

Herausgeber:

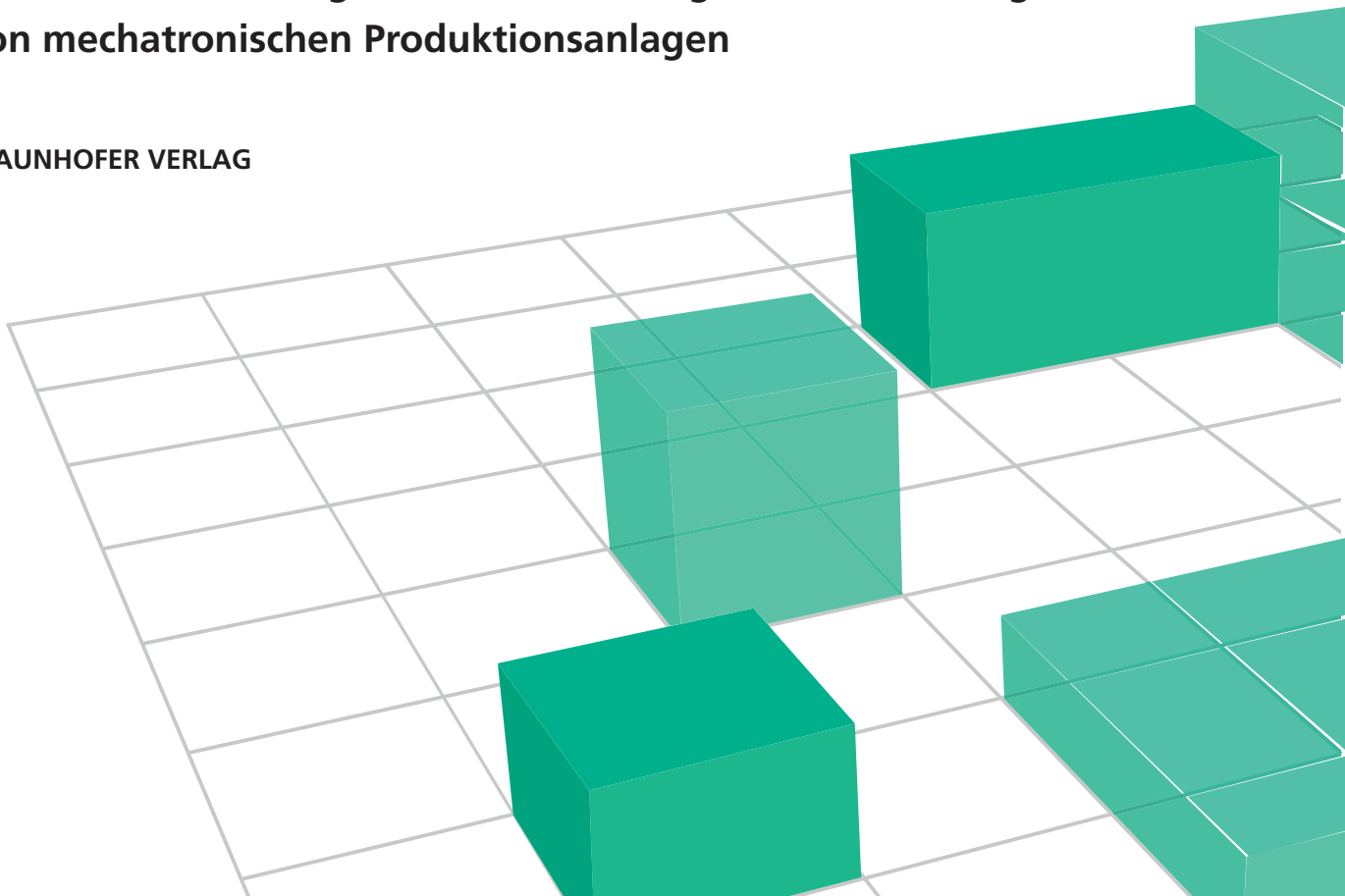
Rainer Stark, Patrick Müller und Hendrik Grosser

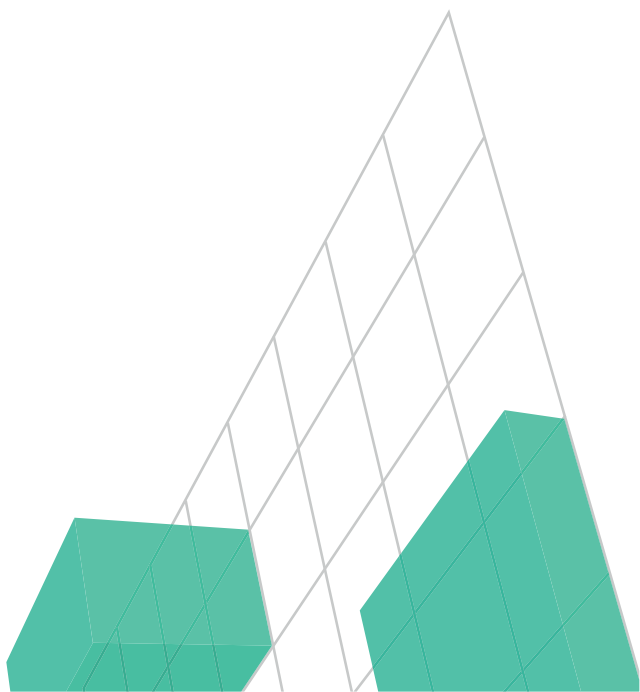
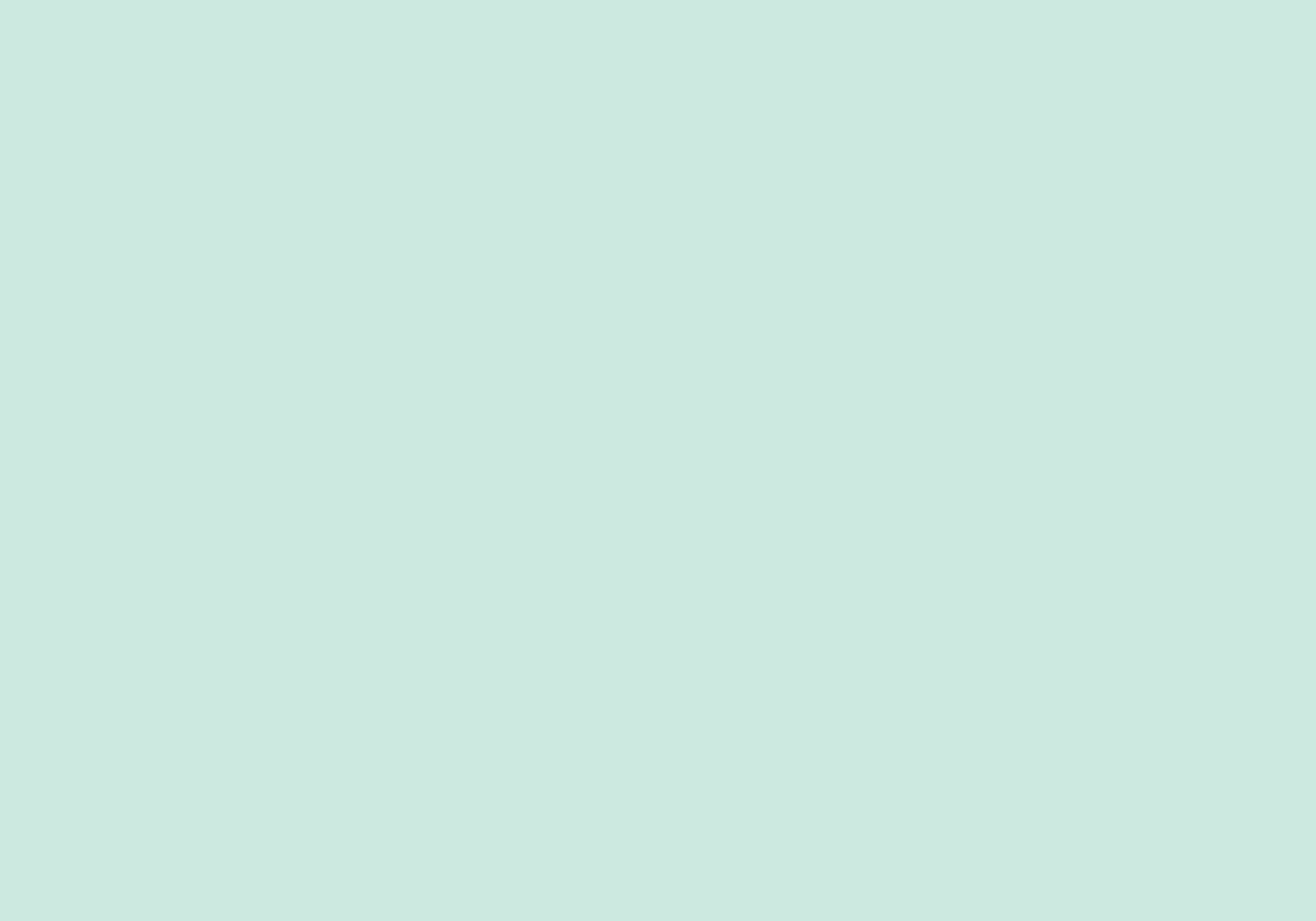
VIB-SHP

Virtuelle Inbetriebnahme für Industrie 4.0 zukunftsicher beherrschen

**Modulare Gestaltung und immersive, digitale Absicherung
von mechatronischen Produktionsanlagen**

FRAUNHOFER VERLAG





VIB-SHP

Virtuelle Inbetriebnahme für Industrie 4.0 zukunftsicher beherrschen

Modulare Gestaltung und immersive, digitale
Absicherung von mechatronischen Produktionsanlagen

KONTAKTADRESSE:

Fraunhofer-Institut für
Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik
Pascalstraße 8 - 9
10587 Berlin
Telefon +49 30 39006-243
E-Mail rainer.stark@ipk.fraunhofer.de
URL www.ipk.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.de> abrufbar.
ISBN (Print): 978-3-8396-1416-7
DOI: 10.24406/IPK-N-509999

DRUCK UND WEITERVERARBEITUNG:

Bosch-Druck GmbH, Ergolding

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by FRAUNHOFER VERLAG, 2018

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IM14002 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Herausgeber

Rainer Stark, Patrick Müller und Hendrik Grosser

VIB-SHP

**Virtuelle
Inbetriebnahme
für Industrie 4.0
zukunftsicher
beherrschen**

**Modulare Gestaltung und immersive,
digitale Absicherung von mechatronischen
Produktionsanlagen**

FRAUNHOFER VERLAG

Danksagung

Jedes Forschungsprojekt basiert auf den Gedanken, Taten und Werken vieler. Nicht jeder, der im Forschungsprojekt mitgewirkt hat, ist letztlich auch als Autor in diesem Werk vertreten. Umso wichtiger ist uns der Dank an jene Kollegen, die durch ihre Ideen und Arbeiten unser Projekt maßgeblich begleitet haben.

Somit danken wir Herrn Sebastian Neumeyer für seinen umfassenden Beitrag zur Gesamtarchitektur der VIB-SHP, seine Beiträge im Antrag und Projekt. Wir danken Herrn Uwe Rothenburg für seine Konsortialleitung in Koordination und Organisation unserer Arbeiten. Wir danken Ralf-Peter Conrad, Konrad Exner, Marcus Kim, Karina Schäfer, Felix Schulz und Jana Speidel für ihre Beiträge zum Konzept und der Ausgestaltung des Baukastens. Und wir danken all unseren Mitarbeitern für die tatkräftige Unterstützung bei der Realisierung unserer Ideen und Konzepte: Manon Cadart, Florian Gollmick, Andrej Justus, Sebastian Keppler, Thai-Le Nguyen, Mickael Pastor und Lena Schmidt.

Auch die raffiniertesten Konzepte und Lösungen verlieren ihren Wert, wenn sie nicht mit anderen geteilt werden. So steht auch dieses Werk in der Absicht die Erkenntnisse, Gedanken und Ideen mit anderen zu teilen. Ersichtlich ist, dass Dritten das Verstehen und Nachvollziehen unserer Gedanken weitaus einfacher fällt, wenn die erarbeiteten Inhalte in ansprechender, gut erfassbarer und konsequenter Ordnung aufbereitet wurden. Diese Leistung erbrachte für uns Frau Daria Rüttimann, der wir für Ihre herausragende Arbeit danken wollen.

Einen herzlichen Dank richten wir auch an unsere Lektoren Frau Sibylle Hartung und Herrn Dr. Michael Muschiol für ihre umfangreiche Überprüfung, Rückmeldungen und Vorschläge zur Optimierung des Werkes.

Für die angenehme und unkomplizierte Zusammenarbeit und Kommunikation danken wir unserem Projektträger DLR, in Personen Herrn Dirk Günther und Frau Ramona Schulze.

Abkürzungsverzeichnis

AG	Auftraggeber
AML	Automation Modeling Language
AN	Auftragnehmer
API	Application Programming Interface
BDE	Betriebsdatenerfassung
BKZ	Betriebsmittelkennzahl
CPPS	Cyberphysische Produktionssysteme
CPS	Cyberphysisches System
CTO	Configure-to-Order
DDMS	Domain Data Management Systeme
E/E	Elektrik/Elektronik
EC	Engineering Change
ECAD	Electronic Computer Aided Design
EDA	Electronic Design Automation
EOS	Engineering Operating System
ERP	Enterprise-Resource-Planning
ETO	Engineer-to-Order
IIRA	Industrial Internet Reference Architecture
MCAD	Mechanical Computer Aided Design
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
MTM	Methods-Time Measurement
OKZ	Ortskennzahl
OLE	Object Linking and Embedding
OPC	OLE for Process Control
OSLC	Open Service for Lifecycle Collaboration
PDM	Product Data Management
PEP	Produktentstehungsprozess
PLM	Product Lifecycle Management
RAMI	Reference Architectural Model for Industrie 4.0
RASI	Responsibility, Approval, Support and Inform
REST	Representational State Transfer
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SHP	Smart Hybrid Prototyping
SOP	Start of Production
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TDM	Team Data Management
TUI	Tangible User Interface
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
VR	Virtuelle Realität

Im Projekt VIB-SHP wurden besonders herausfordernde und komplexe Aspekte der digitalen Wertschöpfung ausgehend von den Fähigkeiten „virtueller Entwicklungswerkzeuge“, virtueller Simulationstechniken und neuer, „smarter, hybrider“ Interaktionstechnologien untersucht.

KURZFASSUNG

Patrick Müller

Die *digitale Transformation* ist eines der aktuell bestimmenden Themen der Industrie. Mit *Industrie 4.0* [BMW, 2018] wurde zunächst ein Förder- und Innovationsschwerpunkt eröffnet, der als Wegbereiter der digitalen Transformation in Deutschland und darüber hinaus seine Wirksamkeit entfaltete. Das Leitbild der Industrie 4.0 adressiert dabei eine Prozess- und Technologiefähigkeit, die stark von der Anwendung von Informations- und Kommunikationstechnologien sowie Software an sich im Umfeld der Produktion abhängt.

Die digitale Transformation als solche unterstreicht den Trend hin zu Industrie 4.0 und Smart Engineering. Sie ist Ausdruck der Tatsache, dass der Anteil der digitalen Wertschöpfung in der Produktentwicklung, Herstellung und im Dienstleistungsprozess signifikant groß ist und weiterhin ansteigt. Wesentliche Innovationen sind dem Gebiet der digitalen Wertschöpfung zuzuordnen [Stähler, 2002]: Serviceorientierte Geschäftsmodelle und datengetriebene Leistungsangebote [Müller, 2014; FRAUNHOFER IEM, 2017] verzahnen mit cyberphysischen Systemen zu Smarten Produkten, die im Kern auf kommunikationsfähiger Mechatronik beruhen. Auch im Anlagenbau ist die digitale Transformation stark zu spüren [VDMA, 2018] wie Studien des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer zur Digitalisierung der Branche und dem Wandel der Berufsbilder und Kompetenzen zeigen. Die Kernaussagen der Studien von Marktanalysten zeigen eindeutig die Relevanz der digitalen Wertschöpfung in industriellen Anwendungen auf [Geissbauer, Schrauf, Brettram und Cheraghi, 2017].

Für den Bereich der Produktentwicklung und Produktionsprozessplanung definiert das Smart Engineering [Anderl, Eigner, Sandler und Stark, 2012] Zielsetzungen einer neuen Entwicklungsfähigkeit, die Smarte Produkte im Sinne cyberphysischer Systeme (CPS) als Entwicklungsgegenstand thematisiert und stark von den Fähigkeiten der virtuellen Produktentstehung und digitalen Fabrik abhängt. Offensichtliche Anschlusspunkte zwischen modellgetriebener Systementwicklung [Eigner, Koch und Muggeo, 2017c], virtueller Produktentwicklung [Krause, Franke und Gausemeier, 2007], digitaler Fabrik [Bracht, Geckler und Wenzel, 2011] und der digital vernetzten Produktion sind gegeben und auch erfolgreich beforscht worden [Eigner et al., 2017c; VDI: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2015].

Im **Projekt VIB-SHP** [Fraunhofer IPK, 2018] wurden besonders herausfordernde und komplexe Aspekte der digitalen Wertschöpfung ausgehend von den Fähigkeiten „virtueller Entwicklungswerkzeuge“ [Stark et al., 2010], virtuellen Simulationstech-

niken und neuer, „smarter, hybrider“ Interaktionstechnologien [Israel, 2011; Beier, 2014] untersucht. Neue Methoden und Prozesse wurden in Software-Werkzeugen umgesetzt und mit Anwendungsbeispielen aus dem Anlagenbau validiert. Den äußeren Rahmen für die Anwendungsfälle stellte der typische Angebots- und Entwicklungsprozess aus dem Anlagenbau → **Abb. 1**.

Das vorliegende Buch illustriert Ergebnisse aus dem **Projekt VIB-SHP** und verallgemeinert den Erkenntnisgewinn mit Blick auf den Anwendungstransfer im industriellen Maßstab. Im Vordergrund steht für die Anwender dabei die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit:

- Beschleunigung von Angebotsprozessen durch eine schnelle, virtuelle Layout-Planung, Kostenkalkulation und Dokumentation, die auf digital gepflegten Baukästen beruht. Bereitstellung von neuen digitalen Technologien und Baukästen bei der Planung, Modellierung und frühen Absicherung von mechatronischen und cyberphysikalischen Produktionsanlagen (integriertes Engineering der Zukunft für die Produktionsanlagen von heute und morgen).
- Den virtuellen Vergleich von Fertigungstechnologien, Materialflüssen und Anlagenkonzepten für eine Losgröße-1-Produktion mit neuen Formen der Automation, Roboter-Unterstützungen und Mensch-Maschine-Interaktion.
- Die virtuelle Inbetriebnahme als Kernanwendungsfall vor kostenintensiven realen Inbetriebnahmesituationen.

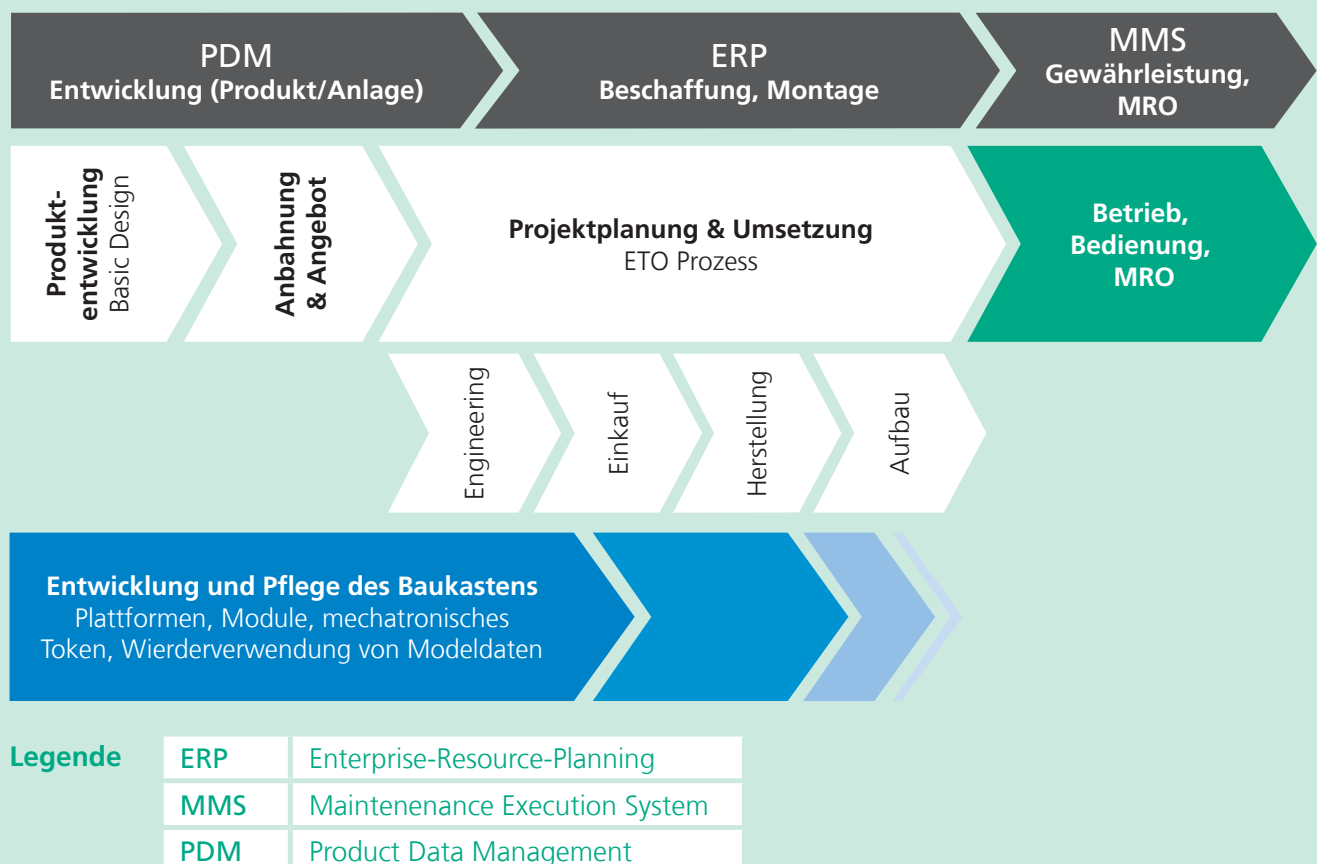


Abb. 1 Verallgemeinerter Entwicklungs- und Angebotsprozess im Anlagenbau [Müller, Muschiol and Stark, 2012]

Im Rahmen des Projekts wurden u. a. exemplarisch Anlagenkomponenten herangezogen, wie man sie in der Automobilherstellung vorfinden kann. Die → **Abb. 2** zeigt einen Teil einer Anlage, wie sie im Projekt als Anschauungsobjekt genutzt wurde.

