualisierung.* [Online]. Verfügbar: https://nachrichten.idw-online.de/2019/02/25/ueber-die-herausforderungen-der-produktindividualisierung/ (zugegriffen: Feb. 27 2020).

[7] G. Schuh, C. Reuter, J.-P. Prote, M. Stöwer, C. Witthohn, und B. Fränken, *Konsortial-Benchmarking: Gestaltung von globalen Produktionsnetzwerken*. Alsdorf, Rheinl: AWD, 2016.

[8] C. Herrmann, C. Schmidt, D. Kurle, S. Blume, und S. Thiede, "Sustainability in manufacturing and factories of the future," *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.*, Jg. 1, Nr. 4, S. 283–292, 2014, doi: 10.1007/s40684-014-0034-z.

[9] J. Hirschfeld, *Wie der Klimawandel indirekt die deutsche Wirtschaft trifft.* [Online]. Verfügbar: https://www.umweltbundesamt.de/themen/wie-der-klimawandel-indirekt-die-deutsche (zugegriffen: Feb. 27 2020).

[10] G. Schuh, J.-P. Prote, B. Franken, J. Ays, und S. Cremer, "Dedicated Agility: A New Approach for Designing Production Networks," in *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Bangkok, Dez. 2018 - Dez. 2018, S. 1–5.

[11] R. Tucker, *How Does Amazon Do It? Five Critical Factors That Explain Amazon's Incredible Success.* [Online]. Verfügbar: https://www.forbes.com/sites/robertbtucker/2018/11/01/how-does-amazon-do-it-five-critical-factors-that-explain-amazons-incredible-success/#dfea23641b9e (zugegriffen: Feb. 27 2020).

[12] D. Selinger, *Data Driven: What Amazon's Jeff Bezos Taught Me About Running a Company.* [Online]. Verfügbar: https://www.entrepreneur.com/article/237326 (zugegriffen: Feb. 27 2020).

[13] K. Bird, *5 Lessons the B2B Supply Chain Can Learn from Amazon.* [Online]. Verfügbar: https://www.getconvey.com/blog/5-tips-b2b-supply-chain-amazon/ (zugegriffen: Feb. 27 2020).

[14] S. Soper, *Got a Hot Seller on Amazon? Prepare for E-Tailer to Make One Too.* [Online]. Verfügbar: https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-04-20/got-a-hot-seller-on-amazon-prepare-for-e-tailer-to-make-one-too (zugegriffen: Feb. 27 2020).

[15] J. Bezos, *https://citatis.com/a8482/36d997/: If you double the number of experiments you do per year you're going to double your inventiveness.* [Online]. Verfügbar: https://citatis.com/a8482/36d997/ (zugegriffen: Mär. 13 2020).

[16] G. Schuh, J.-P. Prote, A. Gützlaff, K. Thomas, F. Sauermann, und N. Rodemann, “Internet of Production: Rethinking production management,” in *Production at the leading edge of technology*, J. P. Wulfsberg, W. Hintze, und B.-A. Behrens, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 533–542.

[17] G. E. P. Box, J. S. Hunter, und W. G. Hunter, *Statistics for experimenters: Design, innovation, and discovery,* 2. Auflage. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2005. [Online]. Verfügbar: http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0619/2004063780-b.html

[18] G. Schuh, T. Potente, R. Varandani, und T. Schmitz, “Global Footprint Design based on genetic algorithms – An “Industry 4.0” perspective,” *CIRP Annals*, Jg. 63, Nr. 1, S. 433–436, 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.121.

[19] G. Schuh, J.-P. Prote, A. Gutzlaff, und K. Thomas, “Framework for Cross-Site Learning to Enable Knowledge Transfer in Production Networks,” in *2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)*, Panama, Panama, Okt. 2019 - Okt. 2019, S. 359–364.

[20] G. Schuh, J.-P. Prote, M. Molitor, und S. Cremer, “Internet of Production – Steigerung des Wertschöpfungsanteils durch domänenübergreifende Kollaboration,” in *Springer Reference Technik, Handbuch Industrie 4.0*, M. ten Hompel, B. Vogel-Heuser, und T. Bauernhansl, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 1–34.

[21] M. ten Hompel, B. Vogel-Heuser, und T. Bauernhansl, Hrsg., *Handbuch Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020.

[22] C. M. Christensen, *The innovator's dilemma: When new technologies cause great firms to fail*. Boston, Massachusetts: Harvard Business Review Press, 2016.

[23] J. J. Larish, *Out of focus: The story of how Kodak lost its direction*. Rochester, N.Y.: John J. Larish, 2012.

[24] E. Holden, K. Linnerud, und D. Banister, “The Imperatives of Sustainable Development,” *Sust. Dev.*, Jg. 25, No. 3, S. 213–226, 2017, doi: 10.1002/sd.1647.

[25] J. Salminen und M. Rajavuori, “Transnational sustainability laws and the regulation of global value chains: comparison and a framework for analysis,” *Maastricht Journal of European and Comparative Law*, Jg. 26, Nr. 5, S. 602–627, 2019, doi: 10.1177/1023263X19871025.

[26] E. MacArthur, “Towards the circular economy,” *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 2, S. 23–44, 2013.

[27] J. Váncza, “Production Networks,” in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, T. I. A. f. Produ, L. Laperrière, und G. Reinhart, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 1–8.

[28] J. A. O'Brien und G. M. Marakas, *Management information systems,* 10. Auflage. New York: McGraw-Hill Irwin, 2011.

[29] L. Shi, H. Zhong, T. Xie, und M. Li, “An Empirical Study on Evolution of API Documentation,” in *Lecture Notes in Computer Science, Fundamental Approaches to Software Engineering*, D. Giannakopoulou und F. Orejas, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 416–431.

[30] P. Mertens, “Wirtschaftlichkeit von IT-Projekten,” in *Xpert.press, Management von IT-Projekten*, P. Mertens, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, S. 225–241.

[31] A. Guerriero, S. Kubicki, und S. Reiter, “Building Information Modeling in use: How to evaluate the Return on Investment?,” 2016.

[32] A. Behrendt und R. Kelly, “Digital manufacturing—escaping pilot purgatory,” McKinsey, Cleveland, 2018.

[33] W. W. Osterhage, *ERP-Kompendium*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

[34] A. Rakowski, *Ansätze zur Optimierung der IT-Systemlandschaft: Eine Untersuchung von EA-Software am Beispiel von "MEGA Suite"*. Hamburg: Diplomica Verl., 2013.

[35] S. Treber und G. Lanza, “Transparency in Global Production Networks: Improving Disruption Management by Increased Information Exchange,” *Procedia CIRP*, Jg. 72, S. 898–903, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.009.

[36] R. Meyes *et al.,* “Interdisciplinary Data Driven Production Process Analysis for the Internet of Production,” *Procedia Manufacturing*, Jg. 26, S. 1065–1076, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.143.

[37] G. Schuh, P. Walendzik, M. Luckert, M. Birkmeier, A. Weber, und M. Blum, “Keine Industrie 4.0 ohne den Digitalen Schatten,” *ZWF*, Jg. 111, Nr. 11, S. 745–748, 2016, doi: 10.3139/104.111613.

[38] G. Schuh, A. Gützlaff, und J. Maibaum, “Effizientere Produktion mit Digitalen Schatten,” *ZWF*, Jg. 115, 2020.

[39] L. H. Etzkorn, *Introduction to Middleware: Web Services, Object Components, and Cloud Computing*: Chapman and Hall/CRC, 2017.

[40] Y. Cui, S. Kara, und K. C. Chan, “Manufacturing big data ecosystem: A systematic literature review,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Jg. 62, 2020, doi: 10.1016/j.rcim.2019.101861.

[41] D. Kozjek, R. Vrabič, B. Rihtaršič, N. Lavrač, und P. Butala, “Advancing manufacturing systems with big-data analytics: A conceptual framework,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Jg. 33, Nr. 2, S. 169–188, 2020, doi: 10.1080/0951192X.2020.1718765.

[42] H. Fang, “Managing data lakes in big data era: What's a data lake and why has it became popular in data management ecosystem,” in *2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, Shenyang, China, Jun. 2015 - Jun. 2015, S. 820–824.

[43] W. Brackenbury *et al.,* “Draining the Data Swamp,” in *Proceedings of the Workshop on Human-In-the-Loop Data Analytics - HILDA'18*, Houston, TX, USA, 2018, S. 1–7.

[44] A. Bauer und H. Günzel, *Data-Warehouse-Systeme: Architektur, Entwicklung, Anwendung*. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2013. [Online]. Verfügbar: http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1213077

[45] N. Prakash und D. Prakash, *Data Warehouse Requirements Engineering*. Singapore: Springer Singapore, 2018.

[46] M. Laske und R. Luxem, “Einführung der Prozesse — Prozess-Roll-out,” in *Prozessmanagement: Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung*, J. Becker, M. Kugeler, und M. Rosemann, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin

Heidelberg, 2000, S. 233–261. [Online]. Verfügbar: https://doi.org/10.1007/978-3-662-09535-5_8

[47] G. E. P. Box, J. S. Hunter, und W. G. Hunter, *Statistics for experimenters: Design, innovation, and discovery,* 2. Auflage. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2005. [Online]. Verfügbar: http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0619/2004063780-b.html

[48] G. Schuh, J.-P. Prote, M. Molitor, F. Sauermann, und S. Schmitz, "Databased learning of influencing factors in order specific transition times," *Procedia Manufacturing*, Jg. 31, S. 356–362, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.03.056.

[49] G. Schuh, J.-P. Prote, F. Sauermann, und S. Schmitz, "Production Analytics," *ZWF*, Jg. 114, Nr. 9, S. 588–591, 2019, doi: 10.3139/104.112153.

[50] U. Khurana, D. Turaga, H. Samulowitz, und S. Parthasrathy, "Cognito: Automated Feature Engineering for Supervised Learning," in *2016 IEEE 16th International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*, Barcelona, Spain, Dez. 2016 - Dez. 2016, S. 1304–1307.

[51] G. Schuh, J.-P. Prote, A. Gützlaff, und N. Rodemann, "Gestaltung von Produktionsnetzwerken," *ZWF*, Jg. 114, 1-2, S. 7–10, 2019, doi: 10.3139/104.112038.

[52] A. Kaiser und A. Tetzner, "Business Analytics mit SAP HANA Möglichkeiten und Grenzen," *ERP Management*, Jg. 13, Nr. 1, S. 52–54, 2017.

[53] B. Vogel-Heuser, V. Karaseva, J. Folmer, und I. Kirchen, "Operator Knowledge Inclusion in Data-Mining Approaches for Product Quality Assurance using Cause-Effect Graphs," *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 50, Nr. 1, s. 1358–1365, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.233.

[54] C. Schlick, R. Bruder, und H. Luczak, *Arbeitswissenschaft,* 4. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018.

[55] N. Bach, C. Brehm, W. Buchholz, und T. Petry, *Organisation: Gestaltung wertschöpfungsorientierter Architekturen, Prozesse und Strukturen,* 2. Auflage Wiesbaden: Springer Gabler, 2017.

[56] S. Thomas, A. Mundt, und T. Friedli, *Management globaler Produktionsnetzwerke: Strategie, Konfiguration, Koordination*. München: Hanser, 2013.

[57] S. Thomas, F. Liebetrau, und T. Friedli, "Knowledge Exchange in Production Networks: Operational Excellence Multiplied," in *SpringerLink, Leading pharmaceutical operational excellence: Outstanding practices and cases*, T. Friedli, P. Basu, D. Bellm, und J. Werani, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 337–344.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 3.3:

Prof. Dr.-Ing. G. Schuh, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT
Prof. Dr.-Ing. Peter Burggräf, Institut für Produktionstechnik, Universität Siegen
Dr.-Ing. S. Gottschalk, Beiersdorf AG
A. Gützlaff, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
T. Adlon, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Dr.-Ing. M. Dannapfel, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
K. Thomas, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
M. Ebade Esfahani, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
C. Geukes, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
J. Uelpenich, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
M. Welsing, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
A. Klein, HMZ Europe GmbH
Dr.-Ing. S. Tschöpe, Miele & Cie. KG
M. Henrichs, Miele & Cie. KG
W. Weber, Henkel AG & Co. KGaA
Dr.-Ing. J. Holtbrügge, Henkel AG & Co. KGaA
Dr.-Ing. C. Benninghaus, Hilti AG
S. Feike, Hilti AG
P. Mairl, GKN Powder Metallurgy, Inc.
N. Hülsmann, ABB Ltd

# SESSION 4

## SUSTAINABLE PRODUCTIVITY

umlaut.com

# Real end–to–end

adds something on top

umlaut

# 4 Subskriptionsmodelle für Sustainable Productivity im Maschinen- und Anlagenbau

*G. Schuh, W. Boos, J. Boshof, C. Dölle, C. Kelzenberg, J. Schweins, J. Tittel*

## Gliederung

1 Motivation und Herausforderung ..... 353

2 Subskriptionsmodelle als Verbesserung der kundenseitigen Produktivität und der herstellerseitigen Gewinnentwicklung ..... 355

3 Die Fusion von Business Model Canvas und IoP ..... 357

4 Drei Interaktionen zur Realisierung von nutzerzentrierten sowie nachhaltigen Subskriptionsmodellen ..... 361

4.1 Usergesteuerte Entwicklung ..... 362

4.2 Usergesteuerte Produktion ..... 364

4.3 Usergesteuerte Abrechnung ..... 365

5 Zusammenfassung ..... 368

6 Literatur ..... 370

## Kurzfassung

**Subskriptionsmodelle für Sustainable Productivity im Maschinen- und Anlagenbau**

Die Industrialisierung hat dazu geführt, dass eine signifikante Unterauslastung von Ressourcen über eine lange Zeit rentabel gewesen ist. Allerdings differenziert sich das kapital- und ressourcenintensive Produktivitätsdenken der Produktionswirtschaft zunehmend vom Zukunftsbild einer ökologisch bewusster denkenden Gesellschaft. Hieraus resultiert die Fragestellung, ob der deutsche Maschinen- und Anlagenbau, als wesentlich vom bisherigen Produktivitätsverständnis profitierend, mit seinen aktuellen Geschäftsmodellen zukunftsfähig aufgestellt ist.

Um diese Fragestellung zu adressieren, liegt aufgrund zunehmender Möglichkeiten der Digitalisierung ein besonderes Potenzial in der Neuinterpretation von industriellen Subskriptionsmodellen. Diese führen zu einer Angleichung der Interessen von Unternehmen und Kundschaft, weil Überkapazitäten durch eine bedarfsgerechte Ressourcenbeanspruchung reduziert werden. Die Digitalisierung muss daher als ultimativer Nachhaltigkeitstreiber verstanden werden, um gleichzeitig die kundschaftsseitige Produktivität neu interpretieren zu können und die unternehmensseitige Marge zu verbessern.

Die Auslegung industrieller Subskriptionsmodelle erfordert die Fusion des Business Model Canvas als methodischer Befähiger zur ganzheitlichen Entwicklung von Geschäftsmodellen und des Internet of Production (IoP) als praktischer Befähiger zur Operationalisierung von Geschäftsmodellen. In diesem Beitrag werden drei zentrale Interaktionen der beiden Ordnungsrahmen beschrieben, welche für eine erfolgreiche Umsetzung industrieller Subskriptionsmodelle für Sustainable Productivity im Maschinen- und Anlagenbau zwingend erforderlich sind.



## Abstract

**Subscription Models for Sustainable Productivity in Machinery and Plant Engineering**

Industrialization made it affordable to significantly underutilize resources for a longer period of time. However, the capital- and resource-intensive productivity approach of the producing sector is becoming increasingly differentiated from the future image of a more ecologically aware society. This raises the question of whether the German machinery and plant engineering industry, as one of the central beneficiaries of the previous understanding of productivity, is prepared for the future with its current business models.

To address this problem special potential lies in the reinterpretation of subscription models due to the opportunities of digitalization. These lead to an alignment of producer and customer interests since overcapacities are reduced by demand-based resource utilization. Therefore, digitalization must be understood as the ultimate driver of sustainability to simultaneously improve customer-side productivity and producer-side profit margin.

The design of industrial subscription models demands the fusion of the Business Model Canvas as methodical enabler for holistic development of business models as well as the Internet of Production (IoP) as practical enabler for the operationalization of business models. In this contribution, three central interactions of both frameworks are described which are mandatory for a successful design of industrial subscription models for sustainable productivity in machinery and plant engineering.

# 1 Motivation und Herausforderung

Die Entwicklung der Industrialisierung im 20. sowie 21. Jahrhundert hat zu einer fundamentalen Änderung des Konsumverhaltens geführt. Zunächst resultierte aus der voranschreitenden Industrialisierung im 20. Jahrhundert eine Wohlstandssteigerung für die Bevölkerung. Eine industriell optimierte Massenproduktion von Gebrauchs- und Konsumgütern hat Produkte aufgrund von Skaleneffekten für breite Massen durch geringere Preise zugänglich gemacht. Technologische Fortschritte führen im 21. Jahrhundert zu einer perfektionierten Weiterentwicklung der Industrialisierung, welche auch das Kaufverhalten von Konsumierenden verändert. Gekennzeichnet waren die industriellen Revolutionen durch das kontinuierliche Streben nach Kostenoptimierung, Zeiteinsparung und Qualität. Dies hat zu einer ökonomisch sinnvollen Überproduktion geführt, in deren Konsequenz stetiges Wirtschaftswachstum direkt mit der Zunahme des Ressourcenverbrauchs sowie der $CO_2$-Emissionen verbunden war (vgl. Bild 1).

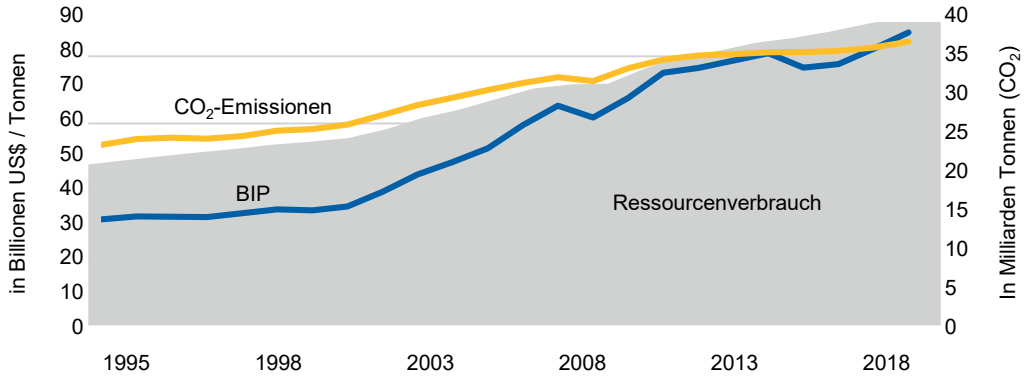



*Bild 1: Kennzahlenentwicklung durch aktuelles Paradigma der Produktion [1], [2], [3]*

Ein beispielhafter Blick auf den Onlinehandel von Konsumgütern verdeutlicht die durch die Industrialisierung geschaffene Überproduktion. Im Jahr 2020 lieferte die deutsche Post rund 1,8 Mrd. Pakete aus [4], welche in 544 Retouren pro Minute resultierten. Bei einer durchschnittlichen $CO_2$-Emission von ca. 500 Gramm pro Paket [5] ergeben sich alleine für den Transport der Retouren $CO_2$-Emissionen in Höhe von ca. 143.000 Tonnen. Neben dem hierbei erzeugten $CO_2$-Verbrauch entstanden im Jahr 2020 zudem rund 11 Mio. verschrottete Retouren durch die Anbietenden in Deutschland. [6] Diese und weitere Entwicklungen haben politisch reglementierte Gegenmaßnahmen, wie z. B. das Kreislaufwirtschaftsgesetz oder die $CO_2$-Steuer, ins Leben gerufen. Des Weiteren verdeutlicht diese Entwicklung die Aktualität der Thematik im Zuge der allgegenwärtigen Nachhaltigkeitsdebatte.

Ein Blick auf andere Industriezweige oder weitere Aspekte des alltäglichen Lebens verdeutlicht ebenfalls, dass die perfektionierte Industrialisierung Profitabilität trotz signifikanter Ressourcenverschwendungen ermöglicht. Große Teile der Bevölkerung können es sich heute leisten, gekaufte Güter nicht bzw. nur in geringem Maße zu nutzen. Kleidung, Geräte, Fahrzeuge, Maschinen und Infrastruktur weisen heute teilweise einen Nutzungsgrad, gemessen an der zeitlich maximalen Verfügbarkeit, im einstelligen Prozentbereich auf. Die Herstellung dieser Güter beansprucht jedoch Energie und natürliche Rohstoffe, deren Rückgewinnung weitestgehend unmöglich ist (vgl. Bild 2).

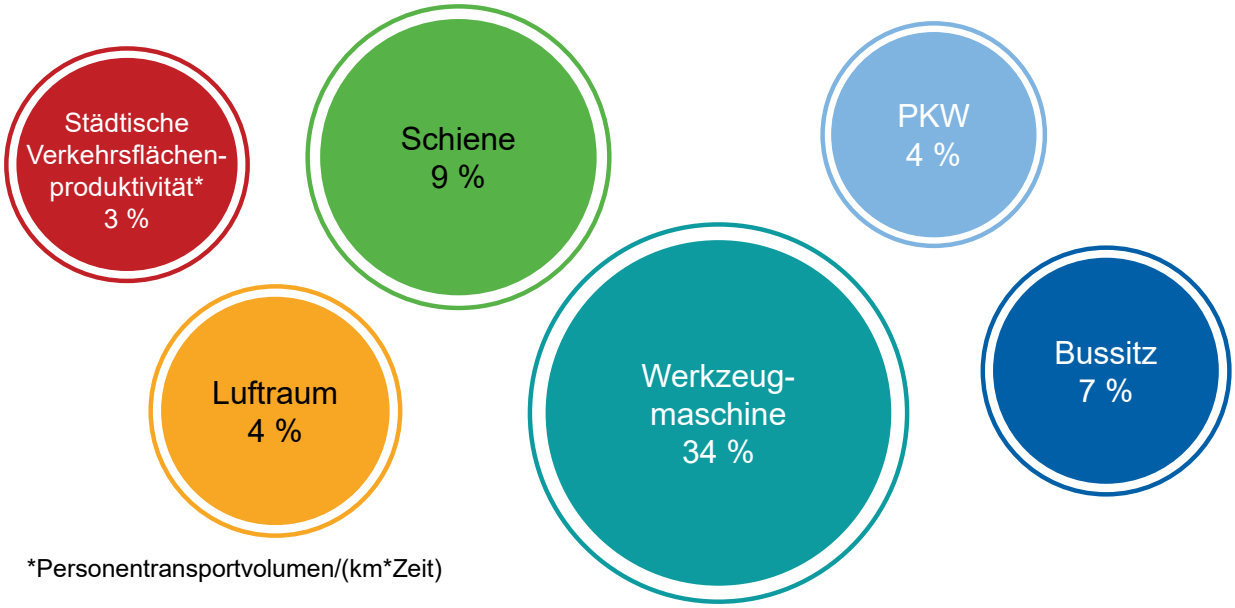



*Bild 2: Die Auslastung alltäglich genutzter Ressourcen [7]*

Eine Analyse des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen zeigt, dass bspw. das deutsche Schienennetz aktuell nur zu 9 % ausgelastet wird. Ein PKW wird sogar nur in 4 % der Besitzdauer verwendet. Eine Werkzeugmaschine ist mit 34 % zwar vergleichsweise gut ausgelastet, aber immer noch signifikant von einer Vollauslastung entfernt.

Die Fallbeispiele belegen, dass die Industrialisierung zu einer Überproduktion geführt hat, welche in der Vergangenheit vom Großteil der anbietenden Unternehmen profitabel umgesetzt werden konnte. Es ist jedoch die Frage zu stellen, ob sich die Nutzenden der Ressourcen diese Verschwendung zukünftig noch leisten können.

Das kapital- und ressourcenintensive Produktivitätsdenken der Produktionswirtschaft differenziert sich jedoch zunehmend vom Zukunftsbild der ökologisch bewusster denkenden Gesellschaft. Der Begriff Nachhaltigkeit in den Dimensionen Ökologie, Sozialwesen und Unternehmenssteuerung gewinnt in nahezu allen gesellschaftlichen Bereichen an Relevanz. Dieser gesellschaftliche Interessenwandel manifestiert sich in der politischen Meinung und fördert den Erlass von umweltbezogenen nationalen Abgaben sowie internationalen Nachhaltigkeitsversprechen (Green Deal etc.). [8] Die Nachhaltigkeitswende blieb jedoch aufgrund der immer noch niedrigen Schlagkraft politischer Forderungen und Sanktionen bislang aus.

Relevant wird es für produzierende Unternehmen erst jetzt, da der Kapitalmarkt, in Zeiten der digitalen Services und der Plattform-Ökonomie, das Interesse an kapitalintensiven Geschäftsmodellen der Industrie verloren zu haben scheint. Die zeigt sich in Initiativen wie „Principles for Responsible Investment (PRI)“, welche von den vereinten Nationen unterstützt etwa 70 Billionen Dollar repräsentieren und einen verstärkten Investitionsfokus auf Umwelt-, Sozial- und Unternehmenssteuerungsfaktoren (ESG-Faktoren) legen. Die Einbindung von ESG-Faktoren in die Kapitalmärkte ist für die Investierdenden wirtschaftlich [9]. Die geänderten Stakeholder-Anforderungen haben über die Politik erwiesenermaßen den Kapitalmarkt erreicht, wodurch ein unmittelbarer Veränderungsdruck auf produzierende Unternehmen entsteht. Die Gefahr der ausbleibenden Investitionen steigt, da Kapitalgebende den etablierten produzierenden Unternehmen, auch im Maschinen- und Anlagenbau, eine authentische sowie sinnstiftende Produktionswende nicht zutrauen.

Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau als Schlüsselindustrie der deutschen Wirtschaft hat durch seine Exportorientierung über viele Jahrzehnte überproportional an der internationalen Wertschöpfungssteigerung partizipiert. Dies darf jedoch nicht über anstehende Herausforderungen hinwegtäuschen. So ist bspw. der globale Marktanteil des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus zwischen den Jahren 2007 und 2019 um 4,1 Prozentpunkte von 12,7 % auf 8,6 % gesunken [10]. Neben diesen Unsicherheiten aufgrund der zunehmend restriktiven Handelspolitik zahlreicher Volkswirtschaften, stellen insbesondere die beschriebenen Rahmenbedingungen im Kontext der Nachhaltigkeit den deutschen Maschinen- und Anlagenbau vor weitere große Herausforderungen. Mit der zunehmenden Digitalisierung von Prozessen sowie Produkten ergeben sich für den Maschinen- und Anlagenbau große Hoffnungen in Form resultierender Wertschöpfungspotenziale und damit auch Potenziale hinsichtlich einer Sustainable Production. Diese konnten bislang jedoch noch nicht erwirtschaftet werden.

Der beschriebene Status quo verdeutlicht die anstehenden Herausforderungen und den damit verbundenen Handlungsbedarf, um auch weiterhin die Führungsrolle als Schlüsselindustrie in Deutschland einnehmen zu können. Es ist fraglich, ob der deutsche Maschinen- und Anlagenbau gegenwärtig noch die richtigen Geschäftsmodelle betreibt.

## 2 Subskriptionsmodelle als Verbesserung der kundenseitigen Produktivität und der herstellerseitigen Gewinnentwicklung

Die kundschaftsseitige Problematik der unzureichenden Nutzung bestehender Ressourcen sowie die herstellendenseitige Problematik des abnehmenden Marktanteils des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus erfordern eine Lösung zur langfristig erfolgreichen und nachhaltigen Ausrichtung der wirtschaftlichen Tätigkeiten der Branche. Um beide Probleme adressieren zu können, ist eine Angleichung und Gleichrichtung der Interessen beider Parteien (Herstellende und Kundschaft) erforderlich. Dies bedeutet, dass der Kundschaft eine effizientere Ressourcennutzung offeriert werden muss. Gleichzeitig muss das Unternehmen direkt von der effizienteren Ressourcennutzung profitieren. Ein besonderes Potenzial zur Realisierung der Interessensangleichung liegt in sogenannten Subskriptionsmodellen.

Subskription repräsentiert nach GASSMANN ET AL. eins von 55 Geschäftsmodellmustern, auf die nahezu alle Geschäftsmodellinnovationen zurückgeführt werden können. Die Forschenden erkannten, dass die „kreative Imitation und Rekombination“ [11] einer begrenzten Anzahl an Mustern die Grundlage der meisten als „neu“ bezeichneten Geschäftsmodelle bildet. Beim Muster der Subskription, das auch unter dem Begriff Abonnement geläufig ist, beziehen Kundinnen und Kunden in regelmäßigen Abständen eine Leistung. GASSMANN ET AL. definieren weiterhin, dass die Nutzungsfrequenz und -dauer dabei vertraglich mit dem Unternehmen vereinbart und von Kunden und Kundinnen im Voraus oder in regelmäßigen Zeitabständen bezahlt werden. Während die Kundschaft vor allem von geringeren Nutzungskosten und einer vereinfachten Wiederbeschaffung profitiert, erzielt das offerierende Unternehmen eine stetige Einnahmequelle. [11] Die Grundprinzipien heutiger Subskriptionsmodelle sind dabei keineswegs neu. Das Geschäftsmodellmuster wurde ursprünglich im 17. und 18. Jahrhundert im Rahmen des deutschen Buch-, Zeitschriften- und Zeitungshandels angewandt. Für Bücher, wie z. B. mehrbändige Enzyklopädien, existierten wiederkehrende Zahlungen zwecks Zugriff auf diese. Hierdurch wurde das Ziel verfolgt, die teuren Herstellungskosten zu decken und langfristige Kundschaft-Unternehmen-Beziehungen aufzubauen. Die aktuell wohl bekanntesten Subskriptionsmodelle sind im Bereich der Unterhaltungsbranche wie bspw. Netflix oder Spotify vorzufinden.

Die Grundzüge eines Subskriptionsmodells, d. h. eine kontinuierlich erbrachte Leistung gegen kontinuierliche Zahlungen, bleiben unverändert. Allerdings muss Subskription aufgrund sich ändernder technologischer Möglichkeiten gänzlich neu gedacht werden. Herstellende müssen nämlich das Ziel verfolgen, die gleichen Interessen wie ihre Kundschaft zu erreichen. Dies bedeutet, dass Kundinnen und Kunden nicht nur ein Zugang zu einer Leistung, wie z. B. die Verfügbarkeit einer Maschine bzw. Anlage, gewährleistet wird, sondern Herstellende darüber hinaus eine permanente Leistungssteigerung erreichen [12]. Im Zuge dessen inkludiert der Leistungsbegriff neben klassischen Effizienzsteigerungen auch Faktoren der ESG-Dimensionen, wie etwa Ressourceneinsparungen während der Leistungsnutzung. Die Neuinterpretation des Subskriptionsmodells stellt somit den Kundschaftsnutzen konsequent in den Fokus der Betrachtung und Handlungen [13] (vgl. Bild 3).

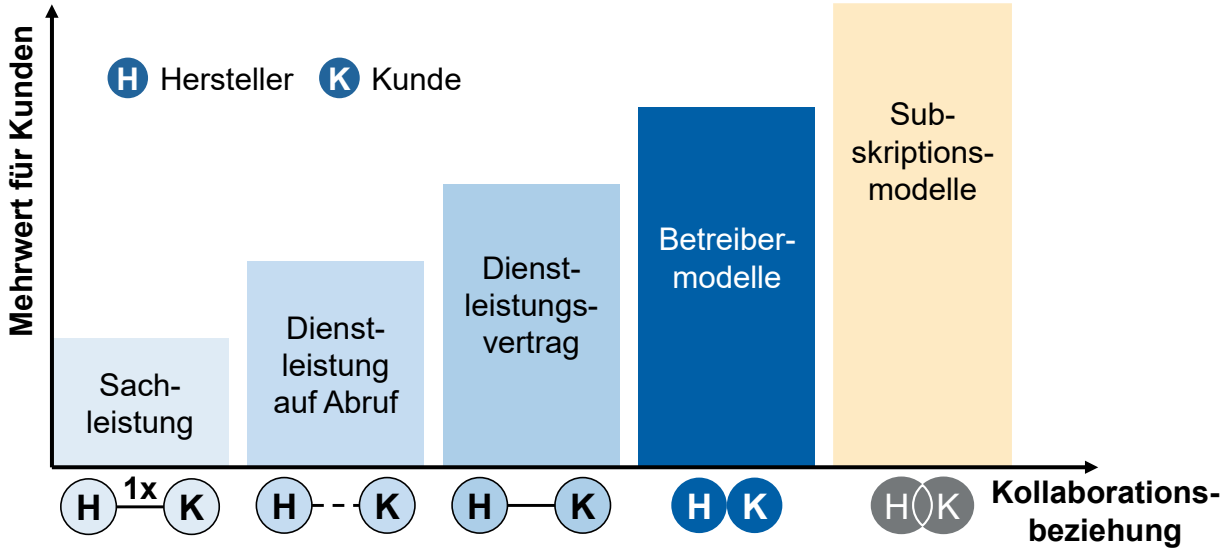



*Bild 3: Subskription zur Fokussierung des Kundennutzen*

Subskription offeriert eine Leistungssteigerung, z. B. aufgrund einer erhöhten Ressourcenauslastung, durch verbesserte Produktivität und führt zu einer Angleichung der Interessen von Herstellenden und Kundschaft. Hierin liegt das zentrale Differenzierungskriterium zu anderen häufig verbreiteten Geschäftsaktivitäten im Maschinen- und Anlagenbau. Beim reinen Verkauf einer Sachleistung, wie z. B. einer Maschine, findet lediglich eine einmalige Interaktion beim Übertrag der Leistung zwischen Unternehmen und Kundschaft statt. Zudem liegt hierbei ein begrenzter Kundschaftsmehrwert durch die reine Produktfokussierung vor. Die Dienstleistung auf Abruf sowie der Dienstleistungsvertrag erhöhen den Kundschaftsmehrwert, da sie neben dem eigentlichen Kernprodukt zusätzliche Leistungen, wie etwa Ersatzteile, Reparaturen oder Instandhaltungen, beinhalten. Jedoch liegt auch hier jeweils ein begrenzter Kundschaftsmehrwert vor, da das Unternehmen den Kundennutzen nicht vollständig ins Zentrum seiner Aktivitäten stellt. Betriebsmodelle führen dagegen zu einer erhöhten Kundschaftsnähe bzw. Kollaboration, weil Herstellende eine direkte Verantwortung für die Prozesse und Aktivitäten bei Kunden und Kundinnen übernehmen [14]. Eine Angleichung der Interessen zwischen Herstellenden und Kundschaft liegt jedoch nicht vor, da Betriebsmodelle nicht auf die Leistungssteigerung der Maschinen- und Anlage ausgelegt sind.

Durch die Gleichrichtung der Interessen zwischen Herstellend und Kundschaft ermöglichen Subskriptionsmodelle eine aktive Zusammenarbeit zwischen beiden Parteien mit dem Ziel der Produktivitätssteigerung. Subskription ermöglicht also über die aktive und

incentivierte Einbindung von Herstellenden und Kundschaft in die Leistungserstellung eine kontinuierliche Steigerung der Produktivität. Dies bedeutet, dass sich Herstellende und Kundschaft gemäß dem Grundverständnis von Subskription zunächst auf die kontinuierlich zu erbringende Leistung gegen die kontinuierliche Zahlung einigen müssen. Die Neuinterpretation des Subskriptionsmodells sieht darüber hinaus vor, dass eine Leistungssteigerung angestrebt wird und Herstellende als Betreiber der Maschine bzw. Anlage von der Produktivitätssteigerung durch eine Beteiligung am Kundschaftsgewinn profitieren. Gemäß dem ökonomischen Grundsatz der Gewinnmaximierung wird dadurch das Bestreben der Herstellenden nach einer Produktivitätssteigerung und eine verbesserte Ressourcenauslastung bzw. -nutzung bei Kundinnen und Kunden garantiert. Herstellende erzeugen durch die neue Auslegung von Subskription einen nicht imitierbaren Kundschaftsmehrwert. Dies ermöglicht einen langfristigen „Lock-In“ von Kunden und Kundinnen im Ökosystem des Unternehmens.

Voraussetzung für die Produktivitätssteigerung bei Kundinnen und Kunden ist, dass das Untenehmen seine jeweilige Kundschaft genau kennt. DDas Unternehmen muss bspw. wissen, welche Leistungen kundschaftsseitig wann und in welcher Intensität benötigt werden. Hierzu ist ein vernetztes physisches Produkt sowie eine entsprechende technische Infrastruktur zur Integration verschiedener Datenquellen unabdingbar. Das Internet of Production (IoP) bildet hierfür die Grundlage und vernetzt Datenquellen auch über Funktionsbereiche in Unternehmen hinweg mit dem Ziel, einen digitalen Schatten zu erzeugen [12]. Eine Neuinterpretation des Subskriptionsmodells bedeutet also eine intelligente Vernetzung technischer Systeme als elementarer Befähiger zur operativen Umsetzung. Dies ermöglicht eine Reduzierung von Überkapazitäten und führt somit zu einer bedarfsgerechten Ressourcenbeanspruchung. Die Digitalisierung muss daher als ultimativer Nachhaltigkeitstreiber verstanden werden, um die kundschaftsseitige Produktivität und unternehmensseitige Umsatzentwicklung zu verbessern.

## 3 Die Fusion von Business Model Canvas und IoP

Konzeption und Implementierung industrieller Subskriptionsmodelle erfordern sowohl eine methodische Befähigung zur ganzheitlichen Geschäftsmodellentwicklung als auch eine praktische Befähigung zur Operationalisierung des Geschäftsmodells. Als methodischer Befähiger soll das Business Model Canvas (BMC) fungieren. Die praktische Befähigung erfolgt, wie bereits angeführt, durch das Internet of Production (IoP). Aus der Fusion der genannten Konzepte ergibt sich ein Zielbild für die methodische Umsetzung von Subskriptionsmodellen im Maschinen- und Anlagenbau. Im Folgenden werden daher sowohl die Bausteine von BMC und IoP als auch das hieraus resultierende Zielbild erläutert.

### Business Model Canvas

Das BMC bietet einen Ordnungsrahmen für die Entwicklung und Beschreibung von Geschäftsmodellen. OSTERWALDER UND PIGNEUR definieren das Geschäftsmodell als die Logik, nach der eine Organisation Werte erschafft, diese Werte an seine Kundschaft bereitstellt und dabei Erträge erwirtschaftet [15]. Es ergeben sich vier relevante Gestaltungsfelder (vgl. Bild 4):

- Value Proposition
- Value Creation
- Value Delivery
- Value Capture

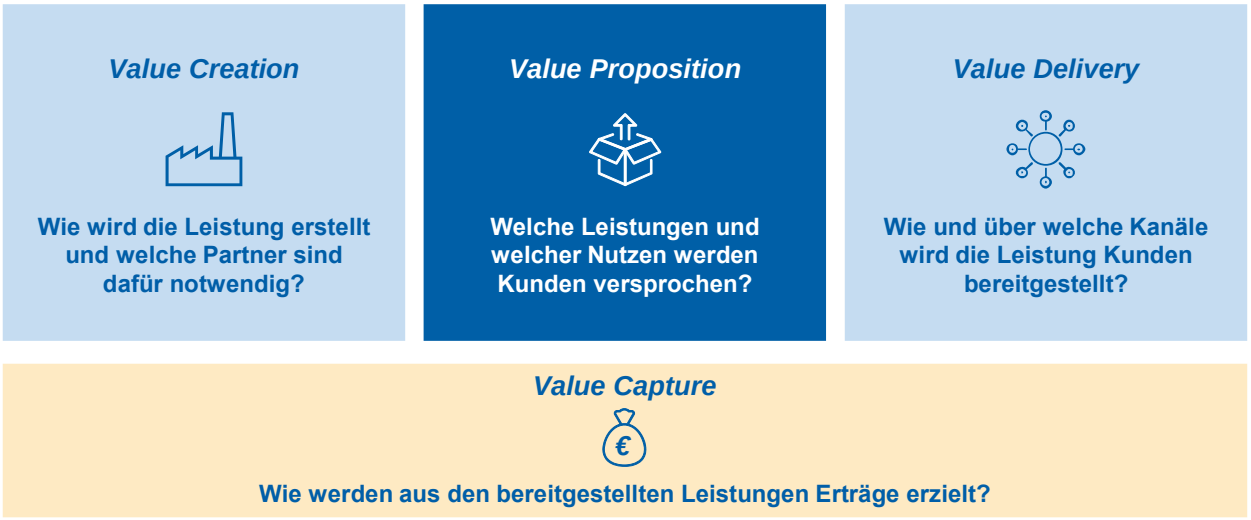



*Bild 4: Das Business Model Canvas [15]*

**Value Proposition** beschreibt das vom Unternehmen entwickelte Leistungsversprechen als Bündel aus Produkten und Dienstleistungen, die einen Wert für ein spezifisches Kundschaftssegment darstellen. Übergeordnet beantwortet die Value Proposition die Fragstellung, welche Leistungen und welche Nutzen Kunden und Kundinnen versprochen werden. Es werden hierbei quantitative Werte, wie bspw. Preis oder Servicegeschwindigkeit, von qualitativen Werten, wie bspw. Design oder Erlebnis, unterschieden. [15]

**Value Creation** beschreibt die Infrastruktur der Leistungserstellung und beantwortet übergeordnet die Fragestellung, wie die Leistung erstellt wird und welche Beteiligten dafür notwendig sind. Hierbei sind die Bausteine zu den Schlüsselaktivitäten, den Schlüsselkooperationen sowie den Schlüsselressourcen zu berücksichtigen. Schlüsselaktivitäten sind die für den Erfolg eines Geschäftsmodells entscheidenden Tätigkeiten. Schlüsselbeteiligte sind in das für die Funktion und den Erfolg eines Geschäftsmodells entscheidende Netzwerk eingebundene Zulieferungsunternehmen und Kontakte. Das Netzwerk dient der Optimierung des Geschäftsmodells, der Risikoreduktion oder dem Erwerb von Ressourcen. Es werden vier verschiedene Arten von Kooperationen unterschieden: Strategische Allianzen zwischen Non-Competitors, strategische Kooperationen zwischen Konkurrenz, Gemeinschaftsunternehmen für den Aufbau neuer Geschäfte sowie Kaufende-Liefernde-Beziehungen zur Sicherstellung einer zuverlässigen Lieferkette. Schlüsselressourcen sind die für die Funktion und den Erfolg eines Geschäftsmodells entscheidenden Ressourcen. Hierbei kann in Sachmittel, geistige Ressourcen, Humanressourcen und Finanzmittel unterteilt werden. Eine Firma kann ihre Schlüsselressourcen besitzen, leasen oder über Schlüsselkontakte erwerben. [15]

**Value Delivery** beschreibt die Bereitstellung der Werte an die Kundinnen und Kunden und beantwortet übergeordnet die Fragestellung, wie und über welche Kanäle die Leistung Kunden und Kundinnen bereitgestellt wird. Relevant sind die Bausteine zu den Kundschaftssegmenten, den Kundschaftsbeziehungen und den Kundschaftskanälen. Kundschaftssegmente sind unterschiedliche Gruppen von Konsumierenden oder Organisationen, die durch gemeinsame Bedürfnisse und Verhaltensweisen gekennzeichnet sind. Unterschiedliche Segmente erfordern verschiedenartige Angebote, Vertriebskanäle und Kundschaftsbeziehungen. Sie zeichnen sich dabei durch unterschiedlich hohe Profitabilität und Zahlungsbereitschaft für unterschiedliche Angebotsaspekte aus. Kundenschaftsziehungen sind die Beziehungen, die eine Firma mit Kundinnen und Kunden eines jeden Segments unterhält. Diese Beziehungen können auf einer persönlichen Ebene

oder automatisiert ablaufen und haben einen starken Einfluss auf das jeweilige Kundschaftserlebnis. Der Aufbau und die Pflege von Kundschaftsbeziehungen dienen der Akquise und Bindung von Kundschaft sowie der Verkaufsförderung. Kundschaftskanäle ermöglichen einer Firma, mit den jeweiligen Kundschaftssegmenten zu kommunizieren und diese zu erreichen, um darüber das jeweilige Leistungsversprechen zu liefern. Es wird zwischen Kommunikations-, Vertriebs- und Verkaufskanälen, die eigenständig oder über Kooperationsunternehmen umgesetzt sein können, unterschieden. Kundschaftskanäle erstrecken sich über insgesamt fünf Phasen, die das Erwecken der Aufmerksamkeit von Kundschaft, die Hilfe bei der Auswertung der Leistungsversprechen durch Kunden und Kundinnen, das Ermöglichen des gezielten Kaufs einzelner Produkte und Dienstleistungen, die eigentliche Lieferung des Leistungsversprechens an Kundinnen und Kunden sowie das Anbieten von After-Sales-Unterstützung umfassen. [15]

**Value Capture** beschreibt die finanzielle Tragfähigkeit der Geschäftstätigkeit und beantwortet anhand der Bausteine zu den Umsatzströmen und der Kostenstruktur übergeordnet die Fragestellung, wie aus den bereitgestellten Leistungen Erträge erzielt werden. Umsatzströme beschreiben die Zahlungen, die ein Unternehmen durch die einzelnen Kundschaftssegmente generiert. Es werden einmalige Umsatzströme aus abgegrenzten Transaktionen von wiederholenden Umsatzströmen aus fortlaufenden Zahlungen unterschieden. Nutzungsgebühren, Subskriptionsgebühren, Leasingzahlung und Lizenzgebühren sind beispielhafte Möglichkeiten, Umsatzströme zu erzielen. Der Umsatz wird darüber hinaus signifikant durch den jeweiligen Preisfindungsmechanismus bestimmt, woraus dessen große Bedeutung direkt ersichtlich ist. Die Kostenstruktur umfasst sämtliche Kostenpunkte des Betriebs eines Geschäftsmodells und resultiert aus den Umfängen, die innerhalb der Bausteine der Value Creation anfallen. Geschäftsmodelle unterscheiden sich in der Ausprägung ihres Fokus auf Kostenreduktion. Wertgetriebene Modelle tolerieren höhere Kosten zugunsten einer Verbesserung des Leistungsversprechens, wohingegen kostengetriebene Geschäftsmodelle sämtliche Bestandteile einer schlanken Kostenstruktur unterordnen. [15]

### Internet of Production

Das IoP beschreibt die weitreichende Integration der folgenden, heutzutage oftmals separierten Bereiche:

- Produktentwicklung (Development Cycle)
- Produktion (Production Cycle)
- Nutzung (User Cycle)

Aufgrund des stark iterativen Prozesscharakters sowohl innerhalb der einzelnen Bereiche als auch zwischen den Bereichen wird jeweils eine Zyklusdarstellung verwendet (vgl. Bild 5).

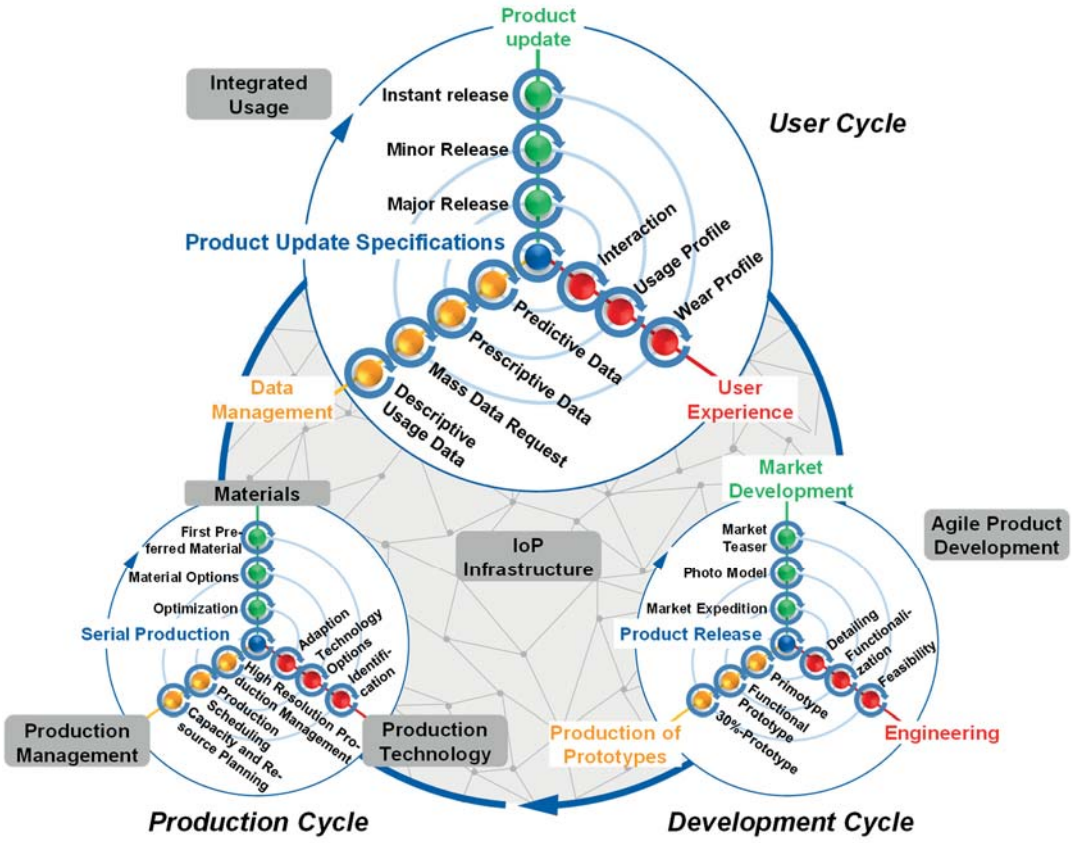



*Bild 5: User Cycle, Development Cycle und Production Cycle im Internet of Production [16]*

Der zentrale Aspekt für die Umsetzung von Subskriptionsmodellen im Maschinen- und Anlagenbau ist die Integration der drei Zyklen. Daten- und informationsbasiert wird diese Integration durch die IoP-Infrastruktur ermöglicht. Sie verwaltet die Generierung, die Synchronisation und den domänenübergreifenden Zugriff auf den digitalen Schatten der verschiedenen Bereiche. Somit kann das IoP proaktiv bei unterschiedlichsten Entscheidungsfindungen unterstützen und bspw. vorausschauende Maßnahmen ableiten. Ausgangspunkt ist die Identifizierung und Nutzung von tatsächlichen Kundenanforderungen, welche durch eine datenbasierte und bereichsübergreifende Zusammenarbeit effizient in neue Produkte umgesetzt und produziert werden können. [17]

Die Möglichkeiten der beschriebenen Vernetzung sind weitreichend. In letzter Konsequenz ermöglicht das IoP eine derart weitreichende Integration von Herstellenden und Kundschaft, dass eine Ablösung des Gütesiegels „Made in Germany“ durch ein neues Gütesiegel „Operated by Germany“ ermöglicht wird. Herstellende wandeln sich somit von reinen Produzierenden einer Maschine bzw. Anlage zum kooperativen Unterstützenden und Befähiger der kundschaftsseitigen Produktion.

**Zielbild**

Damit industrielle Subskriptionsmodelle konzeptioniert und implementiert werden können, ist eine methodische Befähigung zur ganzheitlichen Entwicklung von Geschäftsmodellen sowie eine praktische Befähigung zur Operationalisierung des Geschäftsmodells erforderlich. Das BMC und das IoP wurden in diesem Zusammenhang eingeführt und sind im Zielbild für die Realisierung des Geschäftsmodells konsolidiert (vgl. Bild 6).

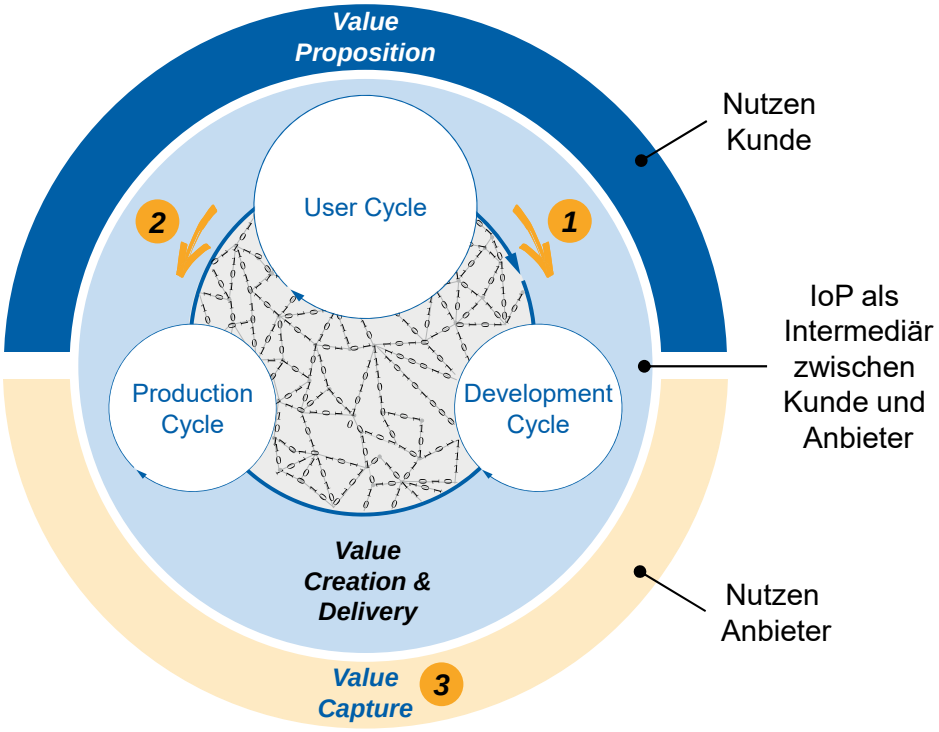



*Bild 6: Zielbild der Implementierung von nutzerzentrierten Subskriptionsmodellen*

Erfolgreiche Geschäftsmodelle sind ausgehend vom eigentlichen Kundschaftsnutzen zu konzeptionieren. Geschäftsmodelle können nur dann erfolgreich am Markt platziert werden, wenn der Kunde, die Kundin und ihre Bedürfnisse als handlungsleitendes Paradigma für die Geschäftsmodellauslegung angesehen werden. Der Kundschaftsnutzen ergibt sich direkt aus der Beschreibung der Value Proposition von industriellen Subskriptionsmodellen. Herstellende wiederum erzielen ihren Nutzen aus einer sinnvollen Gestaltung der Value Capture, die direkt an die eigentliche Nutzung der Produkte und Dienstleistungen durch Kundinnen und Kunden zu koppeln ist. Die IoP-Infrastruktur ermöglicht eine enge Verknüpfung der Bereiche Value Creation und Value Delivery über sämtliche Zyklen im Produktlebenszyklus. Insgesamt ergeben sich die folgenden drei relevanten Interaktionen (vgl. Bild 6). Aufgrund des Bedeutungsgewinns der Nutzungsphase sind sämtliche Interaktionen ausgehend vom User Cycle des IoP zu betrachten:

- Usergesteuerte Entwicklung (1)
- Usergesteuerte Produktion (2)
- Usergesteuerte Abrechnung (3)

## 4 Drei Interaktionen zur Realisierung von nutzerzentrierten sowie nachhaltigen Subskriptionsmodellen

Die zuvor genannten Interaktionen sind zentral für die Realisierung von industriellen Subskriptionsmodellen. Ohne diese Interaktionen ist eine erfolgreiche Umsetzung industrieller Subskriptionsmodelle nicht möglich, weshalb sie in diesem Kapitel detailliert beschrieben werden.

## 4.1 Usergesteuerte Entwicklung

Damit ein Geschäftsmodell erfolgreich vom Markt angenommen wird, ist es besonders wichtig, die Bedürfnisse der Kundschaft zu adressieren. Für diese Umsetzung fällt der nutzenzentrierten Ausrichtung der Value Proposition eine entscheidende Rolle zu.