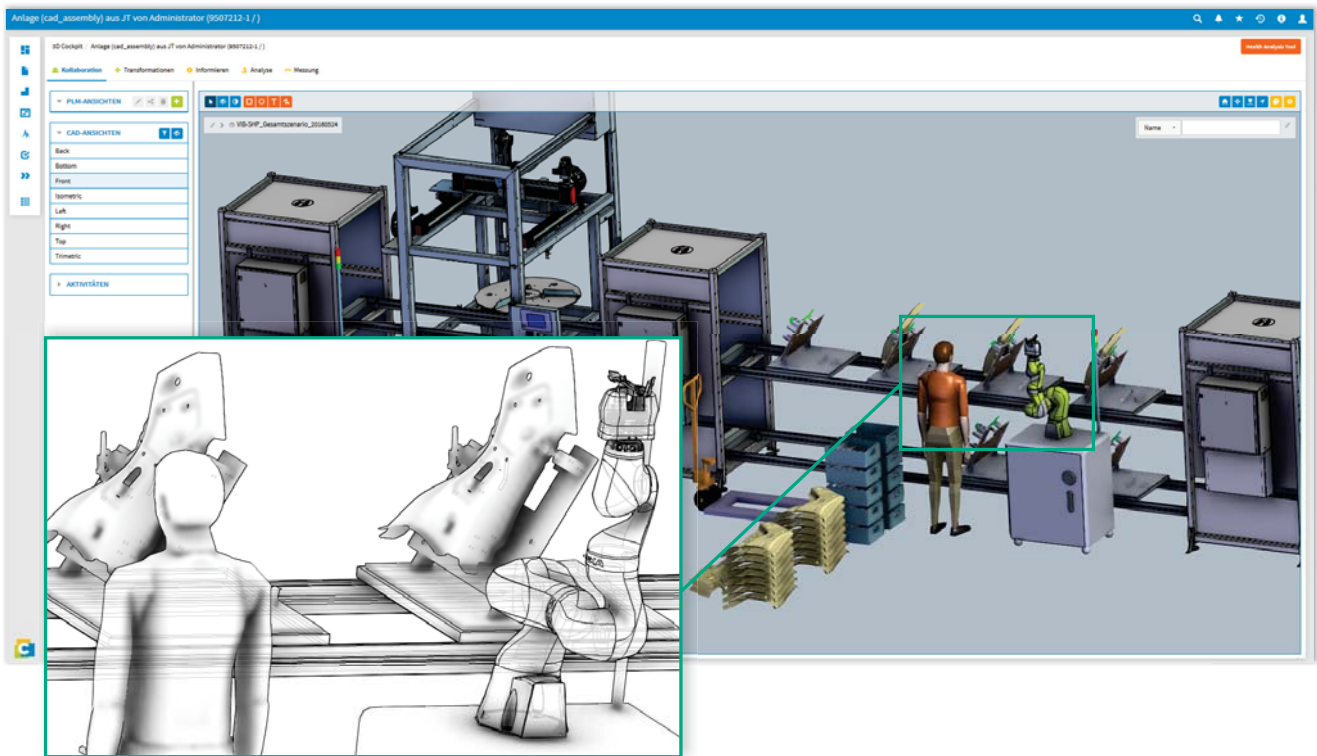


Abb. 2 Bearbeitung C-Säule mit Roboter und Werksarbeitern, Illustration in CIM Database PLM

¹ Gemäß allgemeingültiger Definitionen und Anschauungen bezeichnet PDM vorrangig IT-Systeme zur Verwaltung von Produktdaten. PLM hingegen umfasst Methoden, Prozess und Werkzeuge des Lifecycle Managements in integrierten Konzepten und Managementansätzen. PLM steht daher i.d.R. nicht für ein IT-System. Gängig ist jedoch im Sprachgebrauch die Formulierung „PLM-System“, wenn gleichsam der Einsatz von PDM-Systemen für PLM-Anwendungsfälle diskutiert wird, was der zentralen Rolle von PDM-Systemen geschuldet ist. Auch in diesem Werk wird PLM übergreifend verwendet, um den Lesefluss zu vereinfachen, wenn nicht explizit das IT-System gemeint ist.

Das **Projekt VIB-SHP** fokussierte auf die *Virtuelle Inbetriebnahme (VIB)* mit den Mitteln des *Smart Hybrid Prototypings (SHP)*. Virtuelle Inbetriebnahme bezeichnet an dieser Stelle den Einsatz von 3D-Modellen, Visualisierungs- und Simulationstechniken, um das Anlagenverhalten animiert und geometrisch korrekt wiederzugeben. Das Verhalten wird durch Physik- und Interaktionsmodelle beschrieben und interaktiv in Echtzeit in einer 3D-Szene erfahrbar gemacht. Hinzu werden spezielle Interaktionsgeräte in eine Simulationsinfrastruktur eingebunden. Dieser Ansatz wird als „smart“ und „hybrid“ (reale Interaktionsgeräte und virtuelle Modelle) bezeichnet und ist auf die Interaktion mit virtuellen Prototypen zugeschnitten. Für die Verwaltung der Modellinformationen wird **PLM¹** (*Product Lifecycle Management*) angewendet. Im PLM werden zudem mechatronische *Produktbaukästen* aufgebaut, die eine schnelle Wiederverwendung der Modellinformationen zulassen und diese für die virtuelle Inbetriebnahme vorhalten. Damit kann der Ansatz der VIB aus Ingenieurfachperspektive von der frühen Angebotsphase über die kundenindividuelle Entwicklung (Engineer-to-Order), die Standardisierung der Anlagenmodule (Pflege des Produktbaukastens für CTO/Configure-to-Order), die iterative und agile Absicherung (schnelle Konfiguration und Bereitstellung der virtualisierten Komponenten für einen Simulationslauf), eine Anlagenrekonfiguration und Abnahmeprozesse genutzt werden. Damit unterstützen die Ansätze der *VIB* und des *SHP* in der Kombination schließlich alle Phasen des Anlagenlebenszyklus → **Abb. 3**.

Im Rahmen des Projekts wurden Anwendungsfälle aufgearbeitet und näher beschrieben. Dabei wurde auf den Geschäftsnutzen geachtet. Praktische Problemstellungen sind häufig:

- In der realen Inbetriebnahme gibt es keine Pufferzeiten mehr.
- Varianzen abzusichern ist sehr aufwändig.
- Bedienung und Ergonomie-Untersuchungen sind ohne virtuelle Modelle vor einem realen Aufbau nur schwer abzusichern. Erkenntnisse zur Erreichbarkeit von Gegenständen, Bedieneinheiten usw. sind nur schwer zu generieren.
- Eine Kollisionserkennung ohne reale Schadennahme ist mit realen Prototypen umständlich bzw. nur sehr bedingt „realitätsgetreu“ überprüfbar.
- Die Sicherheit von Bauteilen, Technik und Bedienern steht im Vordergrund. Eine sicherheitstechnische Absicherung an virtuellen Modellen ist einfacher und hilft schwerwiegende Konzeptschwächen eher zu erkennen.
- Korrekturschleifen an realen Aufbauten sind kostspielig und langwierig.

→ Welche Potentiale bieten nun diese Lösungsansätze?

Das Projekt baut auf einer konsequenten Nutzung einer Baukastensystematik für die Produktgestaltung auf. Durch die Verbindung virtueller Geometriemodelle, die in einem Baukastensystem gepflegt werden, steigt das Potential einer umfassenden Wiederverwendung der Produkt- und Prozessdaten z. B. in folgenden Prozessen:

- Angebotskonfiguration und -darlegung
- Konfiguration von auftragsbezogenen Produktdaten und -modellen
- Kostensparende Absicherung alternativer Lösungskonzepte oder Produktvarianten (u. a. wenn der Bau realer Prototypen nicht ohne Investoren / Auftraggeber wirtschaftlich vertretbar ist.)
- Durchführung von Design Reviews und Entscheidungsprozessen
- Gestaltung virtueller Trainings
- Produktabsicherung (Hardware / Software in the Loop)
- Virtuelle Inbetriebnahme und Simulation
- Durchführung von abnahmerelevanten Tätigkeiten
- Reduktion der Zeiten vor Ort in der realen Inbetriebnahme
- Reduktion der Zeiten und Risiken der Rekonfiguration und Wiedereinbetriebnahme

Mit dem vorliegenden Buch wird die Stoßrichtung des Projekts und der hervorbrachten Lösungen kompakt vorgestellt: Es wird stufenweise erklärt, welche Fähigkeiten für eine praktische Einführung der neuen Ansätze notwendig sind. Es wird beschrieben, wo die Ansätze der Verhaltenssimulation und virtuellen Repräsentation in der virtuellen und PLM-unterstützten Anlagenentwicklung verortet sind.

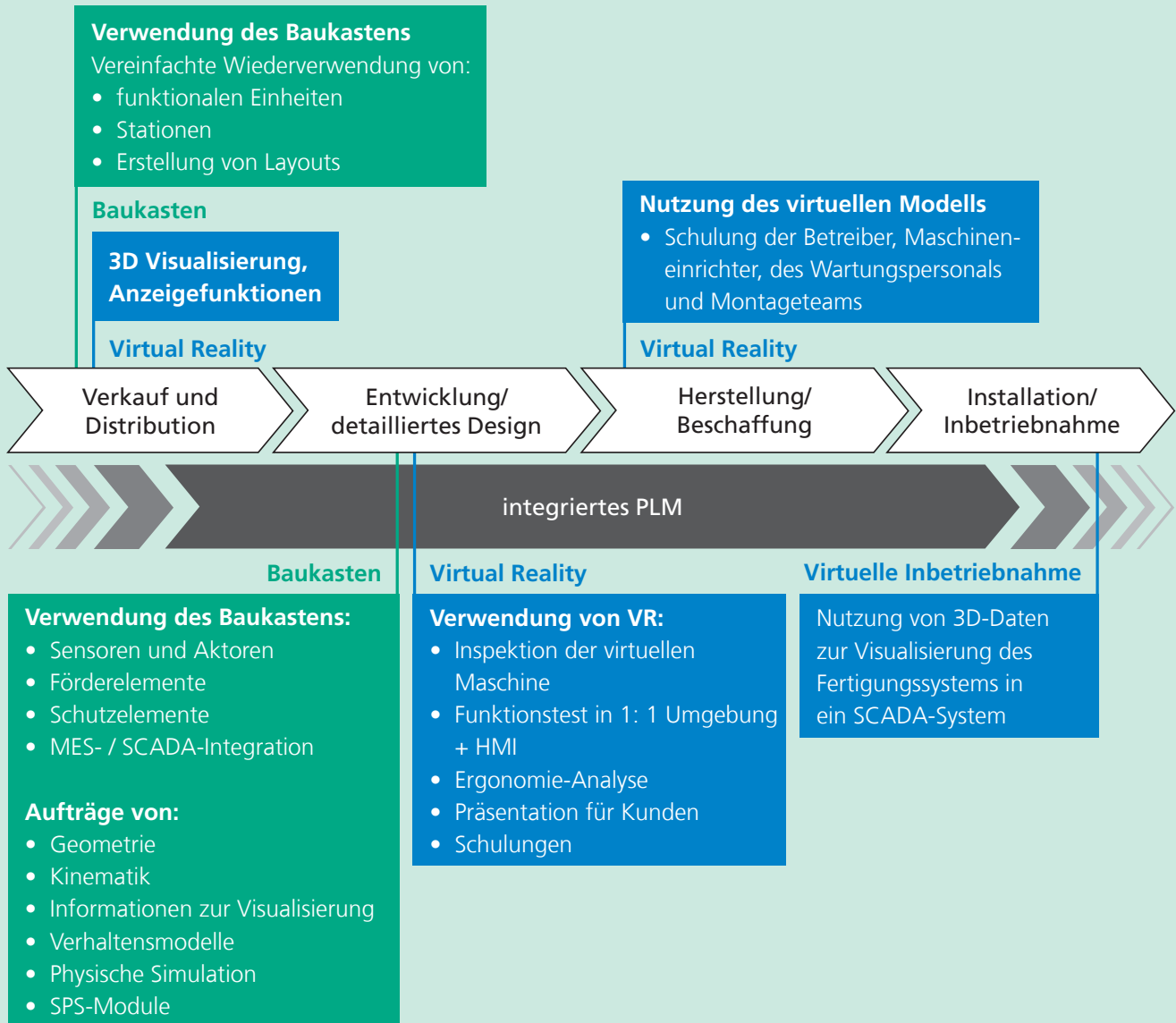


Abb. 3 Anwendungsfälle in VIB-SHP.

Das Buch illustriert die Projektergebnisse und stellt sie in einen breiteren Kontext. Es wird anhand des EOS (Engineering Operating System) [Lunnemann, Stark, Wang und Manteca, 2017] beschrieben, wie die Projektergebnisse unter organisatorischen, technischen und qualifikationsorientierten Gesichtspunkten im Unternehmen zu betrachten sind. Ausgehend von dieser Einordnung wird auf die Prozesse, Methoden, Modelle und Werkzeuge der VIB und des SHP Bezug genommen. Es wird dargelegt, welche technologische Infrastruktur (Datenmanagement, Autorenwerkzeuge, Simulationsumgebung, Visualisierungswerkzeuge) zum Einsatz kommen, welche Software, Hardware und Datenmodelleigenschaften benötigt werden. Es wird gezeigt, wie einerseits Anlagenkomponenten zur konstruktiven Wiederverwendung, Simulation und Virtualisierung in einem Produktbaukasten mit mechatronischem Datenmodell abgelegt werden. Es wird gezeigt, wie ausgehend von einem konfigurierten Produktmodell Daten über Schnittstellen zwischen dem Datenmanagement in das Simulations-Framework übergeben werden. Als Teil der Lösung werden reale, smarte Interaktionsgeräte hervorgehoben, die im Smart Hybrid Prototyping zur Interaktion des Anwenders mit der virtuellen Szene genutzt werden. Auch diese Interaktionsgeräte korrelieren mit den Funktionen der Komponenten aus dem Produktbaukasten. Im Ergebnis wird ein Ansatz vorgestellt, bei dem der Anwender immersiv und in Echtzeit mit einer virtuellen Szene als Teil der (Verhaltens)Simulation interagieren kann, nachdem die Daten im PLM-Prozess zusammengestellt wurden. Der Detaillierungsgrad der Modelldaten kann sich dabei nach der Situation (Angebotsphase, Produktabsicherung, Inbetriebnahme, Rekonfiguration einer Anlage) unterscheiden. In einem Anwenderleitfaden ist schließlich dokumentiert, wie der Technologiebaukasten des Projekts VIB-SHP praktisch nutzbar ist.

Das Buch schließt mit einer Betrachtung notwendiger Folgeaktivitäten zur Einordnung der Ergebnisse in aktuell aufwachsende Standards und IT-Architekturen digitaler Wertschöpfungsarchitekturen, wie sie sich durch die aktuelle digitale Transformation in der Industrie ergeben.

Dieses Buch ist gerichtet an Verantwortliche im PLM-Umfeld und an Mitarbeiter der Engineering IT im Mittelstand und in Großunternehmen. Es soll bei der Technologieauswahl, Methoden- und Prozessgestaltung und zu beruflichen Weiterbildungszwecken herangezogen werden können. Anwendern virtueller Planungs- und Absicherungsmethoden präsentiert es neue Anwendungsfelder und Technologiefähigkeiten. In der Hochschullehre kann es als Literatur zur persönlichen Vertiefung im Bereich der virtuellen Inbetriebnahme empfohlen werden. Für die Forschung liefert es Einblicke in den Stand der Technik und es eröffnet es neue Fragestellungen. Damit adressiert dieses Werk auch die Leserschaft im akademischen Bereich.

INHALT

INHALT

1	Einleitung	23
2	Stand der Technik und Forschungsinbetriebnahme	31
2.1	Virtuelle Inbetriebnahme	34
2.2	Heutige Defizite industrieller Anwendungen	37
3	Lösungskonzept und Gesamtarchitektur	41
3.1	Ausgangssituation und Bedarfsanalyse	44
3.2	ViB-SHP-Konzept in den Dimensionen des Engineering Operating System	49
3.3	ViB-SHP Baukastensystem	51
3.3.1	Integrierte Bestandteile des Baukastens	52
3.3.2	Strukturierung eines Baukastensystems	55
3.3.3	Modularisierung von Baukastenelementen	57
3.4	ViB-SHP-Entwicklungsprozess mit Baukästen	60
3.4.1	Einsatz des Baukastens im Anlagenentwicklungsprojekt	61
3.4.2	Pflege des Baukastens	66
3.5	IT-Systemarchitektur	68
3.5.1	TUI Framework	72
3.5.2	PLM-System	76
3.5.3	PLM-SCADA: Anlagenintegration mittels AML und OPC/UA	78
3.5.4	Betriebswirtschaftliche Daten (ERP-Daten)	80
3.6	Das cyberphysische Produktmodell	83
3.6.1	Vom mechatronischen zum cyberphysischen Produktmodell	86
3.6.2	Konzept des cyberphysischen Produktmodells	86
3.6.3	Perspektiven und Sichten (View Points and Views)	88
3.6.4	PLM-Funktionen auf Basis der cyberphysischen Produktstruktur	89
3.6.5	Vorteile im Vergleich zum dokumentenorientierten Arbeiten	90
3.7	Benötigte neue Jobrollen/Engineering Disziplinen	91

4	Anwendungsszenario und Evaluierung des VIB-SHP-Ansatzes	93
4.1	Evaluierung	98
4.1.1	User Stories	99
4.1.2	Ergebnisse	100
4.2	Anwendungsfälle	101
4.2.1	Prozess- und Layoutplanung per Baukasten	102
4.2.2	Virtuelle Absicherung	105
4.2.3	Materialflusssimulation und virtuelle Inbetriebnahme	109
5	Anwendungstransfer	115
	Glossar	121
	Literaturverzeichnis	127
	Abbildungsverzeichnis	133
	Autoren und Partner	137

Smart Hybrid Prototyping (SHP)
bezeichnet eine innovative Form des
Entwickelns entlang des Produkt-
entwicklungsprozesses von der Idee bis
zur Freigabe von mechanischen und
mechatronischen Systemen.

1 EINLEITUNG

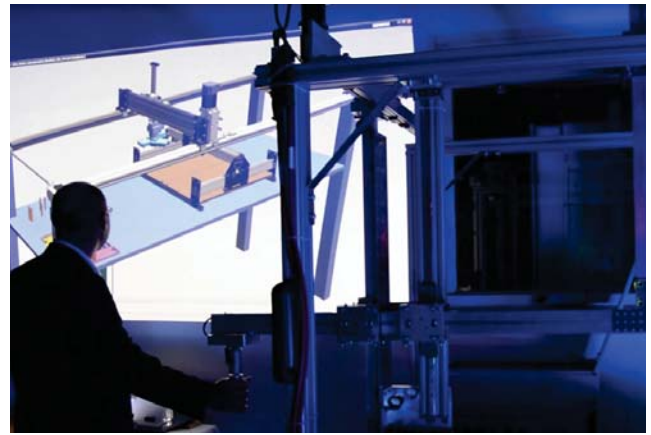
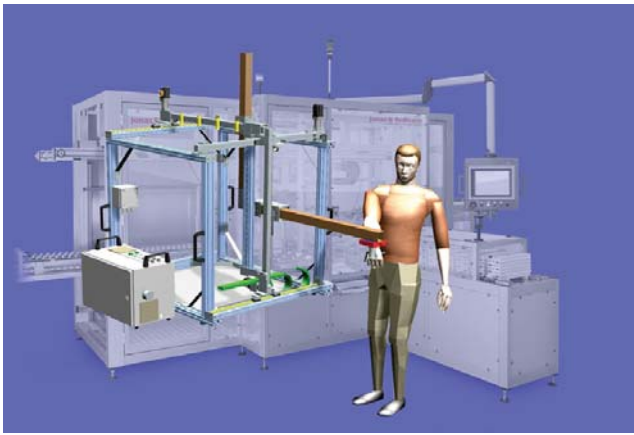
Hendrik Grosser, Patrick Müller und Rainer Stark

Mit der virtuellen Inbetriebnahme ist es möglich, Maschinen mit Hilfe von 3D-Simulationen in vielen verschiedenen Anwendungsbereichen virtuell abzusichern, bevor man die getesteten Programme auf die reale Maschine überträgt. Unter dem Begriff des Zukunftsprojekts „Industrie 4.0“ wird im Projekt die Vernetzung von Produktionsressourcen und einer Dezentralisierung von „Intelligenzen“ (autonomen Entscheidungsmechanismen) verstanden.

Heutige Anlagen sind fest in die sogenannte Automatisierungspyramide integriert. Das Zukunftsprojekt „Industrie 4.0“ strebt jedoch eine Selbstorganisation der Produktion mittels Cyber Physical Systems (CPS) an, so dass die Werkstücke selbst mit den Maschinen, Produktionssystemen und Anlagen verhandeln, also kommunizieren und festlegen, welche Bearbeitungsschritte durch welche Maschinen durchgeführt werden. Dadurch entsteht der Bedarf für die Entwicklung der Cyber Physical Production Systems (CPPS), also der Anlagen, die mit den CPS kommunizieren und mit Ihnen die Erfüllung eines (Teil-)Prozesses aushandeln und realisieren. Bedingt durch Industrie 4.0 werden neue Ansätze im Produktionsdatenmanagement (Betriebsdatenerfassung / BDE und Maschinendatenerfassung / MDE) und der Steuerung von Produktionsabläufen notwendig.

Die Erleichterung des Produktentstehungsprozesses von Fertigungssystemen mittels virtueller Techniken ist das primäre Ziel des Forschungsprojektes VIB-SHP. Dabei sollen die an der Entwicklung beteiligten Personen mittels des Smart Hybrid Prototypings → **Abb. 4** einfacher, schneller und immersiver als bisher in den Entstehungsprozess eingebunden werden. Auf diese Weise sollen Produktionssysteme schon in frühen Phasen als haptisch, visuell und funktional erlebbare virtuelle Prototypen verfügbar sein. Darüber hinaus soll mittels der virtuellen Inbetriebnahme der Aufwand während der eigentlichen Inbetriebnahmephase verringert und Fehler in der Entwicklung früher als sonst erkannt werden.