Eine genauere Betrachtung der Value Proposition aktueller Geschäftsmodelle im Maschinen- und Anlagenbau zeigt, dass die Branche sowohl von ihren Kunden und Kundinnen als auch im Eigenverständnis oftmals als auftragsfertigend wahrgenommen wird und entsprechend agiert. Die Produkte werden zwar häufig individuell auf ihre Kundinnen und Kunden ausgerichtet, jedoch steht in den meisten Fällen lediglich der reine Produktverkauf im Fokus der Geschäftsaktivitäten zwischen Herstellenden und Kundschaft. Die Herstellenden im Maschinen- und Anlagenbau müssen sich jedoch vielmehr zu einem Anbieter von Lösungen entwickeln, welche die Bedürfnisse ihrer Kundschaft antizipieren. Es sollten also Leistungen angeboten werden, die anforderungsgerecht auf die jeweiligen Kunden und Kundinnen ausgerichtet sind und einen nicht imitierbaren Nutzen für diese erzeugen. Dies gelingt dem Unternehmen insbesondere durch den Verkauf von Lösungen im Sinne der Value Proposition anstelle von reinen Produkten (vgl. Bild 7).

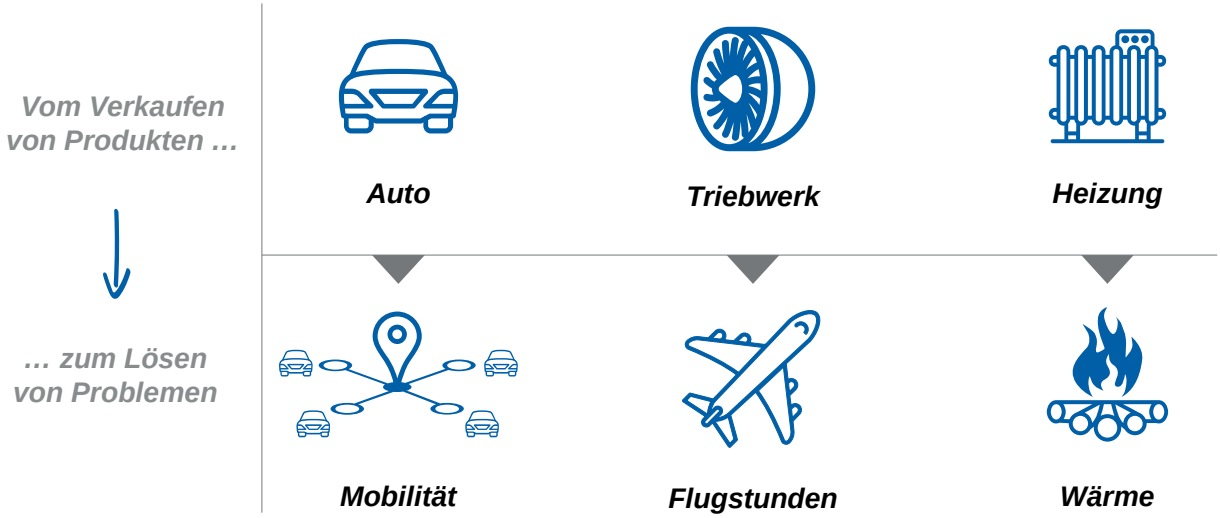



*Bild 7: Ausgestaltung der Value Proposition*

Einzelnen Unternehmen ist eine Transformation vom reinen Produktverkauf hin zum Lösen von Kundschaftsproblemen gelungen. So bietet bspw. ein Herstellender von Flugzeugturbinen an, anstelle des Triebwerkverkaufs die Flugstunden zu verkaufen, die mit dem Triebwerk geleistet werden. Eine ähnliche Denkweise des Geschäftsmodells verfolgt ein herstellendes Unternehmen von Heiztechnikprodukten. So kauft eine Kundin oder ein Kunde in der Regel keine Heizungsanlage, um diese als solche zu besitzen, sondern vielmehr, um mit ihr Wärme zu erzeugen. Daher wurde von dem Unternehmen ein Geschäftsmodell entwickelt, welches das Bedürfnis nach Wärme in den Fokus der Value Proposition rückt. Vergleichbares gilt für Car-Sharing Plattformen, welche in der Regel jüngere Zielgruppen erfolgreich ansprechen, da das Auto in diesen Zielgruppen seine frühere Rolle als Statussymbol verloren hat und das Bedürfnis nach flexibler Mobilität in den Vordergrund rückt.

Damit für Subskriptionsmodelle eine nutzenzentrierte Ausrichtung der Value Proposition gelingen kann, ist eine *Usergesteuerte Entwicklung* erforderlich. Diese beschreibt die Interaktion zwischen dem User Cycle und dem Development Cycle des IoP, um eine Produktentwicklung zu ermöglichen, die eine zielgerichtete Adressierung der tatsächlichen

Kundschaftsbedürfnisse ermöglicht. Eine erfolgreiche Produktentwicklung darf deshalb nur auf Basis des Nutzen ausgerichtet sein.

Für den Maschinen- und Anlagenbau bedeutet dies, dass den Kundinnen und Kunden Leistungs- und Produktivitätssteigerungen als Value Proposition durch Geschäftsmodelle offeriert werden müssen. Nicht das Produkt selbst, sondern die Produktivität der Maschine bzw. Anlage ist das Bedürfnis der meisten Kunden und Kundinnen im Maschinen- und Anlagenbau. Die *Usergesteuerte Entwicklung* muss daher als eine Voraussetzung für eine nutzenzentrierte Ausrichtung der Value Proposition verstanden werden. Sie ist ein entscheidender Faktor für den Erfolg des Geschäftsmodells.

Darüber hinaus können durch eine Produktentwicklung, welche auf dem Verständnis der tatsächlichen Nutzung beruht, auch Verbesserungen der Umwelt-, Sozial- und Unternehmenssteuerungsdimensionen (ESG) erzielt werden. Eine *Usergesteuerte Entwicklung* berücksichtigt die Emissionen in der Nutzungsphase der zu entwickelnden Maschinen und Anlagen. Basierend aus Nutzungsdaten bestehender Maschinen bzw. Anlagen können Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden, um die Emissionen über den gesamten Lebenszyklus zu reduzieren. Des Weiteren erleichtert ein exaktes Nutzenden- sowie Nutzungsverständnis die anwendungs- und anforderungsgerechte Aufbereitung, die Wiederverwendung und das Recycling einzelner Produktumfänge oder gesamter Maschinen und Anlagen.

Das Verständnis der tatsächlichen Nutzung der Maschinen und Anlagen ermöglicht des Weiteren eine Verbesserung der Arbeitssicherheit sowie des Anwendungskomforts. In der Produktentwicklung ist dafür sicherzustellen, dass keine Nutzungsgruppen durch Hard- und Softwareumfänge benachteiligt werden. Ein Negativbeispiel ist in diesem Zusammenhang die unzureichende Berücksichtigung der weiblichen Anatomie bei der Konstruktion und Absicherung von Kraftfahrzeugen, welche, auch bereinigt von anderen Einflussgrößen, in erhöhten Verletzungs- und Sterberaten von Nutzerinnen resultiert [18]. Schon heute sind darüber hinaus zahlreiche Fälle systematischer Benachteiligung von Nutzerinnen durch Algorithmen der künstlichen Intelligenz bekannt. Ferner können nutzungsdatenbasiert sowohl unbewusste als auch vorsätzliche Misuse-Fälle entdeckt und berücksichtigt werden, welche der Produktentwicklung bisher vorenthalten geblieben sind.

Zudem können vormals einschränkende Regulatorien der Produktentwicklung basierend auf einem verlässlichen und präzisen Nutzungsverständnis lösungsorientiert angepasst und ohne Gefährdung der Nutzenden gelockert werden. Ein datenbasiertes Verständnis der Produktnutzung verringert das Informationsdefizit in Bezug auf eben diese Produktnutzung zwischen Unternehmen und Kundschaft. Bewusste und unbewusste Inforationsverluste können so reduziert werden, was zu einer Steigerung der Innovations- und Lösungsfreiheitsgrade führt.

Um die nutzenzentrierte Ausrichtung der Value Proposition sowie die Verbesserungen in den ESG-Dimensionen realisieren zu können, hilft das IoP. Durch das IoP können Maschinendaten während des Produktionsbetriebs in der Nutzungsphase aufgenommen werden. Eine Analyse dieser Daten ermöglicht den Herstellenden, ihre Kundschaft deutlich genauer zu verstehen. So ist es bspw. möglich zu erkennen, wie die Maschinennutzung im Feld verläuft sowie an welchen Zeitpunkten Wartungen durchgeführt werden und Störungen vorliegen. Das IoP hilft aber nicht nur bei diesen „vermeintlich simplen“ Erkenntnissen. Vielmehr ermöglicht das IoP, die Kundschaftsbedürfnisse und -probleme „zwischen den Zeilen“ zu lesen. Dies bedeutet, dass Korrelationen sowie Wirkbeziehungen zwischen verschiedenen Parametern erkannt werden können. Hierdurch werden nicht nur direkt bzw. explizit geäußerte Kundschaftsbedürfnisse abgeleitet, sondern viel-

mehr auch implizit vorhandene Bedürfnisse identifiziert, welche die Kundinnen und Kunden aktuell nicht als direktes Bedürfnisse wahrnehmen. Der Maschinen- und Anlagenbau kann durch das IoP daher eine *Usergesteuerte Entwicklung* durchführen, bei der Leistungsangebote abgeleitet werden können, welche die Kunden und Kundinnen wollen sollten.

### 4.2 Usergesteuerte Produktion

Eine usergesteuerte Auslegung der Produktion unterstützt die Realisierung von Subskriptionsmodellen im Maschinen- und Anlagenbau. Unter *Usergesteuerte Produktion* ist die Planung und Steuerung der Produktion durch die Analyse der kundschaftsseitigen Nutzungsdaten zu verstehen. Es geht somit um die Interaktion des User Cycles mit dem Production Cycle. Hiervon können sowohl die Produktion der Herstellenden als auch die Produktion der Kundschaft profitieren.

Die Produktion der herstellenden Unternehmen profitiert von der mittel- bis langfristigen Prognose der zukünftigen Marktentwicklung und des Kundschaftsbedarfs. Hierbei unterstützt bspw. die Verbindung von aktuellen Daten zur kundschaftsseitigen Maschinenauslastung, Fehleranfälligkeit und Verfügbarkeit mit branchenspezifischen Konjunkturdaten sowie historischen Daten zum Kaufverhalten der Kundinnen und Kunden. Auf diese Art und Weise können Nachfrageschwankungen besser prognostiziert und erforderliche Maßnahmen abgeleitet werden. Amazon experimentiert mit antizipativen Produktlieferungen in kundschaftsnahe Lagerhäuser auf Basis der Analyse des Kaufverhaltens der Kunden und Kundinnen [19]. So können Produkte ausgeliefert werden, bevor die eigentliche Bestellung durch Kundinnen und Kunden überhaupt ausgeführt worden ist. Eine derart weitreichende Anwendung ist aufgrund der Produktkomplexität im Maschinen- und Anlagenbau nicht denkbar. Die Sondierung von Potenzialen alternativer Anwendungen basierend auf vergleichbaren Analysemethoden ist jedoch durch die Möglichkeiten des IoP auch für den Maschinen- und Anlagenbau sinnvoll.

Die Produktion der Kundschaft profitiert ebenfalls, da zusätzliche Produktionskapazitäten, bspw. aufgrund von kurzfristig erhöhter Produktnachfrage durch Endabnehmer:innen, flexibel bereitgestellt werden können. So können bspw. in Zeiten hoher Auslastung erforderliche Wartungsumfänge auf absehbare Zeiträume mit einer geringeren Auslastung der Produktionsanlagen verschoben werden. Hierfür ist jedoch eine nutzungsdatenbasierte Kenntnis des aktuellen Maschinen- bzw. Anlagenzustands erforderlich. Auf Basis dieser Kenntnis kann das herstellende Unternehmen seinen Kunden und Kundinnen den Aufschub der Wartungsumfänge gestatten oder bestenfalls sogar proaktiv anbieten. Ein weiteres denkbares Szenario ist eine kurzzeitige Verschiebung der Belastungsgrenzen von Produktionsanlagen. Basis dafür sind eine Analyse der aufgezeichneten Nutzungsdaten sowie eine kontinuierliche Überwachung des kritischen Produktionszeitraums durch das herstellende Unternehmen.

Neben der Prognose des Kaufverhalten sowie kundschaftsseitiger Produktionskapazitäten und den damit verbundenen Zielgrößen, müssen Produktivitätsziele der Produktion zukünftig an zusätzlichen ESG-Faktoren ausgerichtet werden. Somit müssen bspw. umweltrelevante Zielgrößen wie die Energieeffizienz der Produktion, die Effizienz der Ver- und Gebrauchsgüter sowie die Emission von Treibhausgasen bei der Planung und Steuerung der Produktion berücksichtigt werden. Insbesondere die durchgängige Überwachung der $CO_2$-Emissionen, z. B. mithilfe von Tools wie dem $CO_2$-Werkzeugpass der WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH, spielt hierbei eine wichtige Rolle. Durch die Anwendung von Subskriptionsmodellen können damit Potenziale hinsichtlich einer emissionsreduzierten Produktion bei Herstellenden und Kundschaft realisiert werden.

Gleichermaßen müssen die ökologischen, sozialen sowie regulatorischen Umweltwirkungen häufiger Umplanungen berücksichtigt werden. Kurzfristige Kapazitätsverschiebungen sowie Änderungen des Produktionsablaufs können zu Überforderungen der Mitarbeitenden, sowohl auf Seiten der Herstellenden als auch bei den Kundinnen und Kunden, führen. Ein nachhaltiges Agieren in der Produktion erfordert zudem die Berücksichtigung regulatorischer Rahmenbedingungen wie das Lieferkettengesetz sowie die Auswahl nachhaltiger Lieferanten auch bei unplanmäßigen bzw. kurzfristigen Fremdvergaben.

Zur Umsetzung einer Usergesteuerten Produktion sind weiterhin einige Voraussetzungen zu schaffen. Zum einen ist die technische Realisierung der Vernetzung durch das IoP eine notwendige Bedingung zur herstellerseitigen Erfassung der erforderlichen Datenumfänge. Zum anderen sind zahlreiche juristische Fragestellungen der Datenerfassung und Datenauswertung zu beantworten. Das vermeintlich größte Hindernis ist jedoch die Gewinnung der kundschaftsseitigen Bereitschaft zur Datenweitergabe. Die Kernkompetenz vieler Kunden und Kundinnen des Maschinen- und Anlagenbaus liegt im operativen Betrieb der Maschinen und Anlagen. Sie sind daher in Sorge, dass das dabei aufgebaute Wissen über die Herstellenden auch an mögliche Konkurrenz weitergegeben wird. Darüber hinaus sorgen sich die Kundinnen und Kunden um die Garantien und Gewährleistungen auf ihre Maschinen und Anlagen im Falle einer Nutzung außerhalb der Grenzbetriebsbedingungen. Des Weiteren bestehen mögliche Gefahren durch Cyberkriminalität. Hier werden Produktionsausfälle und Know-how-Verlust infolge von Cyberattacken befürchtet. Um als Anbietendender eines Subskriptionsmodells dennoch Zugang zu den relevanten Daten zu erhalten, ist den beschriebenen kundenseitigen Bedenken mit verlässlichen und sicheren Lösungen durch das IoP zu begegnen. Gleichzeitig gilt es, Potenziale aufzuzeigen, welche direkt und notwendiger Weise an die Analyse der gewünschten Daten gekoppelt sind.

### 4.3 Usergesteuerte Abrechnung

Die dritte Interaktion der Elemente des Zielbilds beschreibt die *Usergesteuerte Abrechnung*. Um einen maximalen Erfolg des Subskriptionsmodells zu erzielen, muss die Value Capture als Element des Business Model Canvas so ausgelegt werden, dass es zu einer Interessensangleichung zwischen Kundschaft und herstellendem Unternehmen kommt. Um diese Interessensangleichung realisieren zu können, müssen die Abrechnungsmodelle so ausgestaltet werden, dass Herstellende und Kundschaft jeweils maximale Profite erwirtschaften können und diese sich gegenseitig bedingen.

Aktuelle Ertragsmodelle im Maschinen- und Anlagenbau berücksichtigen diese revolutionäre Denkweise oftmals jedoch nicht. Es wird das traditionelle Ertragsmodell des vollständigen Produktverkaufs verfolgt. Beide Geschäftsparteien haben hierbei getrennte Ziele. Dasmaschinenherstellende Unternhemen verkauft sein Produkt oberhalb der Maschinenherstellkosten, wobei das Delta zwischen Maschinenpreis und Maschinenherstellkosten die Marge des Unternehmens repräsentiert. Kunden und Kundinnen hingegen erwirtschaften ihre jeweilige Marge durch die Nutzung der Maschine, indem z. B. Artikel hergestellt werden, deren Kosten über die Nutzungsdauer der Maschine durch Skaleneffekte sinken. Hierdurch fallen die Artikelkosten pro Stück unterhalb des Artikelverkaufspreises.

Die Margen beider Parteien fallen hierbei vergleichsweise klein aus. Dies liegt aus der Perspektive des herstellenden Unternehmens daran, dass ein zu hoher Maschinenpreis nicht verlangt werden kann, um im internationalen Markt wettbewerbsfähig zu bleiben. Aus der Perspektive der Kundschaft werden hohe Margen dadurch verhindert, dass einerseits keine optimale Maschinenproduktivität erreicht wird. Dies bedingt andererseits

auch höhere Kosten für Reparaturen und Instandhaltungen über die Nutzungsdauer, die sich negativ auf die Marge auswirken (vgl. Bild 8).

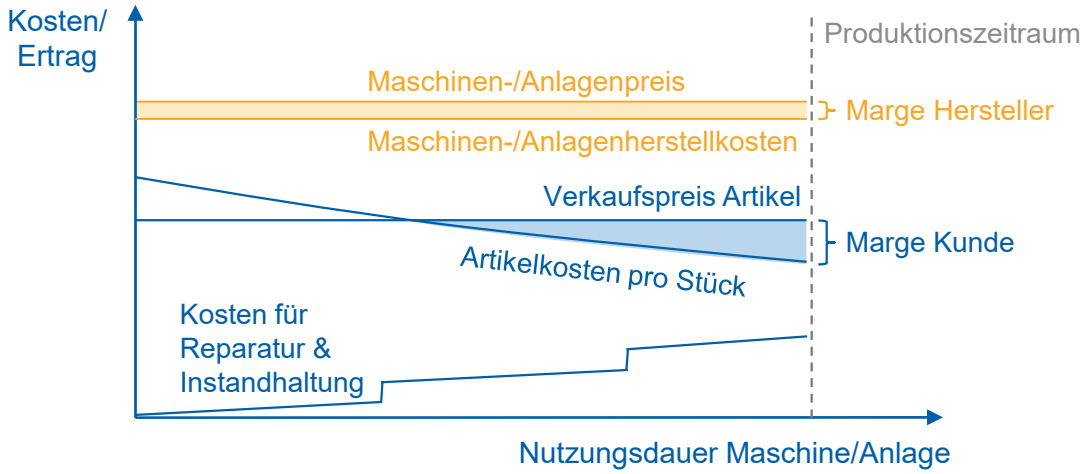



*Bild 8: Traditionelle Ertragsmodelle im Maschinen- und Anlagenbau*

Um die Nachteile traditioneller Ertragsmodelle zu adressieren, muss es im Sinne der Usergesteuerten Abrechnung zu einer Angleichung der Interessen zwischen Herstellenden und Kundschaft kommen. Dies würde im Zuge eines Subskriptionsmodells dann erreicht werden, wenn die Bezahlung des herstellenden Unternehmens auf Basis der erzielten Maschinenproduktivität erfolgt. Ein solcher subskriptiver Ansatz zur Usergesteuerten Abrechnung wird im Folgenden beschrieben.

Ein zentrales Handlungsfeld für die Usergesteuerte Abrechnung ist die vertragliche Ausgestaltung der nutzungsbasierten Leistungsabrechnung. So wird im Subskriptionsmodell vertraglich festgeschrieben, wie hoch die monatlichen Nutzungskosten der Leistungsinanspruchnahme für die jeweilige Kundschaft sind. Durch die vertraglich festgeschriebenen monatlichen Erlösströme der Herstellenden sind diese in der Lage, den Maschinenpreis unterhalb der Maschinenherstellkosten anzubieten. Dies hat bspw. den Vorteil, dass das Produkt gegenüber der kostengünstigeren Konkurrenz aus der Preisperspektive an Attraktivität für Kundinnen und Kunden gewinnt. Der Maschinenpreis muss hierbei nicht als Verkaufspreis angesehen werden, sondern kann bspw. auch den Aufstellpreis bei der Kundschaft repräsentieren. Dies bedeutet, dass der Besitzübertrag beim Subskriptionsmodell zwischen Herstellenden und Kundschaft nicht erfolgen muss und die Maschine Eigentum des Unternehmens bleibt.

Die Definition der abzurechnenden Leistung bezieht sich dabei nicht nur auf das klassische Produkt. Vielmehr setzen sie sich zukünftig als Produktivitätsziele zusammen, die neben den klassischen Faktoren auch ESG-Kriterien berücksichtigen. So muss bspw. unter dem neuen Produktivitätsverständnis berücksichtigt werden, dass während der Maschinennutzung der Verbrauch von Roh-, Hilfs- und Betriebsmittel, wie etwa Kühlschmierstoffe, reduziert wird. Des Weiteren kann diese Form der Leistungserbringung positive Auswirkungen für Kunden und Kundinnen im Sinne der benötigten Kompetenz der Mitarbeiten bedeuten. Durch das Subskriptionsgeschäftsmodell ergibt sich für Kundinnen und Kunden ein größerer Spielraum für das erforderliche Qualifikationsniveau der Anlagenbedienenden. Hierdurch kann bspw. einem kundschaftsseitig bereits existierenden oder sich anbahnenden Fachkräftemangel entgegengewirkt werden. Diese soziale Komponente beeinflusst positiv die vereinbarte Produktivität zwischen beiden Vertragsparteien.

Durch die nutzungsbasierte Vertragsgestaltung wird insbesondere der Effekt der Gleichrichtung der Interessen beider Parteien erzeugt. Herstellende verdienen nämlich über die Nutzungsdauer nur dann Geld, wenn kundschaftsseitig die vertraglich vereinbarte Maschinenleistung bzw. die vertraglich vereinbarte Produktivität abgerufen werden kann. Demnach besitzen Herstellende, als logische Konsequenz, das permanente Interesse, die Leistungsfähigkeit und damit die Produktivität der Maschine bzw. Anlage zu erhöhen. Es wird also nicht nur die Gewährleistung einer bestimmten Produktivität fokussiert. Vielmehr soll die erste Ableitung der Produktivität, also eine Produktivitätssteigerung, erreicht werden. Dieser Anreiz der Produktivitätssteigerung wird zudem verstärkt, wenn sich Herstellende und Kundschaft den durch die Produktivitätssteigerung erzielten Gewinn teilen (z. B. im Verhältnis 50:50). Eine Gewinnbeteiligung garantiert somit Kunden und Kundinnen eine Produktivitätssteigerung sowohl im Sinne finanzieller als auch ESG-Kriterien über die gesamte Nutzungsdauer. Gleichzeitig ermöglichen diese Gewinnbeteiligung und die monatlichen Erlösströme über die gesamte Nutzungsdauer dem maschinen- bzw. anlagenherstellenden Unternehmen einen höheren kumulierten Ertrag im Vergleich zum traditionellen Geschäftsmodell (vgl. Bild 9).

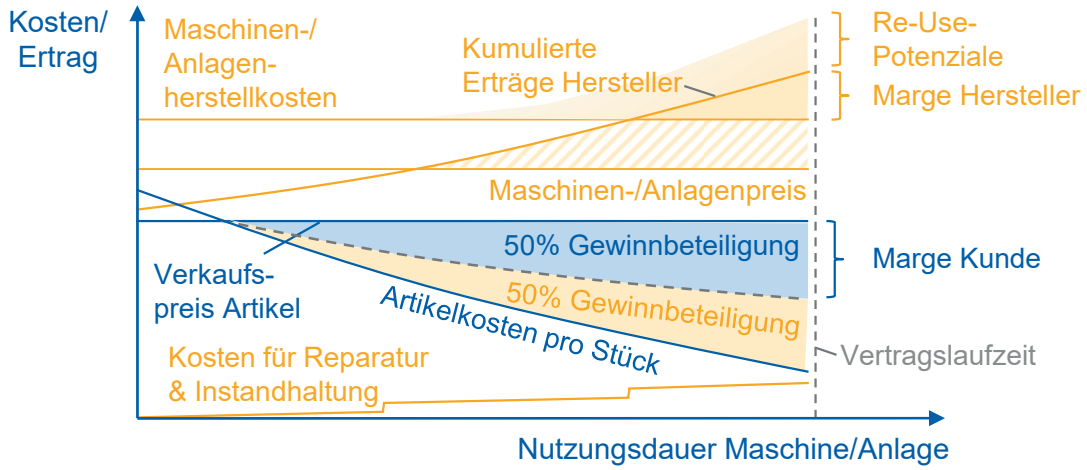



*Bild 9: Möglicher subskriptiver Ansatz zur Usergesteuerten Abrechnung*

Neben der Gleichrichtung der Interessen beinhaltet die Usergesteuerte Abrechnung einen buchhalterischen Vorteil für Kundinnen und Kunden. Bisherige Abrechnungen basieren in der Regel auf Leasing- oder Kaufgeschäften. In der Folge stehen die Kundschaftsausgaben entweder als Dauerschuldverhältnis beim Leasing oder als Kauf in der Bilanz der Kunden und Kundinnen. Diese traditionelle CapEx- (Cap-Expenditure) Geschäftsabwicklung führt somit zu einer hohen bilanziellen Kapitalbelastung seitens der Kundschaft. Die Usergesteuerte Abrechnung verwandelt dagegen diese Kapitalbelastung in eine operationale Ausgabe (OpEx: Operational Expenditure), weshalb vom CapEx-to-OpEx-Shifting gesprochen werden kann. Kundinnen und Kunden können somit hohe Investitionsausgaben vermeiden und das hiermit verbundene finanzielle Risiko in der initialen Ausgabe sowie im späteren Maschinen- und Anlagenbetrieb signifikant reduzieren.

Das Geschäftsmodell erfordert, dass sich Herstellende um die Reparaturen und Instandhaltungen kümmern und die Kosten hierfür übernehmen. Damit das Produktivitätsmaximum erzielt werden kann, benötigen Herstellende das IoP. Nur durch die permanente Erfassung, Analyse und Bewertung von Produktionsdaten können die richtigen Entscheidungen zum Maschinen- bzw. Anlagenbetrieb gewährleistet werden. Durch den perma-

nenten Überblick über die tatsächliche Maschinen- bzw. Anlagennutzung und die sachgerechte Instandhaltung der Maschine, besitzt das herstellende Unternehmen zudem das langfristige Potenzial, die Maschine bzw. Anlage nach Ablauf der Vertragslaufzeit bei einem anderen Kunden oder einer anderen Kundin als Re-Use zu verwenden. Hierdurch können seitens des herstellenden Unternehmens neue Einnahmequellen mit anderen Kundinnen und Kunden für eine Maschine bzw. Anlage generiert werden. Dies ist insbesondere dann für Herstellende von Relevanz, wenn die Maschine bzw. Anlage in seinem Besitz bleibt. Darüber hinaus wird das Potenzial einer nachhaltigen Ressourcennutzung deutlich gesteigert. Dies resultiert aus der datenbasierten Nutzung der Maschine bzw. Anlage im Subskriptionsmodell, durch die eine deutlich längerer Lebensdauer des Produkts erzielt werden kann.

Auch wenn das beschriebene Subskriptionsmodell zu einer langfristigen Win-Win-Situation bei herstellendem Unternehmen und Kundschaft führt, darf nicht vernachlässigt werden, dass für das Unternehmen diverse Risikofaktoren entstehen. Hierbei ist insbesondere zu betonen, dass es erst später zu einer Amortisation des Produkts kommt, als beim traditionellen Ertragsmodell. Folglich muss das Unternehmen zu Beginn eine eigenständige Finanzierung verwirklichen, die sich bilanziell negativ auswirkt. Es kommt somit zu einer eindeutigen Verschiebung der Risikoallokation in Richtung des Maschinen- und Anlagenbaus. Abhängig von der Kapitalintensität der Maschine bzw. Anlage ist die Finanzierung einer Usergesteuerten Abrechnung daher nur mithilfe Dritter aus dem Finanz- und Versicherungssektor umsetzbar.

Darüber hinaus muss das herstellende Unternehmen mit Hilfe des IoP nicht fälschbare Daten für den kundschaftsseitigen Produktivitätsnachweis realisieren, um eine sichere Abrechnungsbasis zu gewährleisten. Ohne diese technologische Voraussetzung ist die Usergesteuerte Abrechnung nicht praxistauglich. Für das CapEx-to-OpEx-Shifting muss das IoP daher auch aus der buchhalterischen bzw. finanztechnischen Perspektive als eine Voraussetzung angesehen werden.

Zusammenfassend wird konstatiert, dass die Usergesteuerte Abrechnung zu einer Interessensangleichung zwischen Kundschaft und Herstellenden führt und somit ein elementares Ziel der Value Capture ist.

## 5 Zusammenfassung

Eine perfektionierte Industrialisierung innerhalb der letzten Jahrzehnte führte durch Skalen- und Verbundeffekten zu einer enormen Profitabilität. Das kapital- und ressourcenintensive Produktivitätsdenken der Produktionswirtschaft differenziert sich allerdings zunehmend vom Zukunftsbild einer ökologisch bewusster denkenden Gesellschaft. Unter Berücksichtigung begrenzter Ressourcen und einer notwendigen Neuinterpretation der Bedeutung von Nachhaltigkeit ist es äußerst fraglich, ob sich die Nutzenden die vorherrschende Ressourcenverschwendung weiterhin leisten wollen und leisten können. Hieraus resultiert die Fragestellung, ob der deutsche Maschinen- und Anlagenbau, als einer der zentralen Profiteure des bisherigen Produktivitätsverständnisses, mit seinen aktuellen Geschäftsmodellen noch zukunftsfähig aufgestellt ist.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, liegt ein besonderes Potenzial in einer Neuauslegung von Subskriptionsmodellen. Dies bedeutet, dass den Kunden und Kundinnen nicht nur ein Zugang zu einer Leistung, wie z. B. die Verfügbarkeit einer Maschine oder Anlage, gewährleistet wird, sondern das herstellende Unternehmen darüber hinaus eine permanente Leistungssteigerung und eine Verbesserung in den ESG-Dimensionen erreicht. Voraussetzung hierfür ist eine intelligente Vernetzung im Subskriptionsmodell.

Durch die Offerierung einer Leistungssteigerung, z. B. aufgrund einer erhöhten Ressourcenauslastung durch verbesserte Produktivität, erreicht Subskription eine Angleichung der Interessen zwischen Herstellenden und Kundschaft. Dies ermöglicht eine Reduzierung von Überkapazitäten und führt somit zu einer bedarfsgerechten Ressourcenbeanspruchung. Die Digitalisierung, als Voraussetzung für die Neuinterpretation von Subskriptionsmodellen, muss daher als ultimativer Nachhaltigkeitstreiber verstanden werden, um die kundschaftsseitige Produktivität und herstellendenseitige Umsatzentwicklung zu verbessern.

Das Internet of Production (IoP) ist der praktische Befähiger zur Operationalisierung von industriellen Subskriptionsmodellen. Das Business Model Canvas (BMC) bildet dagegen einen methodischen Befähiger, um ein Geschäftsmodell ganzheitlich auszulegen. Hierfür muss eine systematische Entwicklung der vier Gestaltungsfelder Value Proposition, Value Creation, Value Delivery sowie Value Capture erfolgen. Werden beide Ordnungsrahmen miteinander vereint, dient das IoP als Intermediär zur Verknüpfung zwischen Value Proposition und Value Capture. Hieraus wurden drei zentrale Interaktionen abgeleitet, die bei einer erfolgreichen Ausgestaltung von Subskriptionsmodellen berücksichtigt werden müssen.

Die erste Interaktion zwischen dem User Cycle und dem Development Cycle beschreibt die **Usergesteuerte Entwicklung**. Sie führt zu einer nutzungszentrierten und ESG-gerechten Ausrichtung der Value Proposition und ist elementar für ein erfolgreiches Subskriptionsmodell, da eine zielgerichtete Adressierung der Kundschaftsbedürfnisse erfolgt. Die **Usergesteuerte Produktion** beschreibt die Interaktion zwischen dem User Cycle und dem Production Cycle. Sie verfolgt das Ziel einer nachfragebasierten und ESG-gerechten Produktionsplanung, indem langfristige und kurzfristige Marktentwicklungen analysiert und prognostiziert werden. Die **Usergesteuerte Abrechnung** dient schließlich zur Interessensangleichung zwischen Kundschaft und herstellendem Unternehmen als elementares Ziel der Value Capture, indem die Bezahlung der Herstellenden auf Basis der erzielten Produktivität und Verbesserungen in ESG-Dimensionen erfolgt. Durch eine angestrebte Produktivitätssteigerung erhöhen sich die Margen bei Kundschaft und Herstellenden.

# 6 Literatur


[1] Global Carbon Atlas, „*A European Green Deal,"* 2019. [Online]. Verfügbar: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

[2] International Monetary Fund (IFM), „*World Economic Outlook Database,"* 2020. [Online]. Verfügbar: https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2020/October

[3] UN Environment Programm, „*Domestic Material Consumption,"* in *International Resource Panel Global Material Flow Database*, 2020. [Online]. Verfügbar: https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database

[4] Deutsche Post DHL Group, „*Paketrekord von 2019 schon jetzt erreicht,"* 2020. [Online]. Verfügbar: https://www.dpdhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2020/paketrekord-2019- schon-erreicht-was-dhl-kunden-beim-weihnachtsversand-beachten-sollten.html

[5] UmweltDialog, *„DHL transportiert Privatkundenpakete bundesweit CO2-neutral ohne Aufpreis,"* 2011. [Online]. Verfügbar: https://www.umweltdialog.de/de/verbraucher/leben-und-wohnen/archiv/20110628_DHL_transportiert_alle_Privatkundenpakete_bundesweit_CO2-neutral_ohne_Aufpreis.php

[6] S. Randler, „*Verschrottung von Reouren: So viel Ware wird tatsächlich entsorgt,"* 2019. [Online]. Verfügbar: https://neuhandeln.de/verschrottung-von-retouren-so-viel-ware-wird-tatsaechlich-entsorgt/

[7] G. Schuh, *Mobilitätswende: Transformation von Metropolitan Cities,* Konferenzbeitrag METROPOLITAN CITIES MC2032 – Designing Ecosystems for Innovation, Aachen, 16.-17. Juli 2019.

[8] European Commission, *„A European Green Deal,"* 2019. [Online]. Verfügbar: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

[9] The Global Compact, *Who Cares Wins: Connecting Financial Markets to a Changing World,* 2004.

[10] VDMA, *Statistisches Handbuch für den Maschinenbau,* Frankfurt/M.: VDMA Verlag, 2020.

[11] O. Gassmann, K. Frankenberger und M. Csik, *Geschäftsmodelle entwickeln. 55 innovative Konzepte mit dem St. Galler Business Model Navigator.* München: Hanser, 2017.

[12] P. Jussen und J. Frank, „*Mit Industrie 4.0 Beute machen – Nur verbunden mit Subscription-Geschäftsmodellen führt Industrie 4.0 zu langfristigem unternehmerischen Erfolg* in *Unternehmen der Zukunft,"* 20. Jg., *Magazin für Betriebsorganisation in der digital vernetzten Wirtschaft*, Nr. 1, S. 7-11, 2019.

[13] Y. Liu, A. Gützlaff, S. Cremer, T. Grbev und G. Schuh, „*Design of Tailored Subscription Business Models – A Guide for Machinery and Equipment Manufacturers*" in *Production at the leading edge of technology*, B. Behrens, A. Brosius, W. Hintze, S. Ihlenfeldt und J. Wulfsberg, Hrsg., Proceedings of the 10th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Dresden, Berlin: Springer, 23.-24. September 2020, S. 717-727.

[14] G. Schuh, G. Gudergan, P. Thomassen und B. Brenken, *„Strategisches Management industrieller Dienstleistungen*," in *Management industrieller Dienstleistungen. Handbuch Produktion und Management 8, G.* Schuh, G. Gudergan und A. Kampker, Hrsg., 2. Aufl., Berlin: Springer, 2016, S. 31-63.

[15] A. Osterwalder und Y. Pigneur, *Business Model Generation: Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer*, Frankfurt: Campus Verlag, 2011.

[16] G. Schuh, J. Prote, A. Gützlaff, K. Thomas, F. Sauermann und N. Rodemann, *„Internet of Production: Rethinking Production Management,"* in *Production at the leading edge of technology,* J. Wulfsberg, W. Hintze und B. Behrens, Hrsg., Berlin: Springer, 2019, S. 533-542.

[17] G. Schuh, M. Riesener, J. Prote, C. Dölle, M. Molitor, S. Schloesser, Y. Liu und J. Tittel, *„Industrie 4.0: Agile Entwicklung und Produktion im Internet of Production"* in *Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft*, W. Frenz, Hrsg., Berlin: Springer, 2020, S. 467-488.

[18] C. Criado-Perez, *Unsichtbare Frauen – Wie eine von Daten beherrschte Welt die Hälfte der Bevölkerung ignoriert*, München: btb Verlag, 2020.

[19] Amazon.com, Inc., *„Anticipatory Shipping,"* 2019. [Online]. Verfügbar: https://www.amazon-watchblog.de/technik/1939-anticipatory-shipping-stoppt-amazon-vorausschauenden-versand.html

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 4.0:

Prof. Dr.-Ing. G. Schuh, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT
Prof. Dr.-Ing. W. Boos, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Dr.-Ing. C. Kelzenberg, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Dr.-Ing. C. Dölle, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
J. Boshof, M.Sc. RWTH, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
J. Tittel, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
J. Schweins, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

## 4.1 Industrial Innovation & Employability – Sustainable Skilling of Smart Experts

*A. I. Metzmacher, T. Hellebrandt, T. Adam, I. Heine, M. Bergholz, B. Döbbeler, S. Hatfield, C. Kieper, M. Plutz, R. Varandani, R. H. Schmitt*

**Gliederung**

1 Einleitung ....375
1.1 Soziotechnologisches Spannungsfeld im Internet of Production ....375
1.2 Industrielle Beschäftigungsfähigkeit ....377
1.3 Szenario der Produktionsarbeit 2030 ....378
2 Beschäftigungsfähigkeit im Zukunftsszenario ....383
2.1 Fallbeispiel 1: KOSTAL Kontakt Systeme GmbH ....383
2.2 Fallbeispiel 2: Henkel AG & Co. KGaA ....385
2.3 Implikationen für die zukünftige Beschäftigungsfähigkeit ....387
3 Strategische Handlungsempfehlungen ....389
4 *Smart Expert MOOC* ....393
4.1 MOOCs als nachhaltige Qualifikationsmaßnahme ....393
4.2 Identifikation der Stakeholder vor Entwicklungsstart ....394
4.3 Zielgruppe ....396
4.4 Entwicklungsschritte ....396
4.5 Inhalte und Struktur ....398
5 Fazit und Ausblick ....399
6 Literatur ....401

## Kurzfassung

**Industrial Innovation & Employability – Sustainable Skilling of Smart Experts**

Disruptive Technologien, global vernetzte Wertschöpfungsnetzwerke und gesellschaftspolitische Entwicklungen sind drei der Schlüsselfaktoren, die die zukünftige Arbeitswelt prägen werden. Die Daten- und Informationsverfügbarkeit im künftigen „Internet of Production“ ermöglicht durch eine erhöhte Prognosefähigkeit eine kontrollierte, effizientere und damit nachhaltigere Produktion. Diese Entwicklungen implizieren veränderte Anforderungen an die Kompetenzen von Beschäftigten. Der Beitrag „Industrial Innovation & Employability – Sustainable Skilling of Smart Experts” beleuchtet, welche Kompetenzen benötigt werden, um im datengeprägten Arbeitsumfeld die Beschäftigungs- und Innovationsfähigkeit von Mitarbeitenden nachhaltig zu sichern. Hierzu werden Strategien aus Arbeitgebendensicht diskutiert, wie die eigenen Mitarbeitenden sinnvoll vorbereitet und in dieses Arbeitsumfeld integriert werden können. Gemeinsam mit sechs Industrieexpertinnen und -experten wurden im Vorgängerbeitrag „Looking 4.0-ward: What the Internet of Production will mean for Industrial Employability“ des Online-Tagungsbands zum AWK 2020 Zukunftsszenarien für die Produktionsarbeit 2030 entwickelt. Anhand von Fallbeispielen aus den Unternehmen Henkel AG und Kostal Kontakt Systeme GmbH wurde aufgezeigt, welchen Einfluss aus den Zukunftsszenarien abgeleitete Schlüsselfaktoren auf die Mitarbeitenden der Unternehmen haben. Ausgehend von diesen Erkenntnissen diskutiert das Expert:Innenteam im vorliegenden Beitrag strategische Handlungsempfehlungen sowie eine konkrete Handlungsmaßnahme, um den Erfolg von Beschäftigten und Unternehmen am Industriestandort Deutschland langfristig sicherzustellen.

## Abstract

**Industrial Innovation & Employability – Sustainable Skilling of Smart Experts**

Disruptive technologies, globally connected value networks and socio-political developments are three of the key factors that will shape the future world of work. The availability of data and information in the "Internet of Production" will enable controlled, more efficient and thus more sustainable production thanks to increased forecasting capability. These developments imply changed requirements for employees' competencies. The article "Industrial Innovation & Employability - Sustainable Skilling of Smart Experts" examines which competencies are needed to sustainably secure the employability and innovative ability of employees in a data-driven work environment. To this end, strategies from the employer's point of view will be discussed as to how the company's own employees can be meaningfully prepared and integrated into this working environment. Together with six industry experts, future scenarios for production work in 2030 were developed in the previous contribution "Looking 4.0-forward: What the Internet of Production will mean for Industrial Employability" of the online conference volume on AWK 2020. Using case studies from the companies Henkel AG and Kostal Kontakt Systeme GmbH, the influence of key factors derived from the future scenarios on the companies' employees was demonstrated. Based on these findings, the team of experts discusses in this article strategic recommendations for action and a concrete measure for action to ensure the long-term success of employees and companies in Germany as an industrial location.

# 1 Einleitung

Durch Industrie 4.0 erreichen produzierende Unternehmen neue Dimensionen der Flexibilität und Produktivität, die über das Ausmaß bekannter Produktionsansätze weit hinausgehen. Die Basis dafür sind die echtzeitfähige und multimodale Kommunikation und Vernetzung zwischen cyber-physischen Systemen und Menschen in nahezu allen Bereichen produzierender Unternehmen [1]. Mit dem Internet of Production (IoP) [2] wird die notwendige Infrastruktur entwickelt, um eine Integration entlang des gesamten Produktlebenszyklus zu realisieren. Die technologische Vision dieser Infrastruktur ist detailliert skizziert und wird gemeinsam durch Forschungspartner und Industrieunternehmen in den kommenden Jahren umgesetzt und in die Praxis transferiert. Weitestgehend offen ist dagegen die Antizipation und Gestaltung des sozialen Teilsystems zukünftiger Produktion. Das IoP repräsentiert den daten- und informationsbasierten Wegbereiter für eine konsequente Umsetzung von Industrie 4.0. Die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit und die Erschließung neuer Wertschöpfungspotenziale durch Innovation lassen sich am Industriestandort Deutschland langfristig jedoch nur durch Menschen realisieren, da diese u. a. über nicht von Maschinen abbildbare Problemlösefähigkeiten und intuitives Reaktionsvermögen verfügen [3].

Der vorliegende Beitrag baut auf dem vorangegangenen Beitrag „Looking 4.0-ward: What the Internet of Production will mean for Industrial Employability“ [4] auf. In Kapitel 1 bis 3 werden die Kerninhalte in gekürzter Form vorgestellt. Kapitel 1.3 enthält zusätzlich die Ergebnisse der 2021 im Rahmen der Szenariotechnik wiederholt durchgeführten Befragung zur Prognose der Zukunft der Produktionsarbeit 2030. Deren Ziel bestand darin, die Ergebnisse aus der Erstbefragung auf Robustheit zu prüfen und weiterhin etwaige Einflüsse der COVID-19-Pandemie zu untersuchen. Anhand des entwickelten Zukunftsszenarios 2030 und den daraus abgeleiteten Fallbeispielen der Unternehmen KOSTAL Kontakt Systeme GmbH und Henkel AG & Co. KGaA (Bereich Laundry & Home Care), wird aufgezeigt, welche Kompetenzen benötigt werden, um im datengeprägten Arbeitsumfeld die Beschäftigungs- und Innovationsfähigkeit von Mitarbeitenden nachhaltig zu sichern.[1] Aus diesen Erkenntnissen werden strategische Handlungsempfehlungen abgeleitet, die den langfristigen Erfolg von Beschäftigten und Unternehmen am Industriestandort Deutschland sicherstellen, besonders auch in und nach Krisen wie der COVID-19-Pandemie. Im Fokus dieses Beitrags stehen sog. Massive Open Online Courses (MOOC). Am Beispiel des *Smart Expert MOOC* wird aufgezeigt, wie diese Form des Online-Lernens von Unternehmen genutzt wird, um Mitarbeitende flexibel und ortsunabhängig auf das zukünftige Arbeitsumfeld im IoP vorzubereiten.

## 1.1 Soziotechnologisches Spannungsfeld im Internet of Production

Produzierende Unternehmen und deren Beschäftigte stehen aufgrund des demografischen Wandels, des Fachkräftemangels und der fortschreitenden Digitalisierung und Vernetzung vor neuen tiefgreifenden Veränderungen der industriellen Arbeitswelt. Mit der technologischen Umsetzung von Industrie 4.0 wird eine Verschmelzung der Informations- und Kommunikationssysteme innerhalb der Unternehmen und z. T. auch über Organisationsgrenzen hinaus erwartet. In Folge der zunehmenden Informatisierung von Prozes-

[1] Vereinfachend wird die KOSTAL Kontakt Systeme GmbH im weiteren Verlauf mit „KKS“ und die Henkel AG & Co. KGaA (Bereich Laundry & Home Care) mit „Henkel“ abgekürzt.

sen werden Arbeitsabläufe medienbruchfrei und Strukturen in der Produktion sind gekennzeichnet durch Dezentralisierung und Selbstorganisation [5]. Ermöglicht wird dieser Wandel durch eine Vielzahl von digitalen Technologien, z. B. cyber-physikalische Systeme, Cloud Computing und Augmented Reality [6]. Zusätzlich nehmen die Anwendungsgebiete der Auswertung großer unstrukturierter Datenmengen mit Methoden aus dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz für produzierende Unternehmen zu [7]. Die Integration dieser digitalen Technologien und der wichtigsten Unternehmensbereiche erfolgt mit der infrastrukturellen Umsetzung der Vision eines echtzeitfähigen Abbilds eines Produktionsunternehmens im IoP.

Diese Entwicklungen werden allesamt als technologische Befähiger verstanden, die u. a. Potenziale in Hinblick auf signifikante Steigerungen der Produktivität durch fundamental neue Arten der Wertschöpfung und neue Geschäftsmodelle bieten [8,9]. Die Realisierung dieser Potenziale kann allerdings nur gelingen, wenn in dem Diskurs ebenfalls die Wechselwirkungen mit sozialen Aspekten (d. h. der Mensch und dessen Rolle) beachtet werden [10]. Insbesondere die Problemlösefähigkeit, Spontanität und Expertise des Menschen werden auf absehbare Zeit nicht vollständig durch digitale Technologien ersetzbar sein [12]. Vielmehr noch ist der Mensch die flexibelste und intelligenteste Komponente in Produktionssystemen. Trotz der technologischen Fortschritte wird die menschliche Arbeit ein integraler und unverzichtbarer Bestandteil von Produktion und Wertschöpfung bleiben [13]. Daraus folgt, dass eine ganzheitliche Betrachtung zukünftiger Produktion eine soziotechnische Perspektive erfordert [14].

Im Vordergrund dieser Betrachtung stehen die grundlegenden Veränderungen der Arbeitswelt, die zu einem großen Teil technologieinduziert sind. Die sich daraus ergebenden Konsequenzen für Arbeitsaufgaben und -umfeld umfassen den Wegfall heutiger Tätigkeitsfelder und gleichzeitig die Entstehung gänzlich neuer Tätigkeitsfelder. Allerdings ist noch nicht abzusehen, ob diese veränderten Tätigkeitsfelder bspw. abwechslungsreicher, interessanter oder schwieriger werden als bisher. Beschäftigte werden somit nicht zwangsläufig mehr Kompetenzen bzw. KSAOs (Knowledge, Skills, Abilities, and Other characteristics; dt. Wissen, Fertigkeiten, Fähigkeiten und andere Merkmale) aufweisen müssen, sondern andere als heute [3]. In diesem Zusammenhang stehen grundlegende Gestaltungsfragen der Organisationsstruktur (zentral vs. dezentral) und dem Bild der zukünftigen Arbeit (Nutzer:Innen vs. Bediener:Innen). Neben den technologieinduzierten Anforderungen durch die Umsetzung von Industrie 4.0, steht insbesondere das soziale Teilsystem gesellschaftspolitischen und ökonomischen Herausforderungen gegenüber. Als Beispiele hierfür seien der demographische Wandel, Urbanisierung oder Verschiebungen der globalen Wirtschaftskraft induziert durch entsprechende Handelspolitiken (z. B. Freihandel vs. Protektionismus) genannt [15].

Unternehmen und Beschäftigte sind aufgefordert, sich zu fragen, welche Kompetenzen notwendig sind, um in der zukünftigen Arbeitswelt zu agieren, dauerhaft einer Beschäftigung im industriellen Sektor nachzugehen und damit zur nachhaltigen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft beizutragen. Dieser zukunftsorientierten Frage liegt die Problematik zugrunde, dass jegliche Antworten zum heutigen Zeitpunkt notwendigerweise spekulativ sind. Dennoch können wahrscheinliche Entwicklungen von wesentlichen Faktoren für die zukünftige Beschäftigung in der Produktion mittels der Szenariotechnik erarbeitet, analysiert und für das strategische Management eingesetzt werden [siehe 4]. Als Grundlage der Szenarioentwicklung zum Zukunft der Produktionsarbeit 2030 fungiert das Konstrukt der Industriellen Beschäftigungsfähigkeit, dass nachfolgend kurz erläutert wird.

## 1.2 Industrielle Beschäftigungsfähigkeit

Die Einführung von Industrie 4.0 und des IoP resultieren insgesamt in einer Verschiebung der Tätigkeiten unter verstärkter Einbindung von Daten, die eine ausgeprägte Digital- und Datenkompetenz der Beschäftigten erfordern [siehe 4]. Außerdem wird der Handlungsspielraum höher qualifizierter Produktionsmitarbeitender erweitert, da sie zunehmend eigenverantwortlich agieren und selbst Entscheidungen treffen.

Weder die Definition noch die Prognose industrieller Beschäftigungsfähigkeit sind bisher ausreichend erforscht. Daher wird im laufenden Forschungsprojekt PreModIE (Predictive Model of Industrial Employability, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG) die Frage nach der „Industriellen Beschäftigungsfähigkeit“ und deren gezielte Beeinflussung empirisch untersucht. Das Ziel des Forschungsprojekts ist, ein Modell zur Vorhersage industrieller Beschäftigungsfähigkeit zu entwickeln, welches die Ableitung von Maßnahmen zur Steigerung der Beschäftigungsfähigkeit für Individuen, Organisationen und Politik ermöglicht. Das Modell umfasst, welche Kompetenzen zukünftig notwendig sind, um im industriellen Umfeld eine Beschäftigung zu erlangen und langfristig zu sichern. Industrielle Beschäftigungsfähigkeit wird wie folgt definiert [29,30]:

> *„Industrielle Beschäftigungsfähigkeit stellt eine Reihe von Kenntnissen, Fertigkeiten, Fähigkeiten und anderen Merkmalen dar, die in vier Dimensionen unterteilt werden können: Berufs- und technologisches Fachwissen (1), Anpassungsfähigkeit (2), soziale Fähigkeiten (3) und Selbstmanagement (4). Diese befähigen ein Individuum, eine Beschäftigung im industriellen Sektor zu erlangen und langfristig zu sichern.“*

Die Definitionen der vier Dimensionen sind im Folgenden wiedergegeben [28,30]:

***(1) Berufs- und technologisches Fachwissen*** *umfasst neben berufsspezifischen Fachkenntnissen, sowohl IKT-Kenntnisse (Informations- und Kommunikationstechnologie), inklusive Datenkompetenz, als auch lebenslanges Lernen, um erfolgreich mit sich schnell entwickelnden Technologien umzugehen.*

***(2) Anpassungsfähigkeit*** *enthält die Fähigkeit, sich leicht an Änderungen des internen und externen Arbeitsmarktes anpassen zu können. Diese Dimension beinhaltet Flexibilität und die Kombination von Offenheit, Gewissenhaftigkeit und Adaptionsvermögen im Arbeitsumfeld. Zudem verweist sie auf die Fähigkeit mit gegensätzlichen (An-)Forderungen seitens der Arbeitgebenden oder mit unterschiedlichen Interessen von Arbeitgebenden und Arbeitnehmenden umzugehen.*

***(3) Soziale Fähigkeiten*** *beschreibt das Vermögen, sich sozialkompetent zu verhalten, um mit anderen zu interagieren. Diese Dimension zeichnet sich durch Beteiligung und Leistung in verschiedenen Arbeitsgruppen aus, was soziales Kapital, soziale Fähigkeiten und emotionale Intelligenz voraussetzt.*

***(4) Selbstmanagement*** *beschreibt einen selbstinitiierten, proaktiven Prozess eines Individuums, persönlich auf aktuelle und zukünftige Anforderungen in der Arbeitswelt vorbereitet zu sein. Selbstmanagement umfasst […] Zeitmanagement, kritisches Denken, Kreativität und die Fähigkeit zur Problemlösung*.

Das Konstrukt „Industrielle Beschäftigungsfähigkeit“ bezieht sich auf die Beschäftigungsfähigkeit eines Individuums zum aktuellen Betrachtungszeitpunkt. Die Beschäftigungsfähigkeit ist zunächst unabhängig von spezifischen Unternehmen und basiert auf generellen Kompetenzprofilen für Industrie 4.0. Um aufzuzeigen, welchen Einfluss arbeitgebende Unternehmen, andere individuelle Faktoren und weitere soziopolitische Rahmenbedingungen auf die individuelle Beschäftigungsfähigkeit haben, sind diese Einflussfaktoren bzw. Antezedenten identifiziert und untersucht worden. Das entwickelte Modell

wurde um die Antezedenten der Kategorien „Einflussfaktoren auf Arbeitnehmerseite“, „Einflussfaktoren auf Arbeitgeberseite“ und „Soziopolitische Einflussfaktoren“ ergänzt [30].

Im Jahr 2030 werden sich die Einflussfaktoren auf allen Ebenen erheblich ändern. Krisen wie aktuell die COVID-19 Pandemie beeinflussen diese Faktoren ebenfalls, zumindest kurzfristig. Das IoP wird besonders auf die Arbeitnehmer:Innen- und Arbeitgeber:Innenebenen in produzierenden Unternehmen einwirken. Demnach fragen sich Unternehmen schon heute, (1) wie sie diese Veränderungen gestalten können, (2) welche Auswirkungen sie auf ihren Betrieb haben werden und (3) wie sie sich darauf vorbereiten können.

## 1.3 Szenario der Produktionsarbeit 2030

Um die Veränderungen für Beschäftigte und Unternehmen im Jahr 2030 abzuschätzen, wurde zunächst ein wahrscheinliches Zukunftsbild der Produktionsarbeit mittels der expertenbasierten Szenariotechnik entwickelt. Um mögliche Auswirkungen auf Produktionsunternehmen am Industriestandort Deutschland zu veranschaulichen, wurde das abgeleitete Zukunftsszenario auf die Fallbeispiele der Unternehmen KKS und Henkel übertragen. Mittels der Persona-Methode wurden die notwendigen Kompetenzen der Beschäftigten in 2020 und 2030 anhand prototypischer Beschäftigtenprofile aufgezeigt, um aus dem resultierenden Skill-Gap Handlungsempfehlungen ableiten zu können. Das methodische Vorgehen ist im Detail dem vorangegangenen Beitrag [4] zu entnehmen.

### Vorgehensweise

Für das Szenario der Produktionsarbeit 2030 wurden einige Grundannahmen getroffen, die nachfolgend beschrieben werden. Das IoP als neues Produktionsparadigma ist in deutschen Produktionsunternehmen technisch umgesetzt. Dies bedeutet, dass eine flächendeckende Digitalisierung und Vernetzung der Unternehmensprozesse vorausgesetzt und zumindest in bestimmten Bereichen eine Fokussierung auf datenzentrierte Geschäftsmodelle erfolgt ist. Die Fertigung ist darüber hinaus durch die Vernetzung digitalisierter Produkte und Produktionsmittel auf Basis cyber-physischer Systeme in Echtzeit geprägt [2]. Weiterhin wird angenommen, dass die politische Lage in Deutschland und Europa weitestgehend stabil ist. In diesem Zusammenhang ist es grundsätzlich möglich, dass sich Machtverhältnisse einzelner Parteien verändern und die politische Orientierung der Bevölkerung Schwankungen unterliegt. Ebenso wird angenommen, dass keine Ausnahmezustände herrschen, die z. B. ein Aussetzen der Gewaltenteilung mit sich bringen könnten.

Als inhaltliche Grundlage für die Szenarioentwicklung wurden basierend auf einer PESTEL-Analyse [siehe 4] insgesamt acht Schlüsselfaktoren identifiziert. Von diesen wird angenommen, dass sie einen wesentlichen Einfluss auf die Produktionsarbeit haben. Die Schlüsselfaktoren sind: Arbeitsmarkt, Arbeitsrecht, Arbeitsorganisation/-bedingungen, Bildung, Gesellschaftliches Wertesystem, Gesellschaftsstruktur, Ökologische Nachhaltigkeit, Technologische Disruption. Die Definitionen sind dem Vorgängerbeitrag [4] zu entnehmen.

Für jeden Schlüsselfaktor wurden insgesamt vier mögliche Entwicklungen, sogenannte Zukunftsbündel, ausgearbeitet. Die Entwicklungen basieren auf diametralen Entwicklungsrichtungen: Dezentralisierung vs. Zentralisierung und Individualismus vs. Kollektivismus [siehe 4]. Die Projektionen wurden in einem Online-Umfragetool unabhängig voneinander bewertet. Um eine objektivere Einschätzung zu erhalten, nahmen an der Befragung neben dem Expert:Innenteam, weitere Expert:Innen aus Industrie und Forschung teil. Voraussetzung war, dass diese entweder im produzierenden Gewerbe oder im Be-

reich der produktionstechnischen Forschung (Fokus Organisationsentwicklung in der Industrie 4.0) tätig sind. Die Befragung fand von Dezember 2019 bis Januar 2020 statt. Insgesamt wurden 16 vollständig ausgefüllte Bewertungen erfasst, davon stammen sieben Teilnehmende aus der Industrie und neun Teilnehmende aus der Forschung.

**Szenario der Produktionarbeit 2030 (Prä-COVID-19-Pandemie)**

Das entwickelte Szenario 2030 setzt sich aus den oben genannten Schlüsselfaktoren zusammen und wurde aus den bewerteten Projektionsbündeln abgeleitet. Das Ergebnis ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei den Faktoren Arbeitsmarkt und Ökologische Nachhaltigkeit betrugen die Differenzen der größten Wahrscheinlichkeiten > 1 %, sodass die Bewertungen der Expert:Innen den Ausschlag gegeben haben. Viele Projektionsbündel sind dem Quadranten links oben zuzuordnen. Dieser Quadrant steht für „sinnstiftende Arbeit“, ethische Belange und sieht die Gesellschaft als Gemeinschaft. Demnach sehen die Befragten zukünftig die Bedürfnisse und Anforderungen der Beschäftigten noch stärker in den Fokus gerückt. Die Auswahl der auszuübenden Tätigkeiten bezieht sowohl wirtschaftliche wie auch soziale Aspekte, z. B. die Motivation und Zufriedenheit der Beschäftigten mit ein. Gesellschaftlich wird verstärkt auf das „Miteinander“ geachtet, wodurch nach Ansicht der Befragten zwar weiterhin die Interessen Einzelner Beachtung finden, jedoch weniger auf Kosten der Gemeinschaft. Dieses verstärkte Gemeinschaftsgefühl wird von einem hohen Stellenwert von Umwelt und Nachhaltigkeit begleitet – Entwicklungen die bspw. durch die „Fridays for Future“-Bewegung bereits 2019 eingeleitet wurden.

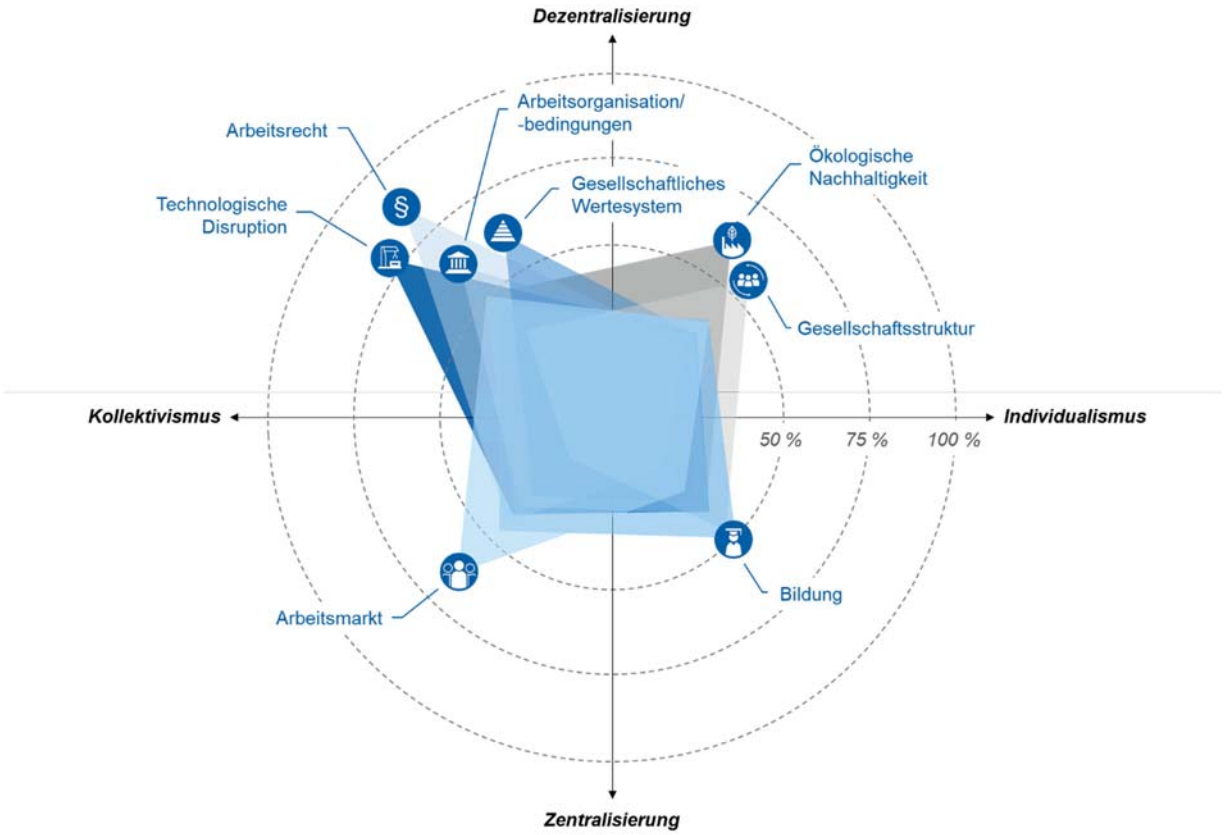



*Abbildung 1 Graphische Darstellung des Szenarios 2030 (anhand der projizierten Ausprägungen der Schlüsselfaktoren), Befragung 2019/20 [4]*

Im entwickelten Szenario 2030 fördern digitale Technologien die Flexibilisierung der Arbeit, die durch einen Vertrauensvorschuss in die Mitarbeitenden ermöglicht wird [60]. Die zunehmende Flexibilisierung der Arbeit ist akzeptiert und eine zeit- und ortsunabhängige

Leistungserbringung wird immer häufiger zur Norm [39]. Konzerne ermöglichen die wachsende Flexibilisierung teilweise durch die Transformation zu Schwarmorganisationen, die sich aus selbstorganisierten Gruppen mit hoher struktureller Offenheit zusammensetzen [38]. „Arbeit“ wird zu einem dynamischen Konzept, in welchem die Grenzen zwischen Arbeit und Freizeit zunehmend verschwimmen [40]. Die Work-Life-Balance wird verbessert, da u. a. Automatisierung belastende Einfacharbeiten übernimmt.

Aktive Gewerkschaften wirken einer möglichen Verschlechterung der Arbeitsbedingungen, entstanden z. B. durch Plattform-Geschäftsmodelle, entgegen und begrenzen die Rationalisierung von Arbeitstätigkeiten durch digitale Technologien [39,61]. Die Politik hat die Gefahr von Plattform-Geschäftsmodellen und wachsender Zeitarbeit erkannt, sodass Regulierungen wie eine Diversitätsquote und verpflichtende Maßnahmen zum Schutz und zur sozialen Absicherung der Beschäftigten etabliert werden [40]. Die Bedeutung des Menschen wird in den Organisationen erkannt und hervorgehoben. Gewerkschaften und Betriebsräten wird eine hohe Relevanz zugesprochen und ihr Einfluss wächst bis in die Geschäftsführung. Gewerkschaften sind in die Personalabteilungen integriert und machen soziale Verantwortung zu einem Kerninhalt ihres Arbeitsbereichs [40].

Die Befragung aus 2019/20 zeigt die Annahme auf, dass im Jahr 2030 große Teile der Produktion automatisiert sein werden. Ebenso schreiten Entwicklungen in der KI-Forschung rasant voran und führen dazu, dass KI-Systeme Menschen in nahezu allen Sinnen (Sehen, Hören, Sprache, allgemeine Kognition) [62], wie in der Verarbeitung großer Datenmengen und der darauf fundierten Entscheidungsfindung überlegen sind [61]. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass KI-Systeme die vollständige Kontrolle übernehmen, da Menschen besonders in unvorhersehbaren Situationen z. B. auf Basis ihrer Erfahrungen schneller reagieren können. Ebenso wird der Mensch weiterhin als letzte Instanz die Verantwortung übernehmen. Somit verändern disruptive Innovationen in der KI und Automatisierung zwar viele Tätigkeitsprofile, eine vollständige Rationalisierung ist aber nicht zu erwarten [63]. Daraus resultiert eine stark gestiegene Anzahl an Tätigkeiten mit Mensch-Maschine-Interaktion. Die Verbreitung von IoT-Geräten führt zu einem Produktivitätszuwachs und steigender Lebensqualität [61].

Der fortschreitende Klimawandel und die wachsende Zustimmung der Bevölkerung zur Bekämpfung globaler Erwärmung führen zu einem Zuwachs an Beschäftigung in „Grünen Jobs“, besonders in den Erneuerbaren Energien [64]. Eine globale, nachhaltige Wohlstandssicherung gewinnt ebenso an Bedeutung [65]. Insbesondere die Industrie treibt nachhaltige Lösungen voran [66]. Aus demselben Grund wird angenommen, dass sich Plattformen zum Management der globalen Energieinfrastruktur durchsetzen.

Nach Annahme der Befragten bestimmt sich die Qualifikation der Beschäftigten nicht mehr (ausschließlich) aus Berufsausbildung oder Universitätsabschluss [40,67], sondern aus individuellen Fähigkeiten und Kenntnissen [40]. Generell kommt es zu einer Polarisierung im Bildungssektor [63,68]. Einerseits finden sich viele hochgebildete Spezialisten z. B. für Forschung und Entwicklung oder umfassend ausgebildete Personen zur Wartung und Instandhaltung der komplexen Produktionsanlagen. Andererseits gibt es weiterhin einige Beschäftigte für Einfacharbeiten, die sich nur schwer automatisieren lassen, z. B. Reinigungskräfte. Durch diese unternehmensspezifischen Berufsbilder kommt es zu einer starken Verbindung von Industrie und Bildungssektor, die gleichsam zu einer Privatisierung des Bildungssektors führen kann [69]. Da sich die Unternehmen ständig weiterentwickeln, ist lebenslanges Lernen auch für Beschäftigte essenziell [65,68,70,71]. Die Unternehmen unterstützen dies u. a. durch Personal Learning Accounts. Dabei hat jeder der Beschäftigten ein jährliches Budget zur persönlichen Weiterbildung [60]. Eine weitere

Möglichkeit zur Mitarbeitendenbildung sind Lernfabriken, welche die komplexen Zusammenhänge in der Produktion anschaulich darstellen [72,73].

Ebenso wie im Bildungssektor erwartet, ist eine Polarisierung der Gesellschaft anzunehmen, wodurch es schwierig wird, die Mittelschicht in ihrer aktuellen Stärke zu erhalten. Der demographische Wandel setzt sich in Deutschland fort; die Gesellschaft wird bis zum Jahr 2030 zunehmend älter [74]. Durch fortlaufende Migration wird die Alterung der Bevölkerung jedoch etwas verlangsamt. Zugleich erhöht sich die Diversität [75].

Die Befragten halten es für wahrscheinlich, dass die gesellschaftlichen Unterschiede zwischen Arm und Reich sich durch im Kollektiv umgesetzte Investitionen verringern [65]. Gleichzeit wird erwartet, dass die Loyalität bei der Wahl der Tätigkeit oder des Arbeitgebenden wieder zunimmt [40]. Eng verwoben ist dies mit dem Wunsch nach „sinnstiftender Arbeit“. Weit verbreitet ist die Sharing-Kultur, die individuellen Besitz vermeidet und bedarfsbezogen Güter und Dienstleistungen zur Verfügung stellt [39]. Obgleich sich viele Aktivitäten auf gemeinsame Ziele und den Erhalt der Gemeinschaft konzentrieren, wird ein Streben nach Individualismus weiterhin angenommen.

**Einfluss der COVID-19-Pandemie auf das Szenario der Produktionarbeit 2030**

Um einen Eindruck über potenzielle Einflüsse durch die COVID-19-Pandemie zu untersuchen und die Ergebnisse aus der Erstbefragung hinsichtlich ihrer Robustheit zu überprüfen, wurde die Befragung zwischen März und April 2021 im selben Personenkreis von 2020 erneut durchgeführt. Wieder konnten 16 Rückläufer verzeichnet werden. Da die Online-Befragung anonym durchgeführt wurde, lässt sich nicht zu 100 % sicher feststellen, ob die ebenfalls 16 Rückläufer von denselben Personen stammen. Aufgrund entsprechender Rückmeldungen steht allerdings fest, dass mind. 2/3 identisch sind, darunter auch die nicht dem WZL-angehörigen Mitglieder der Expert:Innengruppe dieses Beitrags. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass insgesamt nur leichte Veränderungen in der Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeiten aufgetreten sind und die Einschätzungen der ersten Befragung somit als relativ robust zu bewerten sind.

Abbildung 2 zeigt das prognostizierte Szenario 2030 basierend auf der zweiten Befragungsrunde. Bei lediglich zwei Faktoren gibt es veränderte Erwartungen bzgl. der größten Eintrittswahrscheinlichkeiten. Diese sind in der Abbildung orange hervorgehoben.

Beim Faktor Technologische Disruption beträgt die Differenz zu den zweithöchsten Eintrittswahrscheinlichkeiten ca. 5 %. Diese war zudem in Befragungsrunde 1 die Höchstbewertete. Beide Szenarien (in Quadrant 1 und 2) haben gemein, dass ein sehr hoher Einfluss von neuen Technologien und besonders KI erwartet wird. In beiden Befragungsrunden wird eine flächendeckende Integration von KI-Systemen angenommen, die menschliche Leistungen übertrifft [62] und so zu einem Produktivitätszuwachs führen. In der ersten Befragung nahmen allerdings noch mehr Befragte an, dass dies zwar zu veränderten Tätigkeitsprofilen führt, allerdings kein Zuwachs an Arbeitslosigkeit damit einhergeht. Die Ergebnisse der zweiten Befragung zeigen, dass die Befragten einen Zuwachs an Arbeitslosigkeit, also dem ersatzlosen Wegfall von Arbeitsplätzen, mit einer leicht höheren Wahrscheinlichkeit bewerten. Die Differenz beträgt allerdings > 10 %. Aufgrund des Zeitpunkts der zweiten Befragung verwundert das Resultat wenig, da sich Deutschland im Lockdown befand und auch die vorherrschende Kurzarbeit in vielen Branchen als „verzögerter Stellenabbau“ diskutiert wurde.

Der Faktor Gesellschaftliches Wertesystem unterliegt einer noch größeren Veränderung. Hier ist die höchste Eintrittswahrscheinlichkeit vom ersten zum dritten Quadranten gewandert, auf Platz 2 liegt wie in Runde 1 wieder Quadrant 2. Da Quadrant 1 bei diesem

Faktor ein soziales Miteinander mit abnehmender Differenz zwischen Arm und Reich beschreibt und der dritte Quadrant hingegen für Individualismus und stärkerem Eigennutz unter Billigung der Vereinsamung Einzelner steht, ist dies eine deutliche Veränderung der Einschätzung der Befragten. Diese Veränderung könnte ein Resultat der Pandemie sein, da z. B. sogenannten Hamsterkäufe im ersten Lockdown der Pandemie ein Zeichen für Individualismus sind. Ebenso war während der Lockdowns die Vereinsamung Einzelner, besonders bei älteren und/ oder alleinstehenden Menschen, eine sehr präsente Problematik.

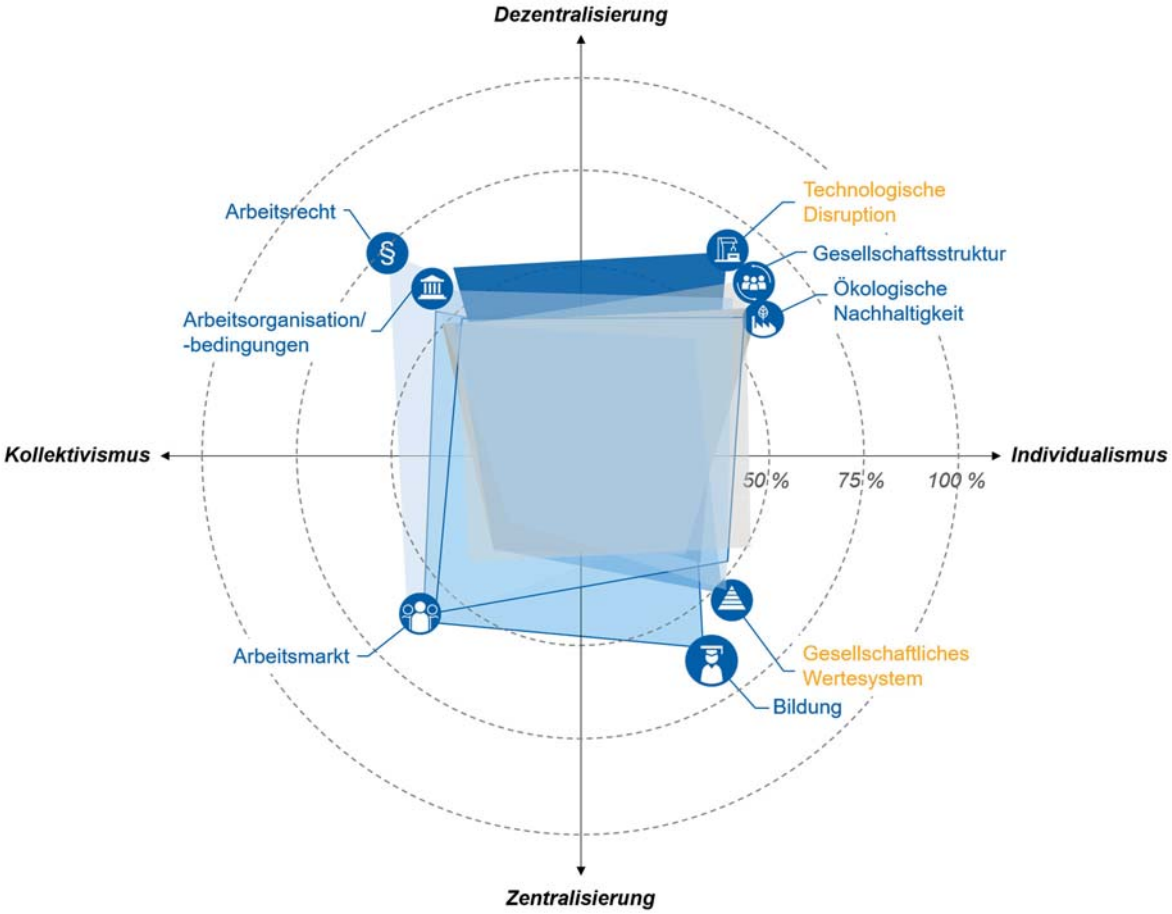



*Abbildung 2 Graphische Darstellung des Szenarios 2030 (anhand der projizierten Ausprägungen der Schlüsselfaktoren), Befragung 2021*

Bei Betrachtung der Einzelwerte und nicht nur der größten Ausprägungen sind in einigen Bereichen neben einer stärkeren Tendenz zum Individualismus auch eine Tendenz hin zur Zentralisierung erkennbar, d. h. große, etablierte Unternehmen und staatliche Institutionen nehmen Einfluss auf viele verschiedene Bereiche und das Gemeinwohl verliert an Bedeutung. Neue Geschäftsmodelle werden z. B. durch den Aufkauf von Startups abgedeckt. Erklärungen für diesen Shift lassen sich einerseits durch die in der Pandemie sehr präsenten Machtpositionen der Regierungen finden. Andererseits verzeichnen viele Großkonzerne auch in der Krise deutliche Gewinne, während kleinere Unternehmen und Startups wesentlich weniger resilient erscheinen. Dies zeigt sich ebenso in den Schlüsselfaktoren Gesellschaftsstruktur und Gesellschaftliches Wertesystem. Dort ist die Ausprägung von Dezentralisierung und Tendenz zu Kollektivismus umgeschwenkt zu Zentralisierung und Individualisierung. Die Wahrscheinlichkeit einer zunehmenden Separierung von Arm und Reich ist deutlich größer geworden. Dies liegt auch an der Annahme, dass Jobs mit mittlerem Anforderungsniveau obsolet werden [63].

Trotz der großen Auswirkungen der Pandemie auf den Bildungsbereich zeigen die Ergebnisse der zweiten Befragung weniger große Veränderungen als vermutet. Informelle Bildungsprogramme werden als nur leicht wahrscheinlicher eingestuft. Digitale Lehr- und Lernmethoden ermöglichen ein eigenverantwortliches, personalisiertes, ortsunabhängiges Lernen. Zum Zeitpunkt der ersten Befragung waren besonders im schulischen und universitären Bildungssystem digitale Angebote eher selten. Durch die Pandemie waren die Institutionen gezwungen, zu handeln und entsprechende Angebote umzusetzen.

Auch bei den weiteren Faktoren lassen sich keine signifikanten Unterschiede zur ersten Befragung erkennen. Vielmehr hat sich das Szenario von der ersten Runde als noch wahrscheinlicher herauskristallisiert. Die Ergebnisse der Befragung spiegeln wider, dass Bewegungen wie „Fridays for Future“ weniger präsent sind: Die Szenarien, die ein hohes Bewusstsein seitens der Politik und weiterer Akteure zur Erreichung von Klimazielen erfordern, wurden als deutlich weniger wahrscheinlich eingestuft. Insgesamt wird der Industrie bspw. durch die Entwicklung von Energiemanagementplattformen weiterhin die Rolle des Haupttreibers zugesprochen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Kernergebnisse der ersten Umfrage weitestgehend äquivalent zur zweiten Befragung sind. Die Änderungen in den Faktoren Technologische Disruption und Gesellschaftliches Wertesystem resultieren mit hoher Wahrscheinlichkeit aus der zum Befragungszeitraum instabilen Lage beeinflusst durch die anhaltende Pandemie, sodass in den Szenario- und Personabeschreibungen der beiden Unternehmen Henkel und KKS keine weitere Adaption erfolgte.

# 2 Beschäftigungsfähigkeit im Zukunftsszenario

Zur Darstellung der Auswirkungen des entwickelten Zukunftsszenarios auf die Unternehmen KKS und Henkel und um aufzuzeigen, wie Unternehmen sich strategisch darauf vorbereiten können, wurde die Methodik der Persona-Entwicklung angewandt [siehe 4]. Zunächst wurden für das Jahr 2020 repräsentative Personas erarbeitet. Diese vereinen für die jeweiligen Tätigkeitsprofile relevante Kompetenzen zum aktuellen Zeitpunkt. Danach werden dieselben Personas und deren Arbeitsalltag zehn Jahre später betrachtet. Basierend auf dem Szenario 2030 wurden exemplarische Tätigkeiten in den beiden Unternehmen vorgestellt, aus denen idealtypische Kompetenzprofile abgeleitet werden. Die schon bestehenden Personas wurden im Expert:Innenteam hinsichtlich der leichten Veränderungen in der zweiten Befragung diskutiert. Da die größeren Veränderungen jedoch keinen unmittelbaren Einfluss auf die Arbeiten auf Shopfloorebene haben, wurden die Personas 2030 nicht angepasst.

Die Beschreibungen der Szenarien 2030 in den Unternehmen KKS und Henkel sind rein fiktiv und spiegeln nicht notwendigerweise fixe Unternehmensziele wider. Die detaillierten Personabeschreibungen sind dem vorangegangenen Beitrag [4] zu entnehmen.

## 2.1 Fallbeispiel 1: KOSTAL Kontakt Systeme GmbH

### Ein internationales Familienunternehmen

Die KOSTAL Kontakt Systeme GmbH wurde 2004 als unabhängiges Unternehmen innerhalb der seit 1912 bestehenden KOSTAL-Gruppe, welche als international agierendes Familienunternehmen alle weltweit führenden Automobilunternehmen zu seiner Kundschaft zählt, gegründet. Das Kerngeschäft ist die Entwicklung, Produktion und der Vertrieb von Steckverbindersystemen für die Automobilindustrie. KKS ist an neun Standorten in acht Ländern mit über 1.400 Beschäftigten präsent. Der Hauptsitz liegt in Lüdenscheid

im Sauerland in Nordrhein-Westfalen. Aktuell bildet die gesamte KOSTAL-Gruppe in acht Berufen aus. [76]

**Beschäftigung in der Produktion**

*Marco Marcovic 2020*

Die Persona Marco Marcovic arbeitet seit der Ausbildung als Stanz- und Umformmechaniker am Standort Lüdenscheid. Nach dem Realschulabschluss hat der 34-Jährige seine dreijährige Ausbildung gemäß IHK-Vorgaben bei der Firma KKS begonnen. Während seiner Ausbildung wurde Herr Marcovic gut auf die ganzheitliche Bedienung, Steuerung und Einrichtung der Stanzmaschinen vorbereitet. Er arbeitet im Schichtbetrieb. Seine Tätigkeiten bestehen aus ca. zwei Drittel manueller Arbeit.

Neben seiner mehrjährigen Erfahrung sind seine selbstständige und sorgfältige Arbeitsweise Grundvoraussetzung für den Beruf, sodass er selbstständig Prozessabläufe optimieren und regelmäßige Prüfungen an Produkten und Materialien durchführen und dokumentieren kann. In den letzten Jahren hat sich der Elektrik-Anteil in den Anlagen sukzessive erhöht. Daher hat Herr Marcovic bereits einen Elektronik-Grundkurs absolviert, in dem ihm das für seine Tätigkeiten notwendige Grundwissen vermittelt wurde. Sofern jedoch Störungen mit Bezug zur Elektronik auftreten, ist er auf die Teamfähigkeit in der Belegschaft angewiesen. Bei Fehlern mit Elektronikkomponenten hat er keine Handlungsbefugnis und benötigt die Unterstützung seiner Kolleg:Innen mit Elektriker-Ausbildung. Als Arbeitshilfsmittel stehen traditionelle Geräte (z. B. Desktop-PC) und klassische Werkzeuge zur Verfügung. Die Kommunikation findet vorwiegend persönlich statt.

*Marco Marcovic 2030*

Im Jahr 2030 ist Marco Marcovic weiterhin in der Stanzerei bei KKS tätig. Herr Marcovic hat eine Weiterbildung zum Techniker absolviert sowie einen Ausbilderschein erworben. Die neusten Anlagen sind hinsichtlich ihrer Steuerungstechnik und Elektrik deutlich komplexer als die älteren Anlagen. Zusätzlich verfügen diese auch über das neuste Kamerasystem zur Qualitätsüberwachung. Herr Marcovic orchestriert mehrere Anlagen parallel. Über sein Tablet hat er immer die wichtigsten Maschinenparameter im Blick. Die Predictive Maintenance Anwendung läuft sehr stabil, sodass er Instandhaltungsarbeiten an verschiedenen Systemen meist in seine Frühschicht legt.

Rüstprozesse und Reinigungsarbeiten werden nicht mehr von Stanz- und Umformmechatronikern erledigt, sondern von Anlagenbedienern und Einrichtern. Die Robustheit und Autonomie der Anlagen sowie das Wegfallen von Rüst- und Reinigungsprozessen erlaubt es, die Anlagen flexibel mobil zu orchestrieren. Herr Marcovic nutzt dies besonders in der Nachtschicht. Tritt ein Störfall auf, entscheidet er selbstständig, welche Maßnahmen ergriffen werden. Kleinere Auffälligkeiten lassen sich oft aus der Fernwartung beheben. Bei unerwartet komplexeren Problemen kontaktiert Herr Marcovic seine Teamkolleg:Innen in der Produktion vor Ort. Diese ermöglichen ihm mittels Augmented Reality (AR) einen Blick auf die Anlage zu werfen und gemeinsam mit Kolleg:Innen vor Ort die meisten Fehler zu beheben. Die mobile Arbeit ist in der Produktion so geregelt, dass die Beschäftigten innerhalb kürzerer Zeit notfalls auch zum Standort kommen können. Bei größeren Problemen beheben Herr Marcovic und weitere Spezialist:Innen diese gemeinsam vor Ort.

*Kompetenzen 2030 und Maßnahmen zur Befähigung der Beschäftigten*

Die Stellenbezeichnung wird 2030 eher „Stanz- und Umformmechatroniker“ lauten. Dies begründet sich maßgeblich durch die komplexeren Anlagen, die mit vielen Elektronikkomponenten ausgestattet sind. Um die Anforderungen zu erfüllen, sind ergänzend zum Status quo 2020 folgende Kompetenzen erforderlich: Berufsspezifische und technologi-

sche Kenntnisse in den Bereichen Steuerungstechnik, Elektrik > 220V, Optik und Pneumatik, sichere Bedienung der Anlagensoftware, hohes Sicherheits-/ Qualitäts-/ Umweltbewusstsein, Flexibilität, eigenständige Arbeitsweise, hohe Entscheidungsfähigkeit, Priorisierung von Aufgaben, Problemlösefähigkeiten, Teamfähigkeit, Kommunikationsfähigkeit, Wissensvermittlung, und das Anleiten von Kolleg:Innen.

Diese und weitere Rollen bzw. Kompetenzprofile wurden von KKS in einem für das gesamte Unternehmen entwickelten „Kompetenz-Baukasten“ definiert. Die Führungsverantwortlichen aller Bereiche, sowohl operativ als auch administrativ, haben zunächst als Zwischenschritt für das Jahr 2025 gemeinsame Ziele festgelegt und daraus abgeleitet, welche Kompetenzen bspw. im Bereich Stanzen zukünftig erforderlich sein werden. Nachdem die zukünftigen Rollen festgelegt sind, können Beschäftigte wie Herr Marcovic über verschiedene Maßnahmen für ihre Aufgaben 2030 befähigt werden. Zunächst wird es erforderlich sein, technologische und berufsspezifische Kenntnisse (Elektronik, Steuerungstechnik, Optik) zu vermitteln. Dies kann über Weiterbildungsmaßnahmen außer Haus oder zunehmend auch über e-Learning-Angebote erfolgen. Auch die IHK-Ausbildung in diesem Bereich müsste angepasst und flexibilisiert werden. Unternehmen sollten zusätzlich zu einer standardisierten Grundausbildung weitere Vertiefungsmodule für ihre Auszubildenden, z. B. im Bereich Elektronik oder Pneumatik, wählen können. Von jüngeren Beschäftigten wird erwartet, dass diesen der Umgang mit Tablets und Smart Glasses leichter fällt. Daher könnten ältere Beschäftigte über ein Tandem-Modell in die sichere Bedienung neuer Technologien durch jüngere Kolleg:Innen eingeführt werden, während diese Prozesswissen vermittelt bekommen.

Abbildung 3 stellt die Persona 2020 und 2030 für KKS zusammenfassend gegenüber:

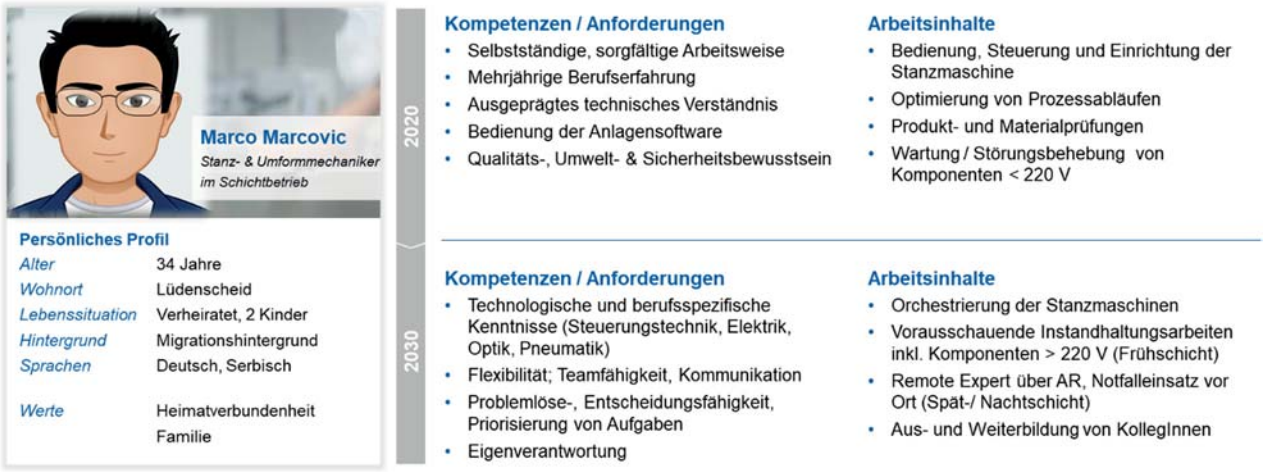



*Abbildung 3 Persona KOSTAL Kontakt Systeme – 2020 vs. 2030 [4]*

## 2.2 Fallbeispiel 2: Henkel AG & Co. KGaA

### Unternehmensbereich Laundry & Home Care – Weltweiter Marktführer für Wasch- und Reinigungsmittel

Die Konzernzentrale und auch der global zweitgrößte Produktionsstandort der Henkel AG & Co. KGaA liegen im nordrhein-westfälischen Düsseldorf. Hier arbeiten ca. 5.800 Beschäftigte aus mehr als 70 Nationen. Henkel bildet in Düsseldorf in 18 Berufen aus. Die Fläche des Werksgeländes umfasst 1,4 km². [77]

**Beschäftigung in der Produktion**

*Arthur Schäfer 2020*

Die Persona Arthur Schäfer arbeitet seit 15 Jahren bei der Fima Henkel am Standort Düsseldorf als Linientechniker im Bereich Pressen, in dem u. a. Spülmaschinentabs der Marke Somat hergestellt werden. Nach dem Realschulabschluss hat der heute 43-Jährige seine Ausbildung im technischen Bereich in einem mittelständischen Betrieb in Hessen absolviert und dort einige Jahre gearbeitet.

Bei seiner Arbeit benötigt Herr Schäfer bislang wenige neuere Technologien. Die Kommunikation findet vorwiegend persönlich oder mit dem Festnetztelefon statt. Seit ein paar Monaten wird als neues Kommunikationsmedium die Videotelefonie mit Skype getestet. Seine Hauptaufgaben bestehen darin, einen einwandfreien Produktionsablauf der zugeordneten Anlage sicherzustellen. Dies umfasst insbesondere auch regelmäßige Instandhaltungsmaßnahmen und die Behebung von Störungen. Dazu sind zunehmend Kompetenzen zur eigenständigen Problempriorisierung gefragt. Zur Ausführung dieser Tätigkeiten genügen klassische Werkzeuge und ein PC, mit dessen Hilfe die Daten zur Online-Effizienz-Dokumentation erfasst werden. Arthur Schäfer arbeitet in einem teilkontinuierlichen Wechselschichtsystem; fünf Tage pro Woche, jeweils eine Woche Früh-, Spät- oder Nachtschicht. Zusätzlich zu seinen Kernaufgaben führt er Flurförderfahrzeuge und ist auch für die Reinigung seiner Anlagen zuständig. Wie seine Kolleg:Innen, notiert Herr Schäfer auf dem analogen Shopfloorboard regelmäßig nach Schichtende festgelegte Kennzahlen wie die Ausschussquote. Zusätzlich hat er die Möglichkeit, Auffälligkeiten oder Verbesserungsvorschläge aufzuschreiben, die von den Vorgesetzten bearbeitet und entsprechend gekennzeichnet werden. In den nächsten zwei Jahren strebt er eine Weiterbildung als Schichtleiter an.

*Arthur Schäfer 2030*

Arthur Schäfer ist im Jahr 2030 weiterhin bei Henkel im Bereich Pressen tätig. Als Teilbereichsverantwortlicher hat er mehr Verantwortung übernommen. Er überwacht mehrere, unterschiedliche Anlagen in seinem Produktionsabschnitt. In seinen Verantwortungsbereich fällt auch die Schichtplanung und Koordination seiner Kolleg:Innen. Um seine Aufgaben zu erfüllen, muss er stets einen guten Überblick über wichtige Kennzahlen und den Produktionsprozess haben. Dies erlaubt ihm, in seinem Verantwortungsbereich Entscheidungen selbstständig zu treffen. Durch seine Methoden- und Digitalkompetenz kann er sich selbst Informationen beschaffen, diese bewerten und interpretieren, sodass er auch kleinere Verbesserungsmaßnahmen eigenständig mit seinem Team umsetzt. Da er für mehrere Anlagentypen verantwortlich ist, hat er sich breites Wissen über die Funktionsweise und technischen Spezifikationen der einzelnen Typen aufgebaut, sodass er häufiger auftretende Probleme selbst lösen kann. Bei spezifischen Fragestellungen und Entscheidungen, die seinen Verantwortungsbereich überschreiten, kann er sich an eines der global verteilten Kompetenzzentren wenden. Dort sitzen Expert:Innen, welche die Beschäftigten an den verschiedenen Standorten in komplexeren Sachverhalten unterstützen. So kann Herr Schäfer bei komplexen Störungen an seinen Anlagen Unterstützung von Kolleg:Innen aus den Kompetenzzentren anfragen. Während seiner Tätigkeit achtet er darauf, Energieressourcen zu schonen. Ebenso hat sich auch ein Teil der Rohstoffe geändert, um die Produkte mitsamt der Verpackung möglichst nachhaltig zu gestalten.

*Kompetenzen 2030 und Maßnahmen zur Befähigung der Beschäftigten*

Um die Anforderungen zu erfüllen, die sich aus dem dargestellten Tätigkeitsprofil ergeben, werden 2030 folgende Kompetenzen wichtig: Ganzheitliches Verständnis über den Produktionsprozess, Kenntnisse über die Funktionsweise der Anlagen, Methodenkompetenz, Technologievertrauen und sichere Nutzung, hohes Sicherheits-/ Qualitäts-/ Umweltbewusstsein, eigenständige Arbeitsweise, hohe Entscheidungsfähigkeit, Priorisierung von Aufgaben, Teamfähigkeit, und Kommunikationsfähigkeit.

Durch die Initiative „Digital Upskilling“ [78], welche Anfang 2019 konzernweit gestartet worden ist, befähigt Henkel die Beschäftigten für die Arbeit der Zukunft. Als agiles Trainingsprogramm wird es sukzessive mit den Projektteams aus verschiedenen Bereichen entwickelt. Diese Vorgehensweise erlaubt es, Inhalte, Kompetenzen, Technologie und Kultur parallel zu fokussieren [79].

Abbildung 4 stellt die Persona 2020 und 2030 für Henkel zusammenfassend gegenüber:

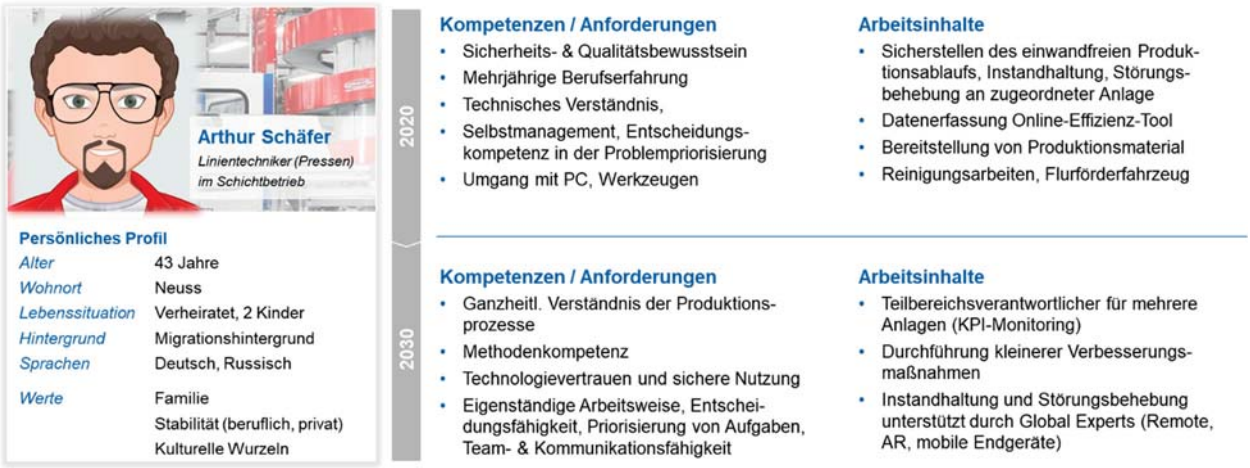



*Abbildung 4 Persona Henkel – 2020 vs. 2030 [4]*

## 2.3 Implikationen für die zukünftige Beschäftigungsfähigkeit

Zusammengefasst lassen sich aus Sicht des Expert:Innenteams am Beispiel der beiden Unternehmen die Kompetenzprofile der Beschäftigten zukünftig in zwei Kategorien unterteilen: In Abhängigkeit des Tätigkeitsprofils und der zu erledigenden Aufgaben ist es wahrscheinlich, dass sich (1) generalistische und (2) spezialisierte Kompetenzprofile herausbilden.

Generalistisch geprägte Profile auf Shopfloorebene zeichnen sich durch ein ganzheitliches Prozessverständnis aus. Besondes Methodenkompetenzen im Bereich des Selbstmanagements werden hier an Relevanz gewinnen. Da die Beschäftigten in diesen Bereichen bei spezifischen Problemstellungen Unterstützung durch Expert:Innen erhalten, sind sie eher in der Lage, wechselnde Aufgaben zu übernehmen, z. B. häufiger den Arbeitsplatz zu wechseln und andere Anlagentypen zu bedienen. Dies setzt ein hohes Maß an Anpassungsfähigkeit voraus. Gleichzeit müssen Generalisten in der Lage sein, sich auch gut anleiten zu lassen. Dies erfordert Flexibilität, Kommunikationsfähigkeit und soziale Kompetenz im Umgang mit Vorgesetzen und Kolleg:Innen. Besonders wenn auf globale Netzwerke zurückgegriffen wird, aber auch im Umgang mit zunehmender Diversität in deutschen Unternehmen, ist interkulturelle Kompetenz gleichsam bedeutend.

Die Gruppe der Spezialisten wiederum ist geprägt durch tieferes Technikverständnis. Durch die wachsende Komplexität der Fertigungsanlagen werden interdisziplinäre Kenntnisse zunehmend wichtiger. Für Spezialisten werden so zunehmend Kenntnisse über Elektrik oder allgemeine physikalische Zusammenhänge wichtiger, um ein ganzheitliches

Verständnis über Prozesse zu entwickeln und auch im Störfall optimal agieren zu können. Da die Anforderungen im Bereich naturwissenschaftlicher Grundkenntnisse hier bereits zu Beginn der Ausbildung hoch sind, wird angenommen, dass zukünftig das (Fach-)Abitur Voraussetzung für diese Berufe sein wird.

Für beide Gruppen gilt, dass sich die Anforderungen in Bezug auf technologische Fachkenntnisse erhöhen. Im IoP müssen auch Beschäftigte auf Shopfloorebene grundsätzliche Zusammenhänge aus Daten erkennen können. Im Bereich der Generalisten wird angenommen, dass die Daten bereits soweit aufbereitet sind, sodass direkte Handlungsempfehlungen ausgegeben werden. Da aber in diesem Kontext mit Wahrscheinlichkeiten gerechnet wird, die mit Unsicherheiten einhergehen, obliegt es den Beschäftigten auch hier kritisch hinterfragen zu können, ob diese Empfehlungen ohne Einschränkungen umsetzbar sind. Treten daher, basierend auf einem übergreifenden Prozessverständnis und einem Grundverständnis über die Arbeitsweise der Entscheidungsassistenzsysteme, Zweifel auf, können zur weiteren Interpretation der Empfehlungen Expert:Innen aus übergeordneten Kompetenzzentren herangezogen werden.

Im Bereich der Spezialisten und Spezialistinnen ist es wahrscheinlicher, dass diese keine direkten Handlungsempfehlungen angezeigt bekommen. Sie nehmen im Rahmenmodell des IoP die Rolle der sog. *Smart Experts* ein. Diese lassen sich wie folgt definieren [4]:

> ***Smart Experts*** *sind Spezialisten und Spezialistinnen, die in produzierenden Unternehmen arbeiten, die das Konzept des Internet of Production (IoP) – zumindest zum Teil – umgesetzt haben. Sie verfügen über vertieftes technisches Wissen über ihr spezifisches Aufgabengebiet sowie Basiswissen über die Grundlagen des IoP. Komplettiert wird das Profil der Smart Experts über fundierte Methodenkompetenzen, insbesondere im Bereich Digital- und Datenkompetenz, die es ihnen erlauben, basierend auf den Daten des IoP, selbstständig Entscheidungen zu treffen und diese über verschiedene Kommunikationswege an Kolleg:Innen weiterzugeben.*

Basierend auf ihrem Technikverständnis sind die Smart Experts in der Lage, selbständig Zusammenhänge ableiten zu können, sodass sie z. B. die Prozessdaten einer Anlage analysieren und interpretieren können. In Kombination mit einem hohen Grad an Problemlösefähigkeit sind sie somit befähigt, selbst Änderungen im Prozess vorzunehmen oder aber die gewonnenen Erkenntnisse an Kolleg:Innen in Form von klaren Anweisungen weiterzugeben. Dazu müssen sie im IoP mit entsprechender Software und verschiedenen Endgeräten, z. B. den Umgang mit Smart Glasses oder Tablets in Verbindung mit Software wie *oculavis Share*, die den Remote Support unterstützt, sicher umgehen können. Auf der Shopfloorebene ist davon auszugehen, dass sich die Analysen auf grundlegende Statistik beschränken, die bereits heute schon auf dieser Ebene Verwendung findet. Komplexere Untersuchungen werden von Datenanalysten durchgeführt.

Allgemein wird bei beiden Profilen eine hohe Technologieakzeptanz essentiell sein. Handlungsempfehlungen können durch KI etwa auf mobilen Endgeräten, z. B. Tablets oder Smart Glasses, ausgegeben werden, weswegen eine hohe Akzeptanz und ein sicherer Umgang mit diesen Technologien essentiell ist. Zudem ist es wahrscheinlich, dass durch die zunehmende Komplexität der Fertigungsanlagen ein größer werdender Anteil der Qualifizierung in den Unternehmen selbst stattfinden muss. Werden heute die Auszubildenden in den ersten sechs Monaten vorwiegend in Berufsschulen ausgebildet, so wird die Qualifizierung innerhalb der Unternehmen früher erwartet. Allgemein wird erwartet, dass in der initialen Vermittlung der Grundlagen, neben Themen wie Organisation und Rollenverteilung in produzierenden Unternehmen, ein stärkerer Fokus auf Daten und Statistik gelegt wird, z. B. welche Typen von Fertigungsdaten und welche Analyseformen

gibt es und wie mit Unsicherheiten umgegangen werden kann. Eine weitere Kernkompetenz, die bereits im Jahre 2020 wichtig ist, ist das lebenslange Lernen. Als Grundlage für die kontinuierliche Weiterbildung gilt die innere Einstellung, sich Veränderungen nicht nur anpassen zu können, sondern diesen offen gegenüberzustehen, um Innovationen im Unternehmen mitumzusetzen und so zur nachhaltigen Wettbewerbsfähigkeit beizutragen.

Die in den Use Cases KKS und Henkel als besonders relevant identifizierten Kompetenzen bzw. KSAOs sind nachfolgend entsprechend des in Kap. 1.2 eingeführten theoretischen Modells zur Industriellen Beschäftigungsfähigkeit hervorgehoben [4]:

**(1) Berufs- und technologisches Fachwissen:** Lebenslanges Lernen, Technologieakzeptanz, IKT-Kompetenz, technisches Grundverständnis, ganzheitliches Prozessverständnis, grundlegende Datenkompetenz.

**(2) Anpassungsfähigkeit:** Flexibilität, Offenheit, Adaptionsvermögen, Lernbereitschaft.

**(3) Soziale Fähigkeiten:** Teamfähigkeit, Kommunikationskompetenz, kulturelle Kompetenz.

**(4) Selbstmanagement:** Eigenverantwortung, selbständiges Arbeiten, Zeitmanagement, Problemlösefähigkeit, Entscheidungsfähigkeit, kritisches Denken.

Als Implikation für die zukünftige Beschäftigungsfähigkeit lässt sich festhalten, dass innerhalb eines Unternehmens beide Profile relevant sein werden. Wie die Anteile gewichtet sein müssen, ist für jedes Unternehmen individuell festzulegen, da die Anforderungen abhängig von Produkten, Produktionsprozessen, Organisationsstruktur etc. sind. Ebenso individuell können Strategien zum nachhaltigen Kompetenzaufbau sein. In den folgenden Kapiteln werden erfolgsversprechende Ansätze vorgestellt.

## 3 Strategische Handlungsempfehlungen

Ausgehend von dem entwickelten Szenario 2030 und den aufgeführten Fallbeispielen lassen sich strategische Handlungsempfehlungen für eine langfristig erfolgreiche Beschäftigungsfähigkeit formulieren.

**Soziopolitische Faktoren: Übergreifende Empfehlungen für den Industriestandort Deutschland**

Auf der Ebene soziopolitischer Faktoren wird zunächst aus gesellschaftlicher und politischer Perspektive betrachtet, wie sich die Industrielle Beschäftigungsfähigkeit der erwerbsfähigen Bevölkerung z. B. über Gesetzgebungen oder Bildungsstandards sicherstellen und gezielt fördern lässt. Politik und Gesellschaft haben die gemeinsame Aufgabe, lebenslanges Lernen als eine kontinuierliche Befähigung und Weiterbildung zu ermöglichen, anstatt Bildung statisch auf die ersten Lebensphasen zu legen [80]. Eine Hauptaufgabe wird die Befähigung der erwerbsfähigen Bevölkerung sein, die Potenziale der Digitalisierung souverän handzuhaben [80]. Dies lässt sich unter dem Begriff „Digitalkompetenz“ zusammenfassen. Diese wird verstanden als Fähigkeit zum kompetenten Umgang mit digitalen Technologien, zum eigenständigen und verantwortungsvollen Handeln in der digitalisierten Lebenswelt sowie als gesellschaftlich relevante Kulturtechnik [81].

Zur Förderung der Digitalkompetenz ist 2019 der DigitalPakt Schule bundesweit gestartet. Dieser stellt die rechtlichen Rahmenbedingungen und finanziellen Ressourcen zur Verfügung [82]. Die finanziellen Mittel erlauben es, Schulen technisch auszustatten und in der Erstellung eines zukunftsweisenden Medienkonzepts zu unterstützen. Für die Digitalisierung des Schulsystems wirkte die Pandemie wie ein Beschleuniger, da aufgrund des

verordneten Homeschoolings schnell Infrastrukturen geschaffen werden mussten. Obwohl dies häufig nicht immer reibungslos funktioniert hat, so haben die Erfahrungen im Distanzlehren und –lernen weitere wichtige Einblicke bezüglich der Zukunft des Bildungsbereichs erbracht. Es ist z. B. deutlich geworden, wie wichtig eine professionelle Vermittlung von Medien- und Digitalkompetenzen ist. Um dies zu gewährleisten, ist es unumgänglich, die Lehrkräfte im Informatikbereich weiterzubilden [83]. Das ist aktuell nicht der Fall. Für die Umsetzung sind maßgeblich die Länder verantwortlich, z. B. Infrastrukturen zu schaffen, adaptierte Lehrinhalte und Lernziele in Lehrplänen umzusetzen und die Lehrkräfte fortzubilden [80]. Für die Zukunft könnte diskutiert werden, die Lehrinhalte bundesweit zu standardisieren.

Die Ausbildung der Digitalkompetenz beginnt spätestens im Grundschulalter. Bereits dann sollten Schüler:Innen an den kompetenten Umgang mit digitalen Medien und den Auswirkungen auf verschiedene Lebensbereiche herangeführt werden. In der Sekundarstufe ist es notwendig, das technische Grundverständnis zu lehren [80]. Wichtig sind z. B. die Vermittlung grundlegender Statistik als Basis von komplexeren Algorithmen und erster Programmierkenntnisse, sodass Schüler:Innen in die Lage versetzt werden, die Mechanismen hinter digitalen Angeboten nachzuvollziehen und kritisch zu hinterfragen. Zusätzlich ist es zukünftig wichtig, verstärkt naturwissenschaftliche und technische Grundlagen zu vermitteln, da diese die Basis zum Verständnis vieler Fertigungsprozesse darstellt.

Die Vermittlung der Digitalkompetenz setzt sich in der weiterführenden Ausbildung fort. Universitäten werden ebenso wie Schulen die Infrastruktur zur Digitalisierung in der Lehre anpassen müssen [83]. Auch hier hat die Pandemie die Entwicklungen erheblich vorangetrieben. E-Learning, Onlinekurse und sogar Online-Prüfungen sind seit dem Sommersemester 2020 zu einem festen Bestandteil deutscher Hochschulen geworden. Nichtsdestotrotz ist es weiterhin erforderlich, neben der Infrastruktur auch die Inhalte der universitären Lehre zu reformieren. Initiativen wie das Förderprogramms Data Literacy Education.nrw unterstützen u. a. die RWTH Aachen im Projekt data.RWTH seit Januar 2020 darin, Studierende aller Fakultäten Datenkompetenzen, z. B. in der Analyse und Interpretation großer Datenmengen, zu vermitteln.

Im Bereich der beruflichen Ausbildung wird ebenfalls eine Anpassung der Inhalte und genutzten Medien erforderlich. Besonders in den produktionstechnischen Ausbildungsberufen wird eine umfassende Anpassung der Inhalte, aufgrund der Änderungen durch Industrie 4.0 notwendig sein. Dazu sollten die aktuell sehr starren Ausbildungsrichtlinien flexibilisiert werden. Neben notwendigen Grundlagen, die weiterhin verpflichtend für alle Auszubildenden eines Berufszweigs sein müssen, könnte eine Auswahl zusätzlicher modularisierter Inhalte angeboten werden. Diese sollten von den Ausbildungsbetrieben ausgewählt und mit entsprechendem Praxisanteil in den Unternehmen vermittelt werden. Zugleich ist zu empfehlen, während der Ausbildung einen früheren Kontakt mit der praktischen Arbeit in der Produktion zu realisieren, um die Auszubildenden zu motivieren und das theoretisch Gelehrte durch praktische Beispiele vor Ort zu manifestieren.