Wesentlich bei der Umsetzung des Smart Hybrid Prototyping für die virtuelle Inbetriebnahme ist der Einsatz eines SHP-Baukastens, um dem Anwender den Einsatz und den Zugang zu diesen Technologien zu erleichtern und den Produktentstehungsprozess zu beschleunigen. Unterstützt wird dieses Konzept von einem Produktbaukasten, der es ermöglicht, Daten eines konfigurierten Produktmodells über Schnittstellen zwischen dem Datenmanagement in das Simulations-Framework zu übergeben.



Smart Hybrid Prototyping (SHP) bezeichnet eine innovative Form des Entwickelns entlang des Produktentwicklungsprozesses von der Idee bis zur Freigabe von mechanischen und mechatronischen Systemen.

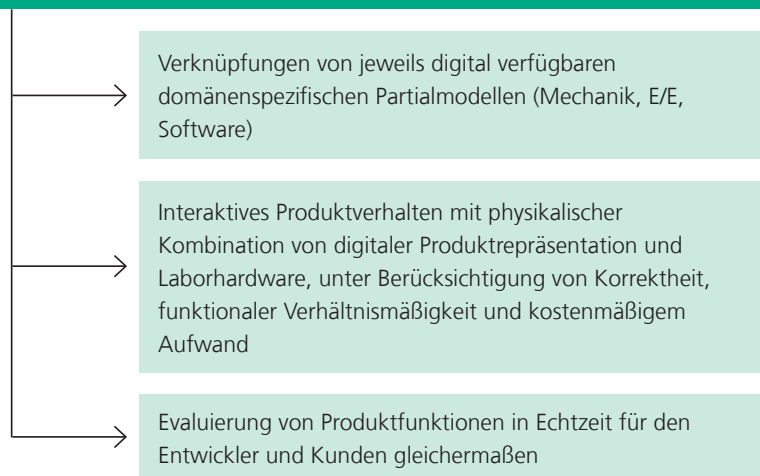


Abb. 4 Definition von Smart Hybrid Prototyping.

Ferner wird durch das Forschungsprojekt eine Entwicklungsumgebung entsprechend der heutigen Anforderungen geschaffen, auf welcher der beteiligten Rollen ein erlebbares, virtuelles Abbild des Produktionssystems zur Verfügung steht, um eine valide und zugängliche Grundlage für die Entscheidungen des Entwicklungsprozesses zu bieten.

Dieses Buch erläutert im Detail, wie dieses Vorhaben umgesetzt wurde. Im Folgenden wird beschrieben, welche Veränderungen im heutigen Produktentwicklungsprozess eines Fertigungssystems notwendig sind, wie die virtuelle Inbetriebnahme, das Smart Hybrid Prototyping und die Virtual-Reality-Technologie eingesetzt werden sollen sowie welche Komponenten dafür notwendig sind.

Unter dem Begriff des Zukunftsprojekts „Industrie 4.0“ wird im Projekt die Vernetzung von Produktionsressourcen und einer Dezentralisierung von „Intelligenzen“ (autonomen Entscheidungsmechanismen) verstanden. Die stärkere Fokussierung auf die Menschzentrierung in automatisierten Arbeitsprozessen wird dabei durch die Abbildung einer Mensch-Roboter-Kooperation im Anwendungsszenario der virtuellen Erprobung realisiert. Dabei werden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Entkoppelte, autonome Systeme, die über eine asynchrone Kommunikation miteinander kommunizieren
- Bereitstellung von Funktionen der Vernetzung zwischen den Teilsystemen
- Definition einer Mensch-Roboter-Kooperation im Anwendungsszenario
- Betrachtung von SCADA und MES-Diensten im Kontext des Anwendungsszenarios

Das Projekt VIB-SHP zielte darauf, mittelständischen Fertigungssystemherstellern durch die Unterstützung im Produktentstehungsprozess (PEP) durch virtuelle Techniken ihre Anschluss- und Innovationsfähigkeit zu den Unternehmen zu sichern, für die Virtual Reality (VR) und Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) bereits etablierte Technologien darstellen.

Das Ziel dieses Projektvorhabens war es, alle am Entwicklungsprozess interdisziplinär Beteiligten wie Planer, Kunden, Konstrukteure, Automatisierungstechnikingenieure und Anlagenprogrammierer, aber auch spätere Nutzer wesentlich stärker als bisher in die Entwicklung von Fertigungssystemen und -prozessen einzubeziehen. Hierzu sollten Methoden des Smart Hybrid Prototypings eingesetzt werden, um die bisher in frühen Entwicklungsphasen des PEP nur begrenzt darstellbaren Aspekte wie haptische, akustische, aber auch erlebnisorientierte, motivationale und hedonistische Nutzungseigenschaften zu erfassen. Die Erstellung Smarter Hybriden Prototypen sollte durch einen SHP-Baukasten, der im Rahmen des Projekts entwickelt wurde, erheblich vereinfacht werden.

Darüber hinaus sollte durch eine Entwicklungsumgebung eine Kooperationsplattform geschaffen werden, in der Planer, Konstrukteure und Automatisierungstechnikingenieure ein erlebbares Abbild des zu entwickelnden Fertigungssystems erhalten. Dessen Verhalten ist in der virtuellen Realität abgebildet, so dass bspw. die Erläuterung von Problemen eines Anlagenprogrammierers auch einem Konstrukteur oder Planer aufgezeigt werden kann.

Auch sollten weitere Potentiale der virtuellen Techniken wie die Absicherung des Anlagenkonzepts unter ergonomischen Aspekten durch einen erlebbaren Prototypen, Erlebbarkeit des Anlagenverhaltens im Kontext von „Cyber Physical Systems“ (und der damit verbundenen Vernetzung und Kopplung des Anlagenverhaltens mit übergeordneten Systemen wie ERP, MES und PLM) und der Einsatz virtueller Techniken für Schulungen, Abstimmung mit dem Auftraggeber oder die Validierung von Planungsergebnissen (Simulation) dargestellt werden.

An dieser Stelle sei bereits vermerkt, dass die in diesem Projekt erarbeiteten innovativen Lösungen für eine umfassende und integrierte virtuelle Inbetriebnahme von Produktionsanlagen eine hervorragende Basis darstellen, um die neuartigen Konzepte des Digitalen Zwillings von Fabrikanlagen im Rahmen von Industrie 4.0 Lösungen angehen und umsetzen zu können.

Die vielfältigen Lösungsansätze wurden in einem integrierten Gesamtkonzept prototypisch umgesetzt und werden in [Kapitel 3](#) beschrieben. Folgende Lösungsbausteine sind dabei wesentlich:

- **VIB-SHP-Entwicklungsprozess:** Für die Umsetzung der neuen Fähigkeiten war die Definition eines neuen Entwicklungsprozesses notwendig sowie die Definition von neuen Jobrollen. Die Beschreibung der Engineering Aktivitäten erfolgt dabei mit dem Engineering Operating System (EOS).
- **Architektur:** Es wurden vielfältige Schnittstellen zu PLM, ERP, SCADA, SPS, Simulations- und Visualisierungstools geschaffen. Dabei wurde u. a. das [TUI](#)² Framework – eine Eigenentwicklung des Fraunhofer IPK – zur Einbindung von haptischen Interaktionsgeräten in der virtuellen Realität eingesetzt.
- **Cyberphysisches Produktdatenmodell:** Gegenüber dem mechatronischen Produktdatenmodell integriert dieses Modell nicht nur Mechanik-, Elektrik- und Steuerungsdaten sondern auch weitere disziplinübergreifende Partialmodelle, z. B. zur Verwaltung von Signalen und Verhaltensmodellen.
- **Baukasten für cyberphysische Produktionssysteme:** Hier wird das Produktmodell mit den anderen Bestandteilen (Mechanik, Elektronik und Steuerung) kombiniert, um Anlagen zu gestalten. Über die Definition von kinematischen Beziehungen werden Verhaltensmodelle aufgebaut und verknüpft, so dass bei der virtuellen Inbetriebnahme das korrekte Zeitverhalten wiedergegeben wird.

² TUI: Tangible User Interface

Die Validierung der VIB-SHP-Projektergebnisse erfolgte über ein Anwendungsszenario in dem verschiedene Use Cases erprobt wurden. Die praktische Vorgehensweise sowie die Ergebnisse werden in [Kapitel 4](#) beschrieben. Das [Kapitel 5](#) gibt abschließend einen Ausblick hinsichtlich der notwendigen zukünftigen Aktivitäten für den Anwendungstransfer in die industrielle Praxis.

Die VDI 3693 definiert die Virtuelle Inbetriebnahme als „Inbetriebnahme, die das entwicklungsbegleitende Testen einzelner Komponenten und Teilfunktionen des Automatisierungssystems mithilfe von auf die jeweilige Aufgabenstellung abgestimmten Simulationsmethoden und -modellen umfasst“.

2 STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNG

Pascal Lünemann, Lucas Kirsch und Gerhard Lechler

Der Einsatz virtueller Techniken ist für Großunternehmen und Konzerne bereits Stand der Technik [Mujber, Szecsi und Hashmi, 2004; Duffy und Salvendy, 2000; Schreiber und Zimmermann, 2011], jedoch nutzten kleine und mittelständische Unternehmen die Technologien aufgrund der hohen Kosten, Medienbrüche und fehlender Infrastruktur nur spärlich [Bös, 2008].

In Deutschland sind die Fertigungssystemhersteller häufig mittelständische Unternehmen, die unter wachsendem Zeitdruck kundenspezifische Fertigungssysteme entwickeln. Durch die Verkürzung und Parallelisierung von Phasen im Entwicklungsprozess könnten Wettbewerbsvorteile wie robustere Absicherung und Verkürzung des gesamten Produktentstehungsprozesses (PEP) entstehen, jedoch besitzen die mittelständischen Unternehmen häufig nicht den Zugang zu den Technologien und verfügen nicht über das notwendige Know-how [Bös, 2008].

2.1 Virtuelle Inbetriebnahme

Pascal Lünemann

Die VDI 3693 definiert die Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) als „Inbetriebnahme, die das entwicklungsbegleitende Testen einzelner Komponenten und Teilfunktionen des Automatisierungssystems mithilfe von auf die jeweilige Aufgabenstellung abgestimmten Simulationsmethoden und -modellen umfasst“ [VDI: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2016] unter der Anmerkung, dass „VIBN im engeren Sinn [...] den der realen Inbetriebnahme vorgelagerten Gesamttest des [Automatisierungssystems] mithilfe eines Simulationsmodells [bezeichnet]“ [VDI: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2016]. Neben dieser Simulation des Systems ermöglicht die Virtuelle Realität ein detailliertes und realitätsnahes Bild des Fertigungssystemverhaltens. Im Gegensatz zur klassischen Inbetriebnahme können dabei Teilsysteme schon während der Entwicklung abgesichert werden. Des Weiteren eignet sich die Virtual Reality (VR) hervorragend als ein Medium zur Abstimmung in interdisziplinären Teams, da ihre starke visuelle Aussagekraft für alle beteiligten Disziplinen gleichermaßen gilt [Ware, 2009]. Empirisch belegbare Vorteile der VR gegenüber anderen Interaktionstechnologien beispielsweise zur Navigation, räumlichen Suche, Arbeitsschrittplanung Kooperation und Kreativitätsunterstützung [Bowman, 2005] finden sich auch in ökonomischen Vorteilen wieder, die sich durch deren Einsatz in industriellen Entwicklungsprozessen ergeben [Virtual Dimension Center VDC, 2011]. In den BMBF-Projekten ViVERA und AVILUSplus wurden Techniken der virtuellen und erweiterten Realität entwickelt, die es erlauben, virtuell simulierte industrielle Fertigungsanlagen mithilfe realer Bedienelemente zu bedienen [Schreiber und Zimmermann, 2011; Schenk und Schumann, 2016].

Für große produzierende Unternehmen gehören Werkzeuge und Methoden der digitalen Fabrikplanung zum „State of the Art“, z. B. die Virtuelle Inbetriebnahme oder Virtuelle Realität (VR). Sie betreiben diese zum Teil auch bereits in Kombination mit VR-Methoden [Westkämper und Runde, 2006]. Dabei werden jedoch vor allem visuell erfassbare Eigenschaften überprüft. Aufgaben- und funktional-orientierte Interaktionen können aufgrund fehlender Interaktionstechniken noch nicht mit VR realisiert werden [Runde, 2007; Virtual Dimension Center VDC, 2012].

In der Regel werden in den Planungswerkzeugen (z. B. DELMIA (Dassault Systèmes) oder Tecnomatix (v. Siemens Industry Software GmbH & Co. KG) bestehende Fertigungsanlagenmodelle aus Bibliotheken verwendet [Bracht et al., 2011]. Der Produktionsplaner definiert den Prozess. Da jedoch die Bibliotheken in der Regel nur Informationen bzgl. der Geometrie und der Kinematik enthalten, muss der Anlagenbau jedes Produktionssystems, insbesondere deren Eigenschaften in einem Verhaltensmodell nachmodellieren, um damit die Modelle um die funktionale Perspektive der Steuerungs- und Regelungstechnik (z. B. Elektrik, Pneumatik, Hydraulik, Software) zu erweitern, was mit einem hohen Aufwand verbunden ist [Kiefer, 2007]. Erst dadurch ist es möglich, den Herstellungsprozess basierend auf

dem Verhalten des Produktionssystems abzusichern [VDI: Verein Deutscher Ingenieure e. V., 2011]. Die Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und Fertigungsanlagenbau besteht aus interdisziplinären Fachbereichen. Da die Produktionsplanung den Fokus auf den Prozess legt, ist die Ableitung der Anforderungen für den Anlagenbau (Konstruktion und Programmierung) während der Projektierung zusätzlich durch hohe Kommunikationsaufwände geprägt [Bracht et al., 2011]. Die funktionale Modellierung und Absicherung des Verhaltens wird in der Regel zu einem späten Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess durchgeführt und auch nicht in Verbindung mit dem herzustellenden Produkt. Weit verbreitete Planungswerkzeuge für OEMs, wie Tecnomatix und DELMIA verfolgen den Ansatz, die Anlagen per OPC (OLE Process Control) anzusteuern, was sich bisher jedoch für den Echtzeitbetrieb als äußerst schwierig herausgestellt hat.

Auch Unternehmen, die bereits seit mehreren Jahren virtuelle Prototypen in der Produktentwicklung einsetzen, verlassen sich immer noch auf problembehaf-tete und aufwendige manuelle Vorgehensweisen zur Erstellung ihrer digitalen Prototypen. Die Daten werden aus unterschiedlichen Systemen eingesammelt. Die Geometriedaten aus dem Product Lifecycle Management (PLM) System, die Materialdaten und die Erzeugnisstruktur aus dem Enterprise Resource Planning (ERP) System. Diese Informationen und Daten werden dann für die Erstellung der Virtual-Reality-Modelle manuell zusammengetragen.

Das Einsammeln der Daten und Informationen basiert zumeist mehr auf persönlichen Netzwerken einzelner Personen, als auf einem definierten und strukturierten Prozess. Es gibt oft keine standardisierten Workflows, kein robustes Änderungsmanagement und keine systematische Versionskontrolle. Streng vertrauliche Daten der neuesten Produkte eines Unternehmens werden oft weltweit verteilt, ohne eine zuverlässige Überwachung der Zugriffsrechte. Führende Unternehmen haben erkannt, dass sie auf diese Weise inakzeptabel viel Geld, Zeit und Datensicherheit verlieren und suchen daher nach Möglichkeiten, Virtual Reality zu einem integralen Bestandteil der [PLM-Strategie](#)³ und der IT-Systeme ihres Unternehmens zu machen.

³ PLM stellt einen Managementansatz zur durchgängigen Informationsversorgung entlang des Lebenszyklus eines Produkts dar. Die PLM-Strategie beschreibt die Langfristige Verhaltensweise zur Etablierung dieses Managementansatzes.

Herausforderungen in der Nutzung dieser virtuellen Techniken liegen in den Datenbrüchen, die sowohl beim Export von CAD-Daten der Fertigungssysteme nach VR als auch bei den VIBN-Werkzeugen, die einen breiten Einsatz der genannten virtuellen Techniken behindern. Eine mangelnde Durchgängigkeit besteht beispielsweise auch bei der Weitergabe kinematischer Informationen oder von Meta-Daten aus PLM-Systemen an die verarbeitenden Systeme der VR und VIBN [Westkämper und Runde, 2006].

Die mit der Industrie 4.0 assoziierte Vernetzung der Produktion ist noch nicht methodisch in den Produktentwicklungsprozess von Fertigungssystemen integriert. Es fehlen technische Konzepte, die die Interdisziplinarität (mechanische Konstruktion, Automatisierungstechnik und Fertigungsprozessplanung) im Entwicklungsprozess

von mechatronischen Produkten unterstützten und den am Entwicklungsprozess Beteiligten gerade in den frühen Phasen der Entwicklung ein Anschauungsobjekt bieten [Bracht et al., 2011].

Ziel sollte es daher sein, mittelständischen Fertigungssystemherstellern ein Entwicklungsumfeld zu bieten, welches in Prozessen, Modellen und Werkzeugen ihre Anschluss- und Innovationsfähigkeit zu den Unternehmen sichert. Dabei müssen alle am Entwicklungsprozess interdisziplinär Beteiligten wie Planer, Kunden, Konstrukteure, Automatisierungstechnikingenieure und Anlagenprogrammierer, aber auch spätere Nutzer wesentlich stärker als bisher in die Entwicklung von Fertigungssystemen und -prozessen einbezogen werden. Dabei können Methoden des Smart Hybrid Prototypings⁴ (SHP) [Stark, Beckmann-Dobrev, Schulze, Adenauer, und Israel, 2009; Stark und Beckmann-Dobrev, 2010] eingesetzt werden, um die bislang – in frühen Entwicklungsphasen – nur begrenzt darstellbaren Aspekte des PEP wie haptische, akustische, aber auch erlebnisorientierte, motivationale und hedonistische Nutzungseigenschaften zu erfassen. Die Erstellung Smarter Hybrider Prototypen kann dabei durch einen SHP-Baukasten, der im Rahmen des Projektes VIB-SHP entwickelt wurde erheblich vereinfacht werden.

Der Anwendungskontext der VIBN erstreckt sich über die gesamte Entwicklung der Fertigungssysteme: von der Konzeption bis zur Inbetriebnahme. Durch den Einsatz der virtuellen Technik „Smart Hybrid Prototyping“ und der Entwicklung eines SHP-Baukastens mit vordefinierten Modulen kann die Konzeption von Fertigungssystemen verkürzt, durch die Erlebbarkeit abgesichert und mit dem Kunden abgestimmt werden, um spätere Zeit- und kostenintensive Änderungen zu vermeiden. Der SHP-Baukasten muss dabei mit den Methoden der Virtuellen Inbetriebnahme verknüpft werden → **Abb. 5**.

⁴ Smart Hybrid Prototyping stellt eine innovative Form des Entwickelns entlang des Produktentwicklungsprozesses von der Idee bis zur Freigabe von mechanischen und mechatronischen Systemen dar, bei der die jeweils digital verfügbaren Produktelemente (Partialmodelle) virtuell oder physikalisch ausgelegt und kombiniert werden, um die spätere Produktfunktion für die Entwickler und Kunden schon frühzeitig im Produktentwicklungsprozess erlebbar in Echtzeit darstellen zu können (vgl. Auricht, Beckmann-Dobrev and Stark [2012]).

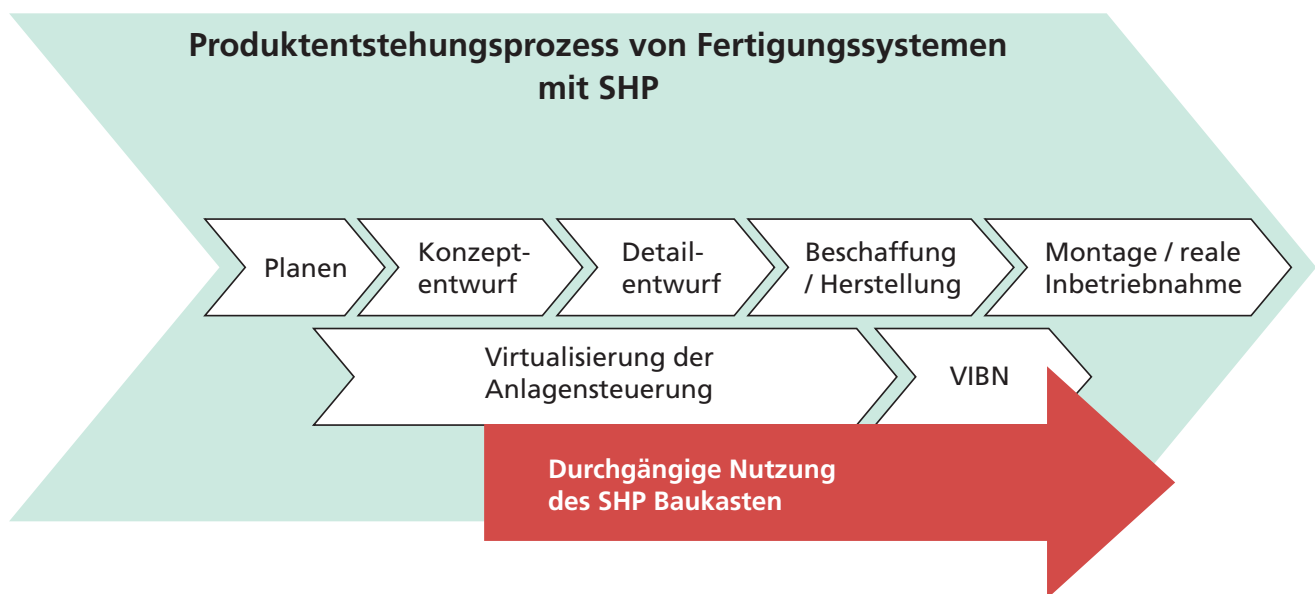


Abb. 5 Produktentstehungsprozess von Fertigungsanlagen und Einbindung der SHP-Baukastenmethode in diesen Prozess

Um eine virtuelle Inbetriebnahme im Unternehmen zu etablieren ist es notwendig, die Entwicklungsumgebung entsprechend zu gestalten. Dabei müssen die verwendeten Werkzeuge, Daten- und Informationsmodelle, die Prozesse und Organisation Berücksichtigung finden. Diese Dimensionen des Entwicklungsumfeldes müssen zueinander abgestimmt werden um effiziente Entwicklungsaktivitäten zu ermöglichen.

Zur Planung und Abstimmung eines Entwicklungsumfelds in Berücksichtigung oben genannter Dimensionen wurde am Fraunhofer IPK das Engineering Operating System (EOS), das Betriebssystem der Entwicklungsumgebung, entwickelt [Lünne-[mann et al., 2017](#)]. Auf Basis des EOS ist eine strategische Neu- und Umgestaltung des Entwicklungsumfelds mit Berücksichtigung der Wechselwirkungen, der oben beschriebenen Dimensionen möglich.