Eine konkrete Maßnahme in diesem Bereich, in der die verschiedenen Institutionen zur beruflichen Aus- und Weiterbildung unterstützt werden, ist das im Oktober 2018 gestartete Projekt NRWgoes.digital. Die landesweite Qualifizierungsoffensive zur Digitalisierung im dualen Ausbildungssystem befähigt Ausbildungspersonal aus den Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus, Lehrkräfte der technisch-gewerblichen Berufskollegs und Auszubildende im Maschinenbau zur zukünftigen Arbeit in Industrie 4.0 [84]. Die Qualifizierungen werden in drei Bausteinen umgesetzt. In der ersten Fortbildungsoffensive für Lehrkräfte und Ausbildungspersonal werden ganzheitliche und interdisziplinäre

Kompetenzen, u. a. zur Smart Maintenance oder der Umgang mit Big Data und IT Security, an die Multiplikatoren vermittelt, um ihnen den Prozess und die Teilprozesse entlang der Wertschöpfungskette eines Produktionsnetzwerks der Smart Factory zu verdeutlichen. Der zweite Baustein besteht in der Entwicklung der neuen Lernmaterialien. Im Mobile Learning System werden für die Multiplikatoren Schulungsmaterialien mit dem Fokus auf eine hohe Fachlichkeit und für die Auszubildenden didaktisch aufbereitete Arbeitsmaterialen mit dem Fokus auf konsequente Handlungsorientierung zur Verfügung gestellt. Der dritte Baustein ist die Zusatzqualifikation „Digitale Fertigungsprozesse", die zukünftig an den Berufskollegs in NRW angeboten wird. Mit der Zusatzqualifikation wird den Auszubildenden die Möglichkeit gegeben, sich entlang der Wertschöpfungskette die Prozesse einer Smart Factory zu erarbeiten und sich damit Fachwissen für die zukünftigen Veränderungen im Sinne der Industrie 4.0 anzueignen. Neben den klassischen Präsenzveranstaltungen werden neue und innovative Lehr- und Lernformen angewendet, z. B. durch Einbindung von digitalen Medien, orts- und zeitungebundenen Projektarbeiten und Webinaren [84].

Abschließend lässt sich weiterhin festhalten, dass es sowohl an Universitäten als auch in der beruflichen Aus- und Weiterbildung erforderlich ist, gezielt lebenslanges Lernen zu vermitteln und zu fördern, da zu erwarten ist, dass Gelerntes zukünftig noch schneller überholt sein wird [80,85]. Dies wird besonders Unternehmen vor (monetäre) Herausforderungen stellen. Der Bund und die Länder können durch praxisnahe Forschungsförderung unterstützen, sodass erforderliche Kompetenzen identifiziert und geeignete Maßnahmen zur Vermittlung entwickelt werden können. Unmittelbar kann der Staat über Steuervorteile Unternehmen motivieren, in Weiterbildungsprogramme zu investieren. Durch eine gezielte Förderung würde der gesellschaftliche Stellenwert des lebenslangen Lernens als Maßnahme zur Erhöhung der Beschäftigungsfähigkeit der Bevölkerung hervorgehoben, was langfristig Wettbewerbsvorteile und die Innovationsfähigkeit Deutschlands sichert [86].

**Faktoren auf Arbeitgebendenseite: Empfehlungen für Unternehmen**

Unternehmen sind besonders im Bereich der beruflichen Weiterbildung maßgeblich für die Weiterqualifizierung der Beschäftigten verantwortlich. Wie bei Henkel und KKS ist es zunächst erforderlich, die Umstellung auf kontinuierliches Lernen als Change Projekt im Unternehmen zu etablieren und Rahmenbedingungen zu schaffen [85]. Die oberste Führungsebene sollte sukzessive eine lernförderliche Unternehmenskultur und Personalführung aufbauen, die der fortlaufenden Qualifizierung einen hohen Stellenwert gibt [87]. Dies beinhaltet die Freigabe finanzieller Mittel, eine Erhöhung der Sichtbarkeit umgesetzter und geplanter Maßnahmen und besonders die Vorgabe einer grundlegenden Stoßrichtung [85,88]. Eine Integration des Lernens in die Unternehmenskultur impliziert auch Betriebsvereinbarungen zu Lernzeiten, um ein Lernen während der Arbeitszeit zu ermöglichen, und besonders auf der Shopfloorebene entsprechende Entlohnungsregelungen, z. B. Akkordlöhne, die einem Lernen während der Arbeitszeit nicht entgegenstehen [87]. Weiterhin bietet es sich an, die Lernaktivitäten in das Leistungsprofil der Beschäftigten zu integrieren und Lernen als Teil des regulären Arbeitspensums zu etablieren [85].

Das mittlere Management und das Fachpersonal ist dafür verantwortlich, allgemeinere Vorgaben in konkrete Kompetenzen und Lernaktivitäten zu übertragen [85]. Dies umfasst z. B. das Entwerfen neuer Tätigkeitsprofile und die Ermittlung des Schulungsbedarfs einzelner Beschäftigter über eine Abfrage des Status quo relevanter Kompetenzen.

Auf Unternehmensebene können die Beschäftigten und zukünftigen Auszubildenden besonders durch arbeitsplatznahes Lernen und entsprechende organisationale Strukturen des Arbeitsprozesses wie digitalisierte Geschäftsprozesse, Wissenstransfer, aber auch

On-the-Job-Training und Tandem-Modelle mit altersgemischten Teams, bei dem mindestens zwei Beschäftigte an einer Anlage tätig sind, gefördert werden [87,89,90].

Eine geeignete Form für das Lernen am Arbeitsplatz ist die Bereitstellung von kleinen modularen Lerninhalten, das sogenannte Micro-Learning, in dem grundlegende Begrifflichkeiten und Zusammenhänge vermittelt werden [86]. Im Bereich der Produktion eignen sich hier Informationen über die Zusammensetzung wichtiger Kennzahlen, die für die Beschäftigten entscheidungsrelevant sind. Zur Umsetzung muss einerseits geklärt werden, welche Daten dort einfließen und wie die Berechnung erfolgt. Andererseits haben die Beschäftigten aktuell nicht alle Zugang zu einem entsprechenden Endgerät, was sie zur Weiterbildung nutzen könnten, sodass Unternehmen dafür entsprechende Infrastruktur stellen müssten.

Eine weitere Form der Wissensvermittlung stellt die Bereitstellung von Informationen zu einzelnen Prozessschritten durch Assistenzsysteme dar [87]. Ergänzend zu der Funktion als Unterstützungssystem lassen sich auch AR-Anwendungen nutzen, um über Smart Glasses Beschäftigte in der Bedienung komplexer Anlagen oder neuer Montageprozesse zu trainieren.

Neben Maßnahmen, in denen die Beschäftigten vorwiegend auf sich alleine gestellt lernen, fördern Konzepte, in denen mehrere Mitarbeitende zusammenarbeiten, zugleich Kommunikationskompetenz, Teamfähigkeit und soziale Intelligenz. Eine Möglichkeit, die auch im Projekt NRWgoes.digital umgesetzt wird, sind die sog. Train-the-Trainer-Konzepte. Darin werden ausgewählte und didaktisch geschulte Mitarbeitende extern u. a. in neuen Fertigungstechnologien oder in der Bedienung und Instandhaltung einer neuen Anlage geschult. Diese Mitarbeitenden geben dann im Betrieb ihr Wissen weiter. Ein ähnliches Modell stellt das Tandem-Prinzip dar. Dies ist besonders in der Vermittlung von Inhalten zur Technologieakzeptanz und im späteren Umgang sowie zur Verfestigung von Prozesswissen und der Weitergabe von Expertenwissen geeignet [89]. Eine weitere bedarfsorientierte Qualifizierungsmaßnahme stellt die Job Rotation dar [89]. Durch den Wechsel der Tätigkeiten, z. B. durch das Bedienen verschiedener Anlagentypen lernen die Beschäftigten am Arbeitsplatz neue Inhalte kennen. Erfahrenere Kolleg:Innen geben ihr Wissen weiter, wodurch der Erfahrungsaustausch und die Teamfähigkeit gefördert werden. Ebenso trainieren die neuen Aufgaben und wechselnde Teams die Beschäftigten in ihrer Flexibilität und Anpassungsfähigkeit.

**Faktoren auf Arbeitnehmerseite: Empfehlungen für Beschäftigte**

Neben unternehmensinduzierten Personalentwicklungsprogrammen wird es zukünftig auch stark von jedem Einzelnen abhängen, inwiefern er oder sie bereit ist, seine Beschäftigungsfähigkeit zu optimieren und durch entsprechende Qualifizierungsmaßnahmen weiter auszubauen. Das Rahmenprogramm muss von der Politik, Ausbildungsstätten und den Unternehmen bereitgestellt und kontinuierlich aktuell gehalten werden. Beschäftigte und Auszubildende müssen relevante Qualifizierungsmaßnahmen in entsprechendem Umfang und hoher Qualität wahrnehmen können.

Doch auch bei einem vielfältigen Angebot und individueller Förderung obliegt es den Einzelnen, ob und wie sie dies in Anspruch nehmen. Eine offene und motivierende Unternehmenskultur ist förderlich, möglichst viele Beschäftigte zu erreichen und diese zu einer aktiven Teilnahme an konkreten Qualifizierungsmaßnahmen zu motivieren [85]. Zugleich sollten die Beschäftigten jedoch auch verstärkt selbst aktiv nach Möglichkeiten zur Weiterbildung suchen und sich ggf. berufsbegleitend weiterqualifizieren, um gestiegenen Anforderungen, z. B. im IT-Bereich, gerecht zu werden. Das aktive Streben nach persönlicher Weiterbildung erfordert Kompetenzen wie eine offene Haltung gegenüber Veränderungen, die Bereitschaft zum lebenslangem Lernen und eine gute Selbstorganisation

[siehe 4], die aus diesem Grund auch im Konstrukt zur Industriellen Beschäftigungsfähigkeit Anwendung finden.

Neben weiteren Angeboten in der Gruppe der selbst-organisierten Lernformen [siehe 4], stellen die sog. MOOCs (Massive Open Online Courses) eine Form dar, die, sowohl entkoppelt von industriellen Institutionen als auch direkt von Unternehmen mit spezifischen Inhalten gestaltet, Anwendung finden. Diese Kurse ermöglichen allen Interessierten, sich gezielt in ihrem eigenen Tempo weiterzubilden. MOOCs sind meist kostenlos; gegen eine Gebühr und entsprechende Nachweiserbringung werden aber auch Zertifikate ausgestellt, die das Erlernte belegen. Am Beispiel des *Smart Expert MOOC* wird im nachfolgenden Kapitel der konzeptionelle Aufbau eines derartigen Qualifizierungs- und Weiterbildungsformats aufgezeigt.

**Fazit**

Die COVID-19-Pandemie hat das Interesse an Weiterbildungsmaßnahmen noch weiter steigen lassen. Insbesondere das Format der MOOCs erfährt einen hohen Zuspruch – sowohl auf Seiten von Unternehmen zur betrieblichen Weiterbildung als auch auf Seiten der Beschäftigten und Arbeitssuchenden als Investition in die individuelle Aus- und Weiterbildung. Die Gründe hierfür sind u. a. auf freie Zeitressourcen (z. B. bedingt durch Kurzarbeit oder gar einen Arbeitsplatzverlust) oder soziale Distanzierung zurückzuführen. Im Kontext dieses Fachbeitrages wird dem MOOC-Format ebenfalls ein großes Potenzial im Hinblick auf die nachhaltige Qualifizierung von Beschäftigten für das Szenario der Produktionsarbeit 2030 zugesprochen. Dabei sind Kurse zur Einführung in die Digitalisierung, Künstliche Intelligenz oder Datenanalyse wichtiger als je zuvor.

# 4 *Smart Expert MOOC*

Der *Smart Expert MOOC* wird aktuell in einem vom Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen geleiteten Konsortialprojekt umgesetzt. Im Konsortium sind mehrere Unternehmen aus dem produzierenden Sektor aktiv. Dies umfasst sowohl Unternehmen mit Konzernstruktur als auch mittelständische Unternehmen. Zusätzlich ist noch ein Beratungsunternehmen beteiligt, das somit Bedarfe aus weiteren Industrieunternehmen einbringt und die Expertise aus Forschung und Industrie optimal ergänzt. Dieser Zusammenschluss stellt sicher, dass die erarbeiteten Inhalte nicht nur für die unmittelbar beteiligten Unternehmen von Interesse, sondern für eine große Menge der produzierenden Unternehmen in Deutschland relevant sind. Die Projektergebnisse sind für das vierte Quartal in 2021 terminiert.

Um ein einheitliches Verständnis über MOOCs und die Potenziale dieses Lernformats zu schaffen, erfolgt zunächst eine kurze Einführung zu MOOCs im Allgemeinen. Die praktischen Schritte der Umsetzung eines MOOCs zur betrieblichen Qualifizierung werden nachfolgend am Beispiel des *Smart Expert MOOC* erläutert.

## 4.1 MOOCs als nachhaltige Qualifikationsmaßnahme

Ein MOOC ist definiert als ein Kurs, der für eine große Anzahl von Teilnehmenden konzipiert ist, auf die jede/r – eine Internetverbindung vorausgesetzt – überall zugreifen kann. Er steht jeder/m ohne Zugangsvoraussetzungen offen und bietet ein vollständiges Kurserlebnis online und kostenlos [91].

Als eine Form des Online-Lernens sind MOOCs spätestens seit der COVID-19-Pandemie flächendeckend bekannt. Im universitären Bildungsbereich erlangten sie ihren Durch-

bruch ab 2012/13. Seitdem werden MOOCs zunehmend von Universitäten genutzt, sodass zeitgleich Unternehmen gegründet worden sind, um die notwendige Infrastruktur bereitzustellen [92]. 2020 haben 180 Mio. Lernende, davon 60 Mio. neue Nutzende, (ausgenommen China) über 16.300 Kurse auf MOOC-Plattformen genutzt [93]. Die beiden größten Plattformen sind Coursera (76 Mio. Lernende, 4.600 Kurse) und edX (35 Mio. Lernende, 3.100 Kurse) [93]. Beide Plattformen stellen Inhalte zahlreicher Universitäten, z. B. Stanford, Oxford, ETH Zürich, RWTH Aachen, zu verschiedenen Themengebieten, z. B. Künstliche Intelligenz, Robotik oder auch Inhalte zu Lernkompetenz oder zu einem gesunden Lebenswandel, zur Verfügung. Als deutsche Plattform ist vor allem openHPI des Hasso-Plattner-Instituts bekannt. Hier finden sich sowohl deutsch- als auch englischsprachige Inhalte. Alle Plattformen enthalten generell frei zugängliche, aber auch kostenpflichtige Kurse. Letztere schließen häufig mit einer Prüfung ab, nach deren Bestehen ein Zertifikat ausgestellt wird, das die Kompetenz auf dem jeweiligen Gebiet belegt.

Im Wesentlichen bestehen zwei Modelle von MOOCs. Der sogenannte xMOOC (x = „extension“) enthält konventionelle, gelenkte Lerninstruktionen im Kontext von formalen Bildungseinrichtungen [94]. Daher wird diese Form oft als erweiterte Form der universitären Lehre z. B. in Form von Videos oder Online-Tests eingesetzt. Zur Interaktion mit anderen Teilnehmenden werden häufig Foren verwendet. Im Gegensatz dazu vertritt der sogenannte cMOOC (c = „connectivist“) einen sozialen, verteilten, vernetzten Ansatz und einen hohen Grad an Autonomie der meist erwachsenen Lernenden, die an persönlicher oder beruflicher Entwicklung interessiert sind [94]. Dieser Ansatz ist stark partizipativ, da Lernende häufig selbst Materialien erstellen, die dann von anderen diskutiert oder bewertet werden. Die Inhalte können somit auch abhängig von den Teilnehmenden variieren. Als besonders geeignet erscheint diese Form bei der Vermittlung von Kompetenzen wie etwa dem zielgerichteten Lernen, bei dem weniger die Inhalte selbst, sondern Methoden vermittelt werden.

Im Kontext der betrieblichen Anwendung im Produktionskontext ist eher die Variante der xMOOC als eine nachhaltige Maßnahme zur Qualifizierung geeignet. Da dieser trotz des weitgehend freien Lerntempos und der damit einhergehenden Flexibilität einer festeren Struktur folgt, ist der xMOOC zur Vermittlung technischer Inhalte, die aufeinander aufbauen vorzuziehen.

Zur Qualifizierung innerhalb des IoP sollten die Teilnehmenden allerdings bereits über bestehende Kenntnisse im industriellen Umfeld, i. d. R. vermittelt innerhalb einer Berufsausbildung, verfügen. So können in einem MOOC spezifische Themen, z. B. über Datensicherheit oder Data Analytics, gelehrt werden. In Kombination einzelner Module könnten sich über dieses Format Produktionsmitarbeitende mit vertieften Kenntnissen der unternehmensspezifischen Prozesse und Anlagen besonders in den Bereichen Methodenkompetenz und Basiswissen zu Industrie 4.0 und dem IoP zu Smart Experts weiterbilden.

### 4.2 Identifikation der Stakeholder vor Entwicklungsstart

Zu Beginn der Entwicklung eines MOOC im betrieblichen Umfeld ist es zunächst notwendig, die relevanten Stakeholder schon im Vorfeld der Kurskonzeption zu identifizieren. Diese sind in Abhängigkeit von Zielen, Zielgruppe und Inhalten einzuordnen. Diese Analyse erlaubt es, frühzeitig etwaige Probleme während der Entwicklungs- und der späteren Nutzungsphase zu erkennen und entsprechende Maßnahmen, z. B. aktive Einbindung in der Inhaltsgestaltung, zu entwickeln, sodass diese den Projekterfolg nicht gefährden. Im Konsortialprojekt *Smart Expert MOOC* wurden nachfolgende Personengruppen als relevante Stakeholder identifiziert:

*Leitende Positionen*

Für eine erfolgreiche Umsetzung des MOOC ist es wichtig, dass Personen in leitenden Positionen im Unternehmen (Geschäftsführung, Produktionsleitung) die zugrundeliegenden Ideen eines MOOC-Formats verstehen und den Mehrwert von MOOCs für die Weiterqualifizierung erkennen. Ebenso zentral ist es, dass dieser Personenkreis die inhaltliche Ausrichtung und die spezifischen Inhalte für die Zielgruppen des MOOC unterstützt, da dieser meist auch über die Finanzierung des Projektes entscheidet. Daher ist die Berücksichtigung der leitenden Funktionen von Beginn an Voraussetzung, um die notwendige initiale Unterstützung für die Einführung eines MOOC zu erhalten. Bei der inhaltlichen Ausgestaltung des MOOC sollte dieser Personenkreis weiterhin an strategischen Punkten miteinbezogen werden, um eine kontinuierliche Unterstützung und ggf. Berücksichtigung von Vorgaben in die MOOC-Inhalte sicherzustellen.

*Personalabteilung*

Die Personalabteilung ist ebenfalls von großer Bedeutung für eine erfolgreiche Umsetzung des MOOC im Produktionskontext, da sie die unternehmensweite Qualifizierungsstrategie maßgeblich mitbestimmt und über Informationen zu derzeitigen und zukünftigen Tätigkeitsbeschreibungen von Funktionen im Unternehmen verfügt. Ebenso ist sie ein relevanter Stakeholder hinsichtlich der Bereitstellung bestehender Materialien, die zur MOOC-Entwicklung gesichtet und ggf. eingebunden werden sollten. Die Personalabteilung sollte bereits im Vorfeld der Entwicklung konsultiert werden, um einerseits notwendige Anforderungen in die Entwicklung miteinfließen lassen zu können, z. B. die Regelung von Rechtevergaben zur Bearbeitung von Inhalten des MOOC. Andererseits um sicherzustellen, dass personalrechtliche Themen sowohl in Inhalten als auch in der Nutzungsphase berücksichtigt werden.

*Betriebsrat*

Der Betriebsrat ist in produzierenden Unternehmen ein wichtiger Stakeholder, da er die Belegschaft repräsentiert und maßgeblich die Einführung des MOOC sowie die Bereitschaft der Belegschaft, den MOOC zu nutzen, beeinflussen kann. Daher sollte auch der Betriebsrat noch vor der eigentlichen Entwicklung des MOOC miteinbezogen werden, um über Ziele des MOOC aufzuklären, etwaige Bedenken aufzulösen und um Anforderungen des Betriebsrats zu berücksichtigen. Der regelmäßige Austausch mit dem Betriebsrat ist daher bereits in der Entwicklungsphase des MOOC wichtig.

*Meister-/ Techniker-/ Ausbilder-Ebene*

Die Meister-/ Techniker-/ Ausbilder-Ebene in produzierenden Unternehmen sind von besonderer Bedeutung. Als meist direkte Vorgesetzte der Nutzenden oder als direkte Vertretung der Nutzendengruppe können sie gut abschätzen, welche zukünftigen Kompetenzen im Profil der Zielgruppe verankert werden müssen und wo der Schulungsbedarf am größten ist, da sie im Gegensatz zur Personalabteilung noch detaillierter Informationen über den praktischen Arbeitsalltag der Nutzenden teilen können. Daher wird dieser Personenkreis in der Ausgestaltung der Schulungsinhalte, aber auch bezogen auf organisatorische Rahmenbedingungen, z. B. inwieweit eine Integration des MOOC in bestehende Prozesse erfolgen kann und welche Infrastruktur eingerichtet werden müsste, kontinuierlich aktiv miteingebunden.

*Nutzende*

Letztlich sind auch die Nutzenden selbst in die Entwicklung des MOOC miteinzubeziehen. Hierbei ist es sinnvoll, Lead-User im Unternehmen zu identifizieren, die kontinuierlich und iterativ in die Entwicklung des MOOC einbezogen werden und einzelne Inhalte testen.

## 4.3 Zielgruppe

Zielgruppe des *Smart Expert MOOC* sind Produktionsmitarbeitende. Als Smart Experts verfügen sie über ein vertieftes technisches Wissen in ihrem spezifischen Aufgabengebiet sowie Basiswissen über die Grundlagen des IoP als Transfer von Industrie 4.0 in die Produktion. Komplettiert wird das Kompetenzprofil durch fundierte Methodenkompetenzen, insbesondere im Bereich Digital- und Datenkompetenz, die es erlauben, datenbasiert selbstständig Entscheidungen zu treffen und diese über verschiedene Kommunikationswege an KollegInnen weiterzugeben. Smart Experts sollen z. B. die Fähigkeit besitzen, Prozessdaten einer Anlage/ Maschine zu analysieren und zu interpretieren, sodass sie Änderungen im Prozess vornehmen können oder Maßnahmen an Mitarbeitende kommunizieren können. Im Produktionskontext lassen sich als Smart Experts folgende Gruppen identifizieren:

*Shopfloor Arbeitskraft*

Shopfloor Arbeitskräfte, z. B. Maschinenführende oder Montagearbeitende, müssen zukünftig in der Lage sein, einfache Analysen selbstständig durchzuführen, zu interpretieren und entsprechende Maßnahmen ableiten zu können. Die Datenkompetenz beschränkt sich meist auf die Interpretation einfacherer statistischer Auswertungen, wie sie beispielsweise von Q-Abteilungen erstellt werden. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die Shopfloor Arbeitskraft der Zukunft stärkere Kompetenzen im Umgang mit neuen Technologien aufweisen und eine größere Technologieakzeptanz zur Nutzung von Entscheidungsunterstützungssystemen mitbringen muss.

*Meister-/ Techniker-/ Ausbilder-Ebene*

Mitarbeitende in der Meister-/ Techniker-/ Ausbilder-Ebene in produzierenden Unternehmen müssen zukünftig neben einem vertiefen Wissen über das spezifische Aufgabengebiet noch stärker Methodenkompetenz im Bereich Datenanalyse und -interpretation, gerade in Verbindung mit Unsicherheiten in Analysen, mitbringen. Die erforderliche Kompetenz übersteigt dabei deutlich die der Shopfloor-Arbeitskräfte. Dies liegt u. a. daran, dass mit den Potenzialen datenbasierter Entscheidungen schrittweise eine Verlagerung entsprechender Kompetenzen aus dem Management in die Produktionsbereiche, etwa auf Meister-Ebene, zu rechnen ist. Technologiekompetenz und -akzeptanz ist auch auf dieser Ebene von großer Bedeutung, da dieser Personenkreis auch eine große Vorbildfunktion für weitere Beschäftigte innehat. Zur Erledigung zukünftiger Aufgaben, ist eine erweiterte Digital- und Datenkompetenz, die die Bedienung spezifischer Software umfasst, erforderlich.

## 4.4 Entwicklungsschritte

Im Folgenden wird die grundlegende Vorgehensweise für die Entwicklung des *Smart Expert MOOC* dargestellt. Der Entwicklungsprozess untergliedert sich in insgesamt fünf Teilschritte. Diese sind in Abbildung 5 graphisch dargestellt. Im Folgenden wird detaillierter auf die einzelnen Teilschritte eingegangen.

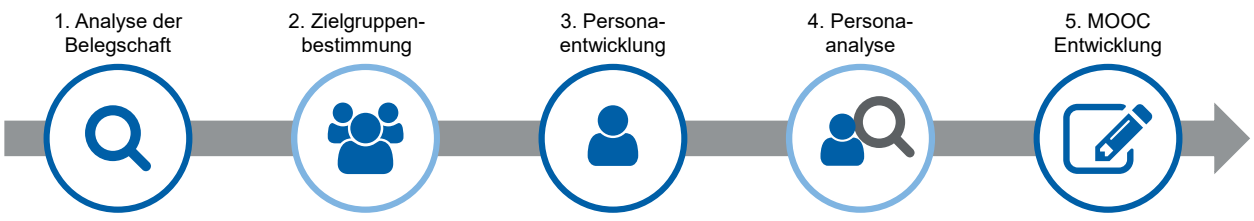



*Abbildung 5: Entwicklungsschritte des Smart Expert MOOC*

**(1) Analyse der Belegschaft***:* Die Analyse der für den MOOC relevanten Teil der Belegschaft in ausgewählten Unternehmensbereichen (i. d. R. Produktion) untersucht die Arbeitskräfte anhand von Arbeitsbereichen, Tätigkeitsbeschreibungen, aktuell notwendiger Kompetenzen und Qualifikationen sowie demografischer Kennzahlen sowohl qualitativ als auch quantitativ. Dazu werden einerseits Interviews mit einzelnen Mitarbeitenden geführt, andererseits Fragebögen an die Beschäftigten versandt, um ein möglichst umfassendes Bild der Zielgruppe zu erlangen. Im nächsten Schritt werden geeignete Kriterien zur Zielgruppenbeschreibung identifiziert, um auf deren Grundlage den relevanten Teil der Belegschaft zu segmentieren.

**(2) Bestimmung der Zielgruppen des MOOC:** Auf Basis der Belegschaftsanalyse erfolgt eine umfassende Zielgruppenbeschreibung. Der qualitative Teil der Beschreibung bezieht u. a. die Beschreibung der Haupt- und Nebentätigkeiten der Beschäftigten mit ein, wohingegen der quantitative Teil die Anzahl der Beschäftigten in relevanten Bereichen und demografische Kennzahlen der Zielgruppen umfasst. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Zielgruppen, die sich meist noch auf verschiedene Bereiche auf dem Shopfloor, z. B. Fertigung und Montage, ggf. auch für verschiedene Fertigungslinien beziehen. Diese lassen sich durch die, in Schritt 1 abgeleiteten, Kriterien in gemeinsame Zielgruppencluster zusammenfassen.

**(3) Entwicklung von Personas:** Für die konsolidierten Zielgruppen erfolgt eine Ausarbeitung von Personas. Ziel dabei ist es, einen Persona-Canvas zu entwickeln, der die Zielgruppen abbildet. Der Persona-Canvas unterteilt die Beschreibung der Persona in Kategorien, die auf in Schritt 1 und 2 identifizierten Charakteristika, z. B. Ausbildung und Technologienutzung, beruhen.

**(4) Analyse der Personas:** Im vierten Schritt erfolgt die Analyse der Personas. In Interviews, vorwiegend mit Beschäftigten, Vorgesetzten und der Personalabteilung, werden aktuelle und zukünftige Herausforderungen, kurz-/ mittelfristige Änderungen im Arbeitsleben und daraus resultierende konkrete Schulungsbedarfe identifiziert. Die Analyseergebnisse werden anschließend konsolidiert und zu übergreifenden Schulungsinhalten über den Persona-Canvas zusammengefasst.

**(5) MOOC Entwicklung:** Nach Bestimmung der Schulungsbedarfe erfolgt im letzten Schritt die eigentliche Entwicklung des MOOC. Zu diesem Zweck wird zuerst die grundlegende Struktur des MOOC erarbeitet, d. h. welche Inhalte in einem Modul gelehrt werden und an welcher Stelle eine Modulreihenfolge vorgegeben werden muss. Neben der Wahl des relevanten Schulungsinhalts muss eine geeignete Form der Wissensvermittlung und ggf. auch -überprüfung, z. B. über Text-/ Bildverhältnisse, Videos und über die Einbettung von integrierten Tests wie Multiple-Choice oder Lückentexte, gewählt werden. Diese ist u. a. abhängig von der gewählten Plattform und von den zur Verfügung stehenden technischen Mitteln, z. B. bei interaktiven Übungen oder bei der Erstellung komplexer Videos. Ist die Ausgestaltung abgeschlossen, erfolgt im letzten Schritt eine Testphase mit Lead-Usern und die iterative Integration der Ergebnisse der Test-Runs.

Insbesondere der letzte Schritt erfolgt iterativ in Abstimmung mit Stakeholdern und Zielgruppe, um eine zielgerichtete und user-zentrierte Entwicklung des MOOC sicherzustellen, und nimmt somit den größten Teil der Entwicklung ein. Das vorläufige Ergebnis der Struktur und der primären Inhalte des *Smart Expert MOOC* werden nachfolgend vorgestellt.

## 4.5 Inhalte und Struktur

Der *Smart Expert MOOC* ist in drei Module gegliedert, die sich an den Ebenen des IoP orientieren (Abbildung 6). Das erste Modul bildet das **Basismodul**. Hier werden Grundlagen zu allgemein relevanten Themen, bspw. Industrie 4.0-Technologien wie Augmented Reality oder Cyber-physische Systeme (CPS), Grundlagenwissen zu Data Analytics und häufig genutzte Softwareanwendungen und darin erzeugte Datentypen vorgestellt. Das Modul soll den Nutzenden die grundlegende Thematik zur Arbeit im IoP und die damit verbundenen Problemstellungen näherbringen. Zusätzlich sensibilisiert es für die Notwendigkeit für die weiteren Schulungsinhalte in den darauf aufbauenden Modulen. Das Basismodul bezieht sich dabei weitestgehend gleichverteilt auf Inhalte jeder Ebene des IoP.

Im zweiten Modul, dem **Methodikmodul**, werden verstärkt methodische Kompetenzen zur erfolgreichen Arbeit im IoP vermittelt. Exemplarische Inhalte sind das Treffen von Entscheidungen auf Basis von Datenanalysen und wie mit Medienbrüchen umgegangen werden kann, sodass Daten aus verschiedenen Systemen in Entscheidungsunterstützungsanwendungen einfließen und berücksichtigt werden können. Im Methodikmodul werden verstärkt Themen aus der Smart Data Ebene des IoP behandelt.

Im **Technikmodul** werden die im Basismodul nur kurz vorgestellten technischen Aspekte des IoP beleuchtet. So wird z. B. vorgestellt, wie Sensoren zur optimierten Instandhaltung eingesetzt werden oder welche Vorteile semantische Modelle mit sich bringen können. Auch die technische Umsetzung von weiteren Technologien wie Augmented Reality in der Produktion ist Teil des Moduls. Insgesamt werden hier alle drei IoP-Ebenen adressiert.

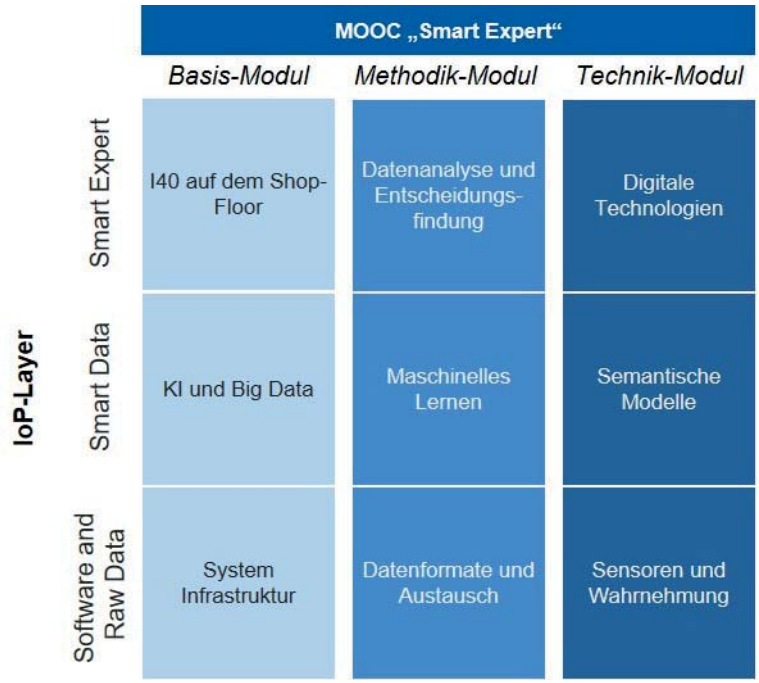



*Abbildung 6: Modularer Aufbau des Smart Expert MOOC*

Bei der Ausgestaltung der Module muss insbesondere die Form der Wissensvermittlung berücksichtigt werden. Aspekte dabei sind u. a.:

- Art des Mediums (Video, Artikel, interaktiver Artikel etc.)
- Form der Wissenskontrolle (Multiple-Choice, Freitext-Antworten etc.)
- Dauer der Schulungseinheiten

Die Inhalte und genutzten Formate zur Wissensvermittlung für den *Smart Expert MOOC* werden im Folgenden näher spezifiziert. Im Basismodul werden u. a. folgende Themen behandelt:

- Grundlagen Industrie 4.0
- Grundlagen zu Technologien des IoP
- Einfluss IoP auf den Shopfloor

Die Inhalte werden dabei einerseits mit Videos erläutert, andererseits mit einem begleitenden Text zu den Videos unterstützt. Ebenso werden Links, die zu tiefer gehenden Materialien führen, bereitgestellt. Die Erfolgs- und Fortschrittskontrolle erfolgt einerseits durch den Nutzenden selbst, indem sie die bearbeiteten Themen als erledigt markieren. Andererseits erfolgt nach jedem Thema eine themenspezifische Überprüfung des Wissens in Form eines Tests und eine Überprüfung über das gesamte Basismodul nach Abschluss aller Themen.

Das Methodikmodul baut auf dem Basismodul auf und beschäftigt sich mit Methoden, die für die Smart Expert Ebene des IoP von Bedeutung sind. Das Modul umfasst folgende Inhalte:

- Daten in der Produktion analysieren und interpretieren
- Entscheidungsunterstützung und das Treffen von Entscheidungen

Eine Vermittlung der Inhalte erfolgt in Videos und Artikeln, die über die grundlegende Idee der jeweiligen Methodik informieren sowie in Form von Use-Case Bearbeitungen, in denen das Gelernte, bspw. in Form einer eigenständig durchgeführten Datenanalyse, konkret angewendet wird. Auch im Methodikmodul erfolgt eine themenspezifische Überprüfung nach Bearbeitung einzelner Themen. Die gesamte Überprüfung des Methodikmoduls findet in Form einer Bearbeitung eines fiktiven Use-Cases statt.

Den Abschluss des *Smart Expert MOOC* bildet das Technikmodul. Dieses geht auf die in den anderen Modulen verwendeten Techniken nochmals spezifischer ein. Inhalte des Technikmoduls sind:

- Supervised, Unsupervised und Reinforcement Learning
- Datenbankensysteme in der Produktion
- Smart Devices in der Produktion
- Anwendungsbeispiele in der Produktion

Die technische Umsetzung des MOOC erfolgt über eine Plattform, die grundsätzlich frei zugänglich ist. Unternehmensspezifische Inhalte und Teile der vorgestellten Module sind allerdings auf bestimmte Nutzendengruppen beschränkt. Die im Konsortium beteiligten Parteien sind überzeugt, dass der *Smart Expert MOOC* ein innovatives Konzept zur Qualifizierung von Mitarbeitenden darstellt, das die Idee des lebenslangen Lernens in die Praxis transferiert. Somit stellt der MOOC eine vielversprechende Strategie der nachhaltigen Sicherung der Beschäftigungs- und Innovationsfähigkeit im datengeprägten Arbeitsumfeld dar.

## 5 Fazit und Ausblick

Mit dem IoP wird die technologische Vision einer Industrie 4.0-Infrastruktur für produzierende Unternehmen bereits heute umgesetzt. Die damit einhergehenden Entwicklungen und Auswirkungen sind derzeit nicht vollkommen vorhersehbar – das gilt sowohl für das technologische als auch das soziale Teilsystem der Produktion. Insgesamt wird sich jedoch die Beschäftigungsfähigkeit in der Zukunft der Produktionsarbeit verändern. Konkrete Implikationen lassen sich ausgehend von dem entwickelten Zukunftsszenario in

Kombination mit der Grundannahme, dass die Rolle des Menschen auch in 2030 und darüber hinaus unersetzlich für die Wertschöpfung ist, herleiten.

Es hat sich gezeigt, dass zwei diametrale Kompetenz- bzw. Tätigkeitsklassen vorherrschen werden (Generalisten vs. Spezialisten, sog. Smart Experts). Diese zeichnen sich nicht durch eine erhöhte Anzahl, sondern einer veränderten Schwerpunktsetzung und Gewichtung einzelner Kompetenzen aus. Die Ergebnisse dieses Beitrags sind als realistische Vorausschau zur strategischen Unternehmensführung zu verstehen. Das letztliche Szenario und auch die Beschäftigungsfähigkeit werden von diversen Faktoren abhängen, die in dieser Form nicht gänzlich vorausbestimmt werden können. So stellt z. B. die COVID-19-Pandemie langfristig ausgebaute internationale Wertschöpfungsketten und Vertrauen in Regierungen infrage, sodass Unternehmen zukünftig stärker hinterfragen, welche Abhängigkeiten sie eingehen. Ebenso hat sich seit Frühjahr 2020 gezeigt, dass bereits heute viele digitale Kommunikations- und Kollaborationsalternativen im Arbeitsalltag und im Bildungsbereich bestehen. So haben sich z. B. nach nur wenigen Wochen Videokonferenzen anstatt physischer Treffen für Meetings und Workshops etabliert und sind zum Alltag geworden. In Schulen und Universitäten mussten Lehrende in kurzer Zeit digitale Formen der Wissensvermittlung umsetzen. Somit wurden bestehende Bedarfe, aber auch die Potenziale der Digitalisierung verstärkt aufgedeckt. Daher ist anzunehmen, dass dieser durch die Pandemie verursachte starke Einschnitt auch langfristig etablierte Formen der Arbeit verändern wird. Umso wichtiger wird es daher sein, die Entwicklung des sozialen Teilsystems parallel zur Entwicklung der Technologien und Infrastruktur aktiv zu gestalten. Eine Möglichkeit zur kontinuierlichen Weiterentwicklung der Beschäftigten im industriellen Sektor stellt der Smart Expert MOOC dar. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass sich Beschäftigte und Unternehmen im Sinne eines soziotechnischen Gesamtoptimums entwickeln.

## Danksagung

Teile der in diesem Beitrag vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „PreModIE – Predictive Model of Industrial Employability“ (SCHM 1856/90-1) entwickelt. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung.

# 6 Literatur


[1] Schuh, G.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; ten Hompel, M.; Wahlster W. (Hrsg.): Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten (acatech STUDIE). München: Utz, 2017.

[2] Klocke, F.; Bassett, E.; Bönsch, C. et al.: Assistenzsysteme in der Produktionstechnik. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R. H.; Schuh, G. (Hrsg.) (2017): *Internet of Production für agile Unternehmen: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017,* 18–19 May 2017, Apprimus Verlag, Aachen, Germany, S. 287-313.

[3] Metzmacher, A. I.; Hellebrandt, T.; Ruessmann, M.; Heine, I.; Schmitt, R. H.: Aligning the Social Perspective with the Technical Vision of the Smart Factory. In: Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): *Advances in Production Research. Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP)*, Aachen, November 19-20, 2018. Cham: Springer, 2018, S. 715–729.

[4] Metzmacher, A. I.; Hellebrandt, T.; Heine, I.; Bergholz, M.; Döbbeler, B.; Hatfield, S.; Kieper, C.; Plutz, M.; Varandani, R.; Schmitt, R. H.: Looking 4.0-ward: Wie das Internet of Production die Beschäftigungsfähigkeit in der Zukunft der Arbeit beeinflusst. In: Bergs, T.; Brecher, C.; Schmitt, R. H.; Schuh, G. (Hrsg.): *Internet of Production - Turning Data into Value: Statusberichte aus der Produktionstechnik 2020*, S. 302-339.

[5] Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. URL: https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf [Stand: 18.02.2020].

[6] Gebhardt, J.; Grimm, A.; Neugebauer, L. M.: Entwicklungen 4.0 – Ausblicke auf zukünftige Anforderungen an und Auswirkungen auf Arbeit und Ausbildung. In: *Journal of Technical Education*, 3. Jg., 2015, Nr. 2, S. 45-61.

[7] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Die digitale Agenda 2014–2017*. Berlin. URL: https://www.digitale-agenda.de/Content/DE/_Anlagen/2014/08/2014-08-20-digitale-agenda.pdf?__blob=publicationFile&v=6 [Stand: 31.09.2019].

[8] Becker, W.; Ulrich, P.; Botzkowski, T.: Industrie 4.0 im Mittelstand - Handlungspotenziale und Umsetzung. In: Obermaier, R. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2019, S. 91-11.

[9] Wang, S.; Wan, J.; Li, D.; Zhang, C.: Implementing smart factory of industry 4.0: an outlook. In: *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 12. Jg., 2016, Nr.1. DOI: https://doi.org/10.1155/2016/3159805.

[10] Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4*. Allgemeine Grundlagen. Berlin: Springer, 2017, S. 1-31.

[11] Thoben, K. D.; Wiesner, S.; Wuest, T.: Industrie 4.0 and Smart Manufacturing - A Review of Research Issues and Application Examples. In: *International Journal of Automation and Technology*. 11. Jg., 2017, Nr. 1, S. 4–16.

[12] Frazzon, E. M.; Hartmann, J.; Makuschewitz, T.; Scholz-Reiter, B.: Towards Socio-Cyber-Physical Systems in Production Networks. In: *Procedia CIRP*. 7. Jg., 2013, S. 49–54.

[13] Spath, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S.: *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0*. URL: http://www.produktionsarbeit.de/content/dam/produktionsarbeit/de/documents/Fraunhofer-IAO-Studie_Produktionsarbeit_der_Zukunft-Industrie_4_0.pdf [Stand: 17.02.2020].

[14] Davies, R.; Coole, T.; Smith, A.: Review of Socio-technical Considerations to Ensure Successful Implementations of Industry 4.0. In: *Procedia Manufacturing. 11*. Jg., 2017, S. 1288–1295.

[15] Apt, W.; Bovenschulte, M.: Die Zukunft der Arbeit im demografischen Wandel. In: Wischmann, S.; Hartmann, E. A. (Hrsg.): *Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung*. Berlin: Springer, 2018, S. 159–173.

[16] Loebe, H.; Severing, E.: Qualifikationstrends – Erkennen, Aufbereiten, Transferieren. Ergebnisse und Transferwege der Früherkennungsforschung am Beispiel einfacher Fachtätigkeiten. Bielefeld: Bertelsmann, 2008.

[17] Benešová, A.; Tupa, J.: Requirements for Education and Qualification of People in Industry 4.0. In: *Procedia Manufacturing. 11*. Jg., 2017, S. 2195–2202.

[18] Gudanowska, A. E.; Alonso, J. P.; Törmänen, A.: What competencies are needed in the production industry? The case of the Podlaskie Region. In: *Engineering Management in Production and Services*. 10. Jg., 2018, Nr. 1, S. 65–74.

[19] Leopold, T. A.; Zahidi, S.; Ratcheva, V.: *The future of jobs report*. 2018. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_2018.pdf [Stand: 17.02.2020].

[20] Schlund, S.; Hämmerle, M.; Stölin, T.: *Industrie 4.0 – Eine Revolution der Arbeitsgestaltung. Wie Automatisierung und Digitalisierung unsere Produktion verändern werden*. URL: https://www.ingenics.com/assets/downloads/de/Industrie40_Studie_Ingenics_IAO_VM.pdf [Stand: 17.02.2020].

[21] Hecklau, F.; Orth, R.; Kidschun, F.; Kohl, H. (2017): Human Resources Management: Meta-Study - Analysis of Future Competences in Industry 4.0. In: *Proceedings 13th European Conference on Management*, Leadership and Governance, ECMLG 2017. London, UK, 11.-12. Dezember 2017. Reading: ACPIL, 2017, S. 163-174.

[22] Spöttl, G.: Industrie 4.0 – Konsequenzen für die Facharbeiter/-innen! In: Jaschke, S.; Schwenger, U.; Vollmer T. (Hrsg.): *Digitale Vernetzung der Facharbeit. Gewerblich-technische Berufsbildung in einer Arbeitswelt des Internets der Dinge*. (Reihe: Berufsbildung, Arbeit und Innovation, Bd. 43). Bielefeld: Bertelsmann, 2016, S. 7-26.

[23] acatech: *Kompetenzentwicklungsstudie Industrie 4.0. Erste Ergebnisse und Schlussfolgerungen*. URL: https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_DOSSIER_neu_Kompetenzentwicklung_Web.pdf [Stand: 10.03.2020].

[24] Dombrowski, U.; Riechel, C.; Evers, M.: Industrie 4.0 – Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution. In: Kersten, W.; Koller, H.; Lödding, H. (Hrsg.): *Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*. Berlin: GITO, 2014, S. 129–153.

[25] Gehrke, L.; Kühn, A. T.; Rule, D.; Moore, P.; Bellmann, C.; Siemes, S.; Dawood, D.; Singh, L.; Kulik, J.; Standley, M.: White paper. A discussion of qualifications and

skills in the factory of the future: a German and American perspective. Düsseldorf: VDI., 2015.

[26] Haeffner, M.; Panuwatwanich, K.: Perceived Impacts of Industry 4.0 on Manufacturing Industry and Its Workforce: Case of Germany. In: Şahin, S. (Hg.): *8th International Conference on Engineering, Project, and Product Management* (EPPM 2017). Proceedings. Cham: Springer, 2018, S. 199–208.

[27] Hammermann, A.; Stettes, O.: Qualifikationsbedarf und Qualifizierung. Anforderungen im Zeichen der Digitalisierung. URL: https://www.iwkoeln.de/fileadmin/publikationen/2016/251836/Qualifikationsbedarf_IW_policy_paper.pdf [Stand: 10.03.2020].

[28] Pinzone, M.; Fantini, P.; Perini, S.; Garavaglia, S.; Taisch, M.; Miragliotta, G.: Jobs and Skills in Industry 4.0: An Exploratory Research. In: Lödding, H.; Riedel, R.; Thoben, K. D.; von Cieminski, G.; Kiritsis, D. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing. IFIP WG 5.7 International Conference*, APMS 2017, Hamburg, Germany, September 3-7, 2017, Proceedings, Part I . Cham: Springer, 2017, S. 282-288.

[29] Beierle, S.; Heine, I.; Letmathe, P.; Metzmacher, A. I.; Schmitt, R. H.: How to stay employable in the industrial sector: A systematic review of literature on Industrial Employability (2013 – 2018). Working Paper.

[30] Metzmacher, A. I.; Beierle, S.; Heine, I.; Paluch, S.; Letmathe, P.; Schmitt, R. H.: Employability 4.0 – Construct and conceptual scale development. Working Paper.

[31] Metzmacher, A. I.; Beierle, S.; Heine, I.; Paluch, S.; Letmathe, P.; Schmitt, R. H.: Developing and Validating the Predictive Model of Industrial Employability. Working Paper.

[32] Fink, A. I.; Siebe, A.: Handbuch Zukunftsmanagement. Werkzeuge der strategischen Planung und Früherkennung. Frankfurt/Main: Campus, 2006.

[33] Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: Scenario Management: An Approach to Develop Future Potentials. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 59. Jg., 1998, Nr. 2, S. 111–130.

[34] Nowack, M.; Endrikat, J.; Guenther, E.: Review of Delphi-based scenario studies: Quality and design considerations. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 78. Jg., 2011, Nr. 9, S. 1603–1615.

[35] Von Reibnitz, U.: Szenario-Technik: Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung. Wiesbaden: Gabler, 1992.

[36] Geschka, H.; Hammer, R.: Die Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung. In: Hahn, D.; Taylor, B. (Hrsg.): *Strategische Unternehmungsplanung - Strategische Unternehmungsführung*. Berlin: Springer, 1990, S. 311-336.

[37] Gausemeier, J.; Plass, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. 2. Auflage. München: Carl Hanser, 2014.

[38] Ittermann, P.; Niehaus, J.: Industrie 4.0 und Wandel von Industriearbeit–revisited. Forschungsstand und Trendbestimmungen. In: Hirsch-Kreinsen, H.; Ittermann, P.; Niehaus, J. (Hrsg.): *Digitalisierung industrieller Arbeit. Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Baden-Baden: Nomos, 2018, S. 33-60.

[39] Vogler-Ludwig, K.; Düll, N.; Kriechel, B.; Vetter, T.: Arbeitsmarkt 2030 - Wirtschaft und Arbeitsmarkt im digitalen Zeitalter. Prognose 2016. Bielefeld: Bertelsmann, 2016.

[40] Brown, J.; Gosling, T.; Sethi, B.; Sheppard, B.; Stubbings, C.; Sviokla, J.; Williams, J.; Zarubina, D.; Fisher, L.: Workforce of the future – The competing forces shaping 2030. URL: https://www.pwc.com/gx/en/services/people-organisation/workforce-of-the-future/workforce-of-the-future-the-competing-forces-shaping-2030-pwc.pdf [Stand: 20.02.2020].

[41] Sinha, R.: Persona Development for Information-rich Domains. In: Cockton, G.; Korhonen, P. (Hrsg.): *CHI EA '03: CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, Ft. Lauderdale, FL, USA: ACM, 2003, S. 830–831.

[42] Beck, A.: Verwendung von Personas zur Erfassung von Anforderungen bezüglich Barrierefreiheit. In: Hassenzahl, M; Peissner, M. (Hrsg.): *Tagungsband UP05*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2005, S. 46-50.

[43] Pruitt, J.; Grudin, J.: Personas: practice and theory. In: Arnowitz, J.; Chalmers, A.; Swack, T. (Hrsg.): *DUX '03: Proceedings of the 2003 conference on Designing for user experiences*, San Francisco, CA, USA: ACM, 2003. DOI: https://doi.org/10.1145/997078.997089.

[44] Cooper, A.: The inmates are running the asylum. Indianapolis, IN, USA: Sams, 1999.

[45] Franz, W.: Arbeitsmarktökonomik. Berlin: Springer, 2006.

[46] Bothfeld, S.; Sesselmeier, W.: Arbeitsmarkt- und Beschäftigungspolitik. In: Mause, K.; Müller, C.; Schubert, K. (Hrsg.): *Politik und Wirtschaft: ein integratives Kompendium*. Wiesbaden: Springer, 2016, S. 1–42.

[47] Jesgarzewski, T.: Arbeitsrecht. Wiesbaden: Springer, 2019.

[48] Heilmann, J.; Raehlmann, I.; Schweres, M.: Arbeitswissenschaft und Arbeitsrecht - Gehalt und Funktion arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse im Arbeitsrecht. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft. 69*. Jg, 2015, Nr. 4, S. 258–268.

[49] Schlick, C. M.; Luczak, H.; Bruder, R.: Arbeitswissenschaft. Heidelberg: Springer, 2010.

[50] Hillebrandt, F.: Exklusionsindividualität. Moderne Gesellschaftsstruktur und die soziale Konstruktion des Menschen. Wiesbaden: VS Verlag, 1999.

[51] Geißler, R.: Die Sozialstruktur Deutschlands. Wiesbaden: Springer, 2014.

[52] Van Deth, J. W.; Scarbrough, E.: The Concept of Values. In: Van Deth, J. W.; Scarbrough, E.; Kaase, M. (Hg.) (1998*): The impact of values. Oxford: Oxford Univ. Press* (Beliefs in government, volumes of a Research Programme of the European Science Foundation / ser. ed. Max Kaase; Vol. 4), S. 21-47.

[53] Lucadou, W.; Römer, H.: Schuld, Person und Gesellschaft. Systemische Perspektiven. In: Kick, H. A.: Schuld: Bearbeitung, Bewältigung, Lösung. Strukturelle und prozessdynamische Aspekte. Münster: LIT, 2011.

[54] Böhm, W.; Seichter, S.: Wörterbuch der Pädagogik. 17. Auflage. Stuttgart: UTB, 2017.

[55] Anzenbacher, A.: Bildungsbegriff und Bildungspolitik. In: *Jahrbuch für christliche Sozialwissenschaften 40*. Jg., 1999, S. 12–37.

[56] Lehmann, E.; Wilhelm, D.: Digitalisierung, Disruption und Corporate Entrepreneurship. In: Keuper, F.; Schomann, M.; Sikora, L. I.; Wassef, R. (Hg.)

(2018): *Disruption und Transformation Management*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 239-266.

[57] Christensen, C. M.: The innovator's dilemma: the revolutionary book that will change the way you do business: New York, NY: Harper Paperbacks, 1997.

[58] Christensen, C. M.: The Ongoing Process of Building a Theory of Disruption. In: *Journal of Product Innovation Management*. 23. Jg., 2006, Nr. 1, S. 39–55.

[59] Brickwedde, F.: Ökologische Nachhaltigkeit. In: Krüger, W.; von Schubert, B.; Wittberg, V. (Hrsg.): *Die Zukunft gibt es nur einmal! Wiesbaden*: Gabler, 2010, S. 47–60.

[60] Fortmann, H. R.; Kolocek, B.: Arbeitswelt der Zukunft. Wiesbaden: Springer, 2018.

[61] Dellot, B.; Mason, R.; Wallace-Stephens, F.: *The Four Futures of Work: Coping with Uncertainty in an Age of Radical Technologies*. RSA. URL: https://www.thersa.org/globalassets/pdfs/reports/rsa_four-futures-of-work.Pdf [Stand: 17.10.2019].

[62] Mitchell, M.: *Artificial intelligence hits the barrier of meaning*. URL: https://www.nytimes.com/2018/11/05/opinion/artificial-intelligence-machine-learning.html [Stand: 17.10.2019].

[63] Manyika, J.; Lund, S.; Chui, M.; Bughin, J.; Woetzel, J.; Batra, P., Ko, R.; Sanghvi, S. (2017). *Jobs lost, jobs gained: Workforce transitions in a time of automation.* URL: https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/featured%20insights/Future%20of%20Organizations/What%20the%20future%20of%20work%20will%20mean%20for%20jobs%20skills%20and%20wages/MGI-Jobs-Lost-Jobs-Gained-Report-December-6-2017.ashx [Stand: 17.10.2019].

[64] Balliester Reis, T.; Elsheikhi, A.: *The future of work: a literature review*. URL: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---inst/documents/publication/wcms_625866.pdf [Stand: 17.10.2019].

[65] Daheim, C.; Wintermann, O.; Glenn, J.: *Work 2050: three scenarios. New findings of an international Delphi study by the Millennium Project*. URL: https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/ST-BS_Delphi-2019_Englisch.pdf [Stand: 13.11.2019].

[66] Zhang, Y. X.; Chao, Q. C.; Zheng, Q. H.; Huang, L.: The withdrawal of the U.S. from the Paris Agreement and its impact on global climate change governance. In: Advances in Climate Change Research. 8. Jg., 2017, Nr. 4, S. 213-219.

[67] Wolter, M. I.; Mönnig, A.; Hummel, M.; Schneemann, C.; Weber, E.; Zika, G.; Helmrich, R.; Maier, T.; Neuber-Pohl, C.: Industrie 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Wirtschaft. Szenario-Rechnungen im Rahmen der BIBB-IAB-Qualifikations-und Berufsfeldprojektionen. (Reihe: IAB-Forschungsbericht, Bd. 8/2015). 2015.