2.2 Heutige Defizite industrieller Anwendungen

Gerhard Lechler, Lucas Kirsch und Pascal Lünne-[mann](#)

Die Methoden und Prozesse, die heute bei der Planung von Fertigungs- und Montageanlagen eingesetzt werden, sind so vielfältig wie die Anbieter dieser Anlagen und hängen von der Komplexität und dem Umfang des Projektes, der Erfahrung der Hersteller und dem Termin- und Kostendruck ab.

Kleinere Anbieter nutzen in weit geringerem Maße als große Firmen Software-gestützte Planungstechniken – was wegen der kurzen Wege und der einfachen Kommunikationsstrukturen auch sinnvoll ist. Die Kommunikation geht schnell und einfach, läuft oft nur über einen oder wenige Mitarbeiter, die Informationen werden über schnell zu erstellende Tabellen, mit Hilfe von Tafeln und Notizzetteln gesammelt und verknüpft. Das Verfahren ist zwar störanfällig, aber Fehler können auf gleiche Weise meist schnell behoben werden.

Zwei Planungsinstrumente finden, abseits des agilen Vorgehens jedoch stets Anwendung: Ein CAD-System zur Erstellung der 3D-Modelle sowie der zugehörigen Zeichnungen und ein E-CAD-System für die Elektroplanung. Die Materialwirtschaft wird häufig mit Hilfe von Tabellenkalkulationsprogrammen erledigt. Wegen des geringen Aufwandes sind auch die Verwaltungskosten oft gering. Synergetisch verfolgen auch große Unternehmen diese Vorgehensweise, um Teilaufträge aus einem großen Projekt an kleine Firmen zu vergeben. Die Aufträge werden dabei auch ohne ausführliches Pflichtenheft platziert, die Erstellung eines Pflichtenheftes ist dann Sache des Unterlieferanten. Das Auftragsvolumen bewegt sich in der Größenordnung von einigen 10.000 € bis zu ca. 500.000 €.

Das beschriebene Abwicklungsverfahren hat hinsichtlich der Schnelligkeit und Flexibilität aber immer noch gravierende Vorteile. Bei komplexen und großen Anlagen sind diese Techniken jedoch nicht mehr angemessen. Es muss wegen der Vielzahl der beteiligten Abteilungen und Teilverantwortlichkeiten für eine transparente, durchgängige Planung der Inhalte, Kapazitäten, Kosten und Termine gesorgt werden.

Üblicherweise wird die Planung großer Anlagen in 4 Hauptabschnitte unterteilt:

Phase 1	Konzeption und Auftragsanbahnung: <ul style="list-style-type: none"> Die Konzeption und der Vorentwurf mit der Layoutplanung finden meist vor der eigentlichen Verkaufsentscheidung statt und sind gekennzeichnet durch die unmittelbare Wettbewerbssituation der verschiedenen Anbieter. In dieser Phase werden auf der Basis von Lastenheften Lösungsentwürfe zwischen dem Auftraggeber (AG) und dem Auftragnehmer (AN) diskutiert und modifiziert. Diese Phase endet mit der Auftragsvergabe.
Phase 2	Entwicklung und Auftragsabwicklung: <ul style="list-style-type: none"> Es werden alle Arbeiten mehr oder weniger gleichzeitig begonnen, die sich auf die Umsetzung des Lastenheftes beziehen, d. h. es werden Pflichtenhefte erstellt, die CAD-Konstruktion beginnt, die Elektroplanung wird gestartet, es werden technische Abläufe, Zeitdiagramme usw. aufgestellt, analysiert und optimiert. Die Softwareerstellung wird begonnen, wobei Ablaufdiagramme und Prozessketten beschrieben werden müssen. Stücklisten werden für die Materialwirtschaft erarbeitet und in den Einkauf gegeben. In dieser Phase bilden absehbare Lieferterminprobleme, technologische Schwierigkeiten, Änderungen des AGs usw. eine Kette von Stolperschwellen.
Phase 3	Montage- und Integrationsarbeiten: <ul style="list-style-type: none"> Dieser Abschnitt hat zum vorhergehenden Abschnitt einen fließenden Übergang. Jetzt werden die Bauteile, Baugruppen, Fremdprodukte und -geräte montiert und die ersten Funktionstests beginnen. Der AG ist mit Mitarbeitern vertreten, die sich mit dem Abgleich von AG-Forderungen und den entgegenstehenden technologischen Problemen sowie Umsetzungsproblemen beschäftigen. Diese Phase wird durch die Vorabnahme abgeschlossen, bei der die Anlage theoretisch ihre Leistung demonstrieren soll. Aber auch die Vorabnahme ist ein Hindernissrennen durch Inbetriebnahme-probleme wie z. B. Ausfälle von Komponenten durch Fehler, Materialmangel, fehlerhaftes oder unzureichendes Material usw.
Phase 4	Inbetriebnahme: <ul style="list-style-type: none"> Die Anlage wird beim AG aufgestellt und in Betrieb genommen. Die geplante Produktionskapazität wird in diesem Abschnitt in der Regel noch nicht erreicht, durch Optimierung nähern sich alle Beteiligten langsam dem Ziel. Die volle Produktionskapazität wird meist erst Wochen bzw. Monate nach dem SOP (Start of Production) geschafft.

Abb. 6 Planungsphasen

Der wirtschaftliche Erfolg hängt von den folgenden Fragestellungen ab:

- Gelingt es dem Auftragnehmer, wiederverwendbare Komponenten zu nutzen?
- Setzt er eine geschickte Konstruktionsplanung mit Zugriff auf Baukästen, Wiederholteile und Ähnliches ein?
- Verwendet er Module mit geringem Konstruktionsaufwand?
- Versucht der Auftragnehmer, Maschinen in ähnlichen Branchen zu verkaufen, um das gewonnene Know-How zu nutzen?
- Wie hoch ist das Engagement der beteiligten Personen?

→ **Wo liegen die Rationalisierungspotentiale?**

Eingefahrene Planungstechniken zu ändern, stellt stets ein Risiko dar, weil Mitarbeiter neue Techniken lernen müssen, zusätzliche Software in der Regel zusätzliche Kosten verursacht und zu Beginn der Anwendung neuer Verfahren die Abwicklung länger dauert.

Attraktive Einsparungseffekte sind dennoch durch folgende Schritte zu erwarten:

- Nutzung von verbesserten mechatronischen Baukastensystemen, die neben den Mechanik-Komponenten auch die Verknüpfung zur Elektrotechnik und Steuerungstechnik bieten
- Baukastensysteme mit intuitiven Bedienoberflächen – getrennt von den komplexen CAD-Programmen, die ohne Schulung und Erfahrung nicht effektiv genutzt werden können – speziell für die einfache Darstellung von Maschinen in der Konzeptphase
- Die durchgängige Nutzung virtueller Planungstechniken, wobei MCAD- und ECAD-Modelle hierfür die Grundlage bilden
- Der frühzeitige Test von Funktionen und Abläufen mit dem Ziel, Fehler früher zu erkennen, ohne dass Anlagenteile im Fehlerfall beschädigt werden.

Die Herausforderungen zur Etablierung liegen im gesamten Umfeld der Entwicklung. Die bestehenden Datensilos der Entwicklungsbeteiligten müssen für eine virtuelle Inbetriebnahme aufgebrochen und miteinander vereint werden – sowohl in ihren Prozessen wie auch in ihren Datenmodellen.

3 LÖSUNGSKONZEPT UND GESAMTARCHITEKTUR

Lucas Kirsch, Pascal Lünemann und Simon Kind

Die Etablierung einer virtuellen Inbetriebnahme mittels Smart Hybrid Prototyping verlangt eine ganzheitliche Umgestaltung des Entwicklungsumfelds. Basierend auf einer Analyse bestehender Entwicklungsumfelder können notwendige Veränderungen in Prozessen, IT-Systemen und verwendeten Daten- und Informationsmodellen identifiziert und neugestaltet werden.

Die Herausforderungen zur Etablierung liegen im gesamten Umfeld der Entwicklung. Die bestehenden Datensilos der Entwicklungsbeteiligten müssen für eine virtuelle Inbetriebnahme aufgebrochen und miteinander vereint werden - sowohl in ihren Prozessen wie auch in ihren Datenmodellen. Dabei bestehen in den Datensilos zu Recht spezialisierte Datenmodelle, welche die jeweiligen Entwicklungsartefakte vollständig repräsentieren, gleichzeitig fehlt jedoch häufig eine Durchgängigkeit bei den gemeinsam verwendeten Parametern (bspw. Signale, Geometrien, Struktureller Aufbau).

Auf Basis bestehender Entwicklungssysteme lässt sich ein neues Konzept der virtuellen Inbetriebnahme ableiten, welches nicht nur eine Prozess-, Werkzeug- und Datenintegration der bestehenden Datensilos erlaubt, sondern darüber hinaus das Anlagenverhalten und die Interaktion, beispielsweise in Montagesituationen, haptisch erlebbar machen.

3.1 Ausgangssituation und Bedarfsanalyse

Lucas Kirsch und Maximilian Hertzner

Auf dem Weg hin zur Industrie 4.0 haben sich Produktionssysteme grundlegend geändert - angefangen bei dampfgetriebenen Maschinen über elektrifizierte Maschinen bis hin zu heutigen robotergestützten Produktionsstraßen. Einhergehend wurde aus einer weitgehend mechanischen Entwicklung einer Produktionsanlage eine multidisziplinäre. In [Kapitel 2.2](#) wurden die heutigen Rahmenbedingungen und Potentiale eingehender beschrieben. Diese Rahmenbedingungen stellen neue Anforderungen an Prozesse, Modelle, Methoden und Werkzeuge. Folgend werden aus diesen Rahmenbedingungen und Defiziten Anforderungen abgeleitet.

[Bauernhansl, Hompel und Vogel-Heuser, 2014]

Silodenken in den Disziplinen

Die heutigen Disziplinen agieren weitgehend in voneinander getrennten Datensilos. Das hat zur Folge, dass oft auch ihre Prozesse, Modelle und Werkzeuge nicht ineinandergreifen. Entwicklungs- und Änderungsprozesse in diesem Umfeld zu beherrschen wird dadurch erschwert, da Defizite erst spät, während der Integration erkannt werden und somit hohe Kosten verursachen. [Kirsch, 2017]

Prozess und Kommunikation

Eine strukturierte Abstimmung durch einen definierten Prozess mit geeigneten Kommunikationskanälen zwischen den einzelnen Datensilos ist in den Unternehmen oft nicht implementiert. Der eher informelle Weg durch regelmäßige Projektmeetings wird durch die unterschiedlichen Fachbegriffe und Methoden in den Domänen erschwert. Auch können regelmäßige Projektmeetings nur bedingt die Prozesssicherheit und Modellkonsistenz gewährleisten. Ein definierter Prozess mit klaren Schnittstellen und werkzeuggestützten Kommunikationswegen, aber auch der notwendigen Flexibilität, um auf Unerwartetes zu reagieren, wird daher als Lösungsansatz vorgeschlagen.

Gemeinsames und konsistentes Informationsmodell

Die Arbeitsweisen innerhalb der Disziplinen divergieren. Während beispielsweise in der Mechanik eine Baugruppen-orientierte Arbeitsorganisation und Denkweise dominiert, herrscht in der Elektrotechnik eine funktionsorientierte Denkweise. Um Abstimmungsprozesse zu optimieren ist jedoch eine gemeinsame und konsistente Datenbasis notwendig. Ein disziplinübergreifendes Produktdatenmodell im Sinne einer cyberphysischen Produktstruktur soll diese gemeinsame Datenbasis schaffen (vgl. [Kapitel 3.6](#)). In der cyberphysischen Produktstruktur sollen die Entwicklungsinformationen der einzelnen Disziplinen zusammengeführt werden.

Das Ziel einer disziplinübergreifenden Nachverfolgbarkeit von Entwicklungsinformationen ist mit dokumentenzentrierten Ansätzen nicht hinreichend zu erfüllen

[Eigner, Koch und Muggeo, 2017b]. Ein weitgehend modellgetriebener Ansatz innerhalb der Disziplinen und auf Ebene der cyberphysischen Produktstruktur ist von Vorteil.

Die Verknüpfungstiefe, das heißt die Granularität der Zuordnung von disziplinspezifischen Informationen innerhalb der cyberphysischen Produktstruktur ist zu prüfen und sollte sich an den Anforderungen an Nachverfolgbarkeit auf der einen, aber auch an zusätzlichen (Zuordnungs-)Aufwand auf der anderen Seite orientieren.

Unterschiedliche Anforderungen an eine cyberphysische Produktstruktur können sich beispielsweise durch Elektrik- oder Mechanik-getriebene Ansätze der Produktentwicklung ergeben. Im Mechanik-getriebenen Prozessmuster werden Artefakte anderer Disziplinen in einer mechanische Produktstruktur ergänzt, während in einem Elektrik-getriebenen Prozessmuster die elektrische Produktstruktur aufgeladen wird. Auch werden immer öfter funktionsorientierte Entwicklungsansätze angewendet. Diese wurden in der Vergangenheit schon in der Industrie untersucht, aber wenig konkret umgesetzt. Durch die Digitalisierung und Virtualisierung von „gegenständlichen“ Denkweisen entlang der Mechanikstruktur ist aktuell ein erhöhtes Interesse an der Einführung einer funktionsorientierten Arbeitsweise zu beobachten [Hundt Lorenz, 2012]. Die cyberphysische Produktstruktur soll dadurch beispielsweise die unterschiedlichen Informationen der Disziplinen flexibel verwalten können.

Disziplinspezifische Informationen und ihre Verwaltung

Die gemeinsame Verwaltung von Informationsobjekten unterschiedlicher Disziplinen hat zur Folge, dass die verschiedenen disziplinspezifischen Teilmodelle und ihre Besonderheiten aus Sicht des Datenmanagements näher betrachtet werden müssen. Hier zeigt sich, dass die im Anlagenbau gängigen Disziplinen und ihre Informationsmodelle stark divergieren.

Der Mechanikentwurf

Der Mechanikentwurf erfolgt heute weitgehend in MCAD-Systemen. MCAD-Modelle sind in der Regel keine monolithischen Modelle. Sie bestehen aus einer Reihe von Teilmodellen (beispielsweise Einzelteilen), die in übergeordneten Baugruppen verbaut (verknüpft) werden. Dadurch entsteht eine CAD-orientierte Dokumentenstruktur, die Prinzipien, wie beispielsweise Wiederverwendung, Mehrfachverbauung und synchrones Arbeiten an einem Modell innerhalb der Domäne, unterstützt. Die mechanische Produktstruktur orientiert sich oft an der Dokumentenstruktur.

Die mechanische Produktstruktur bildet die Baugruppen und ihre Einzelteile hierarchisch ab, dabei werden die Einzelteile bzw. ihre Mengengerüste in einer Position zusammengefasst. Sogenannte Occurences, die verbauungsgenau die Einzelteile anzeigen, sind in Produktstrukturen heute nicht der Standard, werden jedoch für eine Zuordnung von elektrischen/elektronischen Bauteilen benötigt.

Der Elektrik-/Elektronikentwurf

Der Elektronikentwurf findet heute in E-CAD-Systemen statt, während elektronische Bauteile in spezialisierten Electronic Design Automation (EDA)-Systemen entwickelt werden. Die jeweiligen IT-Systeme arbeiten beide oft mit monolithischen Projektdateien, eigenen Katalogsystemen oder Datenbanken. Bei der Arbeit mit Projektdateien findet keine Modularisierung innerhalb des Modells auf Basis einer hierarchischen Dokumentenstruktur verknüpft durch Einzelteil und Baugruppe statt. Die Modularisierung erfolgt attributorientiert mittels Kennzeichnung der einzelnen Modellartefakte innerhalb eines monolithischen Projektes. Es wird oft auf die Ortskennzahl und das Betriebsmittelkennzeichen zurückgegriffen, welche eine Zuordnung auf eine Art funktionalen Bauraum ermöglicht. Das hat zur Folge, dass Produktstrukturen in der Elektrik heute in der Regel keine Mengengerüste in einer Position zusammenfassen.

Signale und Signallisten werden heute ebenfalls in ECAD Systemen erstellt und verwaltet. Sie werden im nachgelagerten Prozess des SPS-Entwurfs maßgeblich als Input benötigt. Sie haben daher eine interdisziplinäre Relevanz und sollten aus diesem Grund ebenfalls in der cyberphysischen Produktstruktur verwaltet werden.

Der SPS-Entwurf

Die Betrachtung mechatronischer Produktstrukturen beschränkt sich immer noch weitgehend auf die Betrachtung von Mechanik und Elektrik/Elektronik. Die Integration von Informationen aus dem Software Engineering in die mechatronische Betrachtung ist heute noch keine weit verbreitete industrielle Praxis. Der SPS-Entwurf findet heute in spezialisierter und proprietärer Software statt. Er basiert auf generischen Funktionsbausteinen aus einer Bibliothek, die projektspezifisch angepasst werden. Die Modelle und ihre detaillierten Informationen werden heute oft nicht in einem disziplinübergreifenden Datenmanagement erfasst. Dadurch ist eine Nachverfolgung von Informationen und eine darauf aufbauende Konsistenzprüfung meist nur mit gesteigertem manuellem Aufwand möglich. Eine tiefergehende Verwaltung von SPS-Modellen und ihren Informationen ist aus diesem Grund wünschenswert. Die Ergebnisse des SPS-Entwurfs und ein Verweis auf das dahinterliegende Modell im SPS-Softwarewerkzeug sollten innerhalb einer cyberphysischen Produktstruktur verwaltet werden, um ein Mindestmaß an Kontrollmechanismen zu ermöglichen.

Die virtuelle Inbetriebnahme

Für die virtuelle Inbetriebnahme werden Verhaltens- und Simulationsmodelle genutzt. Diese proprietären Modelle werden in den jeweiligen Simulationswerkzeugen entwickelt und angepasst. Oft sind die verschiedenen Verhaltensmodule in sogenannte Bibliotheks-Macros gegliedert und werden projektspezifisch angepasst. Ähnlich den Modellen und Informationen im SPS-Entwurf werden sie heute nicht in einem disziplinübergreifenden cyberphysischen Modell erfasst und verwaltet. Eine Integration ähnlich der SPS-Modelle und Informationen ist anzustreben.

Medienbrüche in der IT-Systemlandschaft

Die Teilmodelle des cyberphysischen Produktmodells werden in unterschiedlichen Autorenwerkzeugen entwickelt. Teilweise bieten die Hersteller der Autorenwerkzeuge zusätzliche Datenmanagementsysteme, sogenannte Domain Data Management Systeme (DDMS) oder Team Data Management Systeme (TDM) für die Verwaltung der Modelle an. Für die Verwaltung des cyberphysischen Produktmodells wird eine Sicht auf die Gesamtheit der Teilmodelle benötigt. Die angebotenen Schnittstellen zwischen den Systemen sind heute sehr unterschiedlich und hängen von den beteiligten IT-Systemen ab. Insbesondere der bidirektionale Datenaustausch, welcher für einen reibungslosen Informationstransfer von einer Domäne in die Nächste benötigt wird, ist eine Herausforderung. Die Entwicklung und Pflege solcher Schnittstellen sind für die IT-Hersteller oft zu kostspielig. Das gilt insbesondere, wenn die Systemanbieter mehrere Schnittstellen zu unterschiedlichen Softwareprodukten – Stichwort MultiCAD – einer Domäne unterhalten sollen.

⁵ Standard for the exchange of product model data

Der Einsatz von Branchenstandards kann hier ein Ansatzpunkt sein, um die Aufwände für die Systemanbieter zu senken, die Prozessqualität zu erhöhen und die Zusammenarbeit zu erleichtern. Initiativen dafür gibt es seit geraumer Zeit. Zu verweisen ist hier auf die XML-basierten Standardisierungsformate wie [STEP⁵](#) der ISO 10303 [DIN Deutsches Institut für Normung e. V.], der PLMXML von Siemens [Siemens Industry Software GmbH, 2018] oder die Automation Modeling Language (AML) [builder, w media Ltd \textbar Olaf Wiedfeldt-based on jquery UI].

Neben diesen XML-basierten Ansätzen wird beispielsweise mit dem Open Service for Lifecycle Collaboration (OSLC) ein neuer Ansatz verfolgt. Dieser basiert auf der Representational State Transfer (REST) Technologie, die auch im World Wide Web weit verbreitet ist. Das Paradigma basiert dabei eher auf der Verlinkung von Objekten und ihren Informationen, die von einem Drittsystem bereitgestellt werden. Dabei wird ein definiertes Set an Attributen für bestimmte Informationsobjekte übergeben. Durch OSLC sollen dynamische IT-Systemlandschaften ermöglicht werden. [OSLC, 2018]

In der Industrie haben sich einige der Standards nur partiell durchsetzen können, da die Abdeckung der in der Zusammenarbeit gegebenen Anwendungsfälle nur bedingt möglich ist. Häufig werden proprietäre Erweiterungen genutzt, die nicht in der Breite wirksam werden. Das Rückführen sinnvoller Erweiterungen in die jeweiligen Standards durch die Mitwirkung in den entsprechenden Gremien ist daher ein oft unterschätzter Nutzenfaktor.

Interdisziplinäre Varianz und Baukastensysteme

Die Organisation von Produkten in Produktlinien und einer expliziten Varietenausprägung ist weit verbreitet, um heutige Kundenwünsche schnell und zu wettbewerbsfähigen Konditionen bedienen zu können. Insbesondere im Anlagenbau ist das Ziel, die Schnelligkeit und positiven Kosteneffekte eines Configure-to-Order-Ansatzes (CTO) mit der notwendigen Flexibilität zur kundenindividuellen

Produktanpassung in Auftragsprojekten (Engineer-to-Order / ETO) zu verbinden. Um CTO-Prozesse überhaupt zu ermöglichen, sind Baukastensysteme und ein geeignetes Variantenmanagement unerlässlich. [Kirsch, 2017]

Gut organisierte Plattformen, die produktfamilien- und produktgenerationsübergreifend wirken und zusammen Produktbaukastensysteme bilden, helfen die Komplexität im Entwicklungsprozess zu beherrschen. Ein wichtiger Bestandteil im Design eines Baukastens ist eine Definition der (technischen) Schnittstellen zwischen den Baukastenelementen, um ihre Kombinierbarkeit sicherzustellen. Aber auch die Beschreibung und Klassifizierung der einzelnen Baukastenelemente sind wichtige Faktoren für den erfolgreichen Einsatz eines Baukastensystems. [Neuhausen, 2001]

Generisch kombinierbare Baukastenelemente bilden die Grundlage für einen erfolgreichen Baukasten. Die Kombination zu einer Produktionsstraße oder einer Fabrik bedingt in der Realität oft eine gewisse Varianz. Beispielsweise kann eine Anlage mit unterschiedlichen SPS-Systemen betrieben werden. Ein einheitliches System ist dabei für eine Produktionsstraße oder die ganze Fabrik anzustreben. Im besten Falle bringt das Baukastenelement diese Varianten mit und lässt eine einfache regelbasierte Konfiguration im Projektkontext zu. Das heißt, dass interdisziplinäre Baukästen Varianz besitzen, die beherrscht werden muss. Ein regelbasiertes Variantenmanagement muss dafür auf den Baukasten angewendet werden. Dafür muss das cyberphysische Produktmodell des Baukastenelements durch ein konsistentes, interdisziplinäres Variantenmodell ergänzt werden. Damit können u. a. die Elemente des Baukastens gering gehalten werden, wodurch auch die Pflege des Baukastensystems vereinfacht wird.