[68] Facer, K.; Sandford, R.: The next 25 years?: future scenarios and future directions for education and technology. In: Journal of computer assisted learning, 26. Jg., 2010, Nr. 1, S. 74-93.

[69] Cawood, R.; Roche, J.; Ong, A.; Sharma, D.; Mulder, A.; Jones, L.; Ta, D.; Kirkhope, J.: *Can the universities of today lead learning for tomorrow? The University of the Future*. URL: https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-

com/en_au/topics/government-and-public-sector/ey-university-of-the-future-2030.pdf [Stand: 13.11.2019].

[70] Ehlers, U. D.; Kellermann, S. A.: Future Skills: *The future of learning and higher education*. URL: https://nextskills.files.wordpress.com/2019/03/2019-02-23-delphi-report-final.pdf [Stand: 13.11.2019].

[71] Williamson, B.: Big data in education: The digital future of learning, policy and practice. Los Angeles: Sage, 2017.

[72] Thiede, S.; Juraschek, M.; Herrmann, C.: Implementing cyber-physical production systems in learning factories. In: *Procedia CIRP*. 54 Jg., 2016, S. 7-12.

[73] Erol, S.; Jäger, A.; Hold, P.; Ott, K.; Sihn, W.: Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. In: *Procedia CIRP*, 54. Jg., 2016, S. 13-18.

[74] Statistisches Bundesamt (2019). URL: https://service.destatis.de/bevoelkerungspyramide/ [Stand: 05.11.2019].

[75] Störmer, E.; Patscha, C.; Prendergast, J.; Daheim, C.; Rhisiart, M.; Glover, P.; Beck, H.: *The future of work: jobs and skills in 2030*. URL: https://www.oitcinterfor.org/sites/default/files/file_publicacion/thefutureofwork.pdf [Stand: 05.11.2019].

[76] KOSTAL Kontakt Systeme GmbH: *Unternehmen*. URL: https://www.kostal-kontakt-systeme.com/de-de/unternehmen/das-sind-wir [Stand: 04.02.2020].

[77] Henkel AG & Co. KGaA (2020). *Unternehmensbereich Laundry and Homecare*. URL: https://www.henkel.de/marken-und-unternehmensbereiche/laundry-and-home-care [Stand: 04.02.2020].

[78] Henkel AG & Co. KGaA: *Henkel startet weltweite digitale Fortbildungsinitiative*. URL: https://www.henkel.de/presse-und-medien/presseinformationen-und-pressemappen/2019-03-28-henkel-startet-weltweite-digitale-fortbildungsinitiative-923930 [Stand: 05.03.2020].

[79] Lebensmittelzeitung (2019). *Digital Upskilling bei Henkel: “Wir stehen am Beginn ener lernreise“*. URL: https://www.lebensmittelzeitung.net/handel/Digital-Upskilling-bei-Henkel-Wir-stehen-am-Beginn-einer-Lernreise-140091 [Stand: 05.03.2020].

[80] Bär, D.: Digitale Transformation und gesellschaftliche Teilhabe. In: *Digitalisierung im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Recht*. 1. Band: Politik und Wirtschaft. Berlin: Springer Gabler, 2018, S. 1-10.

[81] acatech: *acatech Begleitprozess zur Strategie Bayern Digital. Ergebnispapier mit Handlungsempfehlungen*. URL: https://www.muenchner-kreis.de/fileadmin/dokumente/_pdf/20150309/acatech_Bayern_Digital_WEB.pdf [Stand: 01.06.2021].

[82] Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Wissenswertes zum DigitalPakt Schule*. URL: https://www.bmbf.de/de/wissenswertes-zum-digitalpakt-schule-6496.php [Stand: 01.06.2021].

[83] vbw – Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V. (Hrsg.): *Digitale Souveränität und Bildung*. Münster: Waxmann, 2018.

[84] NRWgoesdigital: *Projektüberblick*. URL: https://www.nachwuchsstiftung-maschinenbau.de/ausbildung-40/nrwgoesdigital.html [Stand: 01.06.2021].

[85] Erni, K.: *Lernen 4.0. 4 Tipps, Mitarbeiter zu fordern, ohne zu überfordern*. URL: https://www.scope-online.de/smart-industry/lernen-4-0-mitarbeiterqualifizierung-in-zeiten-von-industrie-4-0.htm [Stand: 01.06.2021].

[86] Guggemos, M.; Jacobs, J. C.; Kagermann, H.; Spath, D. (Hrsg.): *Die digitale Transformation gestalten: Lebenslanges Lernen fördern. Empfehlungen des Human-Resources-Kreises von acatech und der Jacobs Foundation sowie der Hans-Böckler-Stiftung*. URL: https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/10/acatech_DISKUSSION_LebenslangesLernen_WEB.pdf [Stand: 01.06.2021].

[87] Mittelstand-Digital: *Mitarbeiterqualifizierung und Wissenstransfer im Zusammenhang der Digitalisierung von Arbeits- und Geschäftsprozessen. Ergebnisse einer Bedarfs- und Trendanalyse*. URL: https://kommunikation-mittelstand.digital/content/uploads/2017/06/Studie-Qualifizierung-Wissenstransfer-Prozessdigitalisierung.pdf [Stand: 01.06.2021].

[88] Herzog, S.; Sanders, A.; Redlich, T.; Wulfsberg, J.: Mitarbeiterqualifikation in der Smart Factory: Ansatzpunkte zum Qualifizierungsbedarf der Mitarbeiter ausgehend von neuartigen Geschäftsmodellen einer Smart Factory. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 111. Jg., 2016, Nr. 10, S. 653-657.

[89] Hammermann, A.; Stettes, O.: *Qualifikationsbedarf und Qualifizierung. Anforderungen im Zeichen der Digitalisierung*. IW Policy Paper. 3/2016. URL: http://hdl.handle.net/10419/127450 [Stand: 01.06.2021].

[90] Abel, J.; Wagner, P. S.: Industrie 4.0: Mitarbeiterqualifizierung in KMU. In: *wt Werkstattstechnik online*. 107. Jg., 2017, Nr. 3, S. 134-140.

[91] OpenupEd: *Definition Massive Open Online Courses (MOOCs).* 2014. URL: http://www.openuped.eu/images/docs/Definition_Massive_Open_Online_Courses.pdf [Stand: 01.06.2021].

[92] Baggaley, J. MOOC rampant. Distance education, 34. Jg., 2013, Nr. 3, S. 368-378.

[93] Shah, D.: By The Numbers: MOOCs in 2020 — Class Central. (2020, November 30). *The Report by Class Central*. URL: https://www.classcentral.com/report/mooc-stats-2020/https://www.classcentral.com/report/mooc-stats-2020/ [Stand 01.06.2021].

[94] Kennedy, J.: Characteristics of massive open online courses (MOOCs): A research review, 2009-2012. Journal of Interactive Online Learning, 13. Jg., 2014, Nr. 1.

Mitarbeitende für den Vortrag 4.1:

Prof. Dr.-Ing. R. Schmitt, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT
Dr.-Ing. M. Bergholz, KOSTAL Kontakt Systeme GmbH
Dr.-Ing. B. Döbbeler, KOSTAL Kontakt Systeme GmbH
Prof. Dr. Sarah Hatfield, Hochschule Augsburg
C. Kieper, apetito AG
M. Plutz, oculavis GmbH
Dr.-Ing. R. Varandani, Henkel AG & Co. KGaA
T. Adam, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Dr. I. Heine, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
T. Hellebrandt, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
A. Metzmacher, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

## 4.2 Monetarisierung von Fertigungsdaten zur Steigerung der ökologischen Effizienz

*D. Trauth, T. Bergs, C. Gülpen, M. J. K. Kornely, W. Maaß, J. Mayer, H. Musa, P. Niemietz, A. Rohnfelder, M. Schaltegger, S. Seutter, J. Starke, E. Szych, M. Unterberg*

### Gliederung

1 Einleitung ....411

2 Datenmonetarisierung ....413

3 Potenziale für die industrielle Produktionstechnik ....415
3.1 Anlagenoptimierung ....415
3.2 Produkt- und Prozessüberwachung ....416
3.3 Austausch von Produkteigenschaften ....416
3.4 Verifikation der Herkunft ....417

4 Bausteine, Herausforderungen und Lösungen ....417
4.1 Bausteine für eine Datenmonetarisierung ....418
4.2 Woran die Monetarisierung von Fertigungsdaten scheitert ....420
4.3 Architektur eines Datenmarktplatzes ....423
4.4 Rebound-Effekte in der Datenmonetarisierung ....425
4.5 Von der Datenmonetarisierung zur Datenökonomie ....426

5 Szenarien für die Fertigungstechnik ....429
5.1 Verkaufen von Sekundärdaten: Produktbenchmark ....430
5.2 Kaufen von Daten Dritter: Transparenz des Werkstoffs ....430

6 Fazit ....432

7 Literatur ....433

## Kurzfassung

**Monetarisierung von Fertigungsdaten zur Steigerung der ökologischen Effizienz**
Eine Monetarisierung von Fertigungsdaten ermöglicht Unternehmen der fertigenden Industrie eine Steigerung ihrer ökologischen Effizienz. Neben einer Optimierung bestehender Geschäftsmodelle hinsichtlich der Nachhaltigkeit können Unternehmen gleichzeitig auch neue Einkommens- und Informationsströme durch die Etablierung digitaler und progressiver Geschäftsmodelle erschließen. Fortschritte im Bereich der Künstlichen Intelligenz und der Datenverarbeitung ermöglichen einerseits den Erkenntnisgewinn aus Fertigungsdaten und andererseits die möglichst effiziente Nutzung dieser Erkenntnisse im Rahmen von Daten-Allianzen. In diesem Beitrag werden verschiedene Stufen der Datenverwertung von der Wissensgenerierung bis hin zur Monetarisierung dieser Daten konzipiert, technische Grundlagen dargestellt sowie resultierende Potenziale, Hindernisse und deren Lösungen diskutiert und anhand praxisorientierter Anwendungsfälle verdeutlicht. Abschließend werden Handlungsempfehlungen für Unternehmen der fertigenden Industrie abgeleitet und eine potenzielle Monetarisierungsstrategie für Fertigungsdaten zur Steigerung der Effizienz dargelegt.

## Abstract

**Monetization of manufacturing data to increase ecological efficiency**

Monetizing manufacturing data enables companies in the manufacturing industry to increase their ecological efficiency. In addition to an optimization of existing business models with regard to sustainability, companies can also tap into new income and information streams at the same time by establishing digital and progressive business models. Advances in the field of artificial intelligence and data processing make it possible on the one hand to gain knowledge from manufacturing data and on the other hand to use this knowledge as efficiently as possible within the framework of data alliances. In this contribution, different stages of data utilization from knowledge generation to monetization of this data are conceived, technical basics are presented and resulting potentials, obstacles and their solutions are discussed and illustrated by means of practice-oriented use cases. Finally, recommendations for action for companies in the manufacturing industry are derived and a potential monetization strategy for manufacturing data to increase ecological efficiency is presented.

# 1 Einleitung

Die ökologische Nachhaltigkeit gewinnt in Deutschland zunehmend an Bedeutung. Mit der Verpflichtung zum Pariser Klimaabkommen willigte Deutschland 2015 ein, Maßnahmen zu definieren und umzusetzen, welche die globale Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C und im besten Fall auf 1,5 °C begrenzen [1]. Ziel ist es, bis spätestens 2050 eine Treibhausgasneutralität zu erreichen. Der erzielte Fortschritt wird regelmäßig mit den Mitgliedsstaaten bilanziert.

Die Metallverarbeitung spielt eine besondere Rolle für den Klimaschutz und die erneuerbaren Energien, insbesondere durch die Produktion nachhaltiger Energieanlagen, wie z. B. Photovoltaik- und Windkraftanlagen, und den effizienten Umgang mit Rohstoffen. Der Anteil der gesamten deutschen Industrie an den Treibhausgasemissionen Deutschlands beträgt aktuell 20 % [2]. Die Emissionen sollen gemäß Pariser Klimaabkommen bis 2030 um 43 % gesenkt werden. Die Eisen-, Stahl-, Zement- und Chemieindustrie haben an den Emissionen durch die eingesetzten Brenn- und Rohstoffe, gewählte Produktionsverfahren, deren Effizienz sowie die Produktionsmenge, maßgeblichen Anteil [3]. Durch die Verpflichtung zum Pariser Klimaabkommen muss sich die produzierende Industrie mit den von ihr verursachten Emissionen und der ökologischen Nachhaltigkeit ihrer Prozesse beschäftigen.

Ökologische Nachhaltigkeit basiert auf den drei Faktoren Effizienz, Suffizienz und Konsistenz [4]. Die Effizienz betrifft die Ressourcenproduktivität und forciert eine ergiebigere Nutzung von Materie und Energie. Prominente Beispiele der produzierenden Industrie sind die Linien-, Maschinen-, Energie-, Prozess- und Materialeffizienz (Rohstoff, Hilfsstoff, Betriebsstoff). Suffizienz beschreibt den verringerten Verbrauch von Ressourcen durch verändertes menschliches Verhalten. Konsistenz bezieht sich auf die natürliche Kompatibilität der eingesetzten Technologien. Sie fokussiert naturverträgliche Technologien, welche die Stoffe und die Leistungen der Ökosysteme nutzen, ohne sie zu zerstören. Ein Unternehmen muss alle in Prozessen eingesetzten (digitalen) Technologien und implementierten Strukturen im Hinblick auf die drei Faktoren untersuchen, um Ursachen für geringe Nachhaltigkeit zu beseitigen. Dabei konkurriert die ökologische Nachhaltigkeit nicht mit der Zielgröße der Kosten, sondern ist eng mit den ökonomischen Interessen eines Unternehmens verknüpft. Einerseits wirkt sich der $CO_2$-Verbrauch direkt auf die an den Staat zu entrichtenden Steuern aus, insbesondere da ab dem Jahr 2021 $CO_2$-Emissionen mit 25 EUR/t bepreist werden [5]. Andererseits ermöglicht die deutsche Bundesregierung mit Einsparungen beim $CO_2$-Ausstoß den sog. $CO_2$-Zertifikatehandel als zusätzliche Einnahmequelle.

Das Internet der Produktion (Internet of Production, IoP) ermöglicht neue Ansätze für die Erfassung und Steuerung der Nachhaltigkeit eines gesamten Unternehmens. Der Einsatz von Daten in Modellen der Künstlichen Intelligenz (KI) verspricht u. a. die Steigerung der Produktivität, Rationalisierung der Prozessabläufe und Generierung neuartiger Kundenerlebnisse. Innerhalb des eigenen Wertstroms existieren Anwendungsfälle wie das *Track&Trace* einzelner Produkte. Anspruchsvollere Anwendungen, wie z. B. die Prognose von Ausfällen und die Identifikation von deren Ursachen oder die Transparenz und Optimierung komplexer Wertschöpfungsnetzwerke, basieren auf trainierten Modellen auf Basis einer großen und möglichst kontextuell heterogenen Datenmenge. Dies erfordert den Austausch von Daten über die eigenen Unternehmensgrenzen hinweg, da ein einzelnes Unternehmen alleine eine solche Datenmenge nicht bzw. in den seltensten Fällen bereitstellen kann. Mit Hilfe von KI können somit bislang verborgene Kausalitäten und Korrelationen identifiziert und über Unternehmensgrenzen hinweg zur Effizienzsteigerung nutzbar gemacht werden.

Ein indirekter unternehmensübergreifender Austausch von Unternehmens-Know-How wurde in den 1980er Jahren im Zuge des Aufstiegs der Computerindustrie im heutigen Silicon Valley in den USA beobachtet. Der Wechsel von Mitarbeitenden zu konkurrierenden Firmen und damit der Wechsel von individuellem Wissen, zeigte einen überproportionalen Effekt auf das Wachstum und die Innovation der gesamten Branche in Abhängigkeit von der regionalen Nähe der Unternehmen. Dieses Phänomen wird als Knowledge-Spillover-Effekt bezeichnet [6]. Der Austausch von Ideen und Wissen über neue Produkte, neue Wege zur Herstellung von industriellen Gütern und nachhaltigeren Prozessen/Produkten findet weitestgehend zwischen Angestellten verschiedener Firmen einer Branche statt (vgl. Bild 1a). Neben explizitem Wissen von Mitarbeitenden ist Unternehmens-Know-How aber auch durch implizites Wissen vorhanden, das in Rohdaten encodiert ist. Rohdaten sind in der Regel ohne eine entsprechende Vorverarbeitung und Decodierung nicht wertvoll.

Die Vernetzung von produzierenden Unternehmen im Sinne eines IoP ermöglicht durch die Verarbeitung und Decodierung von Rohdaten eine domänenübergreifende Zusammenarbeit zwischen Entwicklung, Produktion und Nutzung. Je nach Anwendungsfall werden die Rohdaten aus diesen Domänen erst durch ihre zeitnahe Verfügbarkeit, gute Organisation, ihren Kontext und die Analyse mit geeigneten Modellen zu nutzbarem Wissen. Diese **datengetriebenen und effizienzbezogenen Knowledge-Spillover-Effekte** können von Unternehmen systematisch durch das Bilden von **Daten-Allianzen** selbst bei komplexen Prozessen und Produkten durch die Nutzung von KI zur Schaffung von Innovationen und zur Optimierung bestehender Prozesse hinsichtlich der Effizienz genutzt werden (vgl. Bild 1b und Bild 1c).

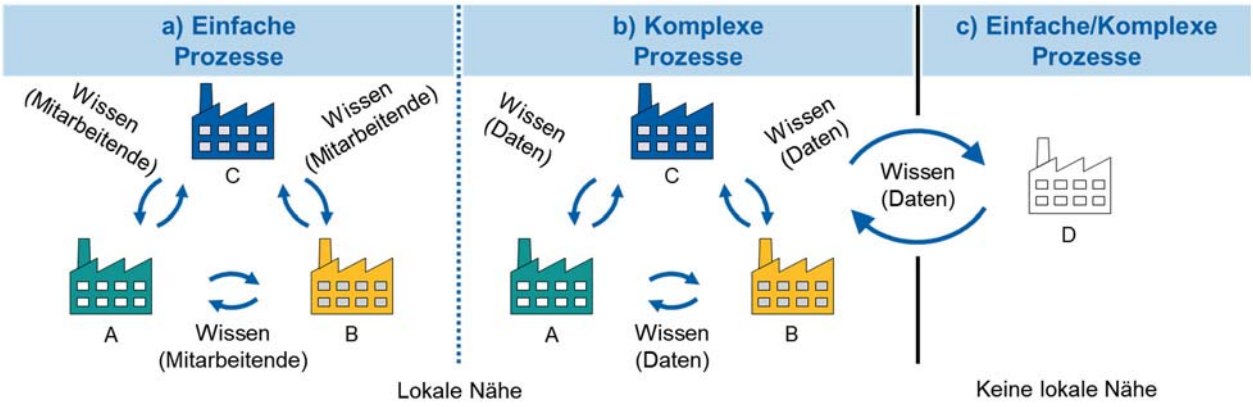



*Bild 1: Schematische Darstellung personeller (a) und datengetriebener Knowledge-Spillover-Effekte (b/c).*

Für eine Daten-Allianz müssen Unternehmen einen ausreichend interoperablen Vernetzungsgrad aufweisen. Hier existiert aktuell sowohl abteilungs- als auch unternehmensübergreifend noch großer Handlungsbedarf [7]. Während der Vertrieb und Einkauf unternehmensintern gut vernetzt sind, ist ein Datenaustausch der Abteilung Personal mit Bereichen wie Logistik (14,2 %) oder Forschung und Entwicklung (FuE; 13,7 %) schwach ausgeprägt. Der Zusammenschluss mit externen Kontakten hingegen ist stark von der Unternehmensgröße abhängig. Abteilungen von Kleinunternehmen sind maximal zu 22 % mit anderen Bereichen fremder Unternehmen vernetzt. Bei Unternehmen mit mehr als 250 Mitarbeitenden können Werte bis zu 50 % ermittelt werden. Auch Datenmodelle und Daten-Managementsysteme müssen innerhalb einer solchen Daten-Allianz vernetzt werden, sodass aus der Bereitstellung von Rohdaten und der anschließenden Aggregation und Transformation mithilfe geeigneter Modelle

nutzbares Wissen entsteht [8]. Die Potenziale einer Daten-Allianz zur datengetriebenen Steigerung der Effizienz stehen der Skepsis von Unternehmen hinsichtlich Datenhoheit, Datenschutz und insbesondere der Unklarheit über die Werthaltigkeit der eigenen Daten diametral entgegen.

In diesem Beitrag werden verschiedene Stufen der Datenverwertung von der Wissensgenerierung bis hin zur Monetarisierung dieser Daten zur Steigerung der Effizienz konzipiert, technische Grundlagen dargestellt sowie die Potenziale, Hindernisse und deren Lösungen diskutiert und anhand praxisorientierter Anwendungsfälle verdeutlicht. Im Kontext der KI-gestützten Effizienzoptimierung dient eine Monetarisierung und ein unternehmensübergreifender Datenhandel der ökologischen Nachhaltigkeit der Unternehmen.

## 2 Datenmonetarisierung

In Industrien wie z. B. der Telekommunikations- und der Werbeindustrie werden Prozess-, Produkt- und Nutzungsdaten bereits zum Zweck der Produkt- und Prozessoptimierung verwendet, weshalb auch die Bepreisung von Daten im Sinne eines wirtschaftlichen Guts in diesen Industrien erfolgreich funktioniert [9]. Das ist insbesondere darin begründet, dass die Verfügbarkeit und die Nutzung von Daten in diesen Industrien seit längerem ein Teil ihrer Produktpalette sind. Dies ermöglicht die Nutzung von Daten zur gezielten Optimierung von Produkten und Prozessen hinsichtlich ihrer Effizienz. Die Verfügbarkeit und Nutzung von Prozess-, Produkt- und Nutzungsdaten ermöglicht eine **Datenmonetarisierung** einerseits durch die Veräußerung von $CO_2$-Zertifikaten und andererseits durch eine geringere Besteuerung durch niedrigere $CO_2$-Emissionen infolge optimierter Produkte und Prozesse.

Der Begriff Datenmonetarisierung schließt dabei nicht nur die im Sprachgebrauch genutzte Bedeutung eines direkten Tauschs von Incentives für ein digitales Datum ein. Vielmehr ist eine Erweiterung des Begriffs auf die Verwertung eines Datums und des darin enthaltenen Wissens zur Generierung eines monetären Mehrwerts sinnvoll. Im fertigungstechnischen Umfeld wie der Blechverarbeitung kann dieser monetäre Mehrwert durch eine gesteigerte ökologische Effizienz zum Beispiel in Form einer verbesserten Materialausnutzung oder einer Reduktion der benötigten Kühlschmierstoffmenge erzielt werden. Die **Monetarisierung von Fertigungsdaten** beschreibt folglich jeden Vorgang, der einen messbaren ökonomischen Vorteil durch die Verwendung von (aggregierten und transformierten) Fertigungsdaten schafft. Die Steigerung der Effizienz durch die Nutzung von Daten ist damit ein **Teilgebiet der Monetarisierung von Fertigungsdaten**.

Die **interne Monetarisierung** von Fertigungsdaten ist als Klasse von Strategien und Vorgängen innerhalb eines Unternehmens der fertigenden Industrie zu verstehen, welche durch **vertikale Prozessanalysen** mit Hilfe von Erkenntnissen aus eigenen oder zugekauften Fertigungsdaten Unternehmens-, Fertigungsprozesse oder Produkte optimieren und ökonomischen Mehrwert generieren. Unternehmensintern lassen sich Mehrwerte durch Erkenntnisse aus Daten am schnellsten verwirklichen, da der Anspruch an Datensicherheit, Datensouveränität und Datenschutz firmenintern in der Regel niedriger ist als bei einer externen Datenmonetarisierung, weil sensible Daten das Unternehmensnetzwerk nicht verlassen müssen. Mehrwerte einer internen Datenmonetarisierung sind in Bild 2 aufgeführt.

*Bild 2: Mehrwerte einer internen Datenmonetarisierung.*

Mit geringem Aufwand können neue Erkenntnisse über Produktions- oder Geschäftsprozesse gewonnen und zur Steigerung der Effizienz genutzt werden. Entscheidungslatenzen können reduziert und somit z. B. die Materialausnutzung durch eine Reduktion des Ausschusses erhöht werden, Produkte können hinsichtlich ihrer Effizienz optimiert und Risiken minimiert werden. Die Effekte der internen Datenmonetarisierung zielen dementsprechend auf eine Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse und -modelle ab.

Die **externe Monetarisierung** von Fertigungsdaten ist eine Klasse von Strategien und Vorgängen, welche interne Fertigungsdaten und Erkenntnisse aus Daten durch entsprechende analytische Modelle in Form von **horizontalen Analysen** entlang der Wertschöpfungskette, über Unternehmensgrenzen hinweg und auf digitalen Geschäftsmodellen basierend zur Verfügung stellt. Das Erfüllen der Anforderungen an Datensicherheit und -schutz ist eine notwendige Voraussetzung für eine derartige Monetarisierungsstrategie, weil interne und unter Umständen sensible Unternehmensdaten über Unternehmensgrenzen hinweg ausgetauscht werden. Eine Umsetzung verspricht die Erschließung neuer Einkommensströme und die Gewinnung neuer Marktanteile durch digitale, innovative und progressive Geschäftsmodelle und digitale Incentives (siehe Bild 3). Die Wertschöpfung des traditionell geprägten Maschinenbaus erweitert sich im Zuge einer externen Datenmonetarisierung um digitale Produkte in Form von Daten und Services.

*Bild 3: Mehrwerte einer externen Datenmonetarisierung.*

Während die interne Datenmonetarisierung schon heute in unterschiedlichsten Fertigungsverfahren möglich ist und auch zu Zwecken der Steigerung der Effizienz eingesetzt wird [10], ist eine externe Datenmonetarisierung in der Produktionstechnik noch nicht etabliert. Einer der Hauptgründe hierfür ist die große Skepsis vieler Unternehmen, ihre Daten an Dritte weiterzugeben bei gleichzeitiger Unwissenheit, wie viel existenzsicherndes Know-How in den Daten repräsentiert ist und welchen Wert die eigenen Daten haben. Das Risiko, potenziell sehr wertvolle Daten zu günstig zu veräußern, ist vielen Unternehmen zu hoch. Das erschwert eine Bepreisung und damit die Offenheit im Handel mit Unternehmensdaten. Für Unternehmen ist es in den meisten Fällen unmöglich, die Potenziale eigener Datensätze durch den Einsatz KI-gestützter Methoden zu ergründen, mangels eigener, personengebundener KI-Expertise. Somit

besteht ein Abhängigkeitsverhältnis mit externen Dienstleistern, das wiederum Hemmnisse in Sachen Datenschutz und Datenhoheit erzeugt. Eine Lösung zum Abbau dieser Hemmnisse ist dringend nötig, denn um die Potenziale eines unternehmensübergreifenden Datenhandels zu nutzen und damit die ökologische Effizienz zu steigern, ist die Bündelung möglichst vieler verschiedener heterogener Datenquellen unterschiedlicher Akteure zwingend notwendig.

Ein möglicher Lösungsansatz besteht in der Nutzung von KI-basierten Services, die Vorhersagen aufgrund von anonymisierten Rohdaten treffen. Über ein geeignetes Beteiligungsmodell können die Datenerzeugenden an den Erkenntnissen und Innovationen, die aus ihren Daten hervorgehen, partizipieren. Der Wert eines Datums ist somit unmittelbar an die Qualität und Verfügbarkeit digitaler KI-basierter Services gekoppelt.

# 3 Potenziale für die industrielle Produktionstechnik

Dem Sinn nach postulierte Peter Drucker: „Was man nicht messen kann, kann man nicht lenken“. Um die ökologische Effizienz der industriellen Produktion zu steigern, ist es notwendig, sie verlässlich und produktspezifisch zu messen, damit konkrete Defizite und Handlungsfelder identifiziert werden können. Einen Ansatz hierzu verspricht das Life Cycle Assessment (LCA), das den ökologischen Fußabdruck eines Produkts von der ‚Wiege bis zur Bahre‘, also von der Entstehung bis zur Entsorgung, abbildet. Das LCA betrachtet dabei die Ebenen i) Rohstoffgewinnung, ii) Fertigung, iii) Verpackung und Transport, iv) Nutzung, und v) Entsorgung [11]. Um aus einem LCA konkrete Handlungsempfehlungen für die industrielle Produktion abzuleiten und dabei die Potenziale der unternehmensübergreifenden Nutzung von Daten zu bergen, ist es nötig, Stellhebel für die ökologische Effizienz in der industriellen Produktion zu identifizieren. Die vier Segmente Anlagenoptimierung, Produkt-/Prozessoptimierung, Austausch von Produkteigenschaften sowie Verifizieren der Herkunft versprechen neben dem ökologischen auch ein ökonomisches Potenzial von weltweit insgesamt über 100 Mrd. US.-$ (siehe Bild 4) [12].

## 3.1 Anlagenoptimierung

Daten von unvorhersehbaren und unerwarteten Maschinenausfällen sind rar. Um schnell auf Maschinenausfälle reagieren zu können müssen traditionell große Mengen an Ersatzteilen vorgehalten werden oder Service Teams unverzüglich ausrücken, um die Anlage vor Ort zu warten und wieder instand zu setzen. Sowohl das Vorhalten großer Lagerbestände an Ersatzteilen als auch das Ausfahren der Serviceteams verursacht Emissionen, welche durch eine genaue Vorhersage von Maschinenausfällen und Handlungsempfehlungen deutlich verringert werden können. Das Training datengetriebener Modelle um solche robusten Vorhersagen zu treffen erfordert jedoch Informationen über genau diese unerwarteten Ereignisse. Daten desselben Maschinentyps von unterschiedlichen Maschinenbetreibenden ermöglichen die Verbesserung von Instandhaltungsmaßnahmen im Sinne einer Predictive Maintenance durch datengetriebene Prädiktionsmodelle und somit eine gesteigerte Maschinenlaufzeit, weniger Serviceeinsätze, effizienteres Ersatzteilmanagement und Produktqualität [13]. Die Verfügbarkeit von Daten, die zur Anlagenoptimierung genutzt werden können, erfordert ein Mindestmaß an sensorischer Messausstattung. Durch eine externe Datenmonetarisierung und damit den Zukauf von Daten anderer Produzierender mit den gleichen oder ähnlichen Anlagen können datengetriebene Modelle im Sinne eines Transfer Learnings weiter angereichert und verfeinert werden [14].

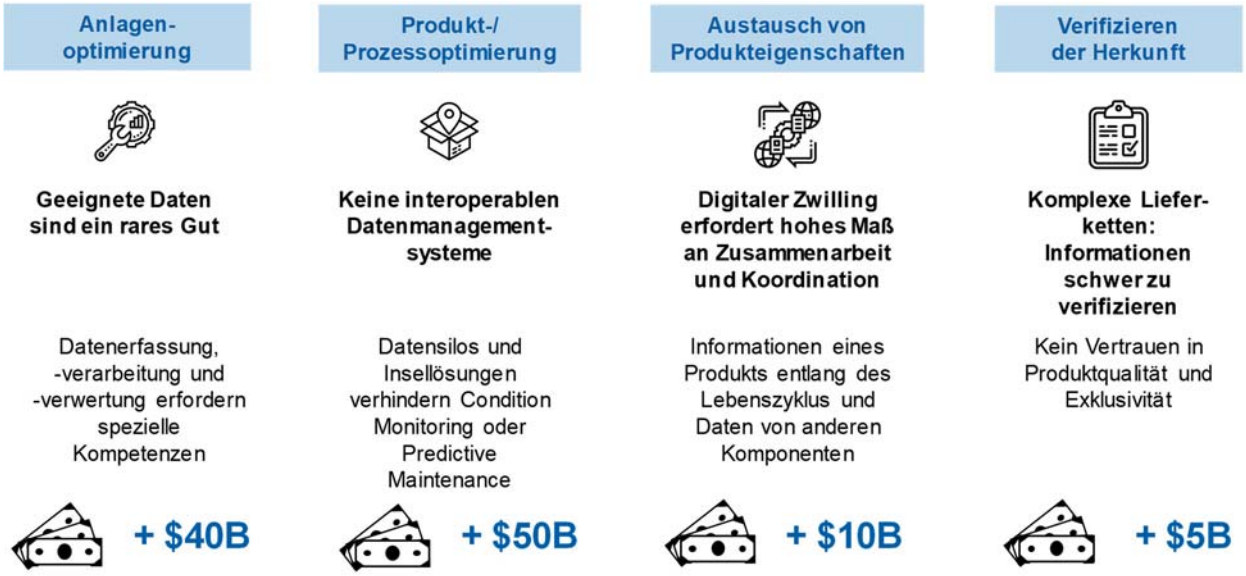



*Bild 4: Potenziale einer Datenmonetarisierung in der industriellen Produktionstechnik. Insbesondere die Anlagenoptimierung sowie die Produkt- und Prozessüberwachung bergen ein hohes ökonomisches Potenzial [10].*

## 3.2 Produkt- und Prozessüberwachung

Der Austausch von Daten, die produkt- bzw. prozessrelevante Informationen, z. B. über den Standort von Produkten oder den Status von Prozessen, beinhalten, ermöglicht eine unmittelbare bauteilspezifische Reaktion auf Störungen und Fehler in Liefer- und Wertschöpfungsketten [12]. Bei fehlerhaften Bauteilen in einer Produktionsserie müssten somit nicht ganze Chargen beispielsweise an Automobilen zurückgerufen und gewartet werden, sondern nur exakt die Automobile, in welchen die fehlerhaften Bauteile verbaut wurden, wodurch sich der benötigte Aufwand in Materie und Energie allgemein einsparen ließe. Außerdem können Bestände in bestimmten Produktkategorien und Materialien durch die Kenntnis der aktuellen Geoposition von Gütern oder des Bestands eines Auftraggebenden und dessen Prozesszuständen bedarfsgerecht minimiert und maximiert sowie Prozesse genauer geplant und getaktet werden. Der Unterschied zu einem herkömmlichen RFID-Tracking ist die durchgängige Sichtbarkeit, die durch einen unmittelbaren Datenaustausch und eine externe Datenmonetarisierung gewährleistet wird [15]. Durch das frühzeitige Wissen um erkannte Fehler einer Lieferung von Bauteilen können durch Sicherheitsbestände oder automatisches Ausweichen auf andere Lieferunternehmen kompensiert werden und damit die Resilienz von Unternehmen der fertigenden Industrie steigern. Die digitale Abbildung der Prozesskette dient dabei dem Nachweis bei der Klärung von Haftungsfragen und der Predictive Maintenance. Eine Prozess- und Produktüberwachung ermöglicht zusätzlich einen zertifizierungsrelevanten Nachweis der Einhaltung ausgewählter Parameter, wie z. B. der Temperatur oder einem Höchstmaß an Vibrationen während der Produktion oder des Transports. Der offene Zugriff auf die jeweils relevanten Daten kann somit die Vermeidung von Verschwendung durch Wechseln von Lieferunternehmen ermöglichen, falls durch Daten Mängel in der Dienstleistung, die zur Beschädigung der Ware geführt haben, identifiziert wurden.

## 3.3 Austausch von Produkteigenschaften

Produkteigenschaften, wie die exakte Bauteilgeometrie oder die Werkstoffeigenschaften eines Halbzeugs, können mit Hilfe eines digitalen Zwillings repräsentiert werden. Der Austausch eines digitalen Zwillings ermöglicht es überdies, Produktionsprozesse

individuell zu synchronisieren und zu optimieren. Durchgängige Qualitätskontrollen bei Wareneingang werden durch bauteilgenaue Qualitätsüberprüfung und Rückverfolgbarkeit obsolet [16]. Der digitale Zwilling erweitert die Datenbasis eines CAD-Modells um die tatsächlichen Dimensionen und Qualitäten eines Bauteils in Folge der verschiedenen Produktionsschritte und ermöglicht so eine datengestützte Auditierung bzw. Zertifizierung. Die möglichst feingranulare Repräsentation eines Produktes durch einen digitalen Zwilling erfordert eine intensive Zusammenarbeit zwischen den verschiedensten Beteiligten der Wertschöpfungskette, birgt jedoch das Potenzial sowohl für Lieferunternehmen als auch für Produzierende, Verschwendung vorzubeugen und ihr operatives Geschäft mittels externer und interner Datenmonetarisierung zu optimieren. Insbesondere durch die in Echtzeit ermöglichte Rückmeldung zu den Qualitätsbestimmungen von Bauteilgruppen können Anforderungen den schwankenden Bedarfen des Einsatzes angepasst, und somit die Fertigung unpassender, oder „zu geometrisch exakter“ Bauteile mit hohem Energiebedarf verringert werden.

## 3.4 Verifikation der Herkunft

Ein Nachweis über die Herkunft ausgewählter Güter steht, verstärkt durch die zunehmenden Nachrichten von desaströsen Arbeitsbedingungen wie beispielsweise in Cobaltmienen in der Demokratischen Republik Kongos, im Fokus vieler Auftraggebenden. Zum einen ist jeder Produktionsschritt von der Qualität der gelieferten Produkte abhängig und Produzierende müssen ihren Lieferunternehmen das Vertrauen entgegenbringen, dass Produkte z. B. die vereinbarten Qualitätsanforderungen erfüllen. Andernfalls wäre die Prozessauslegung nicht korrekt und das Endprodukt fehlerhaft. Zum anderen müssen durch die geplanten Lieferkettengesetzänderungen in Deutschland humanitäre und Umwelt-Standards entlang der Lieferkette gewährleistet werden. Wenn Produzierende Daten im Sinne einer externen Datenmonetarisierung erwerben könnten, die den gesamten Produktlebenszyklus im Sinne eines LCA abbilden, hätten sie die Produktionsstandards der Lieferkette durch Daten abgesichert und besäßen im Falle einer Mangelerscheinung eine sichere Beweisgrundlage. Weiterhin ist, insbesondere hinsichtlich zu erwartender Regulationen und gesellschaftlicher Veränderungen, künftig eine Verifikation der Herkunft von Rohstoffen, Halbzeugen oder Produkten denkbar, die einen bestimmten $CO_2$-Fußabdruck garantiert. Unternehmen könnten somit Anreize erhalten, einen möglichst geringen $CO_2$-Fußabdruck zu hinterlassen.

# 4 Bausteine, Herausforderungen und Lösungen

Unternehmen müssen in ihrer Datenakquise- und Datenverarbeitungsstrategie bestimmte Voraussetzungen erfüllen, damit eine Monetarisierung von Fertigungsdaten gelingt und diese zur Steigerung der Nachhaltigkeit verwendet werden kann. Fertigungsdaten sind im Ausgangszustand roh, unveredelt und stehen in keinem Kontext zueinander. Sie haben somit per se keinen Wert, solange sie nicht einem Kontext zugeordnet werden können, der ihnen eine Bedeutung gibt. Analytische Modelle können Daten dementsprechend ohne einen Kontext nicht in Informationen transformieren. Die Vorhersage eines Qualitätsmerkmals eines Bauteils hat bspw. keinen Wert, wenn der Kontext der Analyse, wie z. B. der betrachtete Zeitraum, unklar ist. Gleichzeitig ist es für Unternehmen kritisch, welche Informationen sie in Kontext zueinander bringen und welche nicht, weil somit Rückschlüsse auf gegebenenfalls kritische Mitarbeitendenkennzahlen getroffen werden können. Hieraus ergeben sich verschiedene Bausteine und Herausforderungen sowohl für interne als auch externe Datenmonetarisierungsstrategien, die im Folgenden näher analysiert werden. Weiterhin

werden entwickelte Lösungen für diese Herausforderungen in Form von Daten-Allianz-Architekturen, Enabler-Technologien und möglichen Beteiligungsmodellen aufgezeigt.

## 4.1 Bausteine für eine Datenmonetarisierung

Die **Datenqualität** setzt sich aus der Größe der zur Verfügung stehenden Datenbasis mit Blick auf die zu lösende Fragestellung, dem Kontext in welchem die Daten zu anderen Datensätzen stehen und dem Grad der Datenbereinigung zusammen. **Datenbereinigung** ist hierbei der Prozess des Erkennens und Korrigierens (oder Entfernens) unvollständiger oder ungenauer Datenpunkte aus einem Datensatz, einer Tabelle oder einer Datenbank. Sie bezieht sich auf das Identifizieren unvollständiger, falscher, ungenauer oder irrelevanter Teile der Daten und das anschließende Ersetzen, Ändern oder Löschen verunreinigter oder grober Daten [17]. Nach der Bereinigung sollte ein Datensatz vollständig und mit ähnlichen Datensätzen im System konsistent sein.

Um die Potenziale einer Datenbasis bergen zu können, müssen Unternehmen die Datenakquise sowie die Datenaufbereitung aus eigenen Ressourcen und Mitteln verwirklichen, da die Individualität der in der Produktion eingesetzten Lösungen und Schnittstellen zwingend Einzellösungen erfordert. Hierbei obliegt es den Teilnehmenden einer Daten-Allianz, ein einheitliches Format bestimmter Datentypen zu definieren, das von den Teilnehmenden dann individuell verwirklicht wird.

In der **Modellbildung** mit KI werden z. B. statistische Lernverfahren mithilfe geeigneter bereinigter Datensätze trainiert um Zusammenhänge zu identifizieren. In der fertigenden Industrie sind neben Ereignisdaten (z. B. Maschinenstatus und Prozessstatus) auch uni- und multivariate Zeitreihen häufige Datentypen. Neben maschinellen Lernverfahren, wie z. B. Convolutional Neural Networks [18] oder Support Vector Machines [19] zur Regression oder Klassifikation, eignen sich auch hybride Ansätze mit Fuzzy Logic [20] und Process Mining [21] für einen Einsatz in der fertigenden Industrie.

Unter **Smart Services** wird die höchste Ebene digitaler Infrastrukturen verstanden, welche die Daten cyber-physischer Systeme analytisch verdichten und solche Erkenntnisse extrahieren, die für die Entscheidungsfindungen von Bedeutung sind. Smart Services werden entwickelt, um diese Erkenntnisse kontextbezogen und bedarfsorientiert über Plattformen mehrwertstiftend bereitzustellen und auch fachfremdem Personal zugänglich aufzubereiten [22]. Diese breite Nutzbarkeit ermöglicht Innovationen und Wertsteigerungen bestehender und neuer Technologien und Produkte (vgl. Bild 5).

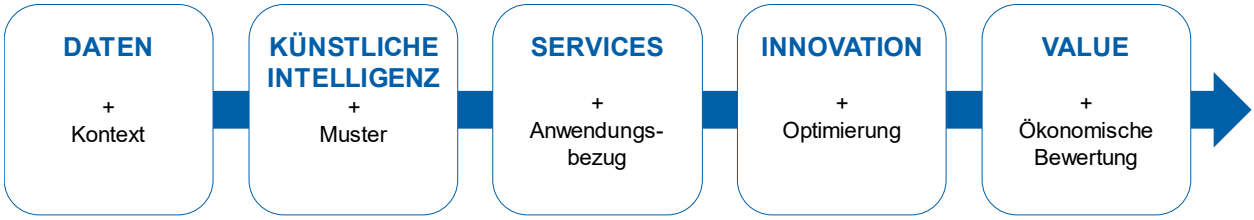



*Bild 5: Bausteine für eine Datenmonetarisierung zur Innovations- und Wertsteigerung.*

Diese grundlegenden Bausteine zur Veredelung von Unternehmensdaten sind notwendig, um das implizit in Daten enthaltene Wissen für die Anwendungsfälle in den Unternehmen nutzbar zu machen. Bild 6 zeigt dabei schematisch die Bedeutung dieser grundlegenden Schritte auf. Um Daten im Rahmen von Daten-Allianzen gewinnbringend einsetzen zu können, müssen die Grundvoraussetzungen in der Datenakquise und -verarbeitung bei jeden teilnehmenden Personder Daten-Allianz erfüllt werden und ein Mindestmaß an FuE-Kapazitäten in die Entwicklung der Datenqualität (Datenbasis, Kontext und Datenbereinigung) investiert werden. Das Risiko für FuE-Investitionen im Bereich KI kann

dann durch die Nutzung von Dienstleistungen an externe Fachkundige ausgelagert werden.

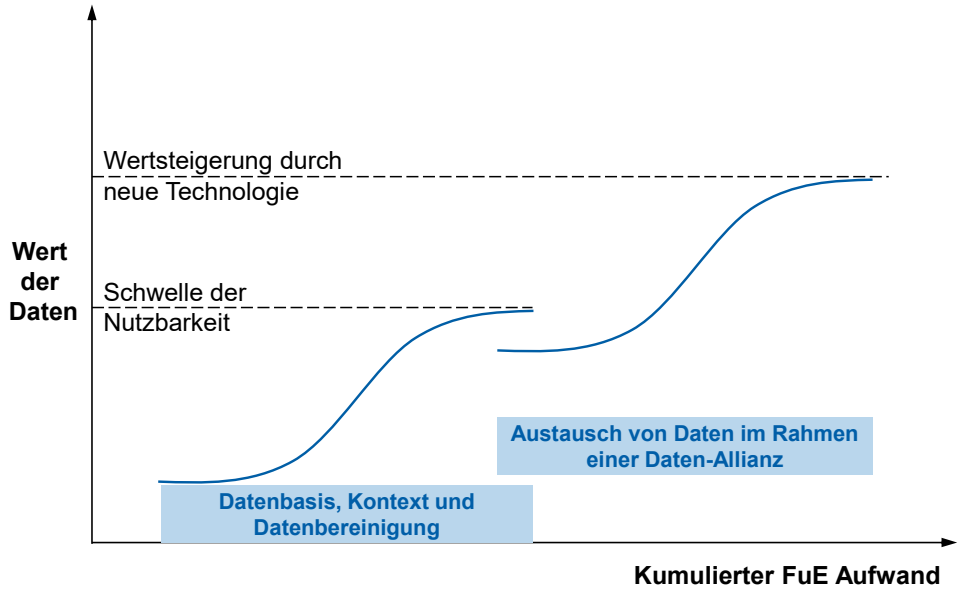



*Bild 6: Steigerung des Datenwerts durch interne und externe FuE-Aufwände.*

Zusätzliche Bausteine betreffen vor allem die **Datensicherheit** und **Privatsphäre**, was die in Daten enthaltenen sensiblen Informationen über Arbeitskrafteffektivität, Maschinenauslastung oder technologische Details miteinschließt. Durch eine Anonymisierung von Daten und Entfernen kritischer Metainformationen können diese Herausforderungen bereits entschärft und umgangen werden.

Weitere Faktoren mit einem Einfluss auf den Wert von Daten können wie folgt zusammengefasst werden.

- Die Aktualität der Daten ist in zahlreichen Anwendungsfällen essenziell. Sollen beispielsweise Maschinendaten zu Wartungszwecken ausgewertet werden, ist die Aktualität der Daten unumgänglich. Stehen diese Maschinendaten erst nach mehreren Tagen zur Verfügung, können sie zwar immer noch in datengetriebene Modelle eingearbeitet werden, haben jedoch keine Aussagekraft mehr über den aktuellen Zustand einer Maschine im Sinne einer Echtzeitüberwachung.
- Ein Datum, das potenziell viele Interessenten hat, kann mehrfach verkauft oder ausgetauscht werden. Ein Datum kann aber auch durch die Exklusivität des Besitzes wertvoll sein und durch Mehrfachverkauf wesentlich an Wert verlieren. Besitzt ein Unternehmen beispielsweise exklusive Informationen, wann es zum Ausfall bestimmter Maschinenkomponenten kommt, können benötigte Services vorbereitet und der Kundschaft direkt und ohne Konkurrenzdruck zur Verfügung gestellt werden. Besitzt jedoch die Konkurrenz ebenfalls diese Informationen, besteht kein Wettbewerbsvorteil alleine durch Kenntnis der Information.
- Erst durch die Entwicklung von KI-Modellen und einer Erprobung dieser in geeigneten Anwendungsszenarien kann das Potenzial zur Steigerung der ökonomischen und ökologischen Effizienz bestimmter Daten bestimmt werden. Werden aus bestimmten Datensätzen sehr genaue Vorhersagemodelle beispielsweise zum Verschleiß von Werkzeugkomponenten entwickelt, kann der Wert der Daten durch effektives Reduzieren von Ausschuss bei einer nachhaltigeren Werkzeugnutzung nachträglich steigen.

- In der Entwicklung von KI-Modellen sind insbesondere Datensätze mit Anomalien wertvoll, weil diese oft rar aber unabdingbar für die Performance von KI-Modellen sind. Enthalten Datensätze nachweislich eine hohe Anzahl an Anomalien oder ließen sich Anomalien vorher identifizieren und dediziert zum Kauf anbieten, kann die Bewertung dieser Daten überdurchschnittlich hoch sein.
- Der Umfang des Kontextes, in dem sich die Daten mit anderen (gegebenenfalls unternehmensexternen) Quellen befinden ist entscheidend für den potenziellen Wert eines Datums. Daten können potenziell mit Hilfe weiterer Datenquellen ausgewertet werden und damit weitreichendere Schlussfolgerungen zulassen als isoliert betrachtete Datenquellen.

Eine Monetarisierung von Fertigungsdaten findet in der industriellen Produktionstechnik bislang noch nicht in umfassendem Maße statt. Die Gründe hierfür sind vielfältig und werden im Folgenden aufgeführt.

## 4.2 Woran die Monetarisierung von Fertigungsdaten scheitert

Die Unklarheit über den Wert von Daten führt zu einer großen Unsicherheit von Unternehmen in ex ante Investitionen [23]. In der fertigenden Industrie sind häufig alte Fertigungsmaschinen in Betrieb, die zwar ihre ursprünglichen Funktionsweisen immer noch erfüllen, allerdings keine Möglichkeit zur Datenerfassung haben. Diese Maschinen werden in der industriellen Praxis zumeist nicht mittels Retrofitting mit umfassenden Möglichkeiten zur Datenerfassung und -verarbeitung in Form von hochfrequenter Sensorik und Edge Devices ausgestattet, wenn der Mehrwert dieser Ausrüstung unklar ist. Werden in Einzelfällen Maschinen dann doch mittels Retrofitting nachgerüstet, weil einer bestimmten Fragestellung nachgegangen wird, entstehen häufig Insellösungen ohne Interoperabilität und auf Basis verschiedener, unter Umständen untereinander inkompatibler Protokolle. Mit einer mangelnden oder unzureichenden Akquise von Fertigungsdaten können dann wiederum keine präzisen datengetriebenen Modelle trainiert werden, die einen echten Mehrwert aus den Rohdaten generieren.

In Unternehmen, in denen hingegen erfolgreich in ausreichendem Maße Fertigungsdaten erfasst werden, werden allerdings nur verhältnismäßig wenige dieser erhobenen Fertigungsdaten zu Analysezwecken genutzt (vgl. Bild 7) [24]. Die Vielzahl der CEO aus der produzierenden Industrie (75 %) ist sich zwar dessen bewusst, dass die Datenanalyse mithilfe von Methoden der KI wachsende Bedeutung erlangen wird, bislang gelang es dennoch nur 39 % der Unternehmen, datengesteuerte Anwendungsfälle über einen einzelnen Wertstrom hinaus zu skalieren [25]. Die wirtschaftliche Nutzung von KI liegt aktuell unterhalb von 5 %. Dies unterliegt verschiedenen Ursachen. Einerseits existiert ein Mangel an Fachkräften oder Smart Services im Bereich Data Science [26]. Der Bestand erfüllt den Bedarf maximal zu 20 % – 25 %, obwohl ohne eine professionelle Datenaufbereitung und -analyse keine Informationen aus erhobenen Fertigungsdaten extrahiert werden können. Auf Basis aktueller Statistiken wird für Deutschland im Jahr 2030 der Mangel an Datenanalysten sogar auf 1,1 Mio. Fachkräfte prognostiziert [27]. Anderseits ist die eigene Datenbasis, sofern sie aus den Datensilos befreit wurde, meist nicht für fortschrittliche Analysen ausreichend. Anwendungen wie das datengestützte Track&Trace innerhalb der eigenen Produktionshallen ist mit der internen Datengrundlage möglich. Anspruchsvollere Anwendungen, z. B. die Vorhersage von Ausfällen und Identifikation von deren Ursachen mittels maschinellem Lernen (ML) Modellen oder die Transparenz über komplexe Netzwerke, beruhen auf effektiv trainierten Algorithmen der KI auf Basis einer großen Datenmenge. Ein effektives Training erfordert den Austausch von Daten über die eigenen Unternehmensgrenzen

hinweg, da ein einzelnes Unternehmen alleine solche Datenmengen selten bereitstellen kann. Ein zuverlässiges und interoperables Angebot an KI-basierten Smart Services existiert bislang noch nicht für die Produktion.

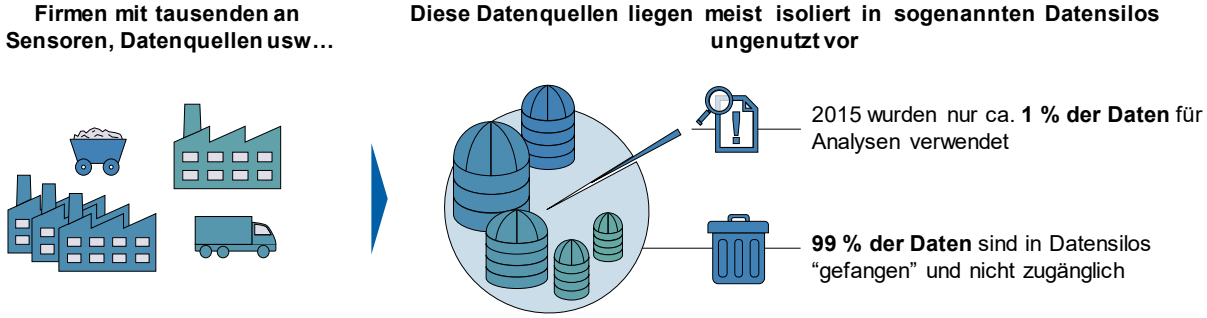



*Bild 7: Datensilos verhindern eine erfolgreiche Monetarisierung von Fertigungsdaten [22].*

Weiterhin existieren in Unternehmen häufig Bedenken bzgl. der Herausgabe von Daten an Dritte. Eine Studie des Bitkom e.V. und der KPMG AG besagt, dass 74 % der befragten Unternehmen Bedenken bei der Weitergabe von Daten an Drittanbietende haben [28]. Eine Vernetzung zwischen den Unternehmen, welche für eine ausreichend große Datenbasis erforderlich wäre, ist aktuell noch gering ausgeprägt. Nur 49,3 % der Unternehmen sind unternehmensübergreifend digitalisiert und vernetzt, davon sind nur 16 % mit mindestens zwei zusammenarbeitenden Unternehmen vernetzt [13]. Ein häufig diskutierter Aspekt ist die Frage der treuhändisch beautftragten Person, welche die Sicherheit und Auditierbarkeit der Nutzungs- und Kaufprozesse von Daten garantiert. Zentralistische Entitäten, die große Datenmengen aller Teilnehmenden zentral in einer Plattform sammeln und verwalten, werden skeptisch betrachtet, da ein Zugriff auf eine Vielzahl unterschiedlicher Unternehmensdaten über eine zentrale Plattform ermöglicht wird. Zur Lösung der Herausforderung fehlender KI-Anwendungen und mangelnder Vernetzung schlägt das World Economic Forum (WEF) die Implementierung eines offen zugänglichen, dezentralen Datenmarktplatz vor [12]. Unter Wahrung der Sicherheit und des Schutzes von Daten sollen durch diese Plattform interne Datensilos aufgelöst und für einen bidirektionalen Austausch freigegeben werden. Das Verbinden zu einer hypervernetzten Allianz über 5G erfüllt die drahtlosen Konnektivitätsanforderungen an unterbrechungsfreie Datenübertragungen mit niedriger Latenz und hoher Bandbreite. Die Sicherstellung der Datenhoheit und -integrität erfordert dabei neuartige Technologien, um das Vertrauen im Rahmen einer Daten-Allianz zwischen verschiedenen Teilnehmenden zu sichern. Datenhoheit ist dabei die Entscheidungsfreiheit, wann welche Daten gehandelt, ausgetauscht oder genutzt werden können bzw. sollen. Die Datenintegrität hingegen stellt sicher, dass transferierte Daten nicht geändert werden können (vgl. Bild 8).

*Bild 8: Vertrauen und Datenhoheit in einer digitalisierten Lieferkette.*

Eine weitere wesentliche Fragestellung in unternehmensinternen Verwertungsstrategien und Kooperationen bzw. Interessengemeinschaften zwischen Unternehmen betrifft die Gestaltung einer Monetarisierung von Fertigungsdaten. Einerseits sollen für unternehmensinterne Entitäten Anreize geschaffen werden, Daten innerhalb des Unternehmens auszutauschen und zu verwerten. Andererseits müssen sowohl datenproduzierende und modellnutzende Unternehmen als auch modellentwickelnde Unternehmen und Plattformbetreibende, welche die treuhändische Funktion innerhalb von Datenmarktplätzen übernehmen, an den Mehrwerten des Datenhandels beteiligt werden. Solange die Beteiligung der verschiedenen Teilnehmenden an einer datenbasierten Wertschöpfungskette nicht definiert ist, besteht beispielsweise für datenproduzierende Unternehmen kein Anreiz, Daten zu teilen und ein potenzielles Risiko einzugehen.

**Zusammenfassend** werden die folgenden vier Herausforderungen für produzierende Unternehmen identifiziert:

- Fehlende Unternehmensstrategie zur Datenakquise
- Mangel an KI-Kompetenz und KI-Fachleuten sowie ein großes finanzielles Risiko bei der Pilotierung von KI-Anwendungen durch ein hohes ex ante Investment
- Ungewissheit über den potenziellen Mehrwert (Wissen) der Daten sowie fehlende monetäre Bewertungsgrundlage und Monetarisierungsstrategie für Daten
- Fehlendes Vertrauen in Plattformen, Dritte oder Projektbeteiligte bezüglich der Datenhoheit und -integrität

Diese ungelösten Herausforderungen führen in vielen Unternehmen zu Datensilos, in denen Daten lediglich gesammelt und abgelegt werden. Diese Datensilos sind für externe Unternehmen unzugänglich. Meist sind sie ebenfalls weder in wertschöpfende noch in nachhaltigkeitssteigernde Prozesse innerhalb des Unternehmens integriert. Solche Datensilos sind zumeist nicht auf Interoperabilität ausgelegt und daher auch ungeeignet für einen unternehmensübergreifenden Austausch zu Analysezwecken. Für den Austausch über Marktplätze und die Nutzung des innovativen Potenzials von Datenanalysen zur Effizienzsteigerung sind folgende Lösungen zu erarbeiten:

- Entwurf einer dezentralen Infrastruktur, die Daten verschiedener Maschinen und Prozesse innerhalb eines Unternehmens sammelt, zur Verfügung stellt und interoperabel ist
- Erarbeitung einer Datenschutzsystematik, die Mitarbeitende, Unternehmensgeheimnisse und Know-How durch das bewusste Entfernen bzw. Auslassen bestimmter kontextbezogener Details, wie z.B. der Zeit, schützt
- Gestaltung eines Datenmarktplatzes, welcher die Datenintegrität sichert, datenbezogene Kauf- und Nutzungsvorgänge auditiert, sowie dezentrale Datenspeicher- und Zugriffskonzepte implementiert, sodass keine teilnehmende Person oder Anbietende des Datenmarktplatzes die Gesamtheit aller Daten einsehen können
- Erarbeitung interner und externer Datenmonetarisierungsstrategien, die es Unternehmen ermöglichen, Risiko, Kosten und Kapazität für potenziell unnütze Daten zu opfern, auszulagern und gleichzeitig am Erfolg zu beteiligen
- Ausarbeitung von Preismodellen für die Nutzung externer Datenquellen um Anreize für eine Teilnahme an einem Datenmarktplatz zu schaffen.

Die Erarbeitung dieser Lösungen, im Rahmen derer Fertigungsdaten zwischen Unternehmen und KI-Dienstleistern sicher und mit Benefit für alle beteiligten Parteien ausgetauscht werden können, erfordert die Nutzung sicherer und dezentraler Architekturen. Die Ausgestaltung solcher Architekturen muss neben der Schaffung einer Grundlage für die Teilhabe von Unternehmen an datengetriebenen Knowledge-Spillover-Effekten zur Steigerung der Effizienz Randbedingungen zur Sicherstellung einer insgesamt verbesserten Ökobilanz einhalten und die Begünstigung von Rebound-Effekten, soweit möglich, vermeiden.

## 4.3 Architektur eines Datenmarktplatzes

Ein Datenmarktplatz zum Handel und Tausch von Daten ist durch eine digitale Plattform charakterisiert, die den Handel von Rohdaten, verarbeiteten Daten, auf Daten basierender Modelle und datenzentrierter Dienstleistungen (beispielsweise Visualisierungen) ermöglicht. Die treuhändische Funktion kann dabei als Intermediär zwischen den einzelnen Teilnehmenden im Netzwerk beschrieben werden. Die Funktion als Intermediär zwischen produzierenden Unternehmen und KI-Fachleuten bzw. Dienstleistenden für Datenprodukte ist besonders hervorzuheben, vgl. Bild 9.

Neben der treuhändischen Funktion und der Bereitstellung der Infrastruktur muss dieser Intermediär Funktionen zur Bestimmung der Datenqualität, Herkunft und des Grades der Veredelung bestimmen. Überdies muss er die Bereitstellung einer Vielzahl von Schnittstellen zur Integration unterschiedlicher Datenquellen innerhalb des Datenmarktplatzes garantieren. Unternehmen, die sich für eine Teilnahme an einem Datenmarktplatz interessieren, stellt sich die zentrale Frage nach der Datenhoheit gehandelter Daten. Klassische zentralistische Modelle, die von einer einzigen Entität verwaltet werden, stoßen auf Ablehnung. Sobald Daten angeboten werden, müssen diese das Unternehmensnetzwerk verlassen und den Plattformanbietenden zur Verfügung gestellt werden. Damit besteht potenziell die Möglichkeit, dass Plattformanbietende Zugriff auf die Daten haben und diese zu eigenen Analysezwecke nutzen können, ohne die Zustimmung der Datenanbietenden. Ähnliche Phänomene sind in der Internetindustrie beispielsweise bei Facebook und Google bekannt, wo personenbezogene Daten nicht nur zentral gespeichert, sondern auch oft ohne das Wissen oder Einverständnis der Nutzenden analysiert und weiterverkauft wurden. Einen Lösungsansatz für diese Problematik eines zentralistischen Ansatzes der Datenverwaltung bietet die Kombination von dezentralen Edge-basierten Systemen zur Datenspeicherung und Distributed-Ledger-basierten Systemen zur dezentralen Datenverwaltung.

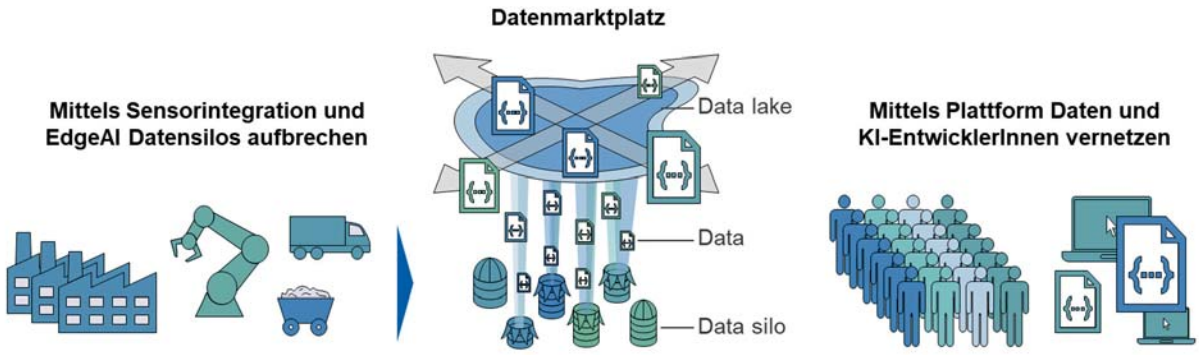



*Bild 9: Funktion eines Datenmarktplatzes als Intermediär zwischen Netzwerkteilnehmern.*

**Speicherung der Daten (Edge-basierte Systeme)**

Edge-basierte Datenspeicherungs- und Verwaltungsansätze sind unabdingbar, um akquirierte Daten lokal im Unternehmensnetzwerk vorzuhalten. Sensible Daten verlassen somit erst dann das interne Netz, wenn das Unternehmen explizit zustimmt. Die Garantie für eine Datensouveränität liefert demnach die Dezentralität des Speichersystems. Erst bei einem erfolgreichen Handel gehen die Daten an Kaufende über und verlassen das Netzwerk des datenerzeugenden Unternehmens. Der Datenmarktplatz verfügt lediglich über Datenbeschreibungen (Metadaten) und hat zu keiner Zeit Zugriff auf Rohdaten. Somit werden nur zuvor festgelegte Metainformationen zur Beschreibung des Datensatzes zentral in einer Cloudarchitektur gespeichert, um Teilnehmenden der Plattform die Suche nach geeigneten Datensätzen zu ermöglichen. Das lokale Speichern der Informationen ermöglicht zum einen den Unternehmen eigenständig für die Sicherheit der Daten zu sorgen, als auch eine Reduktion der Netzwerklast, da nur explizit angefragte Daten über Netzwerkgrenzen ausgetauscht werden. Plattformanbietende übernehmen die Bereitstellung, Wartung und Weiterentwicklung des Edge-basierten Speichersystems.

**Verwaltungshoheit (Distributed Ledger Technologie)**

Edge-basiert Daten dezentral zu speichern wird in zahlreichen Bereichen bereits produktiv eingesetzt, jedoch werden die meisten zur Verfügung stehenden Lösungen zentral von einer Entität verwaltet. Diese traditionellen Lösungen erlauben es nicht, die Verantwortung für Speicher- und Zugriffsressourcen auf alle Netzwerkbeteiligten zu verteilen und sind stattdessen von einer Entität abhängig. Die Klasse der Distributed Ledger Technologien (DLT, wie z.B. Blockchain) hingegen ermöglicht als geographisch verteilte und praktisch fälschungssichere Datenbank das unternehmensübergreifende Handeln von Daten als Assets zwischen allen Markthandelnden.

Im Rahmen einer Monetarisierung von Fertigungsdaten kann die DLT wie folgt eingesetzt werden: Prozess-/Produktdaten werden verschlüsselt inkl. Zeitstempel und Empfängeradresse in einen Datenmarktplatz, der auf dem Distributed Ledger aufsetzt, transferiert und können gegen Bezahlung (z. B. Pay-per-Use oder Subskriptionsmodelle) gekauft werden. Das Vertrauen in die gehandelten Daten wird über das lückenlose, rückverfolgbare und unveränderliche Speichern der Daten/Transaktionen inklusive Zeit- und Ortsstempel erzeugt. Weiterhin trägt der Konsensmechanismus des DLT zur Vertrauensbildung bei, da dieser eine Einigkeit über eine Transaktion im Netzwerk erfordert und damit forciert, dass Aktionen innerhalb eines DLT basierten Netzwerks nicht durch eine Entität durchgeführt werden können, da Transaktionen und Aktionen im Netzwerk abgestimmt und transparent gespeichert werden [29]. Durch die Tatsache, dass Plattformbetreibende nicht alleine den ausgewählten Distributed Ledger verwalten und hosten, können auch die Betreibenden der Plattform selbst nicht unbemerkt auf die Daten der Teilnehmenden zugreifen (vgl. Bild 10). Würden sie es doch tun, würde durch die Transparenz des Datenmarktplatzes für die Daten-Allianz der Vorgang bemerkt werden. Plattformbetreibende würden somit die Attraktivität ihres Datenmarktplatzes deutlich reduzieren und damit gegen ihre eigenen Interessen handeln.

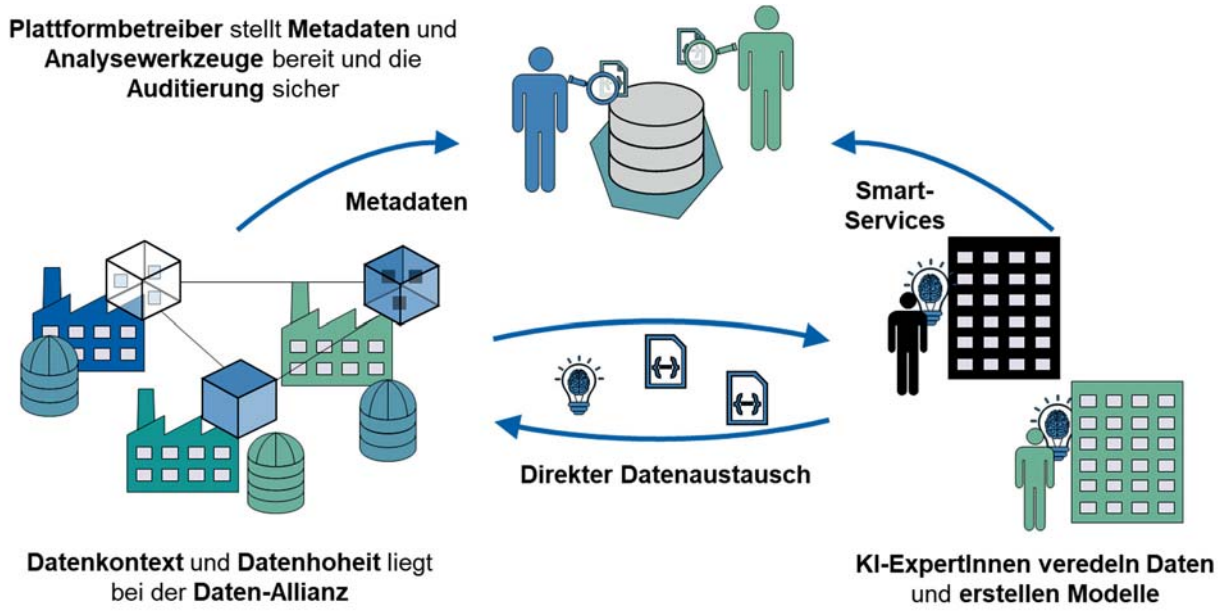



*Bild 10: Sicherer Datenaustausch durch DLT im Rahmen einer Daten-Allianz.*

Bei der Auswahl der zugrundeliegenden DLT sind deren individuelle Eigenschaften zu berücksichtigen. Die Eigenheiten des Anwendungsfalls sollten dabei die Auswahl der Technologie bestimmen. Ist zum Beispiel eine hohe Skalierbarkeit und Transaktionsgeschwindigkeit vom Anwendungsfall gefordert, bieten sich DLT aus der Kategorie der Directed Acyclic Graphs (DAG) im Vergleich zu Blockchain an.

Im Kontext der Effizienz und ökologischen Nachhaltigkeit ist bei der Wahl einer geeigneten Infrastruktur der DLT auch deren Ökobilanz zu berücksichtigen. Die Bitcoin Blockchain stand in jüngster Vergangenheit stark hinsichtlich ihres Energieverbrauchs in der Kritik. Der so genannte Mining Prozess ist infolge der hohen Rechenleistung und Energieverbräuche zum Betrieb der Hardware sehr ressourcenintensiv [30]. Je höher die Leistungsfähigkeit der Bitcoin Blockchain, desto höher die $CO_2$-Emissionen [31]. Der jährliche Energieverbrauch des Bitcoin Minings betrug im Jahr 2018 73,1 TWh [32] und überstieg damit den jährlichen Energieverbrauch verschiedener Länder. Der Proof-of-Work-Mechanismus und die hohe Datenredundanz der Blockchain lösen einen signifikanten Bedarf an Speicherkapazität aus. Bei einem DAG wie IOTA entfällt das Mining und die Rechenoperationen werden mittels ternärer Operatoren schneller gelöst, sodass eine höhere Energieeffizienz resultiert. Die reduzierte Komplexität von Rechenaufgaben verringert Zeit- und Energieverbräuche [33]. Für eine Bitcoin-Transaktion werden die entstehenden Emissionen für 2018 auf 451,62 kg $CO_2$ geschätzt [32] und für 2020 auf ca. 44,1 kg $CO_2$-Äquivalent [34]. Hingegen wird es für IOTA im Jahr 2020 auf lediglich $7 \cdot 10^{-7}$ kg $CO_2$-Äquivalent pro Transaktion geschätzt [34]. Überdies benötigt der Konsensmechanismus eines DAG weniger Speicherplatz, da sich der Bedarf an Speicherplatz nach der Transaktionsmenge richtet [35].

## 4.4 Rebound-Effekte in der Datenmonetarisierung

Rebound-Effekte beschreiben das Phänomen einer Nachfragesteigerung bei einer Steigerung der Effizienz eines Produktes. Prominente Beispiele hierfür sind eine gesteigerte Nutzung von Autos oder Beleuchtung nach der Umstellung eines reinen Verbrenners auf einen Hybriden oder der Umstieg auf Energiesparlampen aufgrund der besseren Ökobilanz der Produkte. Die weniger achtsame Verwendung resultiert allerdings häufig in einem absolut höheren Verbrauch und somit kleineren Effekt auf die

gesamte Ökobilanz bis hin zu einer verschlechterten. Zusätzlich können indirekte Rebound-Effekte auftreten, welche die Mehrnachfrage nach weiteren Produkten umfassen. In einer Studie wird der gesamte Rebound-Effekt zwischen 2013 und 2020 auf 31 % und bis 2030 auf 52 % geschätzt [36], was eine entsprechend gesteigerte Energienachfrage bedeutet. Den Eigenschaften und Entwicklungen der Informations- und Kommunikationstechnologien folgend wird vermutet, dass sie förderlich für Rebound-Effekte sind [37].

Eine systematische Datenmonetarisierung hat das Potential einer Effizienzsteigerung der Produktion und einer nachhaltigeren Verwendung von Werkzeugen und Werkstoffen. Hierbei können Rebound-Effekte entstehen durch einen intensivierten Energieverbrauch zur Verwendung smarter Services und der Teilnahme an Datenmarktplätzen und -ökosystemen. Beispielsweise kann ein hoch-performanter Service zu einer nachhaltigeren Materialnutzung führen und gleichzeitig die Ökobilanz konstant bleiben durch hohen Energieverbrauch. Ein etwas weniger performanter aber deutlich energiesparenderer Service würde somit einen höheren ökologischen Effekt haben. Eine Herausforderung bei der Gestaltung von Daten-Ökosystemen besteht somit darin, die Entwicklung einer Datennutzung von einer insgesamt ökologisch höheren Effizienz zu fördern, ohne durch strikte Regularien die organische Entwicklung eines Daten-Ökosystems zu verhindern.

## 4.5 Von der Datenmonetarisierung zur Datenökonomie

Digitale Ökosysteme sind verteilte, anpassungsfähige und offene sozio-technische Systeme, in welchen Eigenschaften der Selbstorganisation, Skalierbarkeit und Nachhaltigkeit sich an natürlichen Ökosystemen orientieren. Insbesondere spielen in diesem Zusammenhang Effekte des Wettbewerbs und die Zusammenarbeit der verschiedenen Beteiligten innerhalb des Ökosystems eine zentrale Rolle [38].

**Beteiligte**

Die einzelnen relevanten Bausteine für eine Monetarisierung von Fertigungsdaten (siehe Kapitel 4.1) müssen nicht von ein und derselben Entität durchgeführt werden. Sie können durch unternehmensübergreifende Wertschöpfung auch von Teilnehmenden mit speziellem Know-How übernommen werden. Sobald Daten als Ressource gekauft, veredelt und weiterverkauft werden können, ergibt sich ein Netzwerk von Entitäten, welche automatisiert Daten auswerten und in monetäre Mehrwerte für andere Unternehmen übersetzen und somit neue Wertschöpfungsströme für sich und andere erschließen.

**Datenproduzierende** sammeln die durch IoT/IIoT Devices akquirierten Daten innerhalb ihrer Unternehmen und übernehmen selbst nur minimale Schritte zur Vorverarbeitung der Daten. Die Rohdaten werden anschließend mit dem von den Datenproduzierenden vorgesehenen Kontext verbunden und gegebenenfalls in syntaxbasierte Modelle eingebettet. Anschließend werden kleinere und unkritische Ausschnitte (beispielhafte und ggf. synthetische Datensätze) frei im Datenmarktplatz zur Verfügung gestellt, um potenzieller Kundschaft Einblicke in die Art des Datensatzes zu geben.

Die **Anbietenden von Datenservices** sichten die zur Verfügung stehenden Daten und können entweder getrieben durch eigene Innovationsideen Daten einkaufen und verknüpfen, oder konkrete Bedarfe bereits identifizierter Kundschaft lösen. Das vorliegende Geschäftsmodell beschreibt den Verkauf von datenbasierten Dienstleistungen, die allen anderen Teilnehmenden des Netzwerks zur Verfügung stehen.

Veredelte Datensätze und KI-gestützte Modelle können von **Anwendenden** gekauft und in ihre Produktion integriert werden. Dabei sind grundlegende Funktionen des Modells

sowie Benchmarks zur allgemeinen Performance im Datenmarktplatz hinterlegt. Für Anwendende ist es essentiell, dass die Modelle in zuverlässige Services integriert sind, welche sich leicht in die vorhandene Infrastruktur des Unternehmens integrieren lassen.

Das Geschäftsmodell der **Plattformbetreibenden** ist die Bereitstellung der technischen Infrastruktur. Es ist durch die Ausübung treuhändischer Funktionen gekennzeichnet, welche die Sicherheit von Transaktionen und Daten sowie der Datenintegrität garantiert. Treiber der Plattformbetreibenden ist die Erweiterung des Netzwerks durch neue Teilnehmende, die einer der genannten Teilnehmendenkategorien zugeordnet werden können. Es entwickelt sich ein selbständiges, auf der Plattform basierendes Ökosystem.

**Daten- und Service-Rating-System**

Teilnehmende des Netzwerks müssen incentiviert werden sowohl Daten und Services bereitzustellen, als auch deren Qualität zu gewährleisten. Andernfalls verkommt ein Datenmarktplatz zu einer Art Datenmüllhalde [39], auf der nicht zwischen guten und schlechten Daten/Datenservices unterschieden werden kann. Die Einführung eines Ratingsystems für die oben beschriebenen Teilnehmendenkategorien ermöglicht es, Anbietende nach definierten Qualitätskriterien zu sortieren. Die Ergebnisse des Qualitätsrankings bedingen im Umkehrschluss die Attraktivität ihrer Angebote. Die Objektivität des Ranking-Systems ist essentiell, um faire Bedingungen innerhalb der Plattform zu schaffen. Beispielsweise können Modelle zu Bewertung der Datenqualität herangezogen werden. Die FAIR-Datenprinzipien gelten als Leitprinzipien, um Daten auffindbar, zugänglich, interoperabel und wiederverwendbar zu machen [40]. Sie bieten eine Anleitung für das wissenschaftliche Datenmanagement und die Verwaltung von Daten. Die Relevanz der FAIR-Datenprinzipien erstreckt sich über alle Interessensgruppen im aktuellen digitalen Ökosystem [41]. Wichtige Aspekte zur Bewertung der Datenqualität sind vor allem nachvollziehbare Verantwortlichkeiten für Daten, die Zuverlässigkeit, mit welcher eine Datenquelle neue Daten produziert, eine transparente Versionierung der Daten und die korrekte semantische Einbettung von Daten in einen größeren Kontext. Außerdem müssen angebotene Modelle immer die Datensets aufweisen, welche für die Erstellung des Modells genutzt wurden [42]. Durch das Einhalten dieser Prinzipien können nicht nur Daten besser getauscht, gesichtet und weiterverarbeitet werden, sondern auch Modelle eindeutig bestimmten Datensätzen zugeordnet werden, sodass die Transparenz innerhalb des Datenmarktplatzes deutlich erhöht wird.

**Ökobilanz-Rating-System**

Die Strategie der Effizienz ist ein wesentliches Standbein bei der Steigerung der Nachhaltigkeit und allgemein Ökobilanz. Dennoch bestehen die Gefahren eines Ausgleichs des Effektes gesteigerter Effizienz durch Smart Services und deren Energiebedarf in ihrer Ökobilanz. Zusätzliche Aspekte sind der Energiebedarf des Datenmarktplatzes als solchem mit den Eigenheiten der zugrundeliegenden Architektur und Technologie, sowie der potentielle Einsatz smarter Services zur rein ökonomischen Wertsteigerung. Eine Option zur Incentivierung der Nutzung von Datenmonetarisierung zur Steigerung der Nachhaltigkeit ist die Einführung eines Öko(-Bilanz)-Rating-Systems zusätzlich zum zuvor beschriebenen Daten- und Service-Rating-System als Teil des LCA. Ein solches Öko-Rating beinhaltet sowohl den Energiebedarf des Service, seiner Erstellung inklusive der verwendeten Daten, als auch das Öko-Positive-Einsatzpotential. Zum Beispiel hat die Entwicklung eines energiesparenden Systems zur Verschleißprädiktion durch die Anwendungsmöglichkeit in einer nachhaltigen Produktion einen positiven Effekt auf das Öko-Rating der zum Training verwendeten Daten. Durch die Entwicklung des Service steigt auch allgemein der Wert der verwendeten Daten. Trotz

Bezug beider Ratings auf die Daten und ihre Verwendung in Services ist die Trennung der Rating-Systeme sinnvoll, da Services mit einem hohen finanziellen Potential nicht zwangsläufig für ökologische Effizienzsteigerung verwendet werden. Andere Daten können auch hervorragende Qualität haben, ohne bereits für entsprechende Systeme verwendet worden zu sein. Marktteilnehmende können somit besonders auf die Nachhaltigkeitssteigerung achten und dies ebenfalls an ihre Kundschaft weitergeben. Die eigenständige Hervorhebung der Ökobilanz fördert somit auch die Entwicklung von Services ohne bestmögliche Performance, die allerdings energiesparender sind und im Vergleich ein geringeres Risiko für indirekte Rebound-Effekte haben. Abhängig von Regierungs-Strategien wie etwa einer $CO_2$-Steuer können verschiedene Aspekte des Ratings von Daten unterschiedlich in die Bepreisung eingehen.

**Neue Wertschöpfung**

Aus der Monetarisierung von Fertigungsdaten ergeben sich für Unternehmen neue Optionen zur Gestaltung von Investments und Geschäftsmodellen. Die Investition in für ein Unternehmen wertvolle Daten, der geplante Zukauf von Daten zur Erweiterung der eigenen Modelle, die direkte Bereitstellung von Modellen in einem Pay-per-Use oder KI-As-A-Service Ansatz haben einen Einfluss auf die bisherigen sowie auf die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle. In einem voll entwickelten Ökosystem ergeben sich nach einiger Zeit automatisch Mechanismen, welche die Preise für bestimmte Daten nach Qualitätsmaßstäben und Aussagekraft der Daten festlegen.

Ein Ansatz zur Preisfindung zu Beginn eines Ökosystems ist die kostenfreie Bereitstellung unternehmensinterner Datensätzen durch Datenproduzierende. Anbietende von Datenservices können dann z.B. ein ML-Modell zur Vorhersage von Qualitätsmerkmalen erstellen und damit ein Problem innerhalb (ggf. dritter) Unternehmen lösen. Dieses Modell kann dann gegen Incentives zur Nutzung freigegeben werden.

Um Datenproduzierende der verwendeten Daten monetär zu entlohnen, können diese prozentual am Mehrwert des Modells beteiligt werden. Bringt das entwickelte Modell operative Vorteile für Datenproduzierende selbst, können diese das Modell (ggf. zu vergünstigten Konditionen) selbst kaufen oder nutzen (vgl. Bild 11). Ein solches Modell würde es einerseits datenproduzierenden Unternehmen erlauben, Mehrwert aus ihren eigenen Daten zu generieren, ohne ein hohes ex ante Investitionsrisiko in KI-Know-How. Andererseits entsteht eine Situation, in welcher Anbietenden von Datenservices eine Vielzahl von Datensätzen zur Verfügung steht, um eine innovative Kombination verschiedener Datensätze umzusetzen und auf dieser Basis neue Services zu entwickeln. Gelingt es hingegen nicht, produktreife Modelle auf Basis der angebotenen Daten zu erarbeiten, entstehen keine Kosten für die Nutzung der Daten. Falls ihre Daten für die Modellbildung eines produktreifen Modells beigetragen haben, profitieren Datenproduzierende dennoch direkt.

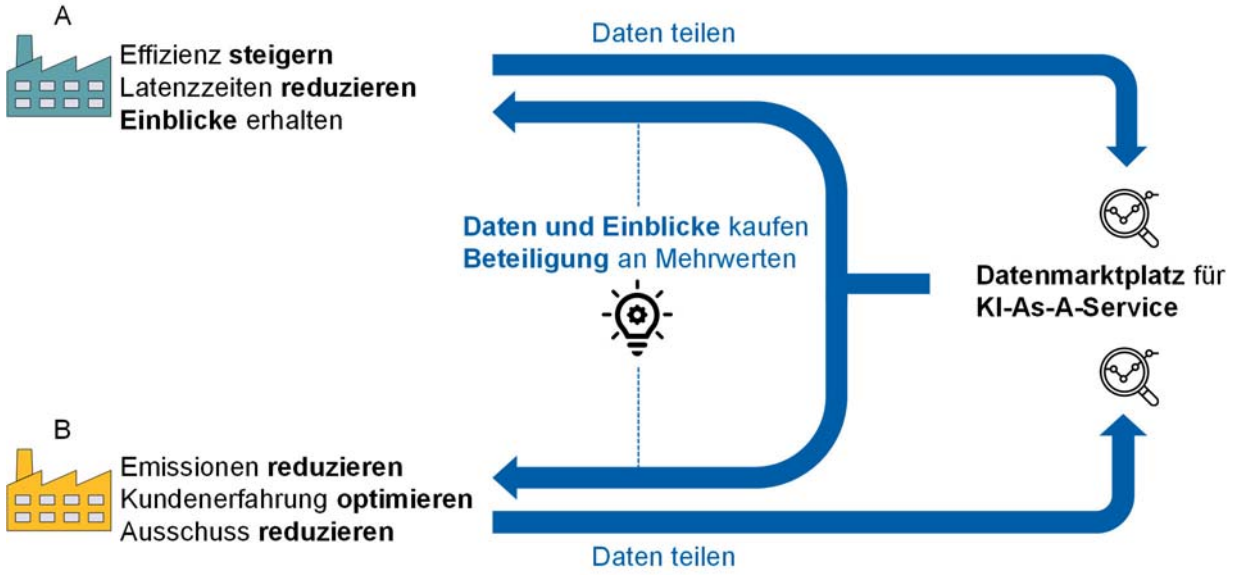



*Bild 11: Daten- und Informationsfluss in einer Daten-Allianz.*

Die Menge an Unternehmen mit der Bereitschaft ihre Daten verfügbar zu machen, ist ein kritischer Faktor für die Entstehung von Innovationen innerhalb des Ökosystems [43].

**Zusammenfassung**

Die vier Haupthemmnisse einer Monetarisierung von Fertigungsdaten sind i) fehlende Unternehmensstrategien zur Datenakquise, ii) die mangelnde Verfügbarkeit von KI-Know-How, iii) fehlende dezentrale Plattformen, die einen automatisierten und spezifischen Austausch von Daten erlauben und iv) die Unklarheit über den Wert von Daten und der Verlust an Know-How ohne adäquate monetäre Entlohnung durch das Teilen von Daten. Um das Potenzial einer Monetarisierung von Fertigungsdaten zur Steigerung der ökologischen Effizienz zu bergen, müssen (technologische) Lösungen entwickelt werden, die diesen Hemmnissen begegnen. Kern der in diesem Beitrag diskutierten Lösungen ist zum einen die dezentrale Speicherung und Verwaltung von Daten, sodass keine zentrale Entität die Hoheit über die Daten oder das Netzwerk besitzt. Zum anderen können durch Beteiligungsmodelle die ex ante Investitionshürden im Bereich der Datenanalyse negiert werden. Damit werden Unternehmen Anreize zur Beteiligung an einem Ökosystem zur Datenmonetarisierung gesetzt und die Nutzung datengetriebener KI-Services zur Steigerung der Effizienz ermöglicht. Die Verwendung eines DAG wie IOTA beim Gestalten der Architektur dieses Ökosystems lässt eine hohe Energieeffizienz erreichen und die Vermeidung von Mining Prozessen, wie sie in einer Bitcoin Blockchain benötigt werden, ermöglicht eine insgesamt positive Ökobilanz des Datenmonetarisierungssystems mit Potential einer langfristig zunehmenden Nachhaltigkeitssteigerung aller Teilnehmenden.

## 5 Szenarien für die Fertigungstechnik

Im Folgenden werden zwei Szenarien zur Beschreibung grundlegender Mechanismen der Datenmonetarisierung zur Steigerung der Effizienz dargestellt. Diese Szenarien beschränken sich auf die Beziehung zwischen Datenproduzierenden. Die Szenarien wurden in einem gemeinsamen Dialog mit Fachleuten aus Wirtschaft und Wissenschaft der Bereiche Produktion, IT (Software und Hardware) und KI erarbeitet und diskutiert.

## 5.1 Verkaufen von Sekundärdaten: Produktbenchmark

**Unternehmensprofile:** Unternehmen A stellt sicherheitskritische Bauteile mittels Maschinenpressen her. Unternehmen B ist Zulieferfirma von Hilfs- und Betriebsstoffen zur Sicherstellung der reibungslosen Fertigung von Millionen von Bauteilen aus Metall.

**Problembeschreibung:** Obwohl Unternehmen A Millionen von Bauteilen mithilfe eines stabilen Prozesses herstellt, gleicht kein Bauteil dem Anderen und es kommt in wiederkehrenden Mustern zu Ausschuss mehrerer hundert Teile.

**Ursache:** Unternehmen A produziert 24 Stunden am Tag 365 Tage im Jahr. Aufgrund von saisonalen und täglichen Schwankungen der Umgebungsparameter, wie z.B. Hallentemperatur, Luftfeuchtigkeit usw. verändern sich in kleinen Maßen die Eigenschaften des Schmierstoffes und des Prozesses, so dass in ungünstigen Szenarien Toleranzen verletzt werden und es zu Ausschuss kommt. Der Ausschuss belastet die $CO_2$-Bilanz Unternehmens und führt zu erheblichen Mehrkosten, da der Werkstoff der Hauptkostenfaktor darstellt. Aufgrund der mehrfach höheren Werkzeughärte gegenüber der Werkstoffhärte kann übermäßiger Werkzeugverschleiß als Ursache ausgeschlossen werden.

**Lösungsansatz:** Eine etablierte Größe zur Bewertung der Wirksamkeit von Schmierstoffen ist die resultierende Prozesskraft. Gleichzeitig sind die Prozesskraft und die Hallenumgebungsinformationen aber kein geschäftsgefährdendes Datum. Unternehmen A könnte demnach dieses Datenpaket bestehend aus Umgebungsdaten und Prozesskräften von Ausschussteilen an Unternehmen B verkaufen. Unternehmen B wäre nun in der Lage mit diesen Daten die Produktionsbedingungen für seine Domäne näherungsweise zu reproduzieren und hiermit sein Schmierstoffprodukt zu optimieren. Unternehmen B ist bereit das Datenpaket zu kaufen, da es sich davon verspricht, durch einen verbesserten Schmierstoff die Absatzmenge an Unternehmen A erhöhen und die Kundenbindung festigen zu können. Unternehmen A ist an einem verbesserten Schmierstoffprodukt interessiert, da es dadurch interne Monetarisierungsmehrwerte (Reduktion von Ausschuss) nutzen kann.

**Erwarteter Monetarisierungsmehrwert:** Primärer Mehrwert für Unternehmen A ist es, durch den Verkauf von Maschinendaten neue Einkommensströme zu erschließen. Sowohl für Unternehmen A als auch für Unternehmen B ist die Bildung einer Daten-Allianz sinnhaft, um durch verbesserte experimentelle Bedingungen bei Unternehmen A und eine reduzierte Ausschussrate infolge des verbesserten Schmierstoffs bei Unternehmen B eine verbesserte $CO_2$-Bilanz zu erreichen.

**Statement:** “Die Bewertung des Verkaufs von Daten an Dritte ist aktuell schwer monetär zu fassen. Es wird erwartet, dass basierend auf den Daten Dienstleistungen abgeleitet werden, welche betriebsseitig mindestens zu einer Kostenersparnis von 15 % führen.” *GF Metallverarbeiter*

## 5.2 Kaufen von Daten Dritter: Transparenz des Werkstoffs

**Unternehmensprofile:** Unternehmen A ist stellt erneut sicherheitskritische Bauteile her. Unternehmen B ist diesmal eine Zulieferfirma von Werkstückwerkstoff aus Metall.

**Problembeschreibung:** Obwohl Unternehmen A Millionen von Bauteilen mithilfe eines stabilen Prozesses herstellt, gleicht kein Bauteil dem Anderen und es kommt in wiederkehrenden Mustern zu Ausschuss mehrerer hundert Bauteile. Der Ausschuss belastet die $CO_2$-Bilanz des Unternehmens und führt zu erheblichen Mehrkosten, da der Werkstoff den Hauptkostenfaktor darstellt. Aufgrund eines neuen verbesserten Schmierstoffs kann der Einfluss von Betriebs- und Hilfsstoffen vernachlässigt werden.

**Ursache:** Unternehmen A produziert weiterhin 24 Stunden am Tag 365 Tage im Jahr. Messungen an Werkstückwerkstoffproben haben ergeben, dass Werkstoffdicke und -festigkeiten von Charge zu Charge und sogar entlang einer Charge stark schwanken. Aufgrund des hochkomplexen Stahlherstellungsprozesses ist es aus technischen Gründen nicht möglich, eine bessere Werkstoffgüte zu produzieren. Weil Unternehmen A die Werkstoffdicke und -festigkeit nicht kennt, kann es die Maschinenparameter nicht darauf abstimmen und fährt mit einem empirischen Maschinensetting, was von Charge zu Charge nicht die gewünschten Effekte hat.

**Lösungsansatz:** Aufgrund des spezifischen Prozesses ist kein Messen der Werkstoffdicke und -festigkeit im Prozess möglich. Das will Unternehmen A auch gar nicht, da es keine Expertise für Materialcharakteristik hat, sondern Millionen von Bauteilen aus Metall herstellt. Unternehmen B hingegen stellt Stahl her und liefert an Unternehmen A. Unternehmen B hat die notwendige Infrastruktur und das Know-How, um die Werkstoffdicke und -festigkeit zerstörungsfrei und vollständig zu messen, zu interpretieren und diesen Datensatz an Unternehmen A zu verkaufen. Unternehmen B ist bereit diese Anstrengung auf sich zu nehmen, weil es Gefahr sieht, dass Unternehmen A sonst zu einem anderen Unternehmen wechselt. Unternehmen A kann nun für jede Charge und für jede zu starke Schwankung ausgewählte Maschinenparameter anpassen, so dass die Werkstoffschwankungen im Prozess kompensiert werden können. Werkstofflieferungen, die nur in Teilen den Spezifikationen entsprechen, können somit zumindest teilweise verwertet werden und müssen nun nicht mehr mittels Sondertransporten zu Unternehmen B zurückgeführt werden.

**Erwarteter Monetarisierungsmehrwert:** Primärer Mehrwert für Unternehmen A ist es, dass durch Kaufen von Daten Dritter die eigenen Prozesse derart verbessert werden können, dass es zu einer Reduktion des Ausschusses kommt und somit zu gesteigerten Produktionsprofiten sowie einer deutlich verbesserten $CO_2$-Bilanz. Zudem entfallen Sondertransporte zu Unternehmen B im Falle einer Reklamation und Rüstzeiten können reduziert werden. Der Mehrwert von Unternehmen B wurde in Fallbeispiel 1 behandelt. Weitere Mehrwerte sind mit Unsicherheiten verknüpft, die nicht weiter betrachtet werden.

**Statements:** “Der Einkauf von Daten Dritter befähigt zu einer Reduktion von Verschwendungszeiten um ca. 15 % und bietet zusätzlich das Potenzial Lagerflächen durch Produktivflächen zu substituieren. Dies bewirkt zusätzliche Erlöse und ermöglicht Umsatzsteigungen von mindestens 23 %.” *Produktionsleiter Metallverarbeiter*

# 6 Fazit

Die Monetarisierung von Fertigungsdaten kann für Teilnehmende einer Daten-Allianz durch die Nutzung und den Austausch von (aggregierten) Fertigungsdaten zu datengetriebenen Knowledge-Spillover-Effekten zur Steigerung der Effizienz führen. Damit können bestehende Unternehmensprozesse optimiert und Innovationen geschaffen werden. Die Umsetzung einer gezielten Datenmonetarisierungsstrategie verspricht neben der Reduktion von $CO_2$-Emissionen auch die Erschließung neuer Einkommensströme und die Gewinnung neuer Marktanteile durch digitale, innovative und progressive Geschäftsmodelle. Eine Datenmonetarisierungsstrategie kann wie folgt aussehen:

Zu Beginn der Monetarisierung von Fertigungsdaten sollten sich datenproduzierende Unternehmen mit der eigenen Datenbasis auseinandersetzen, den Kontext der Daten sicherstellen und die erhobenen Daten bereinigen. Sind alle unvollständigen oder ungenauen Datenpunkte aus einem Datensatz erkannt und korrigiert worden, sind die

Daten in einem optimalen Zustand für die interne Monetarisierung. Vertikale Prozessanalysen innerhalb eines Unternehmens ermöglichen es, mit geringem Aufwand neue Erkenntnisse über Produktions- oder Geschäftsprozesse zu gewinnen, Kosten zu reduzieren, Produkte zu optimieren und Risiken zu minimieren.

Aufbauend auf den Erfolgen der internen Datenmonetarisierung und der daraus resultierenden, gesunkenen Hemmschwelle, folgt der Datenaustausch mit einem anderen Datenproduzierenden und das Bilden sog. Daten-Allianzen. Das Überwinden der Schwelle der Nutzbarkeit bedingt das Hinzuziehen von KI-Modellen. Hierzu müssen die folgenden vier Schritte innerhalb der Daten-Allianzen erarbeitet werden.

- Entwurf einer datensammelnden, dezentralen und Edge-basierten Infrastruktur
- Klärung von Fragen und Anforderungen im Bereich Datenschutz, Datenintegrität und Datenhoheit
- Definition der Monetarisierungsstrategie sowie
- Ausarbeitung von Preismodellen und Beteiligungsoptionen

Abschließend ergeben sich **fünf Schritte** für Unternehmen der fertigenden Industrie, um eine Datenmonetarisierungsstrategie zu definieren und umzusetzen:

- Geeignete Datenquellen identifizieren und in ein standort- / unternehmensweites interoperables Datensystem integrieren
- Klärung von Fragen und Anforderungen im Bereich Datenschutz, Datenintegrität und Datenhoheit
- Eine Strategie zur Herausgabe der Unternehmensdaten an Dritte erarbeiten, was beispielweise den Umfang der Daten und vor allem den Kontext, in dem sich die Daten befinden, umfasst
- Geeignete Beteiligte für die Bildung von Daten-Allianzen identifizieren, diese Kooperationen gestalten und stetig erweitern
- Innovative Beteiligungsmodelle für den Nutzen ihrer Daten festlegen
- Die erarbeiteten Kooperationen in ein plattformbasiertes Ökosystem in Form eines Datenmarktplatzes integrieren, der durch seine Offenheit den Datenaustausch von Unternehmen aus unterschiedlichen Branchen ermöglicht und damit datenbasierte Innovationen befördert

Für Unternehmen ohne eigenes KI-Know-How ist die Nutzung externer Ressourcen für die Identifikation wirtschaftlicher Potenziale der eigenen Daten essentiell, weil damit das Risiko für Fehlinvestitionen nicht durch das Unternehmen getragen wird, sondern an Anbieter von Datenservices ausgelagert werden kann. Diese Anbietenden können innerhalb eines breiten Ökosystems innovative Datenprodukte entwickeln. Durch einen Verkauf oder alternative Beteiligungsmodelle werden somit auch rein datenproduzierende Unternehmen am wirtschaftlichen Erfolg der entstehenden Datenprodukte beteiligt.

Dieser Artikel wurde auf der Grundlage der Ergebnisse der Expertengruppe des Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquiums AWK 2020 erstellt und vor dem Hintergrund der aktuellen Veränderung überarbeitet [44].

# 7 Literatur


[1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. “Die Klimakonferenz in Paris.” [Online]. Verfügbar: https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/ (zugegriffen: Mai 21 2021).

[2] A. Breitkopf. “Höhe der CO2-Emissionen in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2020.” [Online]. Verfügbar: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2275/umfrage/hoehe-der-co2-emissionen-in-deutschland-seit-1990/ (zugegriffen: Mai 25 2021).

[3] A. Breitkopf. “Treibhausgasemissionen des Industriesektors in Deutschland nach Branchen im Jahr 2019.” [Online]. Verfügbar: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1078829/umfrage/treibhausgasemissionen-der-deutschen-industrie-nach-branchen/ (zugegriffen: Mai 25 2021).

[4] J. Mayer, P. Niemietz, D. Trauth, und T. Bergs, “A concept for low-emission production using Distributed Ledger Technology,” *Procedia CIRP*, Jg. 98, S. 619–624, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.164.

[5] Bundesregierung. “CO2-Bepreisung.” [Online]. Verfügbar: https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/co2-bepreisung-1673008 (zugegriffen: Mai 21 2021).

[6] G. A. Carlino, “Knowledge spillovers: Cities' role in the new economy,” *Business review // Federal Reserve Bank of Philadelphia*, Nr. 4, S. 17–26, 2001.

[7] PricewaterhouseCoopers, “PwC Maschinenbau-Barometer Q4/2020.” [Online]. Verfügbar: https://www.pwc.de/de/industrielle-produktion/pwc-maschinenbau-barometer-q4-2020.pdf (zugegriffen: Mai 25 2021).

[8] J. Pennekamp *et al.*, “Towards an Infrastructure Enabling the Internet of Production,” in *2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS)*, Taipei, Taiwan, Ma. 2019 - Mai. 2019, S. 31–37.

[9] G. Li, J. Wang, J. Wu, und J. Song, “Data Processing Delay Optimization in Mobile Edge Computing,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, Jg. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/6897523.

[10] T. Fedkenhauer, Y. Fritzsche-Sterr, L. Nagel, A. Pauer, und A. Resetko, “Datenaustausch als wesentlicher Bestandteil der Digitalisierung.” [Online]. Verfügbar: https://www.pwc.de/de/digitale-transformation/studie-datenaustausch-digitalisierung.pdf (zugegriffen: Mai 25 2021).

[11] J. Guinée. *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

[12] F. Betti, F. Bezamat, M. Fendri, und B. Fernandez, “Share to Gain: Unlocking Data Value in Manufacturing.” [Online]. Verfügbar: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Share_to_Gain_Report.pdf (zugegriffen: Mai 25 2021).

[13] J. Yan, Y. Meng, L. Lu, und L. Li, “Industrial Big Data in an Industry 4.0 Environment: Challenges, Schemes, and Applications for Predictive Maintenance,” *IEEE Access*, Jg. 5, S. 23484–23491, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2765544.

[14] J. Pennekamp *et al.*, “Dataflow Challenges in an Internet of Production,” in *Proceedings of the ACM Workshop on Cyber-Physical Systems Security & Privacy - CPS-SPC'19*, London, United Kingdom, 2019, S. 27–38.

[15] R. Y. Zhong, C. Xu, C. Chen und G. Q. Huang, “Big Data Analytics for Physical Internet-based intelligent manufacturing shop floors,” *International Journal of Production Research*, Jg. 55, Nr. 9, S. 2610–2621, 2017, doi: 10.1080/00207543.2015.1086037.

[16] S. Chen, R. Shi, Z. Ren, J. Yan, Y. Shi, und J. Zhang, “A Blockchain-Based Supply Chain Quality Management Framework,” in *14th IEEE International Conference on E-Business Engineering: ICEBE 2017 : including 13th Workshop on Service-Oriented Applications, Integration and Collaboration (SOAIC 207): 4-6 November 2017*, Shanghai, China, Shanghai, 2017, S. 172–176.

[17] S. Wu, “A review on coarse warranty data and analysis,” *Reliability Engineering & System Safety*, Jg. 114, S. 1–11, 2013, doi: 10.1016/j.ress.2012.12.021.

[18] Z. Cui, W. Chen und Y. Chen, “Multi-Scale Convolutional Neural Networks for Time Series Classification.” [Online]. Verfügbar: http://arxiv.org/pdf/1603.06995v4

[19] C. Liu, Y. Li, G. Zhou und W. Shen, “A sensor fusion and support vector machine based approach for recognition of complex machining conditions,” *J Intell Manuf*, Jg. 29, Nr. 8, S. 1739–1752, 2018, doi: 10.1007/s10845-016-1209-y.

[20] J. Mula, R. Poler, J. P. García-Sabater und F. C. Lario, “Models for production planning under uncertainty: A review,” *International Journal of Production Economics*, Jg. 103, Nr. 1, S. 271–285, 2006, doi: 10.1016/j.ijpe.2005.09.001.

[21] M. ER, N. Arsad, H. M. Astuti, R. P. Kusumawardani und R. A. Utami, “Analysis of production planning in a global manufacturing company with process mining,” *Journal of Enterprise Information Management*, Jg. 31, Nr. 2, S. 317–337, 2018, doi: 10.1108/JEIM-01-2017-0003.

[22] U. Jüttner, K. Windler, A. Schäfer und A. Zimmermann, “Design von Smart Services – Eine explorative Studie im Business-to-Business-Sektor,” in *Dienstleistungen 4.0: Geschäftsmodelle - Wertschöpfung - Transformation. Band 2.* Forum Dienstleistungsmanagement, M. Bruhn und K. Hadwich, Eds., Wiesbaden: Springer Gabler, 2017, S. 335–361.

[23] L. Meisel und M. Spiekermann, “Datenmarktplätze: Plattformen für den Datenaustausch und Datenmonetarisierung in der Data Economy.” [Online]. Verfügbar: https://www.isst.fraunhofer.de/content/dam/isst/de/documents/Publikationen/Datenwirtschaft/2019-2_ISST-Bericht_Datenmarktplaetze-ISSN-0943-1624.pdf (zugegriffen: Mai 25 2021).

[24] R. Peters, *Internet-Ökonomie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.

[25] M. George, N. Lukhele, und D. O’Halloran, “Digital Transformation: Powering the Great Reset,” in *World Economic Forum*. [Online]. Verfügbar: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Digital_Transformation_Powering_the_Great_Reset_2020.pdf (zugegriffen: Mai 25 2021).

[26] H. Schürmann, “Datenanalysten sind rar,” VDI Verlag GmbH, Mär. 30, 2017. https://www.vdi-nachrichten.com/karriere/datenanalysten-sind-rar/ (zugegriffen: Mai 21 2021).

[27] R. Strack, M. Carrasco, P. Kolo, N. Nouri, M. Priddis, und R. George, “The Future of Jobs in the Era of AI,” Mär. 18, 2021. Verfügbar: https://www.bcg.com/de-de/publications/2021/impact-of-new-technologies-on-jobs (zugegriffen: Mai 21 2021).

[28] T. Erwin und P. Heidkamp, “Mit Daten Werte schaffen.” [Online]. Verfügbar: https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/KPMG-Bitkom-Research-Studie-MDWS-final-2.pdf (zugegriffn: Mai 25 2021).

[29] V. J. Morkunas, J. Paschen, und E. Boon, “How blockchain technologies impact your business model,” *Business Horizons*, Jg. 62, Nr. 3, S. 295–306, 2019, doi: 10.1016/j.bushor.2019.01.009.

[30] I. Bashir. *Mastering Blockchain: Distributed ledgers, decentralization and smart contracts explained*, 2. Auflage Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd, 2017. [Online]. Verfügbar: http://proquest.tech.safaribooksonline.de/9781787125445

[31] F. Reetz, “Herausforderungen und Förderstrategien für die Blockchain-Technologie: Studien zum deutschen Innovationssystem,” *Studien zum deutschen Innovationssystem 10-2019*, 2019. [Online]. Verfügbar: https://www.econstor.eu/handle/10419/194280 (zugeriffen: Mai 25 2021).

[32] R. Born, “Distributed Ledger Technology for Climate Action Assessment,” 2018. [Online]. Verfügbar: https://www.climate-kic.org/wp-content/uploads/2018/11/DLT-for-Climate-Action-Assessment-Nov-2018.pdf (zugegriffen: Mai 25 2021).

[33] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, “Online-Konsultation zur Erarbeitung der Blockchain-Strategie der Bundesregierung,” 2019. [Online]. Verfügbar: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/blockchain-strategie.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (zugegriffen: Mai 25 2021).

[34] G. Jara, “IOTA – Green Technology for the Internet of Things.” [Online]. Verfügbar: https://iotahispano.com/iota-green-technology-for-the-internet-of-things/ (zugegriffen: Mai 25 2021).

[35] S. S. Hazari und Q. H. Mahmoud, “Comparative evaluation of consensus mechanisms in cryptocurrencies,” *Internet Technology Letters*, Jg. 2, Nr. 3, e100, 2019, doi: 10.1002/itl2.100.

[36] T. Barker, A. Dagoumas, und J. Rubin, “The macroeconomic rebound effect and the world economy,” *Energy Efficiency*, Jg. 2, Nr. 4, s. 411–427, 2009, doi: 10.1007/s12053-009-9053-y.

[37] C. Gossart, “Rebound effects and ICT: a review of the literature,” in *ICT Innovations for Sustainability. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Jg. 310, L. M. Hilty and B. Aebischer, Hrsg. Cham, Switzerland: Springer, 2015, S. 435–448, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_26.

[38] G. Briscoe und P. D. Wilde, “Digital Ecosystems: Evolving Service-Oriented Architectures,” 2006. [Online]. Verfügbar: http://arxiv.org/pdf/0712.4102v6 (zugegriffen: Mai 25 2021).

[39] J. Freiknecht und S. Papp. *Big Data in der Praxis: Lösungen mit Hadoop, Spark, HBase und Hive: Daten speichern, aufbereiten, visualisieren*, 2. Auflage. Munich, Germany: Hanser, 2018.

[40] J. Freiknecht, *Big Data in der Praxis: Lösungen mit Hadoop, HBase und Hive: Daten speichern, aufbereiten, visualisieren*. Munich, Germany: Hanser, 2014.

[41] B. Mons, C. Neylon, J. Velterop, M. Dumontier, L. O. B. da Silva Santos und M. D. Wilkinson, “Cloudy, increasingly FAIR; revisiting the FAIR Data guiding principles for the European Open Science Cloud,” *ISU*, Jg. 37, Nr. 1, S. 49–56, 2017, doi: 10.3233/ISU-170824.

[42] L. Gleim *et al.*, “FactDAG: Formalizing Data Interoperability in an Internet of Production,” *IEEE Internet Things J.*, Jg. 7, Nr. 4, 2020, S. 3243–3253, doi: 10.1109/JIOT.2020.2966402.

[43] S. Zillner *et al.*, “Big Data-Driven Innovation in Industrial Sectors,” in *New horizons for a data-driven economy: A roadmap for usage and exploitation of big data in Europe*, J. M. Cavanillas, E. Curry, und W. Wahlster, Eds., Cham, Switzerland: Springer, 2016, S. 169–178.