Das Baukastensystem soll schon in der frühen Entwicklungsphase genutzt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass zum Zeitpunkt der Auswahl einzelner Baukastenelemente im Projektkontext noch nicht alle Designentscheidungen gefällt wurden. Die Mitnahme von Varianz innerhalb eines Baukastenelements in den Entwicklungskontext ist damit für die Nutzbarkeit des Baukastensystems entscheidend.

Somit bleibt festzuhalten, dass ein adäquates Baukastensystem auf Basis cyberphysischer Produktmodelle die industrielle Nutzung der VIBN entscheidend fördert. Insbesondere die Entwicklung der benötigten Modelle (Simulation, Kinematik, Smart Hybrid Devices etc.) stellt heutige Anwender vor große Herausforderungen. Durch die integrative Bereitstellung in einem Baukastensystem wird insbesondere der Mittelstand befähigt, komplett simulierbare, virtualisierte Szenen gemäß Auftragskonfiguration zusammenzustellen. Teilweise können Prozessschritte im Anlagenbau durch den Einsatz eines Baukastensystems entschieden beschleunigt werden oder gänzlich entfallen. Damit werden gleich mehrere Dimensionen eines Engineering Operating System (EOS) unterstützt.

3.2 VIB-SHP-Konzept in den Dimensionen des Engineering Operating System

Pascal Lünemann

Im Ergebnis der Anforderungsanalyse ergeben sich umfassende Änderungsbedarfe in der Entwicklungsumgebung für Fertigungs- und Montagesysteme. Die Änderungsbedarfe fokussieren vornehmlich neu einzuführende IT-Systeme mit spezialisierten Datenmodellen, welche die notwendige Kollaboration der entwicklungsbeteiligten Disziplinen bestmöglich unterstützen. Durch die Einführung neuer IT-Systeme und Datenmodelle ergeben sich entsprechende Änderungsbedarfe in den Prozessen der Entwicklung um die neu zu verfolgende Methodik der VIBN mittels SHP abbilden zu können. Zur Planung und Beschreibung solch umfassender Veränderungen im Ingenieurs-Entwicklungsumfeld wurde am Fraunhofer IPK das Engineering Operating System (EOS) entwickelt (→ **Abb. 7**).

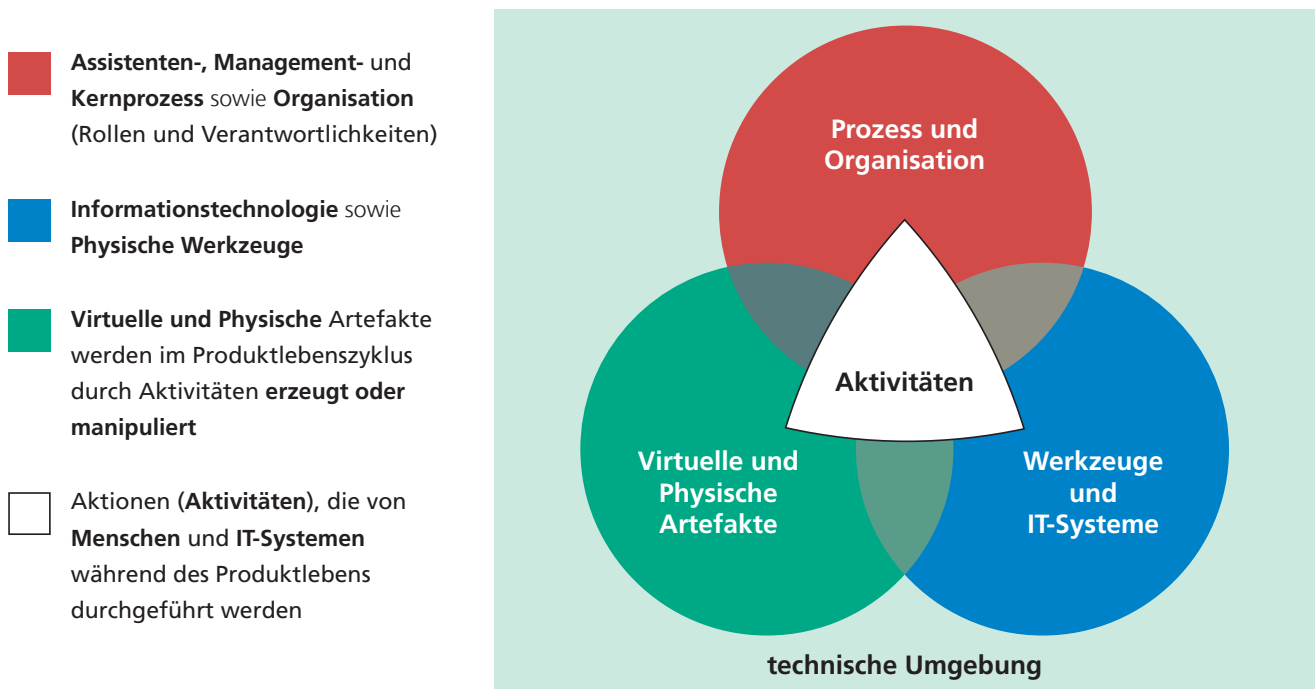


Abb. 7 Engineering Operating System nach [Lünemann et al., 2017]

Das EOS unterscheidet dabei vier sich überschneidende „Mengen“: die Prozesse und Organisation, Daten- und Informationsmodelle, Werkzeuge und IT-Systeme sowie die Aktivitäten. Die Menge der Prozesse und Organisation basiert auf den wertschöpfungsorientierten Prozessen und Vorgehensweisen. Dabei wird zwischen den wertschöpfenden Kernprozessen und den unterstützenden Prozessen, die nur sekundär wertschöpfend sind, unterschieden [Scheer und Cocchi, 2006]. Die Organisation der Entwicklungsumgebung in Rollen, Strukturen und Projektvorgehensweisen wird ebenso in dieser Dimension berücksichtigt.

Die Menge der virtuellen und physischen Artefakte beschreibt das Medium der Produktentwicklung. Die verwendeten, manipulierten und erschaffenen Informationen und Objekte werden dabei berücksichtigt (bspw. CAD-Modelle, Dokumentationen, Anforderungen etc.). Die Menge der Werkzeuge und IT-Systeme beschreibt alle verfügbaren Werkzeuge im Entwicklungsumfeld von der eingesetzten Software und der dabei verwendeten Hardware (Rechner, Interaktionsgeräte und Visualisierungen), über die eingesetzten Werkzeugmaschinen bis hin zu verwendeten Prüfwerkzeugen.

Auf diesen drei, die Entwicklungsumgebung beschreibenden Mengen, gründen die Aktivitäten, als die eigentlichen wertschöpfenden Handlungen der Entwicklungsbeteiligten. Die Menge beschreibt alle durch Menschen und IT-Systeme tatsächlich ausgeführten Handlungen (Aktivitäten) im Produktleben. Durch Menschen ausgeführte Aktivitäten sind dabei die personenspezifisch dynamischen Instanziierungen der Prozesse.

Während durch Menschen ausgeführte Aktivitäten einer natürlichen Varianz unterliegen [Lünnemann, Wang und Stark], führen automatisierte und durch IT-Systeme umgesetzte Aktivitäten, sofern keine adaptiven Algorithmen Verwendung finden, diese Aktivitäten in immer gleiche Weise aus. Lediglich die einmalige Interpretation der Implementationsaufgabe / der Anforderungen an den Algorithmus, durch den konzipierenden Informatiker oder Fachexperten erhält Einfluss, sodass die Varianz deutlich reduziert wird.

Zur erfolgreichen Umsetzung einer VIBN mittels SHP Ansatzes ist es notwendig, die gesamte Entwicklungsumgebung in sich stimmig umzugestalten. Dabei müssen sowohl der Entwicklungsprozess (vgl. [Kapitel 3.4](#)), die verwendeten Werkzeuge (vgl. [Kapitel 3.5](#)), wie auch die verwendeten Informations- und Datenmodelle (vgl. [Kapitel 3.6](#)) berücksichtigt werden. Im Resultat ergeben sich in der neu gestalteten Entwicklungsumgebung in Umsetzung der prozess-, modell- und werkzeugimplizierten Methoden neue Aktivitäten in der Entwicklung von Anlagen.

Für die Umsetzung einer VIB-SHP-Entwicklungsumgebung sind verschiedene Anpassungen in den Dimensionen des EOS notwendig. Zwei herausragende Erweiterungen sind das Baukastensystem und die Virtualisierung der Inbetriebnahme zur visuellen Absicherung. Das Baukastensystem versteht sich dabei nach der Logik von Pahl/Beitz [Feldhusen und Grote, 2013] als eine Zusammenstellung von Baureihen, welche in Modulen des Baukastens abgebildet werden. Jedes Baukastenelement lässt sich über Parameter in Ausformungsvarianten einer Modulbaureihe darstellen indem Parameter im Rahmen von CAD-Systemen angepasst werden. In den Domänen Elektronik und Informatik spielen parametrische Modelle eine untergeordnetere Rolle gegenüber der Variantensteuerung. Eine Detaillierte Erläuterung ist in [Kapitel 3.6](#) zu finden.

Die Virtualisierung zur visuellen Inbetriebnahme verbessert im Wesentlichen die Immersion für die Entwickler. Durch den realistischen Eindruck der Szene erfolgt die Interaktion mit der Anlage wesentlich schneller, sodass ergonomische Absicherungen, Wartungsarbeiten und korrekte Signalverknüpfungen wesentlich früher erfolgen können. Die Virtualisierung ist dabei keine neue Innovation. Entscheidend ist, dass durch die Verwendung eines Baukastensystems mit mechatronischen Produktmodellen und Verhaltensmodellen die notwendige Zeit zur Virtualisierung (Modellerstellung, Parametrisierung, Validierung und Verifikation) reduziert werden kann. So kann schon ab der Konzeption der Anlage aus Standardmodulen eine erste Verhaltenssimulation und virtuelle, begehbare und manipulierbare Szene erzeugt werden. Auf Basis dessen sind hoch immersive frühe Absprachen und Entscheidungsfindungen ohne akute Zusatzaufwände möglich. Auf gleiche Weise lassen sich Simulationen und Auslegungsrechnungen deutlich reduzieren und beschleunigen.

3.3 VIB-SHP Baukastensystem

Simon Kind, Lucas Kirsch und Maximilian Weidemann

Der VIB-SHP Baukasten ist der EOS Dimension der virtuellen und physischen Artefakte zuzuordnen mit Einfluss auf die Dimensionen der Prozesse und Organisation, sowie den Werkzeugen und IT-Systemen. Mit seinen integrierten Bestandteilen stellt er alle für die VIBN benötigten disziplinspezifischen Modelle als Baukastenelemente bereit.

Für den Einsatz und eine übergreifende Verwendung des Baukastens im Entwicklungsprozess ist es notwendig, ergänzend zur Bereitstellung und disziplinspezifischen Verwendung der Entwicklungsartefakte auch eine vereinheitlichte Arbeitsweise mit den verfügbaren Baukastenelementen zu pflegen. Während der Anlagenentwicklungsphase und Layoutplanung ist es demnach essentiell, die in den einzelnen Autorensystemen entstehenden Entwicklungsartefakte entsprechend einer integrierbaren Vorgehensweise aufzubereiten. Dies umfasst beispielsweise eine Kinematisierung der entstehenden CAD-Modelldaten, um hierauf aufbauend sowohl eine plausible Verhaltensmodellierung einer einzelnen funktionalen Baugruppe, als auch deren signaltechnische Verknüpfung ergänzen zu können. Dies führt somit zu Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Partialmodellen, ermöglicht jedoch bei konsistenter Modellierung auch eine vereinfachte interdisziplinäre Verknüpfung dieser in der darauf aufbauenden Simulationsumgebung und virtuellen Inbetriebnahmephase.

Beispielhaft für die mögliche, interne Verknüpfung der Partialmodelle sei die Abbildung der vorhandenen Freiheitsgrade und des Verhaltens eines Förderbandes genannt, dessen funktionale Parameter wie die positive Förderrichtung, zu platzierender Stopper und auch der verwendeten Sensorik zu berücksichtigen sind. Insbesondere die interdisziplinär entscheidenden Faktoren, wie räumliche Freiheitsgrade, Signal- und Adresskonfiguration der Sensorik, als auch Anschlusskonfigurationen der Ein- und Ausgänge müssen konsistent über die unterschiedlichen Entwicklungsdisziplinen modelliert werden. Eine Zusammenführung und Verknüpfung der Partialmodelle wird mithilfe des beschriebenen cyberphysischen Produktdatenmodells innerhalb des PLM-Systems berücksichtigt und ermöglicht.

3.3.1 Integrierte Bestandteile des Baukastens

Der Baukasten besteht aus einzelnen funktionsorientierten Elementen die durch konsistente Partialmodelle beschrieben sind. Um die im Baukastenelement zu verwaltenden Partialmodelle zu identifizieren wurden die beteiligten Gewerke, verfügbarer, modellgetriebener Entwicklungsartefakte bzw. der involvierten Entwicklungsdisziplinen des Anlagenbaus untersucht. Ergebnis dieser Untersuchung stellt die in → **Abb. 8** dargestellte übergeordnete Kategorisierung der Anlagenbestandteile dar [Kind, Exner, Stark und Neumeyer].

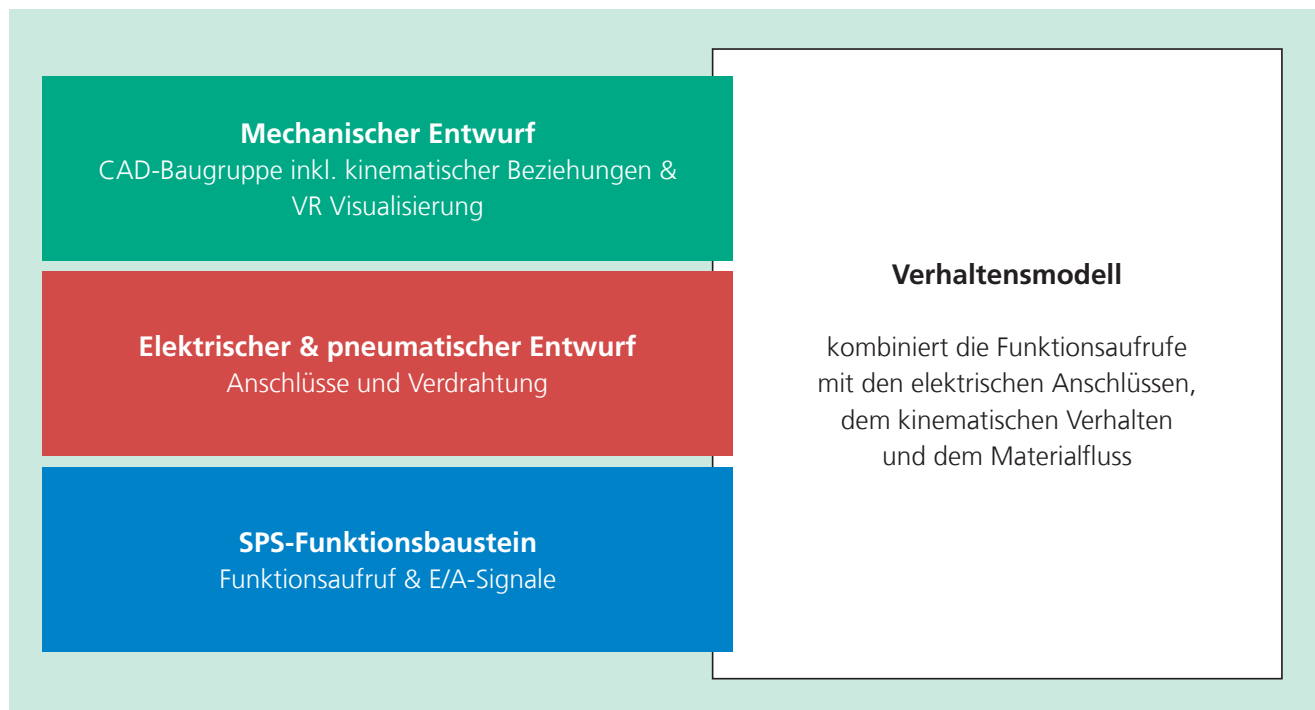


Abb. 8 Kategorisierung von Anlagenbestandteilen nach Entwicklungsdisziplinen

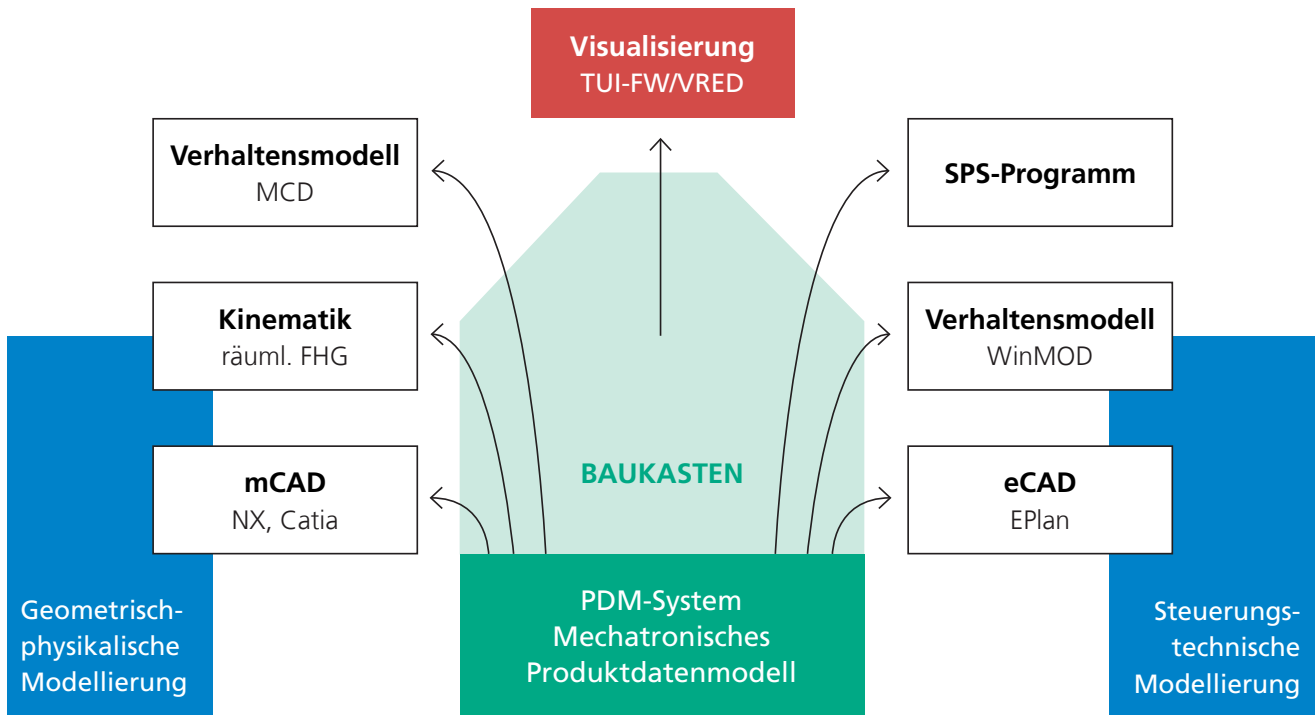


Abb. 9 Zusammenhänge der disziplinspezifischen Entwicklungsmodelle in einem Baukasten

Als mögliche generische Beschreibung einer cyberphysischen Anlage bezogen auf die involvierten Entwicklungsdisziplinen (Mechanikentwicklung, Elektrotechnik und Steuerungsprogrammierung) ergeben sich demnach drei Sichten (siehe auch [Kapitel 3.6.3](#)) auf die zu gestaltende Anlage. Aus Sicht der Layoutplanung und Mechanikkonstruktion ist die geometrisch-physikalische Repräsentation zu berücksichtigen. Diese muss im Rahmen der VIBN ergänzend zu den CAD-Entwicklungsdaten auch um funktionale Modellierungsaspekte, wie beispielsweise der Abbildung kinematischer Beziehungen erweitert werden. Durch diese Anreicherung der CAD-Daten wird es ermöglicht, das abzusichernde Anlagenverhalten auch entsprechend der vorliegenden, kinematischen Freiheitsgrade und geometrischen Zwangsbedingungen korrekt abzubilden. Aus Sicht der Absicherung der Steuerung einer Anlage gilt es gleichzeitig für die VIBN auch das steuerungstechnische Verhalten realitätsnah abzubilden. Hierfür müssen sowohl die elektrotechnische Verkabelung und Verdrahtung der Anlage, die hieraus resultierende Signalmodellierung der Ein-/ und Ausgänge als auch die einzusetzende SPS-Steuerung selbst mitbetrachtet werden.