[44] D. Trauth *et al.*, “Monetarisierung von Fertigungsdaten,” in *Internet of Production - Turning Data into Value. Statusberichte aus der Produktionstechnik 2020*, Aachen, Germany, 2020, S. 340–364, doi: 10.24406/ipt-n-589615.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 4.2:

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT
Dr.-Ing. D. Trauth, senseering GmbH
C. Gülpen, Institut für Technologie und Innovationsmanagement TIM der RWTH Aachen
M. Kornely, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Prof. Dr.-Ing. W. Maaß, DFKI GmbH
J. Mayer, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
H. Musa, BMW Group
P. Niemietz, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
A. Rohnfelder, Fujitsu Deutschland GmbH
M. Schaltegger, Feintool AG
S. Seutter, Microsoft Deutschland GmbH
J. Starke, BMW Group
E. Szych, Dell EMC GmbH
M. Unterberg, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

## 4.3 Nachhaltige Geschäftsmodelle für Werkzeugmaschinen

*C. Brecher, F. Butz, M. Kaever, E. Nagel, S. Neus, T. Rettich, A. Steinert, D. Welling, M. Wiesch, M. Zeis, C. Zeppenfeld*

### Gliederung

1 Werkzeugmaschinen im Kontext einer nachhaltigen Produktion ..... 439
1.1 Ausgangslage ..... 439
1.2 Nachhaltigkeit im deutschen Werkzeugmaschinenbau ..... 439
1.3 Aktuelle Geschäftsmodelle im Werkzeugmaschinenbau und deren Einfluss auf Veränderungsprozesse ..... 441
2 Neue Geschäftsmodelle als Treiber einer Nachhaltigkeitstransformation ..... 443
2.1 Beispiele neuer Geschäftsmodelle im industriellen Umfeld ..... 443
2.2 Subskriptionsmodelle für Werkzeugmaschinen ..... 444
2.3 Nachhaltigkeitstreiber im Zeitalter von Industrie 4.0 ..... 446
3 Aufbau zukünftiger Geschäftsmodelle im Werkzeugmaschinenbau ..... 446
3.1 Transparenz der Gesamtprozesskette zur ganzheitlichen Bilanzierung ..... 447
3.2 Digitale Plattformen als Keimzelle der Geschäftsmodellentwicklung ..... 449
3.3 Flexibler Aufbau nutzenorientierter Geschäftsmodelle ..... 452
4 Realisierbarkeit und Herausforderungen ..... 456
4.1 Technologische Enabler ..... 456
4.2 Menschliche Enabler ..... 461
5 Zusammenfassung und Ausblick ..... 462
6 Literatur ..... 463

## Kurzfassung

### Nachhaltige Geschäftsmodelle für Werkzeugmaschinen

Die aktuelle Lage der Weltkonjunktur und der Megatrend Digitalisierung mit den damit verbundenen Chancen und Risiken stellen die Werkzeugmaschinenbranche aktuell vor große Herausforderungen. Um in Zukunft weiterhin führend an der Gestaltung einer nachhaltigen industriellen Fertigung beteiligt zu sein, müssen auch Werkzeugmaschinenunternehmen ihre Rolle in einem immer nachhaltiger agierenden Wirtschaftssystem neu definieren. Statt der einmaligen Bereitstellung von Produktionshardware könnten in Zukunft kundenorientierte As-a-Service-Konzepte in das Zentrum neuer, digitaler Geschäftsmodelle rücken. Bei erfolgreicher Umsetzung können diese Ansätze den Rahmen für eine flexible und nachhaltige Produktion bilden. Grundvoraussetzung für die Umsetzung ist die Einführung nachhaltiger Bewertungsfaktoren, die neben der alleinigen Gewinnmaximierung (Finance) auch Kriterien aus den Bereichen Umwelt (Environment), Soziales (Social) und Unternehmensführung (Governance), die sogenannten FESG-Faktoren, einbeziehen. Der Fokus dieses Beitrags liegt daher auf der Skizzierung potenzieller Wege hin zu nachhaltigen Geschäftsmodellen für Werkzeugmaschinen.



## Abstract

### Sustainable business models for machine tools

The current state of the global economy and the megatrend of digitalization, with the associated opportunities and risks, are currently presenting the machine tool industry with major challenges. In order to continue to play a leading role in shaping sustainable industrial manufacturing in the future, machine tool manufacturers must also redefine their role in an increasingly sustainable economic system. Instead of the one-off provision of production hardware, customer-oriented as-a-service concepts could move to the center of new, digital business models in the future. If successfully implemented, these approaches can provide the framework for flexible and sustainable production. The basic prerequisite for implementation is the introduction of sustainable evaluation factors that include environmental, social and governance criteria, the so-called FESG factors, in addition to a sole financial maximization effort. For this reason, the focus of this paper is on outlining potential paths towards sustainable business models for machine tools.

# 1 Werkzeugmaschinen im Kontext einer nachhaltigen Produktion

## 1.1 Ausgangslage

Bei dem zunehmend in den Fokus rückenden Megatrend *Neo-Ökologie* handelt es sich um einen vergleichsweise neuen Ansatz, die Bereiche Ökologie, Ökonomie und Ethik zu verschmelzen [1]. Die Folge sind gesellschaftliche und wirtschaftliche Umbrüche, in deren Folge eine fundamentale Neuausrichtung des gesamten Wirtschaftssystems stattfinden wird mit dem Ziel, eine nachhaltige Lebensweise zu ermöglichen [2]. Trotz vielfältiger Definitionen für den Begriff Nachhaltigkeit ist die wesentliche Kernaussage in der Regel, dass in einem nachhaltigen Wirtschaftssystem ein Fließgleichgewicht natürlicher Ressourcen besteht, sodass sich ein langfristig stabiler Zustand einstellt [3]. Im Zuge von gesellschaftlich intensiv diskutierten Themen wie dem Klimawandel oder der Verschmutzung der Weltmeere hat sich in den letzten Jahren ein wachsendes Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewusstsein in der Gesellschaft entwickelt, wodurch Nachhaltigkeit zunehmend auch in das Zentrum unternehmerischen Handelns rückt [4].

Darüber hinaus wirken sich globalwirtschaftliche Ereignisse, beispielsweise in Folge der COVID-19-Pandemie, in besonderem Maße auf konjunktursensible Branchen wie den Werkzeugmaschinenbau aus [5]. Neben wirtschaftlichen Aspekten ist ein resultierender Stellenabbau ein Beispiel für gesellschaftliche Auswirkungen der Positionierung der Branche in unserem Wirtschaftssystem [6].

Aufgrund dieser bedeutsamen globalen Entwicklungen steht das *AWK'21* unter dem Leitmotiv *Turning Data into Sustainability*. In diesem Beitrag wird der Einfluss neuer Geschäftsmodelle auf die nachhaltige und resiliente Gestaltung der industriellen Fertigung mit besonderem Fokus auf den Werkzeugmaschinenbau beleuchtet.

## 1.2 Nachhaltigkeit im deutschen Werkzeugmaschinenbau

Einschneidende wirtschaftliche und gesellschaftliche Erfahrungen im Rahmen der COVID-19-Pandemie haben verdeutlicht, warum für die Definition des Nachhaltigkeitsbegriffs eine rein ökologische Betrachtungsweise nicht ausreichend ist. Stattdessen umfasst das häufig herangezogene Vier-Säulen-Konzept zur Beschreibung der Nachhaltigkeit die drei Säulen Ökonomie, Ökologie, Soziales, erweitert um die institutionelle Dimension als vierte Säule [7]. Eine umfassende Bewertung der Nachhaltigkeit im deutschen Werkzeugmaschinenbau kann somit auf Grundlage der sogenannten $\boldsymbol{FESG}$-Faktoren erfolgen [8]. Diese repräsentieren die ebengenannten Bereiche über die Begriffe $\boldsymbol{F}inance$, $\boldsymbol{E}nvironment$, $\boldsymbol{S}ocial$ und $\boldsymbol{G}overnance$ und ergeben durch Multiplikation entlang des gesamten Lebenszyklus die $Sustainable\ Productivity$, einen Kennwert zur Beschreibung des Nachhaltigkeitsbeitrag (Gl. 1).

$$Sustainable\ Productivity = \boldsymbol{F}inance \cdot \boldsymbol{E}nvironment \cdot \boldsymbol{S}ocial \cdot \boldsymbol{G}overnance \quad (1)$$

Eine Betrachtung der deutschen Werkzeugmaschinenbranche hinsichtlich dieser Dimensionen verdeutlicht, wie nachhaltig die Branche aktuell aufgestellt ist und welche Potenziale zur Steigerung der Nachhaltigkeit sich daraus ableiten lassen (vgl. Abb. 1).

**Faktor 1:** $\boldsymbol{F}inance$

Eine Bewertung der finanziellen Dimensionen zielt darauf ab, herauszufinden, ob die Branche insgesamt langfristig ökonomisch robust positioniert ist. Die Werkzeugmaschinenbranche in Deutschland ist trotz eines zunehmenden

Konzentrationsprozesses mittelständisch geprägt, exportorientiert und stark an die Entwicklung der Weltkonjunktur gebunden. Werkzeugmaschinen sind Investitionsgüter, deren Absatz insbesondere in Krisenzeit massiv zurückgehen kann (Produktionsrückgang von 31 % im Krisenjahr 2020 [9]) [10]. Trotz vergleichsweise geringer Umsatzrenditen im Werkzeugmaschinenbau weisen viele Unternehmen der Branche eine lange Historie wirtschaftlichen Erfolgs auf. Insgesamt ist die finanzielle Nachhaltigkeit der Branche aufgrund der starken Konjunkturabhängigkeit sowie geringer Margen im Kerngeschäft gefährdet.

**Faktor 2:** $\boldsymbol{Environment}$

Wird der gesamte Produktlebenszyklus einer Werkzeugmaschine betrachtet, machen Stromkosten ca. 16,8 % der Gesamtkosten aus [11]. Der Stromverbrauch des deutschen Maschinenbaus, Haupteinsatzgebiet von Werkzeugmaschinen, belief sich im Jahr 2019 auf 10.847 GWh, was ca. 2,11 % des Nettostromverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland entsprach [12]. Bei einem Anteil konventioneller Energieträger im Strommix von Deutschland von ca. 50 % (Stand 2020) führt der Stromverbrauch von Werkzeugmaschinen zu einer entsprechenden Umweltbelastung durch $CO_2$ und anderer Treibhausgase [13]. Da lediglich 5 bis 25 % der aufgenommenen Primärenergie für den eigentlichen Bearbeitungsprozess genutzt werden, besteht erhebliches Optimierungspotenzial zur Steigerung der Nachhaltigkeit vor Umweltgesichtspunkten [14]. Auch der Einsatz umweltunverträglicher Betriebsmittel (z. B. Schmiermittel auf Mineralölbasis oder Kühlmitteln) bietet nachhaltige Optimierungschancen, u. A. durch die Substitution dieser Mittel durch natürliche Produkte im Rahmen der Biologisierung der Produktionstechnik. Auch Lösungen für die Weiterverwendung (*Reuse*) einer Maschine in anderen Bereichen, das gezielte Wiederaufbereiten genutzter Anlagen (*Refurbish*) und das Weiterverwerten (*Recycle*) im Sinne einer Kreislaufwirtschaft sind wichtige Punkte zur Steigerung der Nachhaltigkeit der Werkzeugmaschinenbranche [15].

**Faktor 3:** $\boldsymbol{Social}$

Trotz der bereits genannten Konjunkturabhängigkeit, deren Folge auch ein Stellenabbau sein kann, weisen Unternehmen der Werkzeugmaschinenbranche überdurchschnittlich lange Betriebszugehörigkeiten innerhalb der Belegschaft auf. Vergleichsweise hohe Ausbildungsquoten sind Ausdruck einer nachhaltigen Sicherstellung eines Bestands qualifizierter Teams, wobei es insbesondere im Bereich der Digitalisierung aktuell nicht gelingt, den Bedarf eigenständig zu decken [16]. Eine Attraktivität der Branche für Fachkräfte aus diesem Bereich ist ebenso wichtig wie die Fortbildung des vorhandenen Teambestands.

**Faktor 4:** $\boldsymbol{Governance}$

Der Bereich Governance zielt insbesondere auf den Einfluss der Unternehmensstruktur und –führung ab und beinhaltet damit zum Beispiel die Innovationsfähigkeit. In diesem Feld haben viele Unternehmen der Branche erkannt, dass die Kooperation mit anderen Unternehmen ein Schlüssel sein kann, anstehende Transformationsprozesse erfolgreich zu gestalten, belegt durch eine Vielzahl an Kooperationen von Werkzeugherstellenden Unternehmen mit Unternehmen anderer Branchen. Die strategische Zusammenarbeit und eine kontinuierliche Öffnung sind wichtige Beiträge zur Steigerung der institutionellen Nachhaltigkeit.

Insgesamt zeigt die Aufschlüsselung der einzelnen $\boldsymbol{FESG}$-Faktoren die Bandbreite möglicher Einflüsse (vgl. Abb. 1), die auf die Nachhaltigkeit der Werkzeugmaschinenbranche einwirken. Statt einer individuellen Betrachtung der einzelnen Bereiche muss eine übergeordnete Struktur geschaffen werden, die einen ganzheitlichen Fokus der Nachhaltigkeit der Branche schafft. Da viele der angesprochenen Einflüsse mit der strategischen Ausrichtung der Unternehmen sowie der Struktur der Branche zusammenhängen, ist das Thema Nachhaltigkeit im Werkzeugmaschinenbau stark mit den vorherrschenden Geschäftsmodellen verknüpft.

*Abb. 1: Nachhaltigkeit entlang der FESG-Faktoren [8] (Bildquelle: WZL)*

## 1.3 Aktuelle Geschäftsmodelle im Werkzeugmaschinenbau und deren Einfluss auf Veränderungsprozesse

Um neue Geschäftsmodelle als Basis für eine Nachhaltigkeitstransformation im Werkzeugmaschinenbau zu etablieren, ist eine Analyse der aktuellen Situation notwendig. Für den Begriff *Geschäftsmodell* (engl. *Business Model*) existiert in der Literatur keine einheitliche Definition, wobei in der Regel stets drei Aspekte mit einem Geschäftsmodell in Verbindung gebracht werden. Während *Value Proposition* den gestifteten Kundennutzen repräsentiert, steht *Value Creation* für die Architektur der Wertschöpfungskette und damit für die Realisierung ebendieses Kundennutzens. Der Begriff *Value Capture* beschreibt, wie die Unternehmungen letztendlich in wirtschaftlichen Erfolgt überführt werden können. [17–19]

Bei dem bereitgestellten Mehrwert, den ein Werkzeugmaschinenunternehmen für Anwendende generiert, handelt es sich um die Werkzeugmaschine selbst, da der Betrieb der Maschine und damit auch der Prozess meist bei Anwendenden liegen [20]. Aktuell ist der Punkt *Value Proposition* der zentralste Bestandteil von Geschäftsmodellen im Maschinenbau [21]. Im Zentrum steht somit ein physisches Produkt, wodurch die Betriebsphase aus der Bilanzhülle der Herstellenden herausfällt.

Die Wertschöpfung (*Value Creation*) geschieht primär durch physische Arbeit am Endprodukt, wohingegen das Aftersale- und Servicegeschäft nur zu ca. 15 % zum Gesamtumsatz beiträgt [22].

Tab. 1 gibt einen Überblick über gängige Vertriebskonzepte im Werkzeugmaschinenbau. Im Laufe der Zeit haben sich hier verschiedene Ansätze etabliert, die allerdings allesamt gemein haben, dass keine Verknüpfung mit den variablen Betriebskosten stattfindet. Darüber hinaus arbeiten Werkzeugmaschinenherstellende häufig mit Finanzdienstleistenden zusammen, um zeitlich gestreckte Vertriebskonzepte zu realisieren. Die Folge ist, dass sich für Herstellende nach wie vor Einmaleinnahmen

ergeben. Insbesondere im Sondermaschinenbau führt dies unter Umständen zu stark schwankenden Umsätzen. Das aktuellen Geschäftsmodellen im Werkzeugmaschinenbau zugrundeliegende Ertragsmodell basiert somit meist auf dem Neuverkauf von Werkzeugmaschinen (*Value Capture*).

*Tab. 1: Vertriebskonzepte im Werkzeugmaschinenbau [23, 24]*

| | Kauf | Leasing | Miete | Mietkauf | Finanzierung |
|---|---|---|---|---|---|
| **Abwicklung** | einmalige Zahlung | konstanter, monatl. Betrag | konstanter, monatl. Betrag | konstanter, monatl. Betrag und einmalige Zahlung | konstante, monatl. Rate |
| **zeitlicher Rahmen** | Nutzungs-beginn | Nutzungsdauer (ab 3 Jahre), Vertrag kündbar | flexible Nutzungsdauer (ab 6 Monate) | Nutzungsdauer Nutzungsende | flexibler Zeitplan losgelöst von Nutzung |
| **Eigentumspartei** | Anwendender | Herstellender | Herstellender | Herstellender und Anwendender | Anwendender |
| **Instand-setzung** | Anwendender | i. d. R. Anwendender | i. d. R. Herstellender | Herstellender und Anwendender | Anwendender |

Aktuelle Geschäftsmodelle erfordern bei Anwendenden im Bereich $\boldsymbol{Finance}$ somit einen hohen Kapitaleinsatz, der nicht mit der bei Anwendenden erbrachten Leistung und darauf aufbauend generierten Einnahmen korreliert. Für Anwendende ergibt sich daraus ein vergleichsweise hohes Investitionsrisiko und eine insgesamt schlechte Kalkulierbarkeit. Im Falle eines Direktkaufs sind darüber hinaus erhebliche Einmalinvestitionen bei Anwendenden erforderlich, die insbesondere in Krisenzeiten oft nicht realisierbar sind. Während Anwendende infolgedessen auf die eingeplante Fertigungskapazität somit nicht zurückgreifen oder eine notwendige Modernisierung des Maschinenparks nicht umsetzen können, ist bei Werkzeugmaschinenherstellenden ein volatiler Auftragseingang die Konsequenz.

Der Bereich $\boldsymbol{Environment}$ bleibt in aktuellen Geschäftsmodellen nahezu unberücksichtigt, da die Betriebsphase in der Regel nicht inkludiert ist. Die reine Bereitstellung eines physischen Produkts verschiebt die Fragestellung rund um den nachhaltigen Betrieb oder die Weiternutzung nach einer Erstnutzungsphase von Herstellenden weg hin zu Anwendenden. Die Folge ist, dass verfügbare Fertigungskapazitäten nicht effizient ausgenutzt werden, ausgedrückt durch eine durchschnittliche Gesamtanlageneffektivität (engl. Overall Equipment Effectivenes, kurz OEE) von Werkzeugmaschinen in Deutschland von ca. 60 % [25].

Die Komponente $\boldsymbol{Social}$ wird ebenfalls nicht berücksichtigt, da Humankapital, beispielsweise für den Fertigungserfolg unerlässliche Kompetenzen der Maschinenbedienenden, nicht in das Geschäftsmodell einfließen.

Im Bereich $\boldsymbol{Governance}$ kann festgehalten werden, dass sich aktuelle Geschäftsmodelle nicht als Katalysator von Trends, wie beispielsweise der Digitalisierung, bewahrheitet haben. Trotz erwiesener Vorteile geschieht der Einzug von Industrie 4.0 im mittelständisch geprägten Werkzeugmaschinenbau insgesamt langsam. Hauptproblemfelder sind die Personalverfügbarkeit und der Technologietransfer [16], sodass aktuell (Jahr 2020) ca. drei Viertel der Unternehmen im deutschen Maschinenbau eine Zusammenarbeit mit Anbieterkonsortien und Startups als gute Lösung ansehen. Selbst die Zusammenarbeit mit der Konkurrenz ziehen ein Viertel der befragten Unternehmen in Betracht [26]. In derselben Studie geben 61 % der Unternehmen fehlende Geschäftsmodelle als größte Hürde bei der Entwicklung eigenen Digitalisierungslösungen an.

Abb. 2 fasst das vorherrschende Geschäftsmodell im Werkzeugmaschinenbau zusammen.

*Abb. 2: Vorherrschendes Geschäftsmodell im Werkzeugmaschinenbau, nach [17–19]*

Es kann zusammengefasst werden, dass Geschäftsmodelle im Werkzeugmaschinenbau nicht in der Lage sind, vorhandene Potenziale in zufriedenstellendem Maße auszuschöpfen. Neue, digital ausgerichtete Geschäftsmodelle können hingegen als Befähiger (engl. Enabler) und Katalysator einer Nachhaltigkeitstransformation im Werkzeugmaschinenbau fungieren.

# 2 Neue Geschäftsmodelle als Treiber einer Nachhaltigkeitstransformation

## 2.1 Beispiele neuer Geschäftsmodelle im industriellen Umfeld

Dass digitale, kundennutzenzentrierte Geschäftsmodelle ganze Branchen revolutionieren können, zeigt beispielsweise die Medien- und Unterhaltungsindustrie. Das Wertversprechen ist heute eine flexible, bedarfsorientierte Bereitstellung von Unterhaltung. Statt des Verkaufs physischer Produkte wie CDs oder DVDs existieren Streaming- und Abonnementangebote. *Netflix*, *Spotify* und *Steam* sind bekannte Beispiele aus diesem Segment, deren Geschäftsmodelle sich im Krisenjahr 2020 als äußerst resistent erwiesen haben. [27]

Unternehmen wie *Airbnb* oder *Uber* zeigen außerdem, dass das Wertversprechen vollkommen losgelöst von dem zugrundeliegenden physischen Produkt sein kann. Während *Airbnb* kein einziges Hotel betreibt, verfügt *Uber* über keine eigene Taxiflotte.

Auch im industriellen Umfeld sind zunehmend neue Geschäftsmodelle zu finden. Das Unternehmen *Kaeser* verfolgt bereits seit 2006 ein Pay-per-Use-Geschäftsmodell und verkauft Endnutzenden Druckluft zum Kubikmeterpreis. Das Baumaschinen herstellende Unternehmen *Caterpillar* bietet ebenfalls ein Modell an, bei dem Anwendende nutzungsabhängig für das bereitgestellte Equipment zahlen. Ein ähnliches Konzept verfolgt *Hilti* mit einem bedarfsorientierten Flottenmanagement. Das Unternehmen *Viessmann* zeigt, wie die Aus- und Eingliederung von selbst gegründeten dynamischen und agilen Start-Ups die Geschäftsmodelle eines historisch gewachsenen Unternehmens transformieren kann. Auch der Druckmaschinen-Herstellende *Heidelberg* begreift sich zunehmend als Dienstleistender und stellt der Kundschaft ein monatlich vereinbartes Druckvolumen bereit.

Im Werkzeugmaschinenbau sind derartige Anpassungen der Geschäftsmodelle bisher selten zu finden. Stattdessen zielen Entwicklungen darauf ab, bestehende Modelle zu erweitern. Im Zentrum des Wertversprechens steht somit nach wie vor die Werkzeugmaschine als physisches Produkt, erweitert um dynamisch buchbare Zusatzapplikationen insbesondere im Digitalisierungssegment. *Grob-Net4Industry* von *Grob*, das Digitalisierungskonzept von *Homag*, die Industrie 4.0-Plattform *EDNA* von

*EMAG*, *CELOS Machine & Manufacturing* von *DMG Mori* oder *MHmax* und *MPmax* von *Makino* sind Beispiele für solche Zusatzapplikationen. Eine umfassendere Neuinterpretation des Wertversprechens im Werkzeugmaschinenbau verfolgt beispielsweise *Trumpf*. In Kooperation mit dem Rückversicherer *Munich RE* wird aktuell daran gearbeitet, ein Pay-per-Part-Modell zu entwickeln, bei dem Anwendende zur Verfügung gestellte Laservollautomaten nutzen können und für jedes geschnittene Blech einen zuvor vereinbarten Preis zahlt. Auch *DMG Mori* bietet seit Juni 2021 mit dem Programm *Payzer* (Pay with Zero Risk) ein Abo-Modell an. Umfangreichere Erfahrung mit neuen Geschäftsmodellen hat das Unternehmen *Weisser*, welches mit der Produktreihe *Artery* bereits erfolgreich ein Pay-per-Use-Modell implementiert hat. Auch das herstellende Unternehmen *Heller* bietet mit *Heller4Use* Pay-per-Use-Modelle in verschiedenen Stufen an.

## 2.2 Subskriptionsmodelle für Werkzeugmaschinen

Der Grundgedanke eines Subskriptionsmodells ist das Abrufen einer kontinuierlich erbrachten Leistung durch Anwendende, entlohnt über eine damit verknüpfte kontinuierliche Zahlung. Eine Homogenisierung der Zielsetzung von Maschinenherstellenden und -nutzenden durch die Neuinterpretation des Wertversprechens sorgt dafür, dass Herstellende ihre Arbeit konsequent am Nutzen ausrichten. Nach dem reinen Erbringen von Sachleistungen, bereitgestellten Dienstleistungen auf Abruf, einem Dienstleistungsvertrag und Betreibermodellen vereinen Subskriptionsmodelle somit das Maximum aus Mehrwert für die und Nähe zur Kundschaft. [28]

Infolge einer Gleichrichtung der Interessen begreifen sich der Herstellende als Bereitstellende einer Fertigungsdienstleistung. Die Werkzeugmaschine selbst bildet die Grundlage dieser Dienstleistung, ist allerdings nicht mehr direkter Teil des Wertversprechens. Anwendende zahlen dementsprechend nicht mehr für die Maschine, sondern für die durch die Maschine bereitgestellte Fertigungskapazität. Dabei können verschiedene Abrechnungsmodelle angewendet werden, die unterschiedliche Anforderungen an eine parallele Prozessüberwachung stellen. Während Pay-per-Part-Ansätze die Anzahl gefertigter Teile mit den dadurch angefallenen Kosten in Verbindung setzten, korrelieren Pay-per-Use-Modelle Kosten in der Regel mit der Betriebsdauer einer Anlage. Komplexere Pay-per-Usage- oder Pay-per-Stress-Ansätze verfolgen wiederum das Ziel, während der Bearbeitung entstandene Belastungen der Maschine bzw. den hervorgerufenen Verschleiß als Kostenindikator heranzuziehen. Dies setzt allerdings performante Condition Monitoring-Systeme voraus, sodass derartige Modelle bisher noch Gegenstand aktueller Forschung sind [29].

Beispiel *Weisser Söhne GmbH & Co. KG*

Das Werkzeugmaschinen herstellende Unternehmen *J.G. Weisser Söhne GmbH & Co. KG* bietet bereits für Maschinen ein Pay-per-Use-Modell an. Mit Fokus auf eine Maximierung des Anwendendennutzens verfolgt der deutsche Werkzeugmaschinenherstellende das Ziel, den Nutzenden präzise und gleichzeitig produktive Zerspanprozesse und Dienstleistungen flexibel bereitzustellen. Mit der Maschinenbaureihe *Artery* stellt *Weisser* ein konfigurierbares horizontales Drehzentrum bereit, welches neben einer Dreh-Fräs-Komplettbearbeitung auch parallele Drehprozesse ermöglicht. Durch das Abdecken eines technisch breiten Anwendungsspektrums und die Kombination verschiedener Bearbeitungsverfahren wird der Zielgruppe ein flexibler und produktiver Einsatz der Maschine ermöglicht. Neben den

technischen Produkteigenschaften ist darüber hinaus das Vertriebskonzept auf die Bedürfnisse der Kundschaft ausgerichtet. Beim Pay-per-Use-Modell von *Weisser* handelt es sich de facto um ein Mietmodell mit variablen, minütlich aufgeschlüsselten Kosten, wobei sich diese im Wesentlichen aus der Auslastung der Hauptspindel ergeben. Durch kurze Laufzeit schon ab 48 Monaten wird den Auftraggebenden ein bilanzneutraler, finanziell transparenter Betrieb eines stets modernen Maschinenparks ermöglicht. Die anfallenden Kosten können als steuerlich absetzbare Betriebskosten behandelt werden. Notwendige Wartungsarbeiten und die Behebung von nicht direkt durch die Nutzenden verursachten Maschinenstörungen werden durch *Weisser* selbst abgedeckt. Grundlage des Geschäftsmodells ist eine Kooperation zwischen *Weisser* und weiteren Dienstleistenden in den Bereichen Bankwesen und Datenverarbeitung. Eine Bank erwirbt die Maschine von *Weisser*, tritt gegenüber der Kundschaft nach einer erfolgreichen Bonitätsprüfung als Vermietender auf und trägt dadurch das finanzielle Risiko. *Weisser* betreut die Lieferung, Inbetriebnahme, Schulung und beseitigt Störungen während des Betriebs. Das technische Risiko liegt somit bei den Werkzeugmaschinenherstellenden. Da das Datenmanagement und damit auch zentrale Fragestellungen zu den Themen Datenzugehörigkeit und -sicherheit durch weitere spezialisierte Dienstleistende abgedeckt werden, liegen die Verantwortlichkeiten und somit auch das Risiko nicht bei den Anwendenden, sondern bei den jeweiligen Fachkundigen. Abrechnungs- und Maschinendaten stehen dabei sowohl den Herstellenden als auch den Anwendenden zur Verfügung. Die liberale Datenpolitik setzt Potenziale auf beiden Seiten frei. Während die Kundschaft ein transparentes Bild der Maschine erhält und über auf den Daten aufsetzenden Indikatoren die Produktivität verbessern kann, bilden die Daten für die Herstellenden die Grundlage zum frühzeitigen Erkennen von Ausfällen.

*Abb. 3: Pay-per-Use-Modell am Beispiel von J.G. Weisser Söhne GmbH & Co. KG (Bildquelle: WEISSER, WZL)*

Gezielte, mit den Anwendenden abgestimmte Wartungsarbeiten gewährleisten eine hohe Verfügbarkeit für Nutzende und verringern die Kosten für Herstellenden. Ein effizienter und auf die Bedürfnisse der Nutzenden zugeschnittener Betrieb von Werkzeugmaschinen wird ermöglicht. Mit diesem Geschäftsmodell (vgl. Abb. 3) liefert der Werkzeugmaschinenherstellende *Weisser* eine direkte Antwort auf die aktuellen Herausforderungen im Werkzeugmaschinenbau.

## 2.3 Nachhaltigkeitstreiber im Zeitalter von Industrie 4.0

Die Betrachtung aktueller Geschäftsmodellinnovationen zeigt, dass eine Fokussierung des Nutzens in Dienstleistungen (Production-as-a-Service), bedarfsgerechte Abrechnungsmodelle (Pay-per-X) sowie die flexible Kooperation mit Drittunternehmen (Plattformökonomie) die bereits identifizierten Potenziale zur Steigerung der Nachhaltigkeit adressieren können.

Der As-a-Service-Gedanke sorgt anwenderseitig für eine bedarfsgerechte und damit faire Bezahlpolitik ($\boldsymbol{Finance}$) und verschiebt Investitionsausgaben (CAPEX) in Richtung kontinuierlicher Betriebsausgaben (OPEX), die direkt über durch die Maschine generierte Umsätze gedeckt werden können. Dies maximiert die Transparenz und Planbarkeit bei der Nutzung von Werkzeugmaschinen. Herstellerseitig folgt ein kontinuierlicher, robuster Cash-Flow und außerdem wird das Potenzial geboten, neue Geschäftsbereiche, beispielsweise im finanzschwachen Start-Up-Bereich, zu erschließen.

Darüber hinaus fördern derartige Geschäftsmodelle ein ökologisches Bewusstsein ($\boldsymbol{Environment}$), da Kosten und Nutzen direkt verknüpft werden. Durch die Bereitstellung von Fertigungskapazität wird ein Fokus auf Langlebigkeit von Werkzeugmaschinen direkt monetär belohnt, wenn Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten Teil der Dienstleistung sind. Da Herstellende in den gesamten Produktlebenszyklus von Werkzeugmaschinen integriert werden, sind Konzepte für eine Weiternutzung von Anlagen gefragt und werden ebenfalls durch wirtschaftliche Interessen getrieben.

Zuletzt sorgen Geschäftsmodelle, die den Fertigungsprozess anstelle der Werkzeugmaschine fokussieren, für eine progressive Unternehmensstrategie, da ein agiles Innovationsmanagement, der Aufbau strategischer Partnerschaften sowie der Ausbau der eigenen Kompetenzen die Grundlage erfolgreicher As-a-Service-Modelle sind und somit aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten an Bedeutung gewinnen ($\boldsymbol{Social}$ und $\boldsymbol{Governance}$).

# 3 Aufbau zukünftiger Geschäftsmodelle im Werkzeugmaschinenbau

Der Branchenvergleich in Kapitel 2.1 zeigt, dass durch den Aufbau und Einsatz digitaler Güter sowie Dienstleistungen traditionelle transaktionsbasierte Geschäftslogiken hin zu datengetriebenen Geschäftsmodellen verlagert werden können. Auch innerhalb der Werkzeugmaschinenbranche wird prognostiziert, dass sich der reine Verkauf einer wettbewerbsfähigen und funktionalen Hardware zu (digitalen) Services verlagert [28]. Diese Services sind in der Lage, nachhaltige Produkte und Prozesse in Form eines veränderten Wertversprechens in einem produktionstechnischen Ökosystem unter festgelegten Spielregeln zu generieren, wodurch bisherige Geschäftsmodelle grundlegend beeinflusst werden [30]. Funktionsgrundlage digitaler Services im Umfeld der Werkzeugmaschine ist dabei eine ganzheitliche Transparenz der Prozesskette.

## 3.1 Transparenz der Gesamtprozesskette zur ganzheitlichen Bilanzierung

Der digitale Wandel sowie das Einführen digitaler Güter verstärkt die Entwicklung hin zu digitalen Services, die auf vorhandener Hardware das für Nutzende aktuell nachgefragte Produkt bereitstellen. Damit die Kundschaft ein individuelles Leistungsangebot auf Nachfrage erhält, ist es notwendig, das Nutzungsverhalten und die Bedürfnisse kontinuierlich zu analysieren. Um solch ein entsprechendes Leistungspaket anzubieten, werden werkstattübergreifende digitale Technologien und Data Science-Ansätze genutzt, die zukünftig in der Lage sind, die Komplexität des gesamten Ökosystems zu durchdringen.

Somit ist eine übergreifende digitale Infrastruktur zur Schaffung einer Transparenz der Gesamtprozesskette im Umfeld der Werkzeugmaschine ein notwendiger Enabler in einem nachhaltigen Ökosystem. Innerhalb dieser Infrastruktur können KI-Systeme ihre volle Leistungsfähigkeit ausschöpfen und individuelle Leistungsangebote für Nutzende schnüren. Die Generierung dieser Transparenz wird durch den Aufbau des digitalen Schattens erreicht und ist einer der Forschungsschwerpunkte des Exzellenzcluster *Internet of Production* (vgl. Abb. 4).

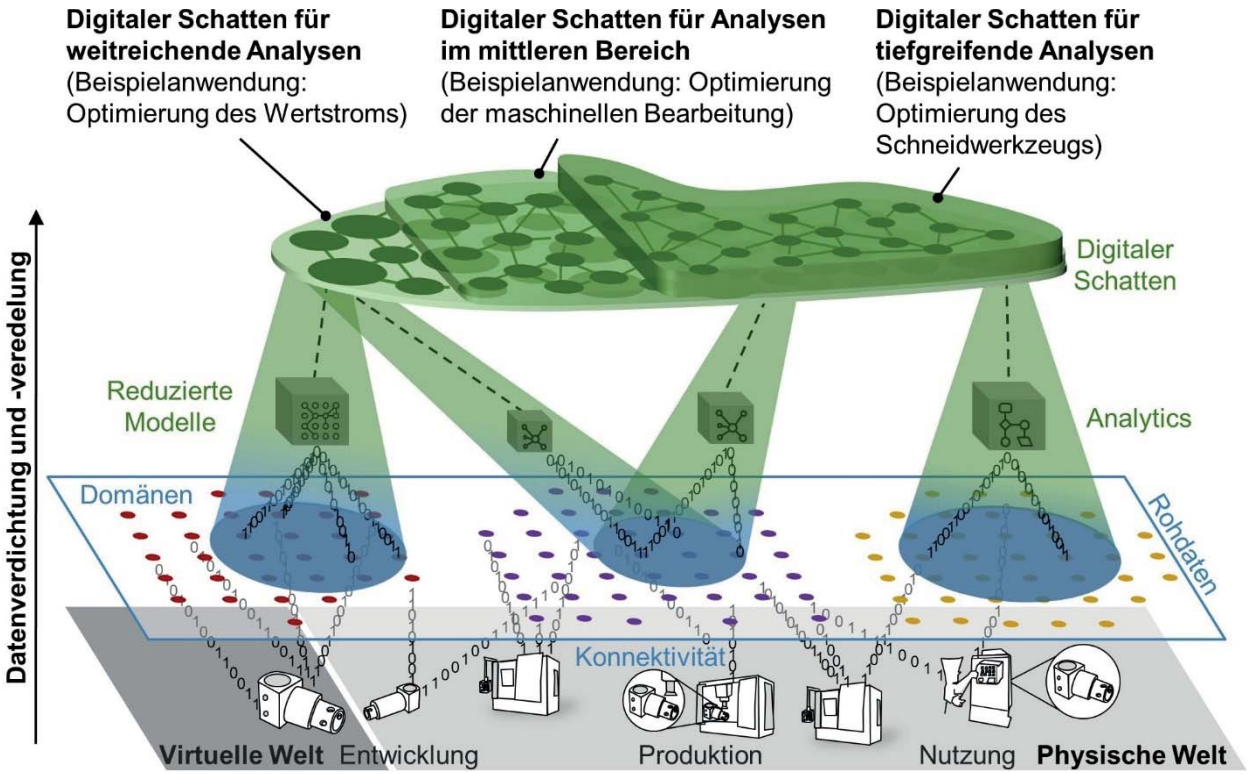



*Abb. 4: Digitale Infrastruktur und digitaler Schatten zur Schaffung einer ganzheitlichen Transparenz und Bilanzierung innerhalb des Hersteller-Kunden-Ökosystems [31]*

Die erforderliche Transparenz wird dabei in zwei Schritten erreicht: Grundlage ist im ersten Schritt der Aufbau einer digitalen Infrastruktur innerhalb des Produktionsumfelds, welche den revolutionären Veränderungsprozess hin zu einer smarten Vernetzung der Produktionslandschaft beschreibt. Dabei bildet das Kernstück die domänenübergreifende Datenbereitstellung zum echtzeitfähigen Informationsaustausch für die geltende Herstellender-Nutzender-Beziehung, z. B. in Form der anfallenden Daten innerhalb der digitalen Prozesskette bei Anwendenden. Konkret birgt die zunehmende Vernetzung

einerseits die Möglichkeit, Informationen an verschiedenen Stationen sowohl lokal als auch global zur sofortigen Analyse zur Verfügung zu stellen. Andererseits führt sie auch zu einer erhöhten Transparenz innerhalb der Produktion durch die sich kontinuierlich verbessernde Vorhersagegenauigkeit des zukünftigen Verhaltens und trägt damit maßgeblich zu der Fähigkeit bei, kurzfristig die richtigen Entscheidungen zu treffen. Damit diese Art des Informationsaustausches gelingt, wird im zweiten Schritt ein Instrument benötigt, welches die richtigen Daten gebündelt und über reduzierte Modelle veredelt in einem gemeinsamen Kontext an der jeweiligen Stelle zur Verfügung stellt: der digitale Schatten. Der digitale Schatten generalisiert die über die Herstellender-Nutzender-Beziehung definierte Datengrundlage entlang der anfallenden Datenhistorie. Für ein konkretes Leistungsangebot oder eine erforderliche Information, beispielsweise das Belastungsverhalten der eingesetzten Werkzeuge innerhalb des Prozesses in den letzten Monaten, werden über den digitalen Schatten alle verfügbaren Daten aggregiert. Durch die Anreicherung mit kontextrelevanten Daten entsteht eine lernfähige Datenumgebung, die dem digitalen Schatten angeheftet wird. Die Folge ist eine gebündelte Bereitstellung aller relevanten Daten für übergreifende KI-Ansätze zur Beschreibung und nachhaltigen Optimierung technischer Systeme, z. B. die betrachtete Werkzeugmaschine [28].

Die smarte Vernetzung mittels des digitalen Schattens ermöglicht in der Folge ganzheitliche Bilanzierungen im betrachteten Ökosystem aus Herstellender und Anwendender im Umfeld der Werkzeugmaschine, wie die folgenden zwei Beispiele zeigen:

1. *Ökonomische Bilanzierung*
   Durch eine Überwachung von Produktionssystemen und Prozessen kann im ersten Schritt das Nutzungsverhalten, unterteilt in Haupt- und Nebenanteile, aufgeschlüsselt werden. Neben einer realitätsnahen Bewertung der tatsächlichen Maschinennutzung wird dadurch ermöglicht, durch Aufdecken ungenutzter Potenziale konkrete Optimierungsvorschläge abzuleiten. Diese können beispielsweise auf eine Steigerung der Produktivität [32] oder eine Reduktion des Ressourceneinsatzes abzielen.
2. *Ökologische Bilanzierung*
   Darüber hinaus erlaubt der digitale Schatten auch, Produktionssysteme vor ökologischen Gesichtspunkten zu analysieren. Entlang der gesamten Prozesskette können dadurch der Strom- und Wasserverbrauch oder der Einsatz anderer umweltunverträglicher Substanzen präzise aufgeschlüsselt werden, um auf dieser Grundlage eine Bewertung des ökologischen Fußabdrucks vorzunehmen (z. B. $CO_2$-Tracking). Insbesondere in Hinblick auf eine Bewertung von Werkzeugmaschinen entlang der $\boldsymbol{FESG}$-Faktoren ist dies ein wichtiges Element.

Diese Beispiele zeigen, dass eine transparente Fertigung auf Grundlage einer durchgehenden Digitalisierung ganzheitlich bewertet werden kann. Die Nutzung von vorhandenen Produktionsmitteln wird demnach nicht mehr auf Basis eines klassischen OEE-Kennwerts durchgeführt, sondern wird in eine neue Bewertungsmethodik auf Grundlage der $\boldsymbol{FESG}$-Faktoren überführt [8]. Es wird deutlich, dass die Digitalisierung dadurch zum Enabler der Nachhaltigkeitstransformation wird. In der weiteren Betrachtung werden deshalb die fünf Ebenen der Digitalisierung betrachtet (vgl. Abb. 5). Ausgehend von der Produktionshardware (Ebene 1) liefern Sensorik und Aktorik (Ebene 2) die Datengrundlage. Durch eine Anbindung dieser an das unternehmensübergreifende Netzwerk (Ebene 3) können darauf aufbauend Analysen durchgeführt werden (Ebene 4). Digitale Plattformen (Ebene 5) bilden die oberste Schicht, da sie dem flexiblen Austausch von Informationen auf globaler Ebene dienen.

*Abb. 5: Fünf Ebenen der Digitalisierung, nach [20, 27]*

## 3.2 Digitale Plattformen als Keimzelle der Geschäftsmodellentwicklung

In den letzten 20 Jahren haben Unternehmen mit plattformbasierten Geschäftsmodellen sowohl das wirtschaftliche als auch das gesellschaftliche Leben radikal verändert (beispielsweise *Amazon*, *Facebook*, *Google*, *Youtube*). Obwohl keine einheitliche Definition einer digitalen Plattform existiert, umschließt die Bezeichnung im Wesentlichen digitale Einrichtungen, die auf eine Organisation und Strukturierung von wirtschaftlichen und sozialen Aktivitäten abzielen [33]. Beteiligte können interagieren, sich austauschen und dadurch auf effiziente Weise einen Mehrwert für Endnutzende generieren. Angebot und Nachfrage können im gewünschten Maße und auf direktem Wege zusammengebracht werden.

Auch in der Produktionstechnik sind in den vergangenen Jahren digitale Plattformen entstanden. Der Stahl- und Metallhandelnde *Klöckner & Co* digitalisiert sämtliche Liefer- und Dienstleistungsketten. In diesem Zusammenhang wurde die unabhängige B2B-Plattform *XOM Material*s entwickelt, über die sowohl Stahlanbietende als auch Kaufende von optimierten und standardisierten Einkaufsprozessen profitieren.

*Xometry* ist ein On-Demand-Marktplatz für individuell gefertigte Bauteile. Während neben der CNC-Bearbeitung auch der 3D-Druck, die Blechfertigung und der Spritzguss zum Portfolio zählen, gehören insgesamt bereits über 5.000 fertigende Unternehmen (Manufacturing Partners) zum Netzwerk.

In der Werkzeugmaschinenbranche ist denkbar, dass unterschiedliche Gruppierungen die Führung in einer übergeordneten Plattform übernehmen. Dazu zählen:

- etablierte Produzierende
- Bereitstellern von Automatisierungssystemen
- IT-Unternehmen im Bereich Cloud Services
- Konsortien

Als **etablierter Produzierender** verfolgte das Unternehmen *Trumpf* mit der Gründung von
*Axoom* das Ziel, zielgerichtet digitale Produktionsplattformen zu entwickeln. *Axoom* wurde 2019 an *GFT Technologies*, ein Unternehmen, welches nicht direkt Bestandteil der Werkzeugmaschinenbranche ist, verkauft. Auch *DMG Mori* bietet über die Plattform *CELOS* verschiedene Apps zur Optimierung der Fertigung an, wobei es sich hierbei um eine geschlossene Plattform handelt. Insgesamt betreibt aktuell kein Werkzeugmaschinenherstellender eine offene Plattform, die gedacht ist, sich zu einer branchenweiten Lösungen zu entwickeln.

Neben den Herstellenden rückt das Thema zunehmend in den Fokus von **Bereitstellenden von Automatisierungssystemen**, beispielsweise *Siemens*.

Beispiel *Siemens*

Das Unternehmen *Siemens* verfolgt im Bereich der Produktionstechnik eine umfangreiche Digitalisierungsstrategie (vgl. Abb. 6). Seit Jahren entwickelt und baut *Siemens* leistungsfähige, computergesteuerte Bewegungs- und Ablaufsteuerungen von Produktionssystemen, darunter auch NC-Steuerungen für Werkzeugmaschinen. Mit der heutigen *SINUMERIK*-Baureihe bildet *Siemens* das steuerungstechnische Herzstück für die Übersetzung bauteilabhängiger Steuerbefehle in konkrete Bewegungsabläufe für die einzelnen Antriebe und Module der Produktionsmaschine. Mit der neuesten Generation, der *SINUMERIK ONE*, können Arbeits- und Inbetriebnahmeprozesse virtuell simuliert und abgebildet werden. Zusätzlich bietet *Siemens* mit der *SINUMERIK Edge* als Kombination aus Hard- und Software eine maschinennahe Plattform für Apps zur digitalen Fertigungsunterstützung und Optimierung. Dabei handelt es sich um eine werkstattnahe Computing-Plattform, die die für die Regelung genutzten steuerungsinternen Daten der Maschine erfasst und mit Industrieanwendungen verschiedener Herstellenden, sog. *Edge Apps,* in Verbindung bringt. Die Computing-Plattform analysiert die in den Prozessen kontinuierlich auflaufenden Daten mithilfe von intelligenten Algorithmen, wodurch eine Erweiterung von Automatisierungslösungen, ein langfristiges Erlernen neuer Wissenszusammenhänge sowie ein Optimieren der Fertigung ermöglicht wird. Gleichzeitig bildet das *Edge*-Device das IoT-Gateway zu den verschiedenen unternehmensinternen Leitebenen und realisiert die übergreifende Anbindung an die Cloud-Plattform, die *Siemens MindSphere*. Das Management, die Systempflege und das Bereitstellen der benötigten Digitalisierungsfunktionen in Form der Apps auf der *Edge* erfolgen online über die *MindSphere*. Hierbei handelt es sich um ein weltweit nutzbares, offenes IoT-Betriebssystem, das neben Online-Speicher und Rechenleistung umfassende Service-, Technologie-, Logistik- und Managementfunktionen samt Software-Distribution unter Berücksichtigung höchster Datenschutz- und Sicherheitsrichtlinien bietet. Mithilfe sog. *Cloud Apps* besteht darüber hinaus die Möglichkeit, neben den dezentral arbeitenden *Edge App*s auch übergeordnete Berechnungen durchzuführen. Algorithmen des maschinellen Lernens (ML) zur Auswertung einer maschinenübergreifenden Datengrundlage sind nur ein Beispiel für einen möglichen Berechnungsansatz in der Cloud.

*Siemens* setzt bei der App-Entwicklung auf eine offene Plattform-Strategie. Einerseits werden eigens entwickelte Apps angeboten, beispielsweise zur Reduktion ungeplanter Stillstandszeiten (*Analyze MyMachine / Condition*) oder zur Ermittlung von Leistungskennzahlen der Anlage (*Analyze MyPerfomance / OEE-Monitor*). Anderseits wird auch Drittunternehmen ermöglicht, über die *Siemens*-Infrastruktur eigene Apps zu entwickeln. Hier ist sowohl vorgesehen, Apps für den eigenen Gebrauch einzubinden als auch diese über einen Marktplatz anderen Unternehmen anzubieten. Dadurch wird sichergestellt, dass kundenspezifische Lösungen implementiert werden können.

Insgesamt ermöglicht *Siemens* eine flexible, dem Bedarf angepasste Digitalisierung zur Optimierung der gesamten Fertigung. Dadurch wird auch kleineren Unternehmen ermöglicht, ganzheitliche Digitalisierungskonzepte umzusetzen und bildet somit eine Grundlage für die Realisierung neuer Geschäftsmodelle im Werkzeugmaschinenbau.

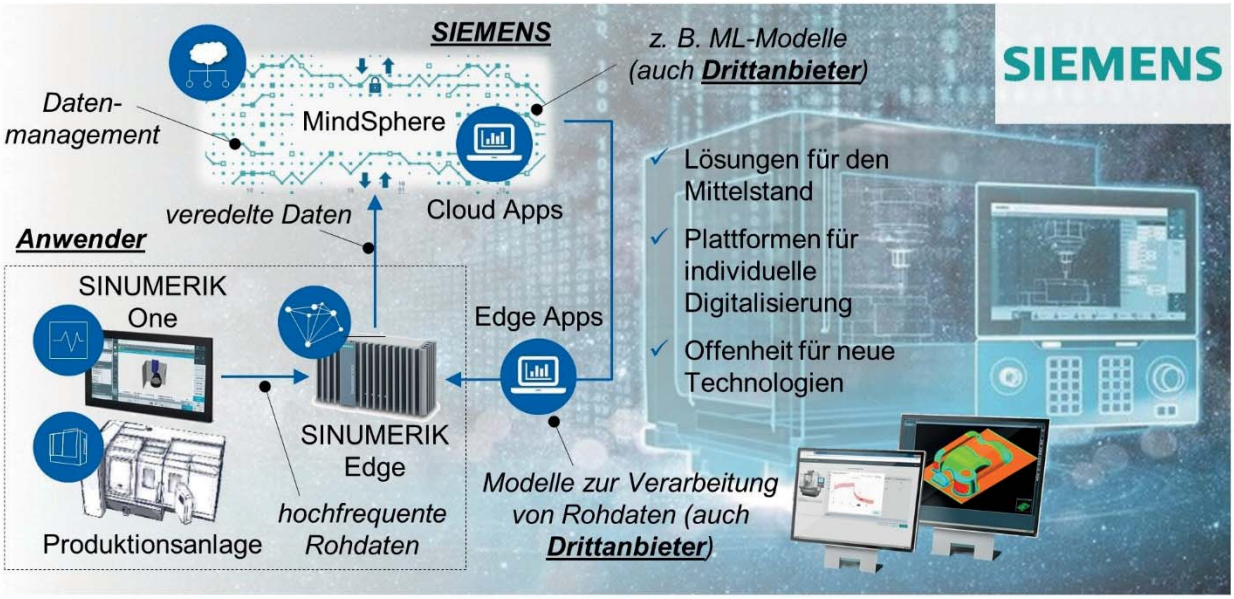



*Abb. 6: Plattformbasierte Digitalisierungslösungen von Siemens (Bildquelle: WZL, Siemens)*

Aufgrund der expansiven Ausweitung der Geschäftsbereiche verschiedener Unternehmen aus dem Bereich der **Cloud Services** (z. B. *Amazon AWS*, *Microsoft Azure*, *Google Cloud*, *IBM Cloud*) ist es möglich, dass diese mittelfristig eine wichtige Position in der Werkzeugmaschinenbranche einnehmen könnten.

Zuletzt können **Konsortien**, also Zusammenschlüsse aus privatwirtschaftlichen oder staatlichen Institutionen, Treiber einer Plattform-Initiative sein. 2020 haben sich insgesamt 22 Unternehmen (elf deutsche, elf französische) zusammengeschlossen und 2021 gemeinsame die Non-Profit-Organisation *GAIA-X* gegründet. Ziel des europäischen Projekts ist die gemeinschaftliche Definition eines digitalen Ökosystems. Im Speziellen beinhaltet dies die Nutzung offener Technologien, die Definition einheitlicher Standards und den Aufbau eines übergreifenden Daten- und Serviceraums. Neben den Gründungsunternehmen sind mittlerweile (Stand Mai 2021) über 500 weitere Unternehmen und Forschungseinrichtungen involviert. In über 50 Usecases sollen Lösungen entwickelt werden, beispielsweise Anwendungen in den Bereichen *Collaborative Condition Monitoring* oder *Smart Manufacturing* im Kontext von *Industry 4.0*. [34]

Trotz der Potenziale digitaler Plattformen ist neben der Definition einheitlicher Standards wichtig, dass stets ein fairer Wettbewerb garantiert wird. Das Unternehmen *Spotify* beklagte beispielsweise 2019, dass es verglichen mit der Konkurrenz *Apple Music* im App Store von *Apple* unter anderem mit hohen Kosten oder verzögerter Bearbeitung von Anfragen zu kämpfen habe [35]. In der Folge startete 2020 eine Untersuchung der Europäischen Kommission. Diese kam 2021 in einer ersten Stellungnahme zu der Erkenntnis, dass *Apple* seine Position als Betreibender der Plattform zum eignen Vorteil ausnutze [36]. Insbesondere für kleinere Unternehmen mit vergleichsweise geringer Marktmacht ist wichtig, nicht in Abhängigkeit eines Plattformdienstleistenden zu geraten, dessen Eigeninteressen mittelfristig mit den des Unternehmens Überschneidungen erfahren können.

Digitale Plattformen sind der Schlüssel für eine durchgehende Digitalisierung und Befähiger neuer Geschäftsmodelle im Werkzeugmaschinenbau. Gleichzeitig kann allerdings auch eine Gefahr von zu mächtigen Plattformen, die von Einzelunternehmen kontrolliert werden, ausgehen, weshalb gemeinschaftliche, länderübergreifende

Initiativen wie das europäische Projekt *GAIA-X* eine große Chance für den mittelständisch geprägten deutschen Maschinenbau darstellen.

## 3.3 Flexibler Aufbau nutzenorientierter Geschäftsmodelle

Anhand verschiedener, individueller Beispiele soll im Folgenden gezeigt werden, wie Werkzeugmaschinenherstellende zukünftig im Rahmen kundenzentrierter Geschäftsmodelle einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Nachhaltigkeit in produzierenden Unternehmen leisten könnten.

Beispiel 1: Productivity-as-a-Service (*MTU*)

Die Hauptgeschäftsfelder des Unternehmen *MTU Aero Engines* sind die Herstellung und Instandhaltung von Triebwerken für die zivile und militärische Luftfahrt. Im Rahmen einer Nachhaltigkeitsinitiative von *MTU* wurden in 14 von 17 Bereichen der sogenannten Sustainable Development Goals (SDG) der Vereinten Nationen konkrete Zielvorgaben definiert [37], um die Nachhaltigkeit der Luftfahrtindustrie mittelfristig zu sichern [38].

Aufgrund signifikanter thermischer und mechanischer Belastungen kommen für die Beschaufelung der Turbine von Strahltriebwerken warmfeste, widerstandsbeständige Superlegierungen auf Basis von Titan oder Nickel zum Einsatz. In Kombination mit hohen Zerspanvolumina ergeben sich dadurch anspruchsvolle, ressourcenintensive Fertigungsaufgaben, weshalb die Luftfahrtindustrie, auch infolge der notwendigen Zerspanleistungen bei integralen Aluminiumbauteilen, Produktivitätstreiber in der zerspanenden Bearbeitung ist. Hohe Hauptzeitanteile sind häufig Ausdruck der fertigungsintensiven Bearbeitung. Neben einer Reduktion von Ausschuss und der optimalen Auslastung verfügbarer Fertigungsanlagen beflügelt aus diesem Grund insbesondere das Ausreizen von Prozessgrenzen, also die Maximierung der Produktivität, die Nachhaltigkeit in dieser Branche.

*MTU* verfolgt bereits eine konsequente Vernetzung von Produktionsanlagen und setzt dabei auf Lösungen von *Siemens*. In aktuellen Arbeiten wurde bereits eine Vielzahl an 5-Achs-Bearbeitungszentren jeweils mit einer *SINUMERIK Edge* ausgestattet, sodass die Grundlage (Digitalisierungsebenen 1 bis 3) für eine darauf aufbauende Prozessoptimierung geschaffen wurde. Für Werkzeugmaschinenherstellende ergäben sich in einem solchen Szenario Möglichkeiten, mit neuen Geschäftsmodellen die eigene Rolle neu zu interpretieren. Als Bereitstellender einer definierten Fertigungskapazität (z. B. Teile pro Stunde) würde sich die Prozessauslegung von *MTU* hin zum Maschinenherstellenden verschieben, infolgedessen der Herstellende leistungsabhängig entlohnt werden könnte (z. B. Pay-per-Part). Die Zertifizierung der Prozesse im Rahmen eines ganzheitlichen Qualitätsmanagements, wie es in der Luft- und Raumfahrt üblich ist, müsste auch in einem derartigen Geschäftsmodell zentraler Bestandteil sein. Im Folgenden werden ein mögliches, zukünftiges Geschäftsmodell und die daraus resultierenden Potenziale näher beleuchtet (vgl. Abb. 7).