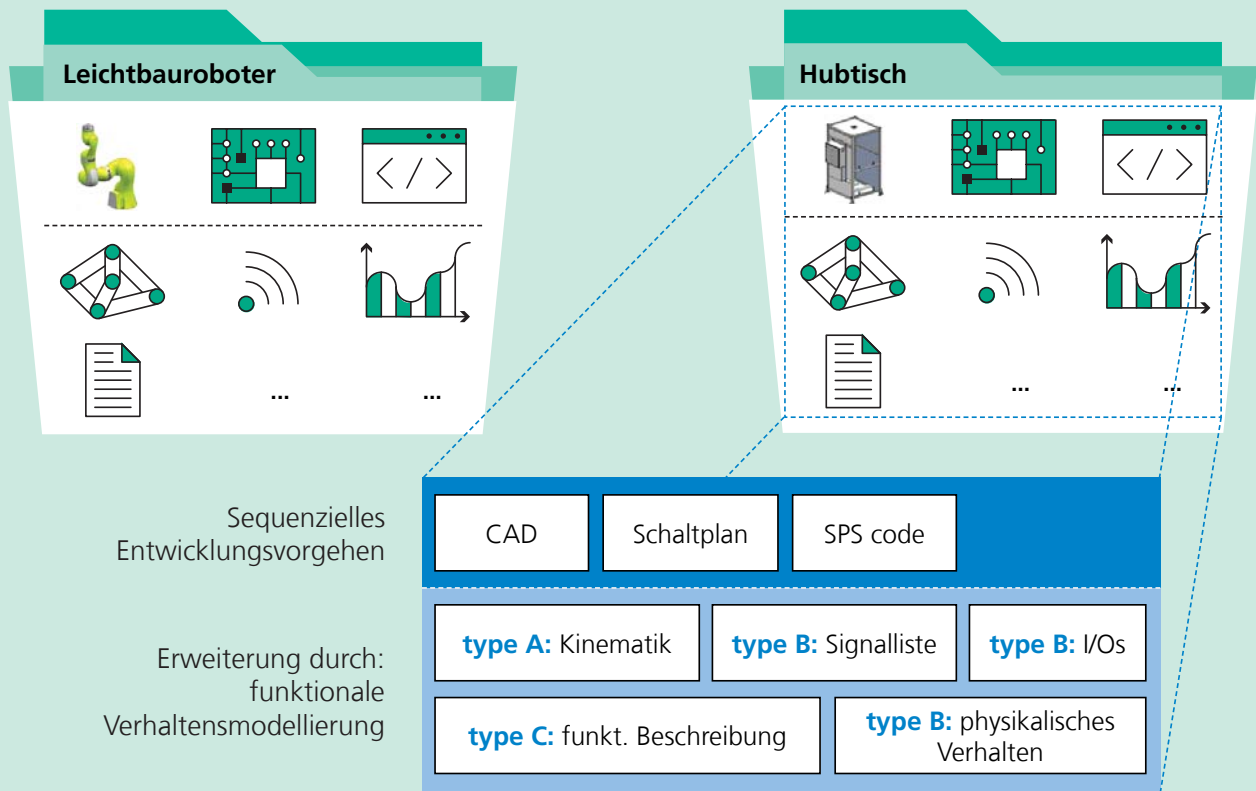


Abb. 10 Der interdisziplinäre Baukasten, seine Elemente und ihre Partialmodelle

Für eine disziplinübergreifende Inbetriebnahme einer Anlage ist zusätzlich die Modellierung und Abbildung des Anlagenverhaltens notwendig. In sogenannten Verhaltensmodellen wird für die Virtuelle Inbetriebnahme das korrekte Zeitverhalten der einzelnen Anlagenbestandteile sowie daraus resultierend auch der Gesamtanlage (→ **Abb. 11**) gestaltet. Es lässt sich unter zusätzlicher Berücksichtigung der Visualisierung der abzusichernden Anlage eine durchgängige, konsistente und interdisziplinäre Anlagengestaltung und -absicherung erreichen, anhand derer neben der Analyse des Anlagenlayouts auch eine steuerungsbetonte Validierung bis hin zur Absicherung des Materialflusses gewährleistet werden kann. Jegliche zuvor beschriebenen Modelldaten aus den unterschiedlichen Entwicklungsdisziplinen sowie auch übergreifender Entwicklungsmodelle (Verhaltensmodelle, Signallisten etc.) werden demnach über ein cyberphysisches Produktdatenmodell abgebildet und mithilfe eines Baukastens für CPPS und Lösungselemente bereitgestellt.

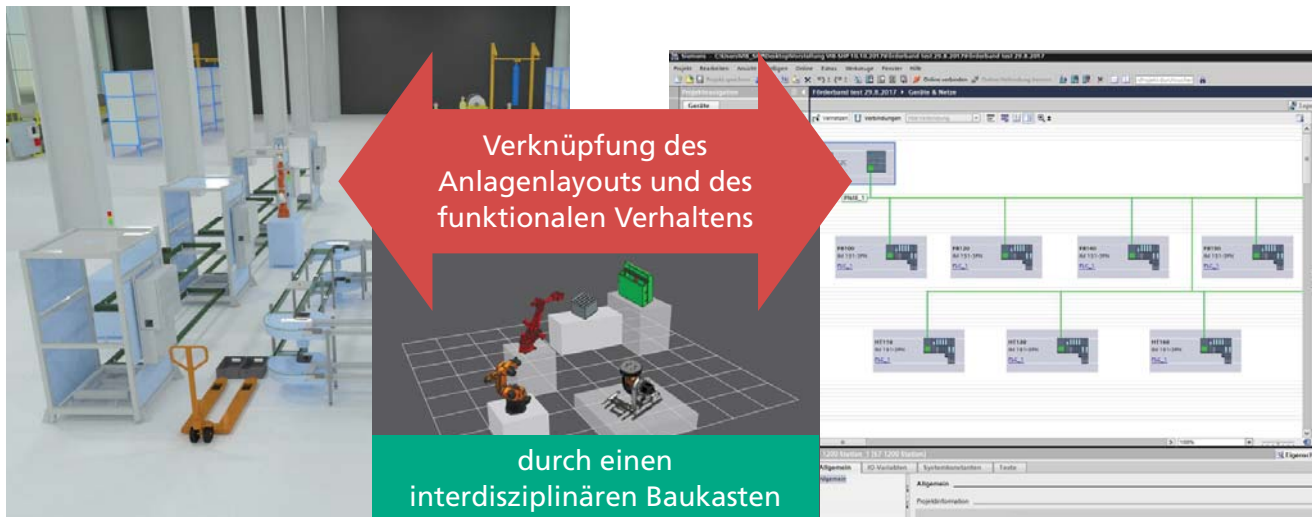


Abb. 11 Verortung und Zusammenhänge der disziplinspezifischen Partialmodelle einer Funktionsgruppe bzw. einer Gesamtanlage

3.3.2 Strukturierung eines Baukastensystems

Die merkmalsbasierte Beschreibung und Klassifizierung von Baukastenelementen ist von entscheidender Bedeutung für einen erfolgreichen Einsatz eines Baukastensystems und des integrierten Variantenmanagements.

Charakterisiert werden Klassifizierungssysteme oft durch eine Klassenhierarchie und den Klassen zugeordneten Merkmalen sowie ihren Eigenschaften. Für eine disziplinübergreifende Beschreibung bietet sich eine funktional-orientierte Klassenhierarchie an, um die Baukastenelemente zuzuordnen [Eigner und Stelzer, 2009]. Um die Entwicklungsphase des Produktionssystems zu unterstützen ist es sinnvoll, innerhalb der einzelnen Klassen disziplinspezifische und/oder technisch-orientierte Attribute als Merkmale der Klassen zu definieren. Insbesondere der Beschreibung der Schnittstellenmerkmale einer Klasse muss eine hohe Aufmerksamkeit gewidmet werden, um den späteren Nutzer bei der Auswahl kompatibler Baukastenelemente zu unterstützen. In der Realität kommt es oft vor, dass ein Baukastenelement mehrere Funktionen übernimmt, wie zum Beispiel der Hubtisch, der die Funktionen Fördern und Heben vereint. Aus diesem Grund ist das Zulassen einer Mehrfachklassifizierung eines Baukastenelements zweckmäßig und sinnvoll. Ein Abwägen zwischen dem Erzeugen einer multifunktionalen Klasse und einer Mehrfachklassifizierung muss bei der Konzeption des Klassensystems getroffen werden.

Auch ist es ratsam, als Blaupause für eine Klassifizierung bekannte Standards zu verwenden, um beispielsweise auch externe Baukastensysteme unter geringem Aufwand integrieren zu können. Eine der bekanntesten Klassifizierungssysteme für Baukästen ist die Sachmerkmalleiste, die in der DIN 4000 beschrieben wird. Ein weiteres Klassifizierungssystem ist der eCl@ss Klassifizierungsstandard. Das Datenmodell ist konform zur ISO 13584-42 / IEC 61360. Die Klassenbibliothek und ihre Merkmale fokussieren hauptsächlich Vertriebs- und Einkaufsaspekte und weniger die technischen Details der Entwicklung. Ebenfalls gibt es im AutomationML-Konsortium Bestrebungen, eine Klassenbibliothek aufzubauen, die unter Umständen berücksichtigt werden kann.

→ **Abb. 12** zeigt eine Klassifizierung mit einer Klassenhierarchie auf der linken Seite und dem Klassenmerkmal auf der rechten Seite in CIM Database PLM am Beispiel eines Daten- und Kommunikationskabels. Auf Basis der für die Beispielanlage benötigten Funktionselemente wurden die Partialmodelle entwickelt und in Form einer cyberphysischen Produktstruktur im PLM-System hinterlegt. Parallel wurde ein Klassifizierungssystem für die verschiedenen Baukastenelemente und ihre Partialmodelle entwickelt. In dieses Klassifizierungssystem wurden die Baukastenelemente eingeordnet.

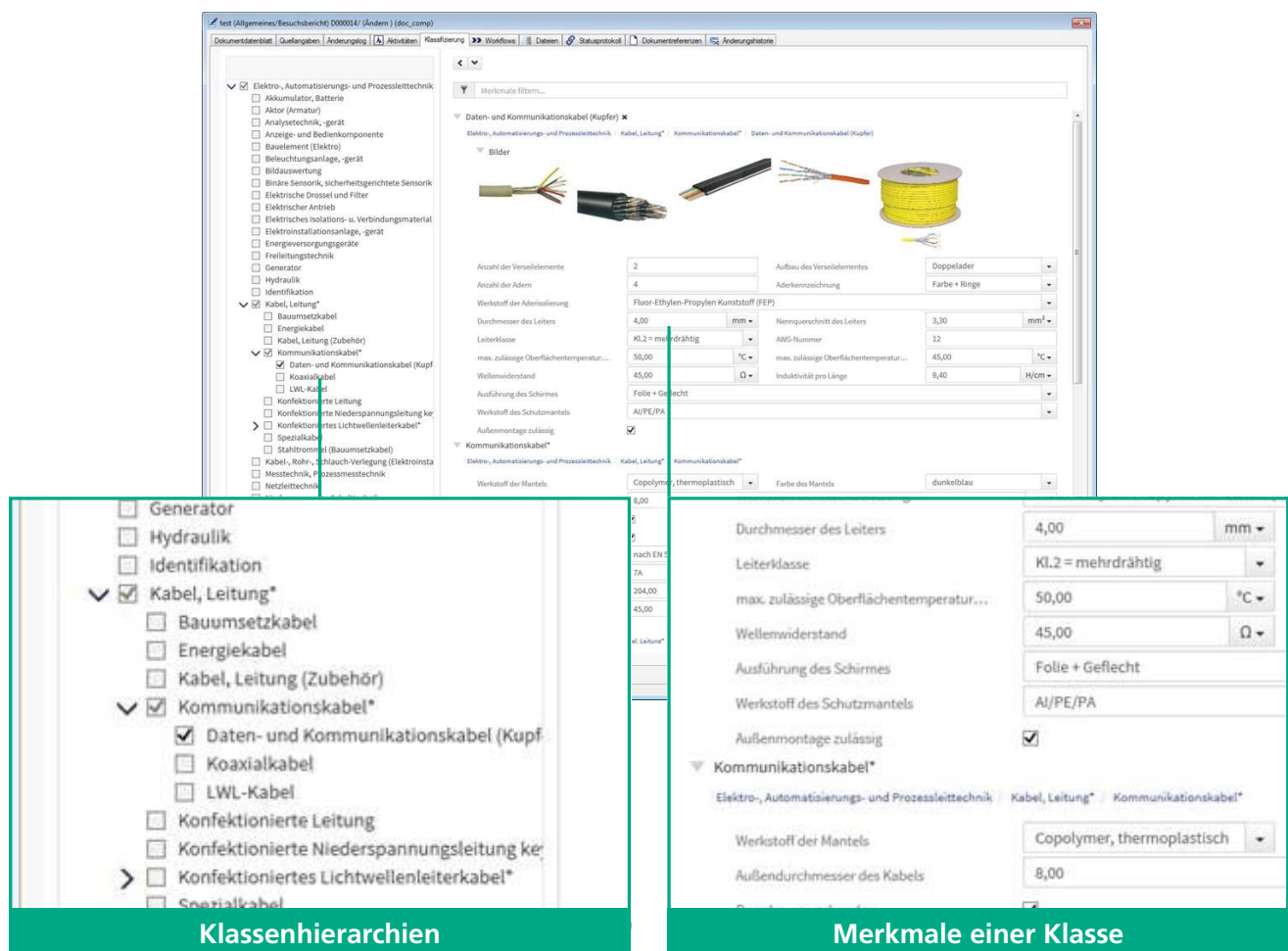


Abb. 12 Beispiel einer Klassifizierung im PLM-System CIM Database PLM

3.3.3 Modularisierung von Baukastenelementen

Baukastensysteme verfolgen den Ansatz, durch eine Modularisierung von Gesamtsystemen in Komponenten die Wiederverwendung zu fördern. Damit bilden sie u. a. die Grundlage für einen Configure-to-Order (CTO) Ansatz. Das in → **Abb. 13** gezeigte Paradigma der Entkopplung von Produktkomponenten/Baukastenelementen ist dabei essentiell, damit Änderungen an einem Baukastenelement zu möglichst wenigen Folgeänderungen an anderen Baukastenelementen führen. Ein Design, welches eine Entkopplung von innerer Funktionsweise und Schnittstelle eines Baukastenelements verfolgt, ist das Ziel. Dadurch soll eine Adaption der inneren Funktionsweise einer Baukastenkomponente, beispielsweise getrieben durch eine Anpassung auf ein spezielles zu fertigendes Produkt sich minimal oder gar nicht auf andere Baukastenelemente auswirken. Insbesondere im weitgehend projektgetriebenen Anlagenbau bleiben so projektspezifische Anpassungsvorgänge, beherrschbar. [Neuhausen, 2001]

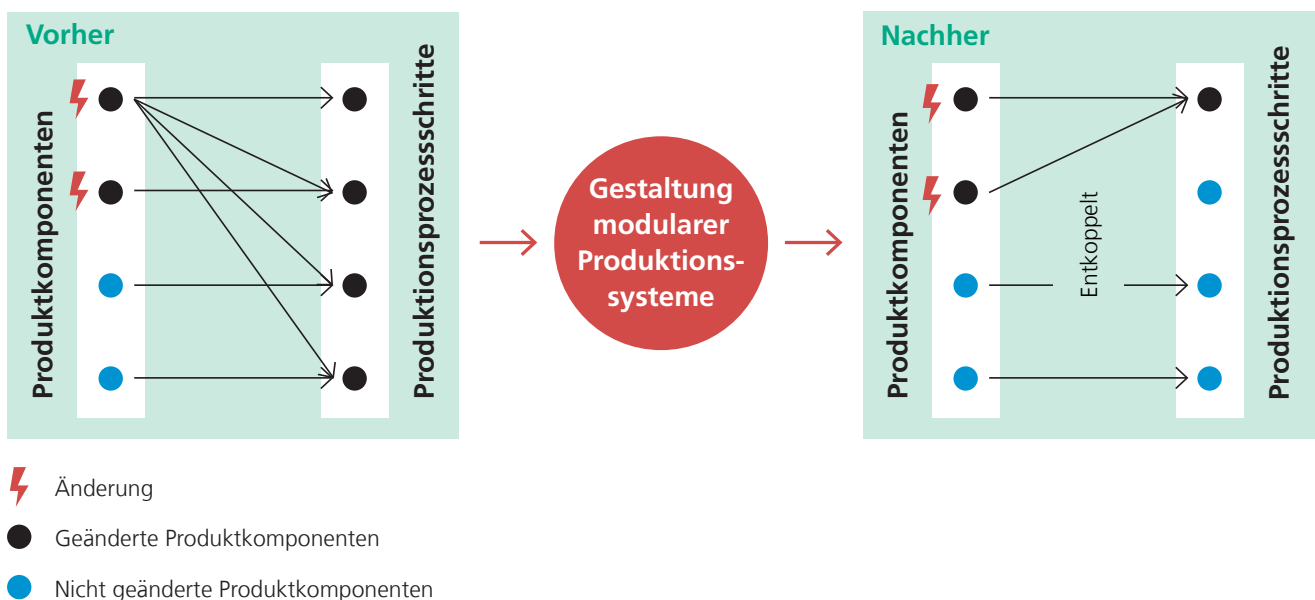


Abb. 13 Paradigma zur Gestaltung modularer Produktionssysteme [Neuhausen, 2001]

→ **Abb. 14** zeigt unterschiedliche Ebenen der Modularisierung. Das in VIB-SHP genutzte Baukastensystem fokussiert die Ebene der Produktionslinie. Produktionsstationen werden funktional modularisiert und in Form von standardisierten Baukastenelementen auf einer Plattform, wie beispielsweise dem unternehmens-eigenen PLM-System zur Verfügung gestellt. Diese modularisierten Baukastenelemente entsprechen einer funktionalen Produktionsstation und können im Entwicklungsprojekt einer Produktionslinie zugeordnet werden.

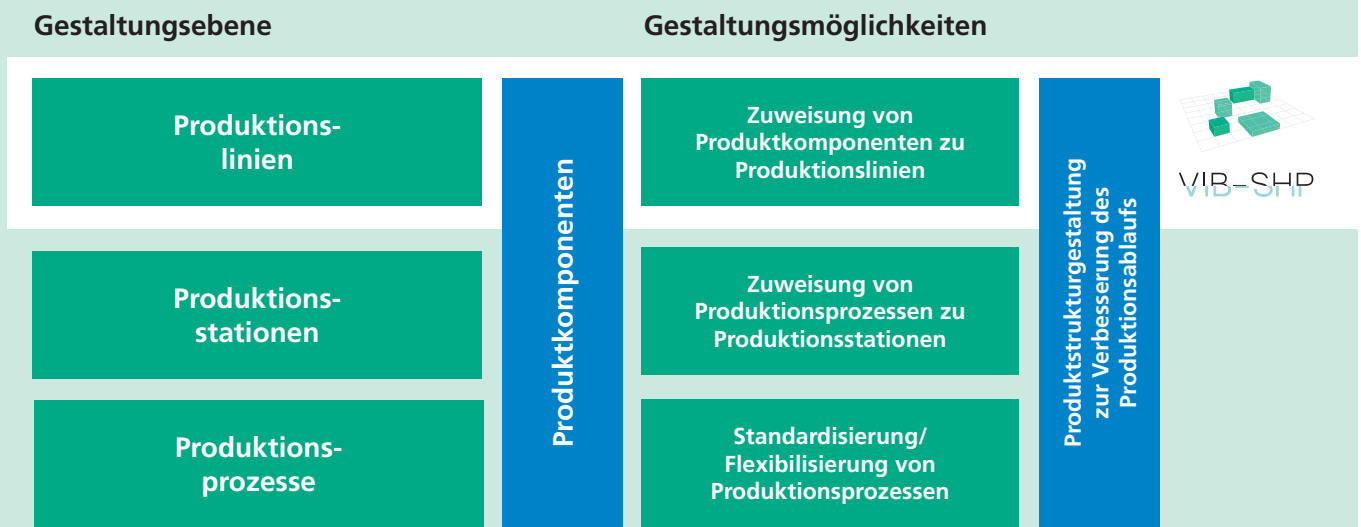


Abb. 14 Gestaltungsebenen der Modularisierung [Neuhausen, 2001]

Die bereitgestellten Baukastenelemente bringen die Partialmodelle des Elements und seine Schnittstellenbeschreibung mit. Dazu gehören beispielsweise Schaltpläne, SPS-Code-Fragmente, SPS-Funktionsmodelle, CAD-Modelle, Verhaltensmodelle u. v. m. → **Abb. 15** zeigt die einem Baukastenelement (Komponente) zugeordneten Partialmodelle und ihre Informationen. Wie in [Kapitel 3.6](#) dargestellt, werden diese in Form einer cyberphysischen Produktstruktur bereitgestellt. Die Auflösung der Modelle in der cyberphysischen Produktstruktur kann in unterschiedlicher Granularität erfolgen und vom komplett aufgelösten Modell, mit all seinen Artefakten, bis hin zu einem Modellknoten gehen. Der einzelne Modellknoten repräsentiert dann als Black-Box mit einem dahinterliegenden proprietären oder neutralen Beschreibungsformat das ganze Modell. Die mögliche Granularität der aufgelösten Modelle hängt u. a. von der Schnittstellentechnologie zwischen dem Autorenwerkzeug und dem PLM-System ab. Grundsätzlich ist eine höhere Granularität für eine PLM-System-gestützte Konfiguration im späteren Anlagenentwicklungskontext jedoch von Vorteil, da dadurch z. B. halb- oder vollautomatisiert anlagenspezifische Informationen angepasst werden können (Ortskennzahl, Betriebsmittelkennzahl, SPS-Adressbereiche etc.). Beim Anlegen der Baukastenelemente werden diese Partialmodelle und Schnittstellen der cyberphysischen Produktstruktur des Elements hinzugefügt.

Einleitung der vorhandenen Funktionsgruppen

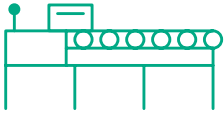
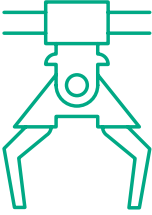
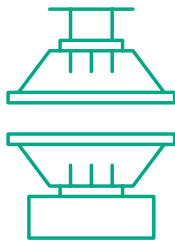
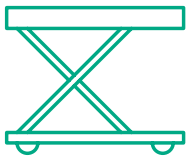
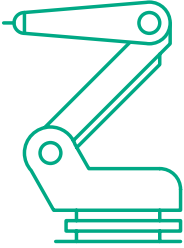
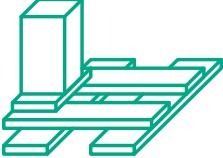
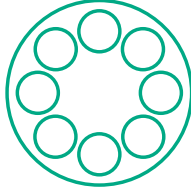

	Förderband (FB)	Greifer (GR)	Presse (PR)	Hubtisch (HT)
Zuordnungsbereich:	Fördertechnik	Fördertechnik	Fügetechnik	Fördertechnik
Statisch/Dynamisch:	Dynamisch	Dynamisch	Dynamisch	Dynamisch
Hauptfunktion:	Bewegung von Objekten	Greifen von Objekten	Aufbringen von Kräften	Heben von Objekten
Antrieb:	Elektromotor	Pneumatik	keine Angabe	Elektromotor
Bewegungsform:	Linear	Linear	Linear	Linear
Bewegbare Achsen:	1	1	1	2
Steuerung vorhanden:	Keine	Keine	keine Angabe	als Erweiterung möglich
				
	Leichtbauroboter (LBR)	XYZ-Portal (XYZP)	Rundtaktisch (RTT)	Behälter (BH) <small>Beispiel für Statische Elemente</small>
Zuordnungsbereich:	Robotik	Fördertechnik	Fördertechnik	Lagerung
Statisch/Dynamisch:	Dynamisch	Dynamisch	Dynamisch	Statisch
Hauptfunktion:	Handhabung	Handhabung	Bewegen von Objekten	Lagerung von Objekten
Antrieb:	Elektromotor	Elektromotor	Elektromotor	Kein Antrieb
Bewegungsform:	Linear & rotatorisch	Linear & rotatorisch	Rotatorisch	Keine Bewegung
Bewegbare Achsen:	7	3	1	0
Steuerung vorhanden:	Ja	Keine	Keine	Keine
				

Abb. 15 Auszug der Elemente des VIB-SHP Baukastensystems

3.4 ViB-SHP-Entwicklungsprozess mit Baukästen

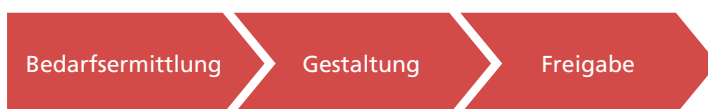
Pascal Lünemann und Bernhard Mathes

Die Bereitstellung innovativer Werkzeuge (beispielsweise haptische Interaktion, Konfiguration im PLM-System) und Vorhaltung notwendiger Information in Baukästen und spezialisierten Datenmodellen (vgl. [Kapitel 3.6](#)) ermöglicht noch keine virtuelle Inbetriebnahme. Unverzichtbar sind die Anpassung und Optimierung der bestehenden Anlagenentwicklungsprozesse, sowie die Etablierung neuer Design- und Validierungsmethoden, welche die Möglichkeiten der virtuellen Immersion zu einer effizienteren Entwicklung führen.

Davon ausgehend, dass die Entwicklung mit dem Auftrag eines Kunden beginnt, werden die Detaillierungsgrade des Designs bis hin zur virtuellen und realen Inbetriebnahme mit dem Kunden besprochen. Dabei verlangt der Einsatz eines Baukastensystems eine Etablierung eines parallelen Vorgangs zur kontinuierlichen Pflege und Erweiterung des Baukastens (→ **Abb. 16**).

Für die Integration von Komponenten in den Baukasten können dabei verschiedene Strategien gefahren werden. Anhand einer vorangehenden Analyse sollte das unternehmensspezifische Modularisierungspotential der Anlagen untersucht werden, um eine effiziente Gleichteil- und Baureihenebene zu identifizieren. Baukastenelemente können Normteile, Standardkomponenten oder im Sinne von Baureihen [[Feldhusen und Grote, 2013](#)] statische, parametrisierte oder algorithmisch erstellte Variantenbauteile darstellen, welche sich entsprechend des Entwicklungsbedarfs anpassen lassen.

Pflege von Baukastenelementen



Anlagenentwicklung im Kundenauftrag



Abb. 16 Allgemeiner prozessualer Ablauf der Anlagenentwicklung mit virtueller Inbetriebnahme

3.4.1 Einsatz des Baukastens im Anlagenentwicklungsprojekt

Die Entwicklung einer Anlage, auch in Verbindung mit virtueller Inbetriebnahme, erfolgt i. d. R. in Projektform. Dabei wird der Anlagenentwicklungsprozess in der Vorgehensweise des Projekts abgebildet. Auch ist das grundlegende Vorgehen der Entwicklung nicht anders als bei der klassischen Anlagenentwicklung. Der Unterschied entsteht im Detail der einzelnen Entwicklungsschritte. Dabei ermöglicht die Verwendung des Baukastens eine Beschleunigung der Entwicklung in der frühen Projektphase. Durch die Bereitstellung von Modell- und Simulationsdaten können schnell simulationsfähige Anlagenmodelle, schon in der Konzeption, definiert werden. Im Nachfolgenden wird auf die einzelnen Schritte der Anlagenentwicklung eingegangen.

Konzeption und Auftragsanbahnung

Davon ausgehend, dass die Entwicklung mit dem Auftrag eines Kunden beginnt, werden die Anlagenfähigkeiten und Detaillierungsgrades Designs bis hin zur virtuellen und realen Inbetriebnahme mit dem Kunden besprochen. Dabei werden Meilensteine zur Lieferung von Deliverables und Absprache von Designs sowie die Konfiguration der Anlage verabredet.

Die Konzeption lässt sich nach Lotter [Lotter und Wiendahl, 2006] in mehrere Teilschritte mit spezifischen Aufgaben unterteilen: Anforderungsliste, Produktanalyse, Montageablaufanalyse, Funktionsanalyse, Taktzeitermittlung, Layoutplanung, Personalbedarfsbestimmung, Verfügbarkeitsermittlung und schließlich die Erstellung des Lasten- und Pflichtenhefts (→ **Abb. 17**). Üblicherweise sind über die Konzeption Iterationen notwendig um die Einhaltung der Kundenanforderungen zu gewährleisten. Der Ansatz des VIB-SHP fokussiert in dieser Phase insbesondere auf die Schritte der virtuellen Layoutplanung, Detaillierung und Absicherung.

Zunächst erfolgt auf Basis der Kundenabsprache die Erstellung einer Anforderungsliste, welche wesentliche Eckdaten der Anlage festlegt (bspw. Lebensdauer, Produktionsmenge, Budget). Auf Basis dessen lassen sich unter Berücksichtigung standortspezifischer Schichtmodelle Nutzungsdauer und -grad des Systems bestimmen.

Fortsetzend erfolgt die Analyse des betrachteten Produkts um Fügevorgänge, Komponentenzahl, Qualitätsansprüche, Handhabbarkeit etc. zu ermitteln. Ziel ist es, die notwendige Bereitstellung, das Automatisierungspotential und die Qualität der Komponenten und Systeme zu ermitteln. Dies stellt gleichzeitig die grundlegende Auswahl im Baukasten dar. Je nach Entwurfsvariante werden verschiedene Komponenten zu einer möglichen Anlage zusammengeführt.

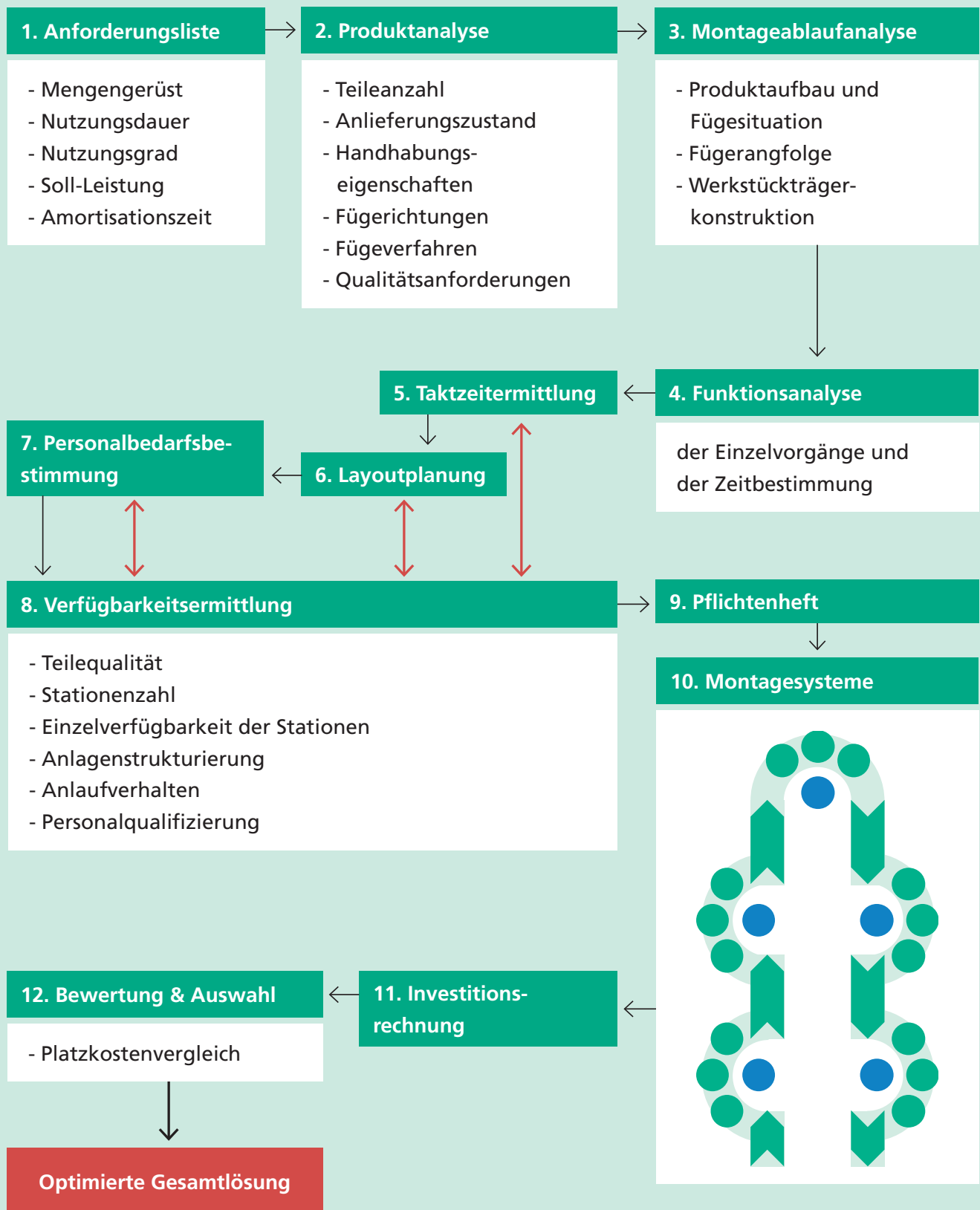


Abb. 17 Planungssystematik nach Lotter [Lotter, 1992]

⁶ In der Montagepraxis ist weitgehend das MTM-Verfahren üblich. MTM ist die Abkürzung von Methods-Time Measurement, was mit Methodenzeit-Messung übersetzt werden kann. Methodenzeit bedeutet nach der Definition der MTM-Vereinigung, dass die bei der Durchführung einer bestimmten Arbeit beanspruchte Zeit von der gewählten Methode der Tätigkeit abhängt. MTM gliedert sämtliche Bewegungsabläufe in Grundbewegungen. Diesen sind Normzeitwerte zugeordnet, die in ihrer Höhe durch bestimmte, zu erfassende Einflussgrößen variieren. Lotter and Wiendahl [2006].

Auf Basis dessen erfolgt die Montageablaufanalyse. Im Rahmen dieser werden mögliche Produktionsabläufe und damit verbundene Fügefolgen ermittelt. Mit dieser können anschließend die notwendigen Werkstückträger bestimmt sowie die Funktionsanalyse durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Analyse werden die notwendigen Einzelmontagevorgänge in Funktionsfolgen (Folgen von Ordnen, Zuführen, Fügen, Prüfen) aufgestellt und die benötigte Zeit ermittelt. Für automatisierte Vorgänge werden Richtwerte oder Simulationen verwendet, für manuelle Montagen können Abschätzungen anhand des [MTM](#)⁶ durchgeführt werden. Durch die in den Baukastenelementen verknüpften Simulationsmodelle kann die Montageablaufanalyse durch Simulationen deutlich einfacher unterstützt werden. Durch das Verhältnis von Verfügbarkeit zum Mengengerüst und Nutzungsdauer (Soll-Leistung) lässt sich im Folgenden die Taktzeit des Systems ermitteln.

Ein weiterer Aspekt bei der Anlagenentwicklung ist die Sicherheitstechnik, zu welcher anlehnend an Richtlinien des Kunden auch Gesetze und vorgeschriebene Normen zählen. Dabei werden Sicherheitskonzepte erarbeitet, bei welchem unter anderem die Notaus-Schalter, Schutzzäune, Scanner und sonstige Schutzeinrichtungen definiert werden. Ebenfalls werden die unterschiedlichen Sicherheitskennzeichnungen, wie beispielsweise der Verweis auf das Tragen von Sicherheitsschuhen oder Warnungen über Laserstrahlen, in einem Sicherheitskonzept dargestellt. Auch die Erstellung einer Risikoanalyse über die zu entwickelnde Anlage zählt zu der allgemeinen Anlagensicherheit. Im Rahmen des Baukastensystems können diese Sicherheitskonzepte abgebildet werden. Eine Besonderheit ist dabei die Absicherung der Sicherheitskonzepte. Durch die Begehung in der virtuellen Szene lassen sich Interaktionen mit dem Sicherheitskonzept überprüfen. Dabei können sowohl Reaktionen von Lichtschranken wie auch die Erreichbarkeit von Manipulatoren überprüft werden. Im zunehmenden Szenario kooperativer Arbeiten mit Leichtbau-Robotern können Reaktionen auf ungewollte Kollisionen des Manipulators und des gesamten Anlagensystems überprüft werden.

Ebenfalls werden in der Konzeption Ergonomiebetrachtungen durchgeführt. Die Ergonomie wird bewertet durch die Ausführbarkeit, Erträglichkeit, Zumutbarkeit, Zufriedenheit und Persönlichkeitsförderlichkeit. Verschiedene Personen besitzen verschiedene Eigenschaften und Fähigkeiten bedingt durch Alter, Geschlecht oder Anatomie. Darunter fallen beispielsweise Körperabmessungen, Körperkraft oder der Übungsgrad. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass alle am gleichen Arbeitsplatz arbeiten. Daher ist es notwendig, ergonomisch wertvolle Arbeitsplätze zu gestalten, die in einem vorgegebenen Körpergrößenbereich liegen und an einen „durchschnittlichen“ Menschen angepasst sind. Die individuelle Streuung der Körpermaße, sollte bei Stichproben dabei einer Normalverteilung entsprechen. Die Komplexität der Ergonomie zeigt daher, dass diese Betrachtungen schon früh im Anlagenentwicklungsprozess zu berücksichtigen sind. Durch die Begebarkeit der Anlage im virtuellen Raum können Entwickelnde nun wesentlich umfassender die Auswirkung der getroffenen Gestaltungsentscheidungen überprüfen. Etwaige Hindernisse in Montageabläufen, Erreichbarkeiten und Fügbarkeiten lassen sich,

im Besonderen durch die haptische Simulation, genauer überprüfen. Ferner lassen sich durch die nachvollziehbaren Bewegungsbahnen Energiebetrachtungen der Montagevorgänge durchführen.

Somit sind alle notwendigen Informationen zur Gestaltung eines Layouts gegeben. Dabei werden mögliche Varianten der Anordnung von Montageanlagen und -arbeitsplätzen unter Berücksichtigung von Materialfluss und Materialbereitstellung festgelegt und hinsichtlich den Kundenprämissen und Anforderungen in ihrer Qualität beurteilt. Mit einem Layout und der Funktionsanalyse lassen sich nun die Personalbedarfe bestimmen, die sich in Überwachungs- und Montagetätigkeiten unterscheiden. Die simulierten Konzeptvarianten werden zueinander verglichen und in Berichten, auch gegenüber dem Kunden dargestellt. Durch die frühe Virtualisierung der Anlagenvarianten kann der Kunde Unterscheidungs- und Performancemerkmale deutlich leichter verstehen, als in bisherigen Berichten.

Im nächsten Schritt der Verfügbarkeitsanalyse werden Teilqualität, Stationsanzahl, Einzelverfügbarkeit der Stationen, Anlagenstruktur, Anlaufverhalten und Personalqualifizierung betrachtet, um eine gleichmäßige Verfügbarkeit des Montagesystems sicher zu stellen. Sind notwendige Iterationen und Variantenvergleiche durchgeführt und mit dem Kunden abgestimmt wird ein Pflichtenheft erstellt, welches die zu entwickelnde Anlage in Taktzeit, Tätigkeiten, Struktur, Vorfeldanforderungen etc. beschreibt.

Entwicklung und Auftragsvergabe

Auf Basis des Pflichtenhefts erfolgt die Entwicklungsfreigabe seitens des Kunden. Mit dieser beginnen die einzelnen Gewerke die weiteren Detaillierungen der Anlagenkomponenten auf Basis aktueller Produktdaten. Änderungen der Produkte zur Konzeptphase können durch farbliche Markierungen, beispielsweise durch Rot-Grün-Vergleiche, aufgedeckt und umgesetzt werden. So werden beispielsweise die Konstruktionen finalisiert und die unterschiedlichen Anlagenbereiche simulativ abgesichert.

Teil dieses Anlagenkonzeptes sind im Weiteren technische Aspekte, die zuvor konzeptioniert wurden, wie die Montagereihenfolge und der Materialfluss und deren Absicherungen anhand Materialflusssimulationen. Durch diese Materialflusssimulationen wird unter anderem auch die Pufferfläche und -größe bestimmt. Das Anlagenkonzept wird ergänzt um Handlungsaspekte, stationsspezifische Aspekte und Einzelkomponenten und deren Toleranzen in Oberflächen und Abmaßen. Dazu zählt auch die Erstellung verschiedenster Konzepte zum Ein- und Ausschleusen von Komponenten zu Qualitätsüberprüfung, Konzepte zum Warten und Instandhalten der Anlagen, sowie Planung der Behälteranstellungen.

Zu der Anlagenkonzeption zählt auch ein grob konzeptionierter SPS-Ablauf. Hierbei zeigt sich der große Vorteil des Baukastensystems. Durch den hohen

Detaillierungsgrad der bereitgestellten Modelle ist die notwendige Nacharbeit, verglichen zu Neukonstruktionen geringer. Durch Konstrukteure, Elektrotechniker und SPS-Programmierer werden die notwendigen Anpassungen für das Pflichtenheft vorgenommen.

Die Stücklisten und Modelle der jeweiligen Konstruktionen können schlussendlich aus dem PLM-System anhand von CAD-Strukturen, Verhaltensmodellen und ECAD-Modellen automatisch generiert werden. Hinzu kommen eine detaillierte Anlagenbeschreibung, Ablaufbeschreibung der unterschiedlichen Prozesse, sowie eine Erstellung einer Anlagendokumentation und Betriebsanleitung. Des Weiteren werden finale Berechnungen der Medienversorgungen erstellt (bspw. Pneumatikpläne) und in der Anlage berücksichtigt. Weiterhin werden in der Detaillierungsphase die jeweiligen Lieferanten koordiniert und die Betriebsmittelbeschaffung anhand eines erstellten und freigegebenen Mengengerüsts organisiert, um einen rechtzeitigen Anlagenaufbau zu realisieren. Dabei werden alle Entwicklungsdaten im PLM-System verwaltet, sodass sichergestellt wird, dass eine Abstimmung der Gewerke stets auf den aktuellen Entwicklungsdaten erfolgt. Gleichzeitig ermöglicht die Informationsverfügbarkeit und -verknüpfung eine frühzeitige virtuelle Inbetriebnahme. Dafür können ad-hoc Simulationen durchgeführt werden um die Abstimmung der Gewerke zu überprüfen.

Im Rahmen der (Kunden-)Design-Reviews kann die virtuelle Inbetriebnahme durchgeführt werden. Dabei ermöglicht der deutlich erhöhte Grad der Immersion eine vereinfachte und erweiterte Möglichkeit der Fehleridentifikation. Durch den realistischen Eindruck der Anlage und ihres Verhaltens können Problemstellen schneller identifiziert werden. Besonders die im zweidimensionalen Raum schwierige Einschätzung von Dimensionen bspw. für die Erreichbarkeit von Komponenten, die Freigängigkeit von Klappen und Türen, Montage- und Pflegehandlungen, Durchgangsbreiten, Manövrierungsräume für die Anlieferung von Halbzeugen, Ergonomiebetrachtungen und Sicherheitseinrichtungen können im dreidimensionalen Raum weitaus intuitiver und umfassender eingeschätzt werden.

Durch die Möglichkeit haptischer Interaktionen können neben der Ergonomie auch die Montagevorgänge untersucht werden. Dabei können Ermüdungserscheinungen und die Effizienz der Bewegungen abgebildet werden.

Virtuelle Inbetriebnahme

Mit der Fertigstellung der Entwicklung beginnt die Phase der virtuellen Inbetriebnahme. Hierfür ist in allen Gewerken ein erster finaler Stand, ggf. in Teilen der Anlage, erreicht worden. Durch die Kopplung der Modelle im gemeinsamen Produktdatenmodell lässt sich die Inbetriebnahme unter deutlich reduzierten Aufwänden ausführen. Dabei kann die reale SPS-Steuerung an die Verhaltenssimulation der Anlage gekoppelt werden. Somit kann sichergestellt werden, dass die verwendete SPS das erwartete Anlagenverhalten umsetzt. Gleichzeitig

ermöglicht die virtuelle Inbetriebnahme eine vollständige Absicherung der Anlage noch bevor die Anlagenkomponenten gefertigt werden bzw. der Auftrag zur Fertigung erteilt wurde.

Durch die Möglichkeit die Anlage bereits virtuell besichtigen zu können, können Anlagenbediener und Wartungspersonal vorab die Erreichbarkeiten verschiedenster Komponenten überprüfen. So können Anlagenbediener beispielsweise die Erreichbarkeiten von manueller Spanntechnik oder Wechselvorrichtungen überprüfen. Auch können kritische Montagearbeiten auf deren Durchführbarkeit kontrolliert werden. Gleichzeitig kann das zukünftige Montagepersonal in der virtuellen Umgebung trainiert und an die neuen Arbeitsabläufe herangeführt werden.

Letztlich ermöglicht die virtuelle Inbetriebnahme die in der realen Inbetriebnahme notwendige Zeit deutlich zu reduzieren. Die bestehenden Risiken einer Rekonfiguration können durch die vorauslaufenden Design-Reviews, Simulationen und Absicherungen deutlich reduziert werden.

Begleitend zur finalen virtuellen Inbetriebnahme erfolgt die Integration der mechanischen Komponenten und die protoypische Montage von Teilsystemen der Anlage.

Reale Inbetriebnahme

Basierend auf der virtuellen Inbetriebnahme wird die Anlage nach Beschaffung und (Teil-) Montage beim Kunden aufgebaut und in Betrieb genommen. Die hergestellten Anlagenkomponenten werden entsprechend der Planung montiert und verkabelt. Darüber hinaus wird ein Abgleich zwischen der realen und der virtuellen Anlage mithilfe einer Anlagenmessung (Einhaltung der durch Anforderungen bestimmten Leistungsparameter) durchgeführt. Differenzen werden in der virtuellen Welt eingepflegt. Die SPS, welche das Anlagenverhalten steuert, kann dabei aus der virtuellen Inbetriebnahme übernommen werden, sodass die notwendige Zeit für eine Inbetriebnahme auf der Baustelle beim Kunden deutlich reduziert wird.