Es ergeben sich vielfältige Vorteile durch die Verteilung fertigungstechnischer Aufgaben auf die jeweiligen Fachleute, da die geschäftlichen Kontakte ihre Expertise gewinnbringend nutzen können. Für Herstellende bedeutet dies, dass er als Maschinenexperte die statischen, dynamischen und thermischen Systemgrenzen optimal abschätzen kann. Eine ganzheitliche Berücksichtigung limitierender Einflussfaktoren wird dadurch ermöglicht und kann in einer datengetriebene Produktivitätssteigerung eingebettet werden [32]. Für Maschinenherstellende ergibt sich ein neues Optimierungsziel, da Produktivität, Langlebigkeit und selten auftretende Störungen direkt mit finanziellem Unternehmenserfolg verknüpft werden – ökonomische und ökologische

Interessen werden harmonisiert. Die Unternehmensstrategie wird am Nutzen ausgerichtet und nachhaltige Innovationen, beispielsweise wirksame Condition Monitoring-Ansätze, werden gezielt vorangetrieben. Neuentwicklungen am Fertigungssystem, wie beispielsweise neue Schneidstoffe oder optimierte Regelungsparameter der Maschinenachsen, werden kontinuierlich bei Anwendenden implementiert, da ein direkter monetärer Gegenwert bei Herstellenden generiert wird.

Auch für *MTU* ergeben sich Vorteile innerhalb eines solchen Geschäftsmodells. Unternehmensinternes Fertigungs-Knowhow kann nach wie vor eingebracht werden und einen Wettbewerbsvorteil darstellen. Die Folge ist, dass Investitionsausgaben nicht mehr zwischen Produkt und Prozess aufgeteilt werden müssen. Stattdessen wird ein Produktfokus unterstützt, ein Bereich, der im Falle von *MTU* erhebliches Innovationspotenzial birgt. Eine gesteigerte Kraftstoffeffizienz, der Einsatz von Getriebefan-Triebwerken und die Entwicklung alternativer Kraftstoffarten sind wichtige Entwicklungstrends, auf die sich *MTU* dadurch vollends konzentrieren kann.

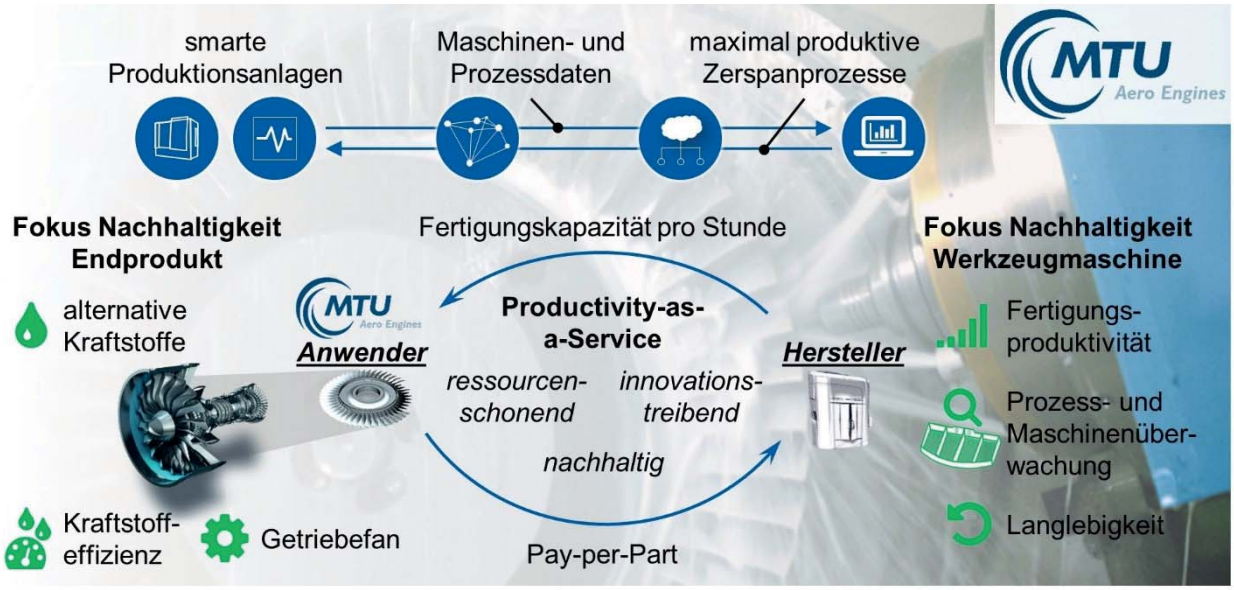



*Abb. 7: Productivity-as-a-Service am Beispiel von MTU Aero Engines (Bildquelle: MTU, WZL)*

Beispiel 2: Quality-as-a-Service (*MAN Energy Solutions*)

Das Produkt- und Dienstleistungsspektrum von *MAN Energy Solutions* umfasst im Wesentlichen die Bereiche Motoren- und Turbinenbau. Produkte von *MAN Energy Solutions* sind insbesondere in der Marine- und Kraftwerkstechnik zu finden und sind in diesen Einsatzgebieten hohen technischen Anforderungen ausgesetzt. Die Nachhaltigkeitsstrategie von *MAN Energy Solutions* zielt darauf ab, neben einer gesunden Arbeitsumgebung für die Belegschaft sichere Produkte in ressourcen- und umweltbewussten Herstellungsverfahren bereitzustellen [39].

Schwerpunkt in der Fertigung ist die spanende Bearbeitung von Großbauteilen, beispielsweise von Motorblöcken oder Turbinenwellen. Da die Präzision dieser Bauteile mitentscheidend für die Effizienz und Langlebigkeit der Endprodukte ist, werden höchste Anforderungen an die Fertigungsqualität gestellt. Darüber hinaus trägt eine Minimierung von Ausschuss im Falle von Großbauteilen stark zu einem reduzierten Ressourceneinsatz in der Fertigung bei. Der Nachhaltigkeitsgedanke in der Fertigung von *MAN Energy Solutions* ist deshalb stark verknüpft mit der Herstellung qualitativ höchstwertiger Produkte.

*MAN Energy Solutions* verfügt aus diesem Grund bereits über ein ausgereiftes und umfassend zertifiziertes Qualitätsmanagement-System. Dennoch ergäben sich für Werkzeugmaschinenherstellende Optionen, mit neuen Geschäftsmodellen einen wertvollen Beitrag zu leisten und die Nachhaltigkeitsstrategie zu erweitern. Dies soll im Folgenden anhand eines möglichen Szenarios aufgezeigt werden (vgl. Abb. 8).

Eine virtuelle, prozessparallele Qualitätsbewertung ermöglicht es Werkzeugmaschinenherstellenden zukünftig, eine angestrebte Endproduktqualität, die letztendlich einen zentralen Nutzen widerspiegeln, als Kern eines Geschäftsmodells zu definieren. Das Wertversprechen der Herstellenden entspräche somit dem Konzept Quality-as-a-Service. Auf dieser Grundlage können bei Anwendenden Fertigungsprozesse so produktiv gestaltet werden, dass höchste Toleranzen dennoch eingehalten werden. Da von Herstellenden eine gewisse Qualitätsgewährleistung ausgeht, wird herstellerseitig eine Reduktion von Ausschuss angestrebt. Ein schnelles Prozess-Ramp-Up und eine First-Part-Right-Strategie werden mit ökonomischen Interessen der Herstellenden verknüpft. In aktuellen Forschungsaktivitäten konnte eine prozessparallele Qualitätsregelung auf Basis realer sowie virtueller Qualitätsdaten realisiert werden. Diese bezieht die gesamte digitale Prozesskette ausgehend von der CAM-Planung ein. In Session 3 des *AWK‘21* wird in der Keynote *Data Science in Production* darüber hinaus im Detail auf die Funktionsweise einer virtuellen Qualitätsüberwachung eingegangen.

Durch einen ökonomisch getriebenen Fokus auf Produktqualität und qualitätsgerechte Produktivität kann die Nachhaltigkeit bei der Zerspanung von toleranzkritischen Großbauteilen gesteigert werden. In Analogie zum Geschäftsmodell Productivity-as-a-Service sorgte die Verteilung der fertigungstechnischen Aufgaben außerdem für eine klare Aufteilung der Verantwortlichkeiten. Während Nuzende den Fokus wieder vermehrt auf das Produkt und die zukünftigen Innovationen in diesem Bereich legen kann, können Maschinenherstellende ihre Kompetenzen nutzen, um den gesamten Produktlebenszyklus der Werkzeugmaschine zu optimieren und davon direkt finanziell profitieren.

Neben dem Qualitätsfokus des Geschäftsmodells liegt großes Potenzial in der Reduktion von Stillstandszeiten, da entsprechende Maschinen meist spezialisiert und vergleichsweise selten sind, sodass eine direkte Abhängigkeit von der eigenen Fertigungskapazität besteht. Herstellerseitig wäre hier denkbar, Skaleneffekte zu nutzen und unternehmensübergreifende Service-Teams aufzustellen, die Standard-Komponenten tauschen und maschinenunspezifische Probleme effizient abarbeiten können. Möglich wird dies, da Produzierende sich nicht mehr über ihr Service-Geschäft differenzieren. Stattdessen wird dieses ein wichtiger Baustein im Wertversprechen.

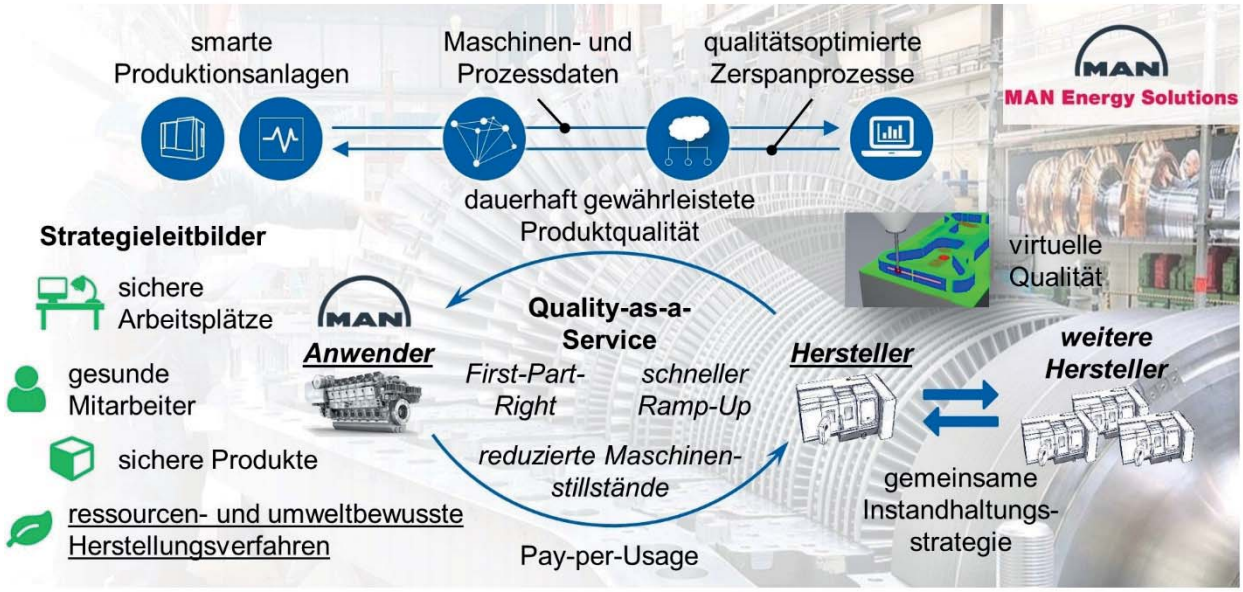



*Abb. 8: Quality-as-a-Service am Beispiel von MAN Energy Solution (Bildquelle: MAN, WZL)*

Beispiel 3: Availability-as-a-Service

Trotz kundenspezifischer Anpassungen, in deren Folge Werkzeugmaschinen auch im Massensegment individuelle Konfigurationen erhalten, sind auf einer Vielzahl an Maschinen ähnliche Produkte mit ähnlichen Anforderungen herstellbar. Während die ersten beiden Beispiele auf eine Maximierung der Produktivität und der Qualität abzielen, beides Einflussfaktoren bei der Berechnung der Gesamtanlageneffizient (OEE), fokussiert das dritte Beispiel die Maschinenauslastung im Bereich von Standardmaschinen. Aufgrund der Tatsache, dass Werkzeugmaschinen im Grundsatz höchst flexibel eingesetzt werden können, steckt Potenzial in einer Nivellierung von überschüssigen und kurzfristig benötigten Fertigungskapazitäten in unterschiedlichen Unternehmen. Der Ansatz verfolgt somit das Ziel, den Missstand aus natürlich schwankenden Absätzen und statisch konstanten Fertigungskapazitäten auszugleichen, um durch eine Maximierung der Maschinenauslastung einen ökonomischen wie ökologischen Beitrag zu einem nachhaltigen Einsatz von Werkzeugmaschinen zu leisten.

Grundlage ist eine digitale Plattform über die Anwendenden sowohl verfügbare Fertigungskapazitäten anbieten können als auch benötigte Kapazitäten buchen können („Maschinenlandkarte“, vgl. Abb. 9). Damit Angebot und Nachfrage zusammenpassen, müssen wichtige Informationen abgeglichen werden. Neben technologischen Parametern wie Bauraum oder Werkstoff sind insbesondere Bauteiltoleranzen von Bedeutung und müssen mit den Fähigkeiten etwaiger Maschinen in Verbindung gebracht werden. Um eine effiziente Evaluation durchführen zu können, ist eine Kategorisierung dieser Parameter erstrebenswert.

Konnte auf dieser Grundlage eine technisch passende Kombination gefunden werden, ist eine zeitliche wie finanzielle Kalkulation notwendig. Während für die zeitliche Komponente umfangreiches Erfahrungswissen aus dem Bereich Produktionsplanung und –steuerung (PPS) relevant ist, müssen für die finanzielle Betrachtung Preiskataloge entworfen werden, die eine transparente Kalkulation ermöglichen. Auch mögliche Transportwege („Teiletourismus“) sind einzubeziehen, sodass sich eine umweltverträgliche Bewertung ergibt.

Ein solcher Ansatz, der aus anderen Bereichen (z. B. Landmaschinen: *UseMyTec*) bekannt ist, ist sicherlich nur auf einfache, nicht-kritische Bauteile und

Universalmaschinen applizierbar. Die diese Szenarien aber einen nicht unerheblichen Anteil an der Gesamtfertigung ausmachen, können durch den beschriebenen Ansatz ungenutzte Potenziale freigesetzt werden.

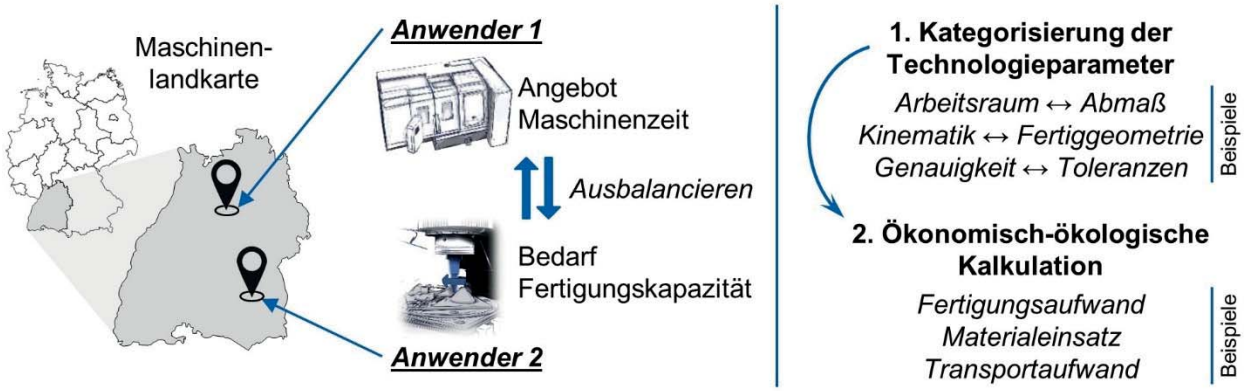



*Abb. 9: Availability-as-a-Service (Bildquelle: WZL)*

Die drei Beispiele zeigen, dass die drei Einflussfaktoren zur Berechnung der OEE als Zielgröße eines Geschäftsmodells dienen können und dass dadurch die Nachhaltigkeit in der industriellen Fertigung insgesamt aktiv gefördert wird. Die Herangehensweise über die OEE verdeutlicht auch, wie derartige Geschäftsmodelle insgesamt finanziell funktionieren können. Bei einer durchschnittlichen OEE des deutschen Maschinenbaus von ca. 60 % [25] kann eine Steigerung dieses Wertes enorme finanzielle Mittel freisetzen, die wiederum für die Realisierung genutzt werden können. Auch die Einbindung von Drittunternehmen, die aktuell keinen direkten Bezug zur Werkzeugmaschinenbranche haben, kann vor diesem Gesichtspunkt finanziell gerechtfertigt werden. Bei einer gerechten Verteilung von freigewordenen Ressourcen kann ein monetärer Mehrwert für alle Parteien entstehen.

Außerdem muss festgehalten werden, dass neue Geschäftsmodelle flexibel an den Nutzen der Kundschaft angepasst werden können. Welche Zielgröße letztendlich entscheidend ist, muss unternehmensabhängig entschieden werden.

# 4 Realisierbarkeit und Herausforderungen

## 4.1 Technologische Enabler

Für eine erfolgreiche Realisierung plattformbasierter Geschäftsmodelle bilden technologische Enabler in den verschiedenen Digitalisierungsebenen die Grundlage. Eine Betrachtung der verschiedenen Ebenen mit entsprechenden Praxisbeispielen gibt Aufschluss über den aktuellen Entwicklungsstand der technologischen Befähigenden. [21, 28] Erst durch das Zusammenspiel der verschiedenen Lösungen können Geschäftsmodelle ganzheitlich abgebildet werden. Der folgende Abschnitt bezieht sich auf die in Abb. 5 gezeigten Ebenen der Digitalisierung.

Beispiel *Makino MHmax*

Das Werkzeugmaschinen herstellende Unternehmen *K.K. Makino Furaisu Seisakujo* bietet seinerr Kundschaft unter dem Namen *MHmax* (Makino Health Maximizer) ein ganzheitliches Überwachungs- und Steuerungswerkzeug an, um den Zustand der Werkzeugmaschine (Ebene 1) kontinuierlich zu überwachen und unerwünschte

Stillstandszeiten dadurch zu minimieren (Abb. 10). Berücksichtigt werden verschiedene Teilsysteme einer Werkzeugmaschine. Dazu zählen:

- *Überwachung der Hauptspindel*
  Durch eine gezielte Auswertung von Beschleunigungsspektren kann auf den Zustand der Spindellager, auf eine störende Unwucht im Werkzeug oder eine sonstige Störung des Systems geschlossen werden.
- *Überwachung der Kühlsysteme*
  Volumenstrom- und Temperatursensoren dienen der Überwachung der aktiven Kühlsysteme. Durch einen Abgleich mit Erfahrungswerten sowie eine kontinuierliche Trendüberwachung können Überlastungen der Maschine rechtzeitig identifiziert werden. Machine Learning-Algorithmen sorgen dafür, dass Eingriffsgrenzen und zulässige Schwankungen sukzessive an die realen Gegebenheiten angepasst werden.
- *Überwachung des Hydrauliksystems*
  Angelehnt an die Überwachung der Kühlsysteme kann mithilfe von Druck- und Temperatursensoren der Zustand des Hydrauliksystems überprüft werden.
- *Überwachung mechanischer Komponenten*
  Verschiedene Messgrößen des automatischen Plattenwechslers als auch des Werkzeugwechslers werden genutzt, um Fehlfunktionen beider Systeme vor dem Entstehen eines mechanischen Schadens zu erkennen.

Grundlage sind Live-Daten, die entweder aus standardmäßig verbauten Sensoren oder gezielt neu platzierten Elementen gewonnen werden (Ebene 2). *Makino* bietet den Anwendenden drei Konnektivitätslevel an (Ebene 3). Während sich Stufe 1 auf Einzelmaschinen beschränkt, kann in Stufe 2 eine unternehmensübergreifende Analyse erfolgen und es besteht ein Zugriff auf alle Daten innerhalb des Unternehmensnetzwerks. Stufe 3 beinhaltet die Anbindung an die *Makino*-Cloud. Dadurch erhält *Makino* Zugriff auf Maschinendaten und kann auf Grundlage eigener Erfahrung in Form von umfangreichen Historiendaten eine verbesserte Analyse erzielen. Die lokale Auswertealgorithmik der aufgelisteten Überwachungssysteme verarbeitet die Echtzeitdaten hochfrequent (Ebene 4). Über entsprechende Dashboards kann der Zustand der Subsysteme kontinuierlich betrachtet werden. Außerdem werden Warnungen bzw. Störungen sowie wichtige Hinweise für ein frühzeitiges, proaktives Eingreifen bereitgestellt. Insgesamt werden so die ersten vier Ebenen an technologischen Enablern abgedeckt.

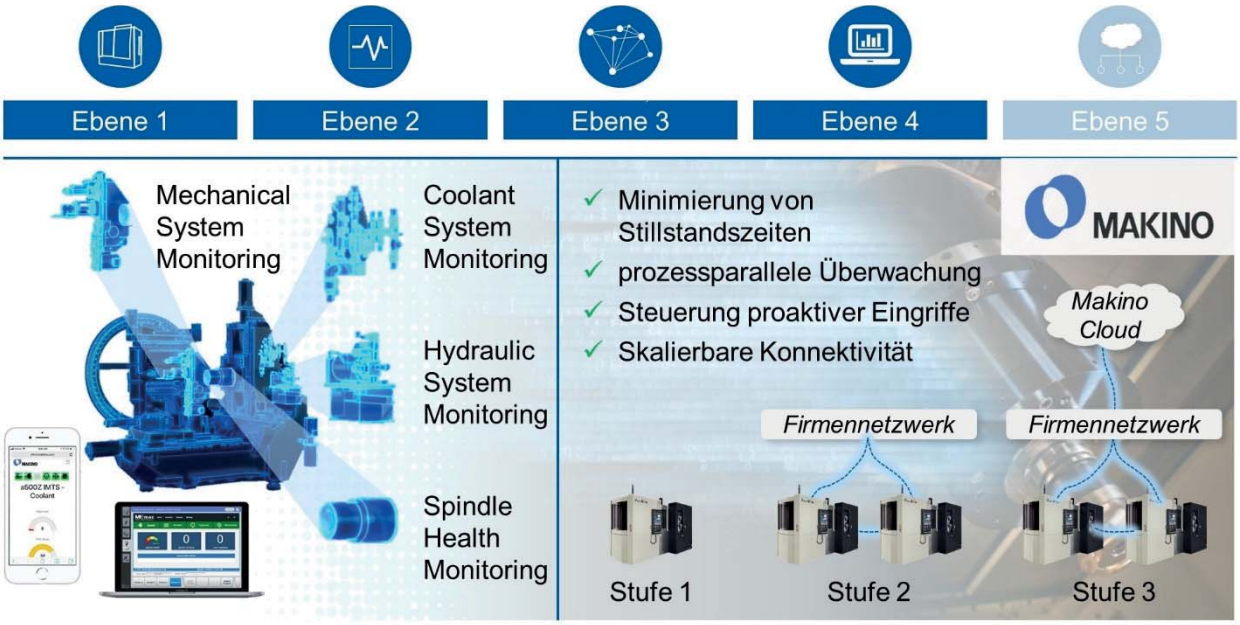



*Abb. 10: Makino Health Maximizer (Bildquelle: Makino, WZL)*

Beispiel *Weiss Spindle Force*

Am Beispiel des Spindelherstellenden Unternehmens *Weiss Spindeltechnologie GmbH* kann aufgezeigt werden, wie Komponentenherstellende (Ebene 1), also Zulieferbetriebe im Werkzeugmaschinenbau, an neuen Geschäftsmodellen partizipieren und ihr Know-How gezielt einbringen können. In Zusammenarbeit mit der *MT Analytics GmbH* entwickelt der deutsche Produzierende von Spindeleinheiten für Werkzeugmaschinen *Weiss* aktuell ein System zur Bestimmung von Prozesskräften (vgl. Abb. 11).

Der verfolgte Ansatz macht sich zunutze, dass Hauptspindeln die für den Prozess notwendige Leistung zur Verfügung stellen, sodass die Auswirkungen des Fertigungsprozesses aufgrund der Prozessnähe in nahezu ungefilterter Form auftreten. Bei der verwendeten spindelintegrierten Sensorik (Ebene 2) handelt es sich um ein Orbitalwellenmesssystem bestehend aus sechs Wegaufnehmern, mit welchen dynamische Verlagerungen relativ zwischen Spindelwelle und –gehäuse erfasst werden.

Die analogen Messsignale der Wegaufnehmer werden hochfrequent (>20 kHz) abgetastet und in einer Auswertebox weiterverarbeitet (Ebene 3). Diese Auswerteeinheit (*Spindle-Force-Box*) besteht dazu aus einem Echtzeit-Linux-Rechner und einer FPGA-Einheit (Field Programmable Gate Array). Der Linux-Rechner realisiert den Datenaustausch und kommuniziert auch mit der Maschinensteuerung via MQTT, um beispielsweise Informationen über das aktuell eingewechselte Werkzeug abzufragen. Auf dem FPGA findet die Verarbeitung sämtlicher Daten statt, indem aus Verlagerungsdaten und Drehgeberinformationen über ein Steifigkeitsmodell die zugrundeliegende Prozesskraft berechnet wird (Ebene 4). Dabei beinhaltet das Steifigkeitsmodell das dynamische Übertragungsverhalten zwischen TCP und der Position der verbauten Sensoren. Aufgrund der Abhängigkeit dieses Übertragungsverhaltens von den dynamischen Eigenschaften des eingewechselten Werkzeugs ist eine flexible Neuberechnung auf Basis der über MQTT abgefragten Werkzeugdimensionen notwendig. Im Rahmen der Datenverarbeitung findet beispielsweise eine Korrektur von Rundlauffehlern, die Berücksichtigung von Kreuzsteifigkeitseffekten und eine Verrechnung thermisch und kinematisch bedingter Einflüsse statt, sodass letztendlich dynamische Prozesskräfte im Kilohertz-Bereich aufgelöst werden können.

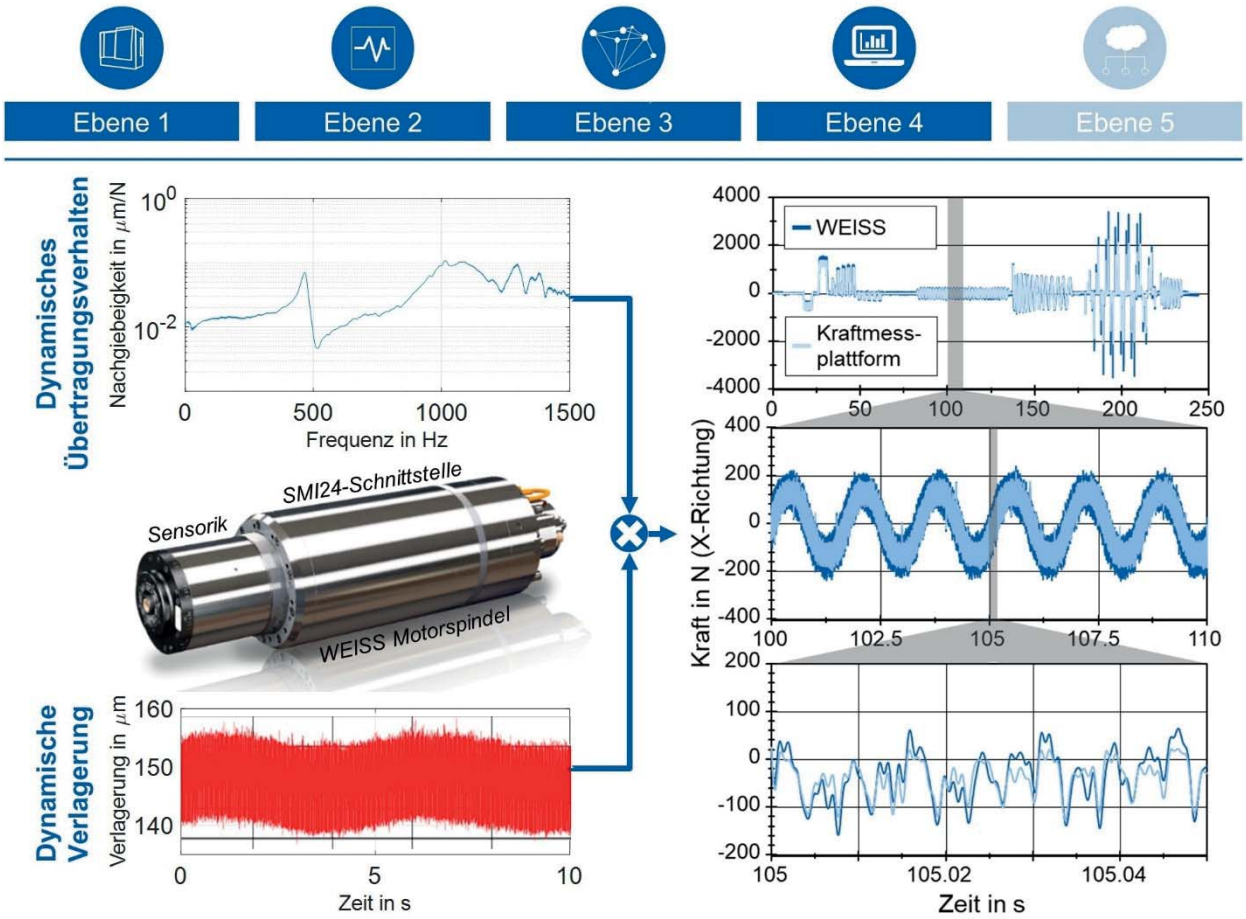



*Abb. 11: Spindelintegrierte Sensorik von Weiss zur Prozesskraftbestimmung (Bildquelle: Weiss, MT Analytics)*

Gegenüber konkurrierenden Ansätzen zur Prozesskraftmessung zeichnet sich der beschriebene Ansatz durch folgende Punkte aus:

- Messung in direkter Prozessnähe
- Keine Schwächung der Struktur durch Einbau von Sensorik im Kraftfluss
- Keine Reduktion des Arbeitsbereichs
- Hohe Sensitivität gegenüber dynamischen Kraftanteilen

Zukünftig ist denkbar, diese Daten über die bestehende Digitalschnittstelle *SMI24* bereitzustellen. Die Anwendenden würden dadurch über eine einzige Schnittstelle in Echtzeit Zugriff auf Temperaturinformationen, kumulierte Last-Drehzahl-Kollektive sowie die aktuell wirkende Prozesskraft haben. In Vorarbeiten mit dem *WZL* konnte bereits gezeigt werden, dass eine genaue Kenntnis der Prozesskraft die Grundlage einer prozessparallelen Qualitätsvorhersagen sein kann [40].

Mit der beschriebenen Lösung zur Bestimmung der Prozesskraft liefert *Weiss* eine bedeutsame physikalische Größe, auf deren Grundlage neben der bereits angesprochenen Qualitätsvorhersage beispielsweise auch eine kumulierte Lagerlast ermittelt werden kann, die dann wiederum maßgebend für die Beurteilung des Spindelgebrauchszustands ist. *Weiss* vereint verschiedene Ebenen technologischer Befähiger (Ebenen 1 bis 4) und verdeutlicht außerdem, dass Komponentenherstellende einen wichtigen Platz in neuen Geschäftsmodellen haben.

Beispiel *UMT* Finanztransaktionen

Für die effiziente und transparente Abwicklung variabler, nutzungsabhängiger Finanztransaktionen zwischen Werkzeugmaschinenherstellenden, Anwendenden und möglichen Drittunternehmen hat die *United Mobility Technology AG (UMT)* eine Lösung entwickelt. Als Technologie- und Finanzdienstleistungsunternehmen hat sich *UMT* auf die Digitalisierung von Bezahlvorgängen mit den Kernkompetenzen im mobilen und elektronischen Bezahlen spezialisiert.

Im Einzelhandel wickelt *UMT* bereits auf 70.000 Kassen in über 16.000 Filialen monatlich sieben Millionen Finanztransaktionen ab. Damit liefert *UMT* mit der bereits 15 Millionen mal gedownloadeten App als Grundlage das erfolgreichste Mobile Payment System Deutschlands. Durch Transaktionsabwicklungen in unter 50 % der Zeit einer EC-Kartenzahlung ergeben sich Vorteile für Kaufende und Verkaufende. Während Kaufende schnell und komfortabel zahlen können, folgen beim Unternehmen bei einem Einsatz im großen Maßstab erhebliche Senkungen der Betriebskosten.

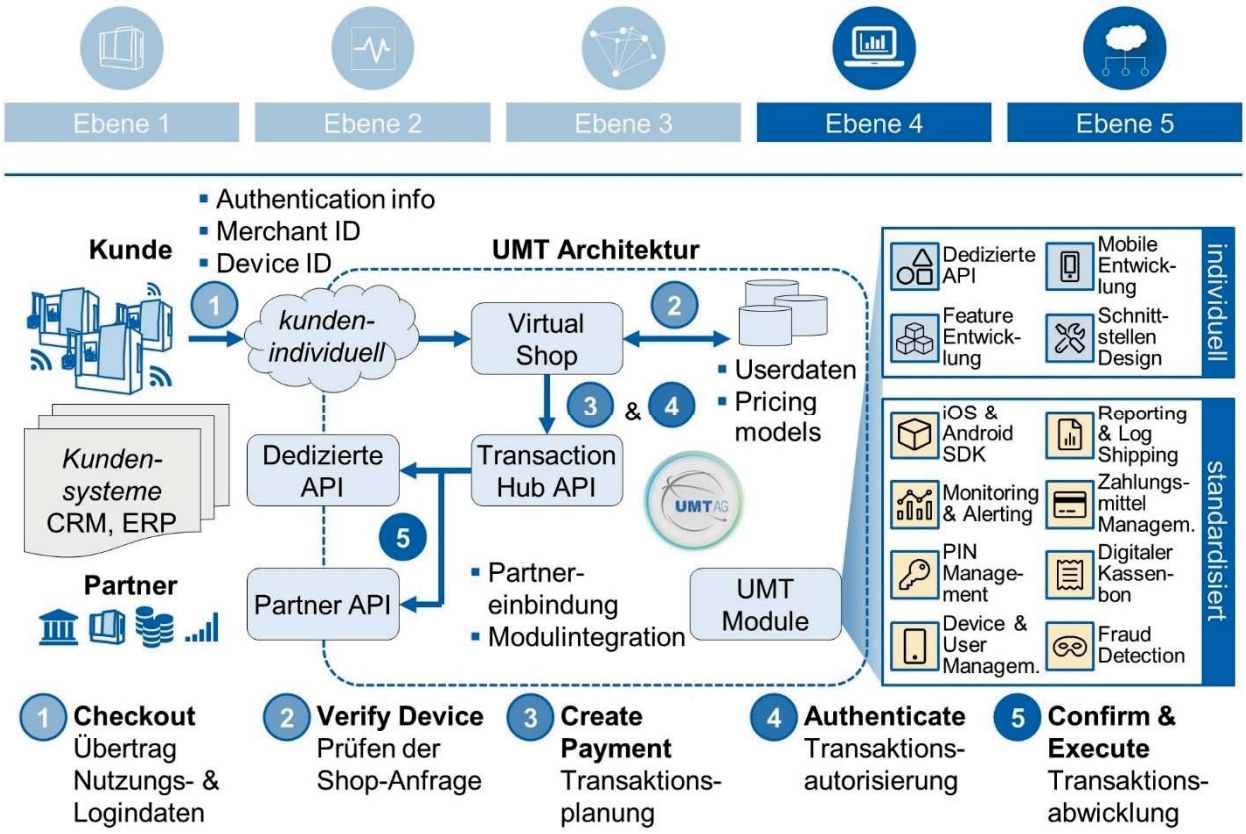



*Abb. 12: Aufbau der UMT-Architektur und Ablauf einer Finanztransaktion (Bildquelle: UMT, WZL)*

Die digitale Finanztransaktionsabwicklung von *UMT* kann somit einen wichtigen Baustein im Internet der Dinge (IoT) bilden. Abb. 12 gibt einen Überblick über den Aufbau der UMT-Architektur und den Ablauf einer Finanztransaktion in einem möglichen zukünftigen Geschäftsmodell. *UMT* verfolgt eine plattformneutrale Philosophie und ist mit verschiedenen Systemen kompatibel. Außerdem ist die app-basierte Einbindung kundenspezifischer Applikationen möglich, sodass *UMT* als plattformorientiertes Drittunternehmen im Werkzeugmaschinenbau elementare Fragestellungen rund um die Abwicklung digitaler Finanztransaktionen beantworten kann. Die zeitlichen Abstände zwischen Bezahlvorgängen können im Bereich von Sekunden liegen. Ausgelöst wird eine

Finanztransaktion durch die Verbraucher selbst, also eine Werkzeugmaschine, die in Betrieb ist und Produktionskapazität beansprucht (1). Der weitere Ablauf umfasst eine Prüfung der Zahlungstransaktion durch einen Abgleich mit Nutzerdaten (2). Dies umfasst beispielsweise auch kundenindividuelle Bezahlmodelle. Nach erfolgreicher Prüfung wird die Transaktion erstellt und terminiert (3), um nach einer Autorisierung (4) durchgeführt zu werden (5). Über dieses Vorgehen können letztendlich sichere Finanztransaktionen ressourceneffizient und auch vollständig automatisiert aufgebaut werden. Gleichzeitig wird durch die Einbindung individueller Kostenmodelle und weiterer Module eine maximale Flexibilität geboten, sodass Bezahlvorgänge hinsichtlich des zugrundeliegenden Anwendungsfalls optimiert werden können.

Dieses Beispiel zeigt, wie Drittunternehmen, die bisher keine Verbindung zur Werkzeugmaschinenbranche haben, in einer Plattformökonomie ihre Kernkompetenzen gewinnbringend einbringen können.

Anhand der drei exemplarisch vorgestellten Lösungen von *Makino*, *Weiss* und *UMT* wird deutlich, dass die technologischen Befähiger neuer, digital ausgerichteter Geschäftsmodelle im Grundsatz bereits vorhanden sind und zum Teil bereits in der Praxis erfolgreich genutzt werden. Es handelt sich allerdings um individuelle Lösungen, die nicht auf den unternehmensübergreifenden Einsatz ausgelegt sind. Während somit die Ebenen 1 bis 4 als vorhanden und umfassend erprobt angesehen werden können, ist der Aufbau einer übergreifenden Plattform mit Standards und Richtlinien bisher nicht geschehen.

Eine Umfrage von *VDMA* und *McKinsey & Company* bestätigt, dass aktuelle Maschinen hochmodern, digital vernetzt und mit Sensorik- und Algorithmik ausgestattet sind, sodass die technologischen Enabler der Ebenen 1 bis 4 im Grunde als ausgereift bezeichnet werden können. In derselben Studie werden fehlende Standards und eine Unterschätzung der Bedeutung digitaler Plattformen im Maschinenbau genannt. [26] Beim Aufbau von Plattformangeboten sind weitere wichtige technologische Fragestellungen zu klären. Dazu zählen insbesondere Sicherheitsthemen wie die Gefahr vor Cyberattacken und die Sicherheit kritischer Daten.

## 4.2 Menschliche Enabler

Fehlende Kompetenzen im digitalen Sektor stellen viele Unternehmen zwar vor Herausforderungen, sind allerdings kein primäres Hindernis bei der Einführung neuer Geschäftsmodelle im Werkzeugmaschinenbau. Einen deutlich größeren Einfluss auf den Erfolg digitaler Geschäftsmodelle haben vorherrschende Denkweisen in den Managementebenen von Hersteller- und Anwenderunternehmen. Im Rahmen am WZL durchgeführter Experteninterviews konnten folgende Aspekte als wesentliche Kritikpunkte neuer Geschäftsmodelle herausgearbeitet werden:

- *Fehlende Kalkulationsgrundlage birgt Risiko*
  Einerseits befürchten Experten der Branche, dass neue Geschäftsmodelle die eigene Wertschöpfung und damit die Erfolgsgrundlage von Unternehmen bedrohen können. Dies geht einher mit Zweifeln, wie derartige Ansätze profitabel funktionieren können. Anderseits beschäftigen sich Fachkundige mit zentralen Fragestellungen rund um die Themen Sicherheit und Haftung im Schadensfall. Solange das Vorgehen in extremen, unvorhergesehenen Situationen nicht abgeschätzt werden kann, verbleiben gewisse Vorbehalte gegenüber neuen Geschäftsmodellen im Werkzeugmaschinenbau.
- *Datenaustausch sorgt für Abfluss von Firmen-Know-How*

Sowohl im Bereich von Herstellenden wie Anwendenden bestehen Bedenken gegenüber einem deutlich verstärkten Austausch von Maschinen- und Produktionsdaten, da ein Verlust von Wettbewerbsvorteilen befürchtet wird.

- *Maschinenbesitz gibt Sicherheit*
  Der Kauf und eigenständige Betrieb von Werkzeugmaschinen gibt Anwendenden häufig ein Gefühl der Sicherheit, da der Betrieb von Maschinen unabhängig von externen Unternehmen und Dienstleistern gestaltet ist. Gekaufte Werkzeugmaschinen als Teil des Anlagevermögens werden teilweise als Wertanlage interpretiert, die einem Unternehmen finanzielle Sicherheit gibt.
- *Externe Unternehmen können zur Gefahr werden*
  Einzelne befragte Fachkundige sehen die Gefahr, dass externe, im digitalen Segment expandierende Unternehmen eine Gefahr für die Werkzeugmaschinenbranche darstellen können. Durch die Größe dieser Unternehmen und massive Investitionskapazitäten könnten diese Player in einem voll-digitalisierten Werkzeugmaschinenbau lukrative Kernfunktionen übernehmen und dadurch einen Großteil der zukünftigen Wertschöpfung abgreifen.

Die angeführten Bedenken sind Ausdruck einer im Grundsatz konservativen, aber mit Blick auf den historischen Erfolg der Branche gerechtfertigten Ausrichtung des Werkzeugmaschinenbaus. Dennoch erfordert ein ganzheitlicher Einzug des Industrie 4.0-Gedankens und die Realisierung nachhaltiger Geschäftsmodelle eine Öffnung und rationale Betrachtung der Themenstellung. Langfristigkeit und Nachhaltigkeit müssen zentrale Leitthemen in der Unternehmensphilosophie werden. Damit Geschäftsmodelle gewinnbringend funktionieren können und angenommen werden, sind zentrale Fragestellung zur Datensicherheit, Kostentransparenz und Kalkulierbarkeit, Haftung und Risikoabschätzung sowie Abhängigkeit von Drittunternehmen eindeutig zu beantworten.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das gesamtgesellschaftliche Bewusstsein für ökologische Fragestellungen und wirtschaftlich einschneidende Ereignisse haben gezeigt, dass die Werkzeugmaschinenbranche einem bedeutsamen Umbruch bevorsteht – Nachhaltigkeit wird zunehmend zum Wettbewerbsfaktor. Neue, digitale Geschäftsmodelle können der Befähiger sein, um ökonomische und ökologische Zielsetzungen für Herstellende und Anwendende zu harmonisieren. Außerdem können sie die Grundlage für eine resiliente, also krisenfeste, Gestaltung der Werkzeugmaschinenbranche darstellen.

Die technologische Grundlage neuer Geschäftsmodelle bildet die digitale Transformation, wobei viele wesentliche Enabler bereits erforscht und erprobt sind. Insbesondere durch eine noch nicht absehbare Bildung von übergreifenden digitalen Plattformen entstehen neben erheblichen Potenzialen auch Risiken und Gefahren. Ein erster Schritt zur langfristigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit und Unabhängigkeit des deutschen Werkzeugmaschinenbaus ist aber stets eine offene und ehrliche Diskussion der Thematik.

Die Realisierung neuer Geschäftsmodelle geht für Werkzeugmaschinenherstellende einher mit der Neuinterpretation der eigenen Rolle im Ökosystem. Mit dem Ziel, den Kundennutzen in Zeiten volatiler Marktbedingungen zu maximieren, rückt die Bereitstellung von Fertigungslösungen zunehmend in das Zentrum des Werteversprechens. Durch die ganzheitliche Bilanzierung des Produktlebenszyklus von Werkzeugmaschinen in neuen Geschäftsmodellen und die Verknüpfung ökologischer Aspekte mit wirtschaftlichen Interessen wird ein System geschaffen, welches Nachhaltigkeit aktiv treibt und finanziell belohnt.

# 6 Literatur


[1] R. Schacht, *Der Megatrend Neo-Ökologie. Dessen Einfluss auf Unternehmen und Darstellung am Fallbeispiel von Biomasseanlagen,* 1. Aufl. München: GRIN Verlag, 2019.

[2] L. Papasabbas, N. Pfuderer, V. Muntschick, C. Schuldt, and J. Seitz, *Neo-Ökologie: Der wichtigste Megatrend unserer Zeit,* 1. Aufl. Frankfurt am Main: Zukunftsinstitut GmbH, 2019.

[3] *Gabler Wirtschaftslexikon,* 18. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.

[4] J. Hellbrück and E. Kals, “Werte, Umweltbewusstsein und Nachhaltigkeit,” in *Basiswissen Psychologie, Umweltpsychologie*, J. Hellbrück and E. Kals (Hrsg.), Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2012, S. 87–98.

[5] Deloitte, *COVID-19 Briefing: Rezessionen und Aufschwung aus der Sektor-Perspektive.* [Online]. Verfügbar: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/about-deloitte/COVID-19-Briefing-Sektoren-Rezession-und-Aufschwung.pdf

[6] IG Metall, *GUTE ARBEIT IST IN GEFAHR.* [Online]. Verfügbar: https://www.igmetall.de/download/20210323_Flyer_Trendmelder_MaschinenundAnlagenbau_eb252262cbd910fcc320b440c0da08931cc94198.pdf

[7] O. Renn, J. Deuschle, A. Jäger, and W. Weimer-Jehle (Hrsg.), *Leitbild Nachhaltigkeit: Eine normativ-funktionale Konzeption und ihre Umsetzung*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2007.

[8] W. Boos, *Die Produktionswende – Turning Data into Sustainability: Durch das Internet of Production zu nachhaltiger Produktion und Betrieb.* [Online]. Verfügbar: https://www.wzl.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaabapamly&download=1

[9] VDMA - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, *Deutsche Werkzeugmaschinenindustrie sieht Licht am Ende des Tunnels.* [Online]. Verfügbar: https://wzm.vdma.org/viewer/-/v2article/render/62297888

[10] VDW, *Marktbericht 2019.* [Online]. Verfügbar: https://vdw.de/wp-content/uploads/2020/06/pub_vdw-marktbericht_2019_2020-06-25.pdf

[11] M. Dehli, “Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen,” in *Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe: Energietechnische Optimierungskonzepte für Unternehmen*, M. Dehli, Ed., Wiesbaden Germany: Springer Vieweg, 2019, S. 81–95.

[12] AGEB, *Stromverbrauch des Maschinenbaus in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2019 (in Gigawattstunden).* [Online]. Verfügbar: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/236700/umfrage/stromverbrauch-des-maschinenbaus-in-deutschland/

[13] Fraunhofer ISE, *STROMMIX 2020: STROMERZEUGUNG IN DEUTSCHLAND [NETTO].* [Online]. Verfügbar: https://strom-report.de/strom/#strommix-2020-deutschland

[14] C. Dorn, M. Stark, U. Renger, and F. Bleicher, “Untersuchungen zur Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung der kinematischen Struktur und der Prozesskräfte,” *ISM*, Bd. 2010. [Online]. Verfügbar: https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_188550.pdf

[15] CECIMO - Comité de coopération des industries de la machine-outil, *THE EUROPEAN MACHINE TOOL SECTOR AND THE CIRCULAR ECONOMY.*

[Online]. Verfügbar: https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/circular_economy_report.pdf

[16] J. Dispan, *Digitalisierung im Maschinenbau: Entwicklungstrends, Herausforderungen, Beschäftigungswirkungen, Gestaltungsfelder im Maschinen- und Anlagenbau*. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung, 2018.

[17] O. Gassmann, K. Frankenberger, and M. Csik, *The business model navigator: 55 models that will revolutionise your business*. Harlow, England, London, New York, Boston, San Francisco: Pearson, 2014.

[18] C. Scheer, T. Deelmann, and P. Loos, *Geschäftsmodelle und internetbasierte Geschäftsmodelle: Begriffsbestimmung und Teilnehmermodell*. Mainz: ISYM, 2003.

[19] A. Osterwalder and Y. Pigneur, *Business model generation: Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer,* 1. Aufl. Frankfurt, New York: Campus Verlag, 2011. [Online]. Verfügbar: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=832895

[20] A. Demont and D. Paulus-Rohmer, “Industrie 4.0-Geschäftsmodelle systematisch entwickeln,” in *Schwerpunkt, Digitale Transformation von Geschäftsmodellen: Grundlagen, Instrumente und Best Practices*, D. Schallmo, A. Rusnjak, J. Anzengruber, T. Werani, and M. Jünger, Eds., Wiesbaden: Springer Gabler, 2017, S. 97–125.

[21] L. Grünert and G. Sejdić, “Industrie 4.0-getriebene Geschäftsmodellinnovationen im Maschinenbau am Beispiel von TRUMPF,” in *ZfbF-Sonderheft*, 71/17, *Betriebswirtschaftliche Aspekte von Industrie 4.0: Arbeitskreis „Integrationsmanagement für neue Produkte“ der Schmalenbach-Gesellschaft für Betriebswirtschaftslehre e. V*, M. Seiter, L. Grünert, and S. Berlin, Eds., Wiesbaden: Springer Gabler, 2017, S. 29–45.

[22] VDMA and McKinsey & Company, *Zukunftsperspektive deutscher Maschinenbau: Erfolgreich in einem dynamischen Umfeld agieren.* [Online]. Verfügbar: https://www.plastverarbeiter.de/wp-content/uploads/migrated/docs/10096_17277.pdf

[23] Hommel GmbH, *Finanzierung von CNC-Werkzeugmaschinen.* [Online]. Verfügbar: https://www.hommel-gruppe.de/360-service/financial-services/ (zugegriffen: Apr. 27 2020).

[24] J.G. WEISSER SÖHNE GmbH & Co. KG, *ARTERY – Anwendernutzen, Kompetenz und Markenwerte.* [Online]. Verfügbar: https://www.weisser-web.com/artery/ (zugegriffen: Apr. 30 2020).

[25] Baker Tilly Roelfs Studie, *Deutsche Industrie mit viel Leerlauf.* [Online]. Verfügbar: https://www.stiftung-nv.de/sites/default/files/synthetische_daten.pdf (zugegriffen: Apr. 27 2020).

[26] VDMA and McKinsey & Company, *Kundenzentrierung als Chance für den digitalen Durchbruch: Was sich die Endkundenindustrien vom Maschinenbau bei digitalen Plattformen und Mehrwertdiensten wünschen*.

[27] J. Winter, “Europa und die Plattformökonomie – Wie datengetriebene Geschäftsmodelle Wertschöpfungsketten verändern,” in *Dienstleistungen 4.0: Geschäftsmodelle - Wertschöpfung - Transformation. Band 2. Forum Dienstleistungsmanagement*, M. Bruhn and K. Hadwich, Eds., Wiesbaden: Springer Gabler, 2017, S. 71–88.

[28] T. Bergs, “Internet of Production - Turning Data into Value,” 2020.

[29] P. Stanula, C. Praetzas, O. Kohn, J. Metternich, M. Weigold, and A. Buchwald, “"Stress-oriented, data-based payment model for machine tools",” *Procedia CIRP*, Bd. 93, S. 1526–1531, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.03.080.

[30] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), *Nachhaltige Produktion: Mit Industrie 4.0 die Ökologische Transformation aktiv gestalten*. München: PRpetuum GmbH, 2020. zugegriffen: Mai 25 2021.

[31] RWTH Aachen, *Exzellenzcluster Internet of Production.* [Online]. Verfügbar: https://www.iop.rwth-aachen.de/cms/~gpfz/Produktionstechnik/

[32] F. Wellmann, *Datengetriebene, kontextadaptive Produktivitätssteigerung von NC-Zerspanprozessen: Data-driven, context-adaptive productivity increase of NC machining processes,* 1. Aufl. Aachen: Apprimus Verlag, 2019.

[33] M. Kenney and J. Zysman, “The Rise of the Platform Economy,” *Issues in Science and Technology*, Bd. 32, Nr. 3, S. 61–69, 2016.

[34] Gaia-X AISBL, *GAIA-X: A Federated Data Infrastructure for Europe.* [Online]. Verfügbar: https://www.data-infrastructure.eu/GAIAX/Navigation/EN/Home/home.html

[35] Spotify, *Time to Play Fair: Leveling the Playing Field.* [Online]. Verfügbar: https://timetoplayfair.com/

[36] Europäische Kommission, *Antitrust: Commission sends Statement of Objections to Apple on App Store rules for music streaming providers.* [Online]. Verfügbar: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_2061

[37] United Nations Organization, *Agenda 2030: Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung.* [Online]. Verfügbar: https://www.un.org/Depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf

[38] MTU Aero Engines, *Agenda 2030 - Globale Ziele für eine nachhaltige Entwicklung.* [Online]. Verfügbar: https://sustainability.mtu.de/report2019/de/02-02-globale-entwicklungsziele/

[39] MAN Energy Solutions, *Nachhaltigkeit: Strategieleitbilder – Qualität, Arbeits- und Umweltschutz sowie Corporate Responsibility.* [Online]. : https://www.man-es.com/de/unternehmen/nachhaltigkeit

[40] C. Brecher, H.-M. Eckel, T. Motschke, M. Fey, and A. Epple, “Estimation of the virtual workpiece quality by the use of a spindle-integrated process force measurement,” *CIRP Annals*, Bd. 68, Nr. 1, S. 381–384, 2019, doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.020.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 4.3:

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher, WZL der RWTH Aachen und
Fraunhofer IPT
Dr. F. Butz, WEISS Spindeltechnologie GmbH
Dr. M. Kaever, Siemens AG
E. Nagel, UMT AG
S. Neus, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
T. Rettich, JG WEISSER Söhne
A. Steinert, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Dr.-Ing. D. Welling, Makino Europe GmbH
M. Wiesch, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Dr.-Ing. Dr. M. Zeis, MTU Aero Engines
Dr.-Ing. C. Zeppenfeld, MAN SE

**Zu diesem Buch**

„Internet of Production – Turning Data into Sustainability“ lautet das Leitthema des 30. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquiums, das vom 22. bis 23. September 2021 in zwei parallelen Vortragsreihen mit insgesamt 16 Fach- und Keynote-vorträgen sowie sieben Plenarvorträgen aus Wissenschaft und Praxis Wege zu einer nachhaltigen und resilienten Produktion aufzeigt.

Der vorliegende Tagungsband fasst die erarbeiteten Vortragsinhalte zusammen und stellt sie der wissenschaftlichen Community und dem interessierten Fach-publikum nun im Rahmen einer Open-Access-Veröffentlichung bereit.

Im Mittelpunkt des Buches steht die Frage, wie Unternehmen im Rahmen einer zunehmend digitalisierten und vernetzten Produktion Nachhaltigkeit und Resilienz erzielen und so ihre die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit sichern können.

Die Beiträge wurden von den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Werkzeug-maschinenlabors WZL der RWTH Aachen und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie IPT gemeinsam mit namhaften Expertinnen und Experten sowie Referentinnen und Referenten aus Industrie und Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zusammengestellt und ausgearbeitet.

Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium AWK
c/o Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 30
52074 Aachen
Telefon +49 241 80 27400
Fax +49 241 80 22293
info@awk-aachen.de
www.awk-aachen.de

ISBN 978-3-86359-994-2