3.4.2 Pflege des Baukastens

Parallel zu den Entwicklungsprojekten muss der Baukasten in seinen Komponenten gepflegt werden. Je nach Unternehmen entsteht daraus eine neue Rolle, die ein Mitarbeiter wahrnimmt oder - bei sehr umfangreichen Baukästen – eine Organisationseinheit. Dabei werden entwickelnde Gewerke des Entwicklungsprojekts berücksichtigt. Mitarbeiter der Mechanik, Elektrik und SPS-Programmierer verantworten gemeinsam die Qualität der bereitgestellten Modelle. Grundsätzlich lässt sich die Baukastenpflege in drei Schritte unterteilen. Die Bedarfsermittlung, die Gestaltung und schließlich die Freigabe der Komponenten.

Bedarfsermittlung

Die initiale Befüllung des Baukastens hängt stark von der Anlagengestalt und dem bisherigen Vorgehen der Entwicklung ab. Beispielsweise sind jene Komponenten zu berücksichtigen, welche in mehr als einem Entwicklungsprojekt enthalten sind. Dabei sollten auch solche Komponenten berücksichtigt werden, die in Varianten verwendet werden (bspw. Längen von Fördertechnik).

Im weiteren Verlauf werden in den Entwicklungsprojekten neue Komponenten entwickelt. Diese neu entwickelten Komponenten bieten stets das Potential einer Mehrfachverwendung, die grundsätzlich anzustreben ist, um Synergien zur Verkürzung der für die Produktentwicklung notwendigen Zeit zu nutzen. Die Abteilung steht in der Verantwortung die entwickelten Anlagen zu sichten und im Potential für eine Weiterverwendung der Komponenten zu untersuchen. Dabei sollten geeignete Aufstellungen bereits vorhandener Komponenten vorliegen, sowie eine gute Übersicht der zuletzt entwickelten Anlagen Verwendung finden. Dabei können einheitliche Produktstrukturen und Benennungen die Arbeit deutlich vereinfachen.

Letztlich erfolgt die Bedarfsermittlung auch im Kontakt mit dem Einkauf. Sollten Komponenten von Zulieferern nicht mehr verwendet werden dürfen, so müssen diese aus dem Baukasten entnommen werden. Auf gleiche Weise müssen neue Zulieferer in das Portfolio aufgenommen werden und die zu verwendenden Komponenten im Baukasten bereitgestellt werden.

Gestaltung

Die Gestaltung der Anlagenkomponenten erfolgt auf die gleiche Weise wie im Anlagenentwicklungsprozess. Es können auch Anlagenkomponenten aus Auftragsprojekten, ggf. mit Anpassungen, übernommen werden.

Freigabe

Die Freigabe der Anlagenkomponenten spielt im modularisierten Anlagenbau eine besondere Rolle. Die Absicherung der Funktion des Moduls gegenüber allen freizugebenden Einsatzzwecken verlangt eine umfassende Erfahrung des verantwortlichen Ingenieurs / Teams. Es ist zu berücksichtigen, dass die Randbedingungen des Einsatzes nachvollziehbar für die späteren Verwender dokumentiert sind und der Aufbau der Komponente entsprechend der Richtlinien nachvollziehbar erfolgt ist. Dabei müssen auch die verwendeten Freiheitsgrade und Signale (vgl. [Kapitel 3.5.3](#)) berücksichtigt werden.

Bei der Verwendung der Baukastenkomponenten wird im PLM-System ein Verwendungsnachweis zwischen dem Entwicklungsprojekt und der Komponente erstellt. Auf diese Weise lassen sich Reversionierungen der Komponenten auf die Verwendung in derzeit in der Entwicklung oder Revision befindlichen Anlagen prüfen.

3.5 IT-Systemarchitektur

Pascal Lünemann, Lucas Kirsch, Simon Kind, Waldemar Becker, Konstantin Könnecke und Jörg-Uwe Zuchold

Die virtuelle Inbetriebnahme verlangt auf Werkzeugebene eine hohe Durchgängigkeit der verwendeten und erstellten Information. Grundsätzlich ist dabei zwischen zwei Szenarien zu unterscheiden: Der vorbereitenden Phase, in der Autorensysteme dazu eingesetzt werden, Anlagenmodelle (MCAD, ECAD, SPS, Verhalten) zu erschaffen und diese im PLM-System verwaltet werden, sowie der darauf aufbauenden Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme. In diesem Szenario werden Informationen zwischen den an der Simulation beteiligten Systemen vermittelt (→ **Abb. 18**).

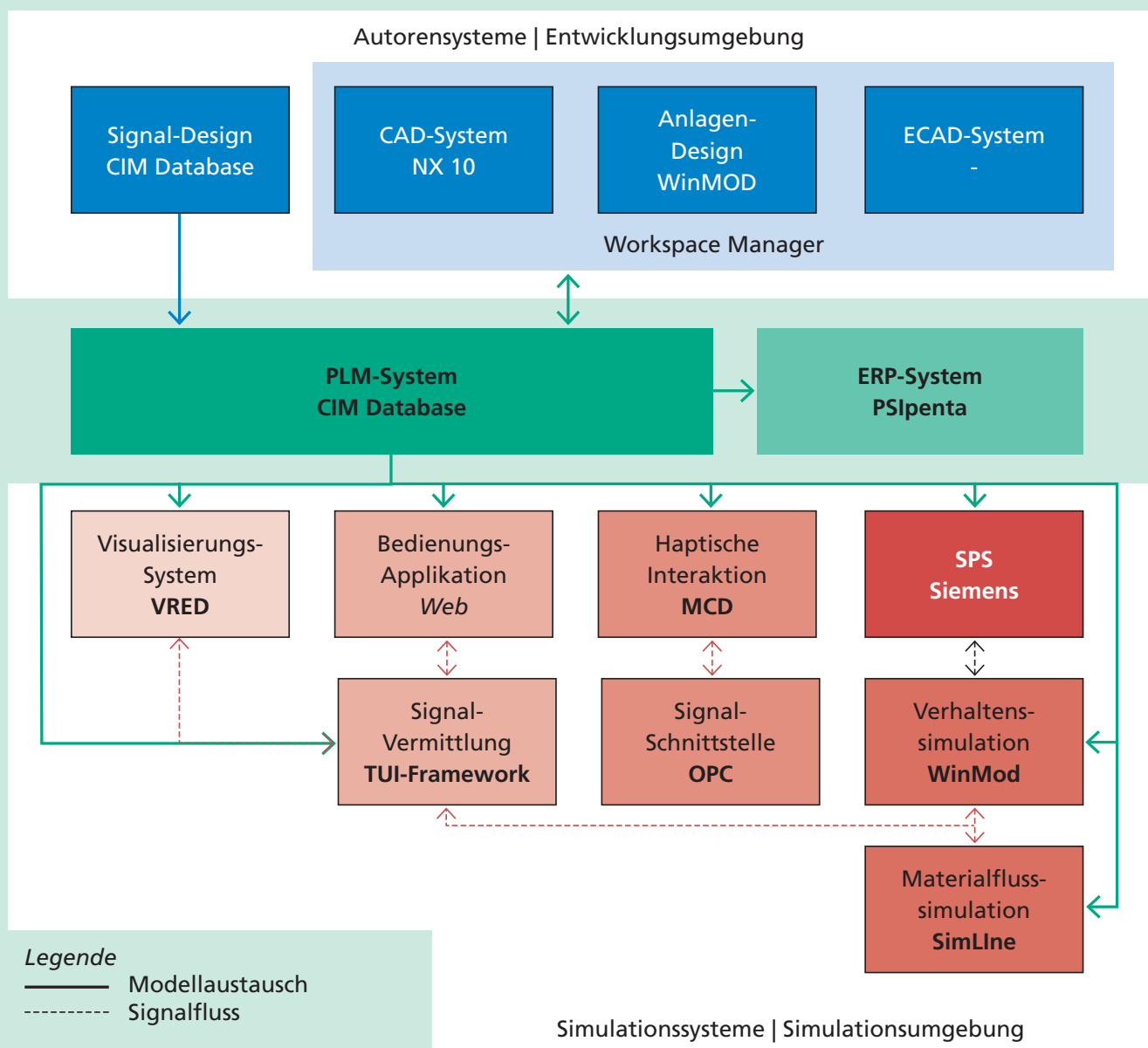


Abb. 18 Mögliche Systemwelt zur VIBN mit Smart-Hybrid-Prototyping

Die Entwicklungsumgebung besteht aus den Autorensystemen zur Definition der mechanischen, elektrischen und informationstechnischen Anlagenkomponenten. Dabei werden die Systeme über Workspaces im Workspace Manager an das PLM-System CIM DATABASE angebunden. Zur Verknüpfung der im Produktmodell definierten Freiheitsgrade mit den steuernden Signalen wird direkt im PLM-System gearbeitet.

Die Simulationsumgebung besteht aus Systemen zur Visualisierung, Signalmanipulation, haptischen Interaktion und Verhaltenssimulation. Die Verhaltenssimulation ist dabei mit einer Materialflusssimulation und der Speicherprogrammierbaren Steuerung verbunden. Untereinander kommunizieren die Systeme über das TUI-Framework, welches die Signale von der Verhaltenssimulation zur Visualisierung und haptischen Interaktion vermittelt. Dabei wird eine OPC-Schnittstelle [OPC Foundation, 2018] zwischengeschaltet. Die initiale Konfiguration der Simulationsumgebung erfolgt automatisiert durch das PLM-System. Die Produktstruktur, enthaltene Modelle und Signale werden an die Systeme verteilt und die Simulation vorbereitet. In den nachfolgenden Kapiteln wird detailliert auf die Funktionsweise der beteiligten Systeme in den Szenarien der Entwicklung und Simulation eingegangen.

Die Systemwelt zur virtuellen Inbetriebnahme (in Verwendung eines Baukastens und in Verbindung mit einem haptischen Feedback) vereint Autoren- (CAD, ECAD, etc.) und Simulationssysteme zu einem datendurchgängigen Framework. Im Rahmen dessen können virtuelle Absicherungen effizient und hoch automatisiert erfolgen.

Die Autorensysteme ermöglichen die Gestaltung der Anlage und ihrer Komponenten. Die Informationsversorgung erfolgt dabei über das PLM-System und den daran angebotenen Workspaces, in welchen das verwendete CAD-System zum direkten Datenaustausch mit dem PLM-System eingebunden ist. Produktkomponenten und Baugruppen können aus dem PLM-System in den Workspace geladen und so auf dem Client bereitgestellt werden. Zur Manipulation der Komponenten werden diese in einen Status der Bearbeitung übernommen und somit für Dritte in diesem Moment nicht veränderbar [Eigner, Koch und Muggeo, 2017a]. In selber Form ist das System zum Anlagen-Design WinMOD angebunden. Dieses wird verwendet, um das Verhalten von Anlagenkomponenten (Anlaufverhalten, Signalverhalten) abzubilden. Ferner ermöglicht der Workspace-Manager auch die Anbindung von ECAD-Systemen zur Modellierung der Verschaltungen der Steuer- und Energieversorgungen.

Die Verortung von Signalen auf Freiheitsgraden erfolgt direkt in der Produktstruktur im PLM-System (→ **Abb. 19**), die im Projekt aus der Struktur der M-CAD-Konstruktion ausgeleitet und mit dieser synchronisiert wird. Zur Modellierung dieses Zusammenhangs werden die Daten der Produktstruktur um Signalinformationen erweitert. Die Verortung wird direkt im PLM-System in Erweiterung der Metadaten vorgenommen.

Dabei wird einer konsequenten Logik gefolgt: Die mechanische Komponente, welcher ein Freiheitsgrad untergeordnet wurde bewegt sich relativ zu der ihr übergeordneten Komponente entlang des ihr untergeordnet Freiheitsgrades in Reaktion auf dessen untergeordnetem Signal.

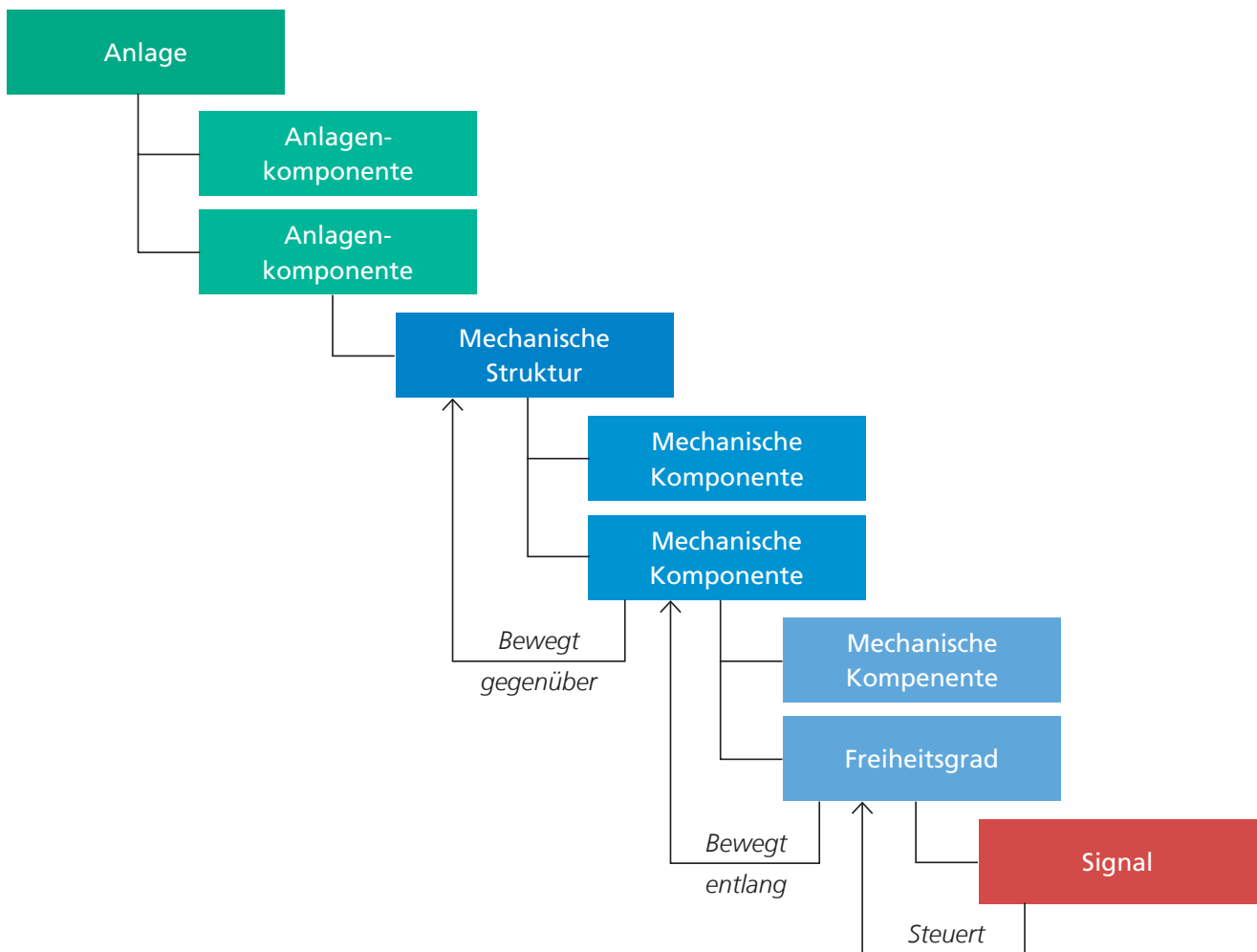


Abb. 19 Produktstruktur mit Freiheitsgrad und zugeordnetem Signal

Im Weiteren ist das PLM-System über eine spezielle Schnittstelle mit einem ERP-System verbunden. Das ERP-System verwaltet die monetären und logistischen Parameter des Anlagenentwicklungsprojekts und muss entsprechend dem Entwicklungsfortschritt aktuell gehalten werden. Der Austausch der Produktinformationen ist dabei an einen Workflow der Freigabe gekoppelt. Erst mit der Freigabe von Produktkomponenten erfolgt die Übergabe der Daten an das ERP-System. Zur Verknüpfung der Informationen wird im PLM-System eine eindeutige ID der Komponenten vorgehalten (vgl. [Kapitel 3.5.4](#)).

Die virtuelle Inbetriebnahme erfolgt in Verknüpfung mehrerer IT-Lösungen. Grundlage für die dafür durchzuführende Simulation des Anlagenverhaltens sind die Entwicklungsdaten, welche im PLM-System verwaltet werden. Für die Darstellung der virtuellen Inbetriebnahme ist ein leistungsfähiges Visualisierungssystem anzu-

binden, welches die Modelle bis hin zu fotorealistischen Darstellungen in einem begehbaren und interaktiven virtuellen Raum für den Anwender präsentiert. Für die Interaktion in der virtuellen Umgebung ist ggf. eine Anpassung oder Erweiterung des Visualisierungssystems notwendig. Möglich sind dabei Funktionen des Messens und Manipulierens der geometrischen Szene, Manipulationen der Steuerungssignale, Ein- und Ausblendungen von ERP- und PLM-Informationen etc.

⁷ „Für die Steuerung von Montagesystemen, die durch eine größere Anzahl von Ein- und Ausgängen am Steuergerät geprägt sind, ist der Einsatz von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) eine gängige Lösung. Die zu regelnde Maschine liefert Informationen, die nach bestimmten Kriterien ausgewertet werden. Mit einer Ausgabefunktion kann die SPS nach Bedarf Befehle an das Montagesystem senden. Um einen hohen Automatisierungsgrad zu erreichen, werden meistens zusätzliche Kommunikations- und Datenbankfunktionen mit integriert. Ein Mikroprozessor übernimmt die Koordination der einzelnen Funktionen. Dabei ist der interne Aufbau einer SPS mit dem eines Computers vergleichbar.“ Lotter and Wiendahl [2006].

⁸ Representational State Transfer: Programmierparadigma für verteilte Systeme (bspw. WEB) mit hoch standardisierten Schnittstellen zu anderen Architekturen T. Fielding [2000].

⁹ Y200: Shared Memory Schnittstelle: „Shared Memory ist ein vom Kernel verwalteter Speicherbereich, der von mehreren Prozessen gelesen und beschrieben werden kann.“ Wolf [2007].

Das Anlagenverhalten in Reaktion auf die Steuerung durch eine [SPS](#)⁷ wird durch ein entsprechendes Simulationssystem gewährleistet. Dieses Simulationssystem ist seinerseits an eine physikalische Simulation gekoppelt, welches den Transport der Montageträger /Werkstücke simuliert. Weiterhin ist, besonders in einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung auch abseits der virtuellen Szene eine direkte Manipulation der Signalparameter sinnvoll (bspw. zur Überprüfung des Verhaltensmodells in Kopplung mit den Signalstrecken).

Die Verknüpfung der verschiedenen beteiligten Systeme erfolgt auf Signalebene und durch die initiale Versorgung der Entwicklungsdaten.

Die Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme beginnt somit mit der initialen Konfiguration des TUI-Framework im TUI-Server. Hierfür wird eine XML-Struktur vom PLM-System an den TUI-Server vermittelt. In dieser enthalten sind eindeutige Identifikationen für die Steuersignale, die Signaltypen (Bool/ Float), die Signalquellen und -senken, die Minimal- und Maximalwerte sowie die Bewegungsform im Raum (Translation/ Rotation in X/Y/Z). Die Signal-Ports werden durch den TUI-Server bereitgestellt und die TUI-Clients entsprechend gestartet.

Zur direkten, simulationsunabhängigen Manipulation der Signale wurde eine Applikation entwickelt. Diese Bedienungs-Applikation wird anhand der TUI-Konfiguration automatisch eingerichtet und in der Gestaltung der Oberfläche berücksichtigt. Für jedes Signal werden dem Typ entsprechende Interaktionselemente (Binär-, Mehrzustands- und Kontinuitätsmanipulatoren) erzeugt. Ferner erfolgt eine Ordnung der Signale entsprechend der Produktstruktur, die über eine [REST](#)⁸-Schnittstelle vom PLM-System bereitgestellt wird.

Die Visualisierungsumgebung wird mit tesselierten Produktmodellen im JT-Format versorgt, welche bei der Ablage der MCAD-Modelle automatisch erstellt werden. Die Modelldaten wurden beim Ablegen der Modelle durch das CAD-System bereitgestellt. Durch ein Python-Skript werden die Signalinformationen des TUI-Frameworks mit der Produktstruktur im Visualisierungs-System verknüpft. Die Verhaltens- und Materialflusssimulation wird ebenso mit den Modelldaten versorgt. Gleichzeitig wird eine [Y200-Schnittstelle](#)⁹ entsprechend der TUI-Konfiguration eingerichtet. Bei diesem Verfahren liest und schreibt der TUI-Client auf zuvor festgelegte Bereiche des Arbeitsspeichers, während die Verhaltenssimulation in umgekehrter Weise die Bereiche schreibt und liest.

Die SPS wird mit dem Steuerungs-Code versorgt und in den Betriebsmodus versetzt.

Wie die Visualisierung und Verhaltenssimulation wird auch die haptische Interaktion mit den tesselierten Modelldaten versorgt. Die Kommunikation mit dem TUI-Framework erfolgt über eine standardisierte OPC-Schnittstelle. Über diese werden Manipulationssignale an den TUI-Server weitergeleitet.

3.5.1 TUI Framework

Haptische Geräte sind als „... System, das mit Objekten mechanisch interagiert, und dabei Informationen über die Raumlage sowie die wirkenden Kräfte [...] misst.“ definiert [Kern, 2009]. Zur Einbindung von haptischen Interaktionsgeräten in VR-Umgebungen, hat das Fraunhofer IPK ein Tangible User Interface Framework (TUI¹⁰-Framework) entwickelt und stellt dies unter der GNU-Lizenz der allgemeinen Öffentlichkeit zur Verfügung¹¹. Eine beispielhafte Konfiguration ist in → **Abb. 20** dargestellt. Das TUI-Framework ermöglicht eine Anbindung von Objekten an einen Server, welcher wiederum über ein Netzwerk mit verschiedenen Clients verbunden ist. Dabei ist eine bidirektionale Datenverbindung möglich.

¹⁰ TUI = Tangible User Interface

¹¹ <https://github.com/fraunhoferipk/tuiframework>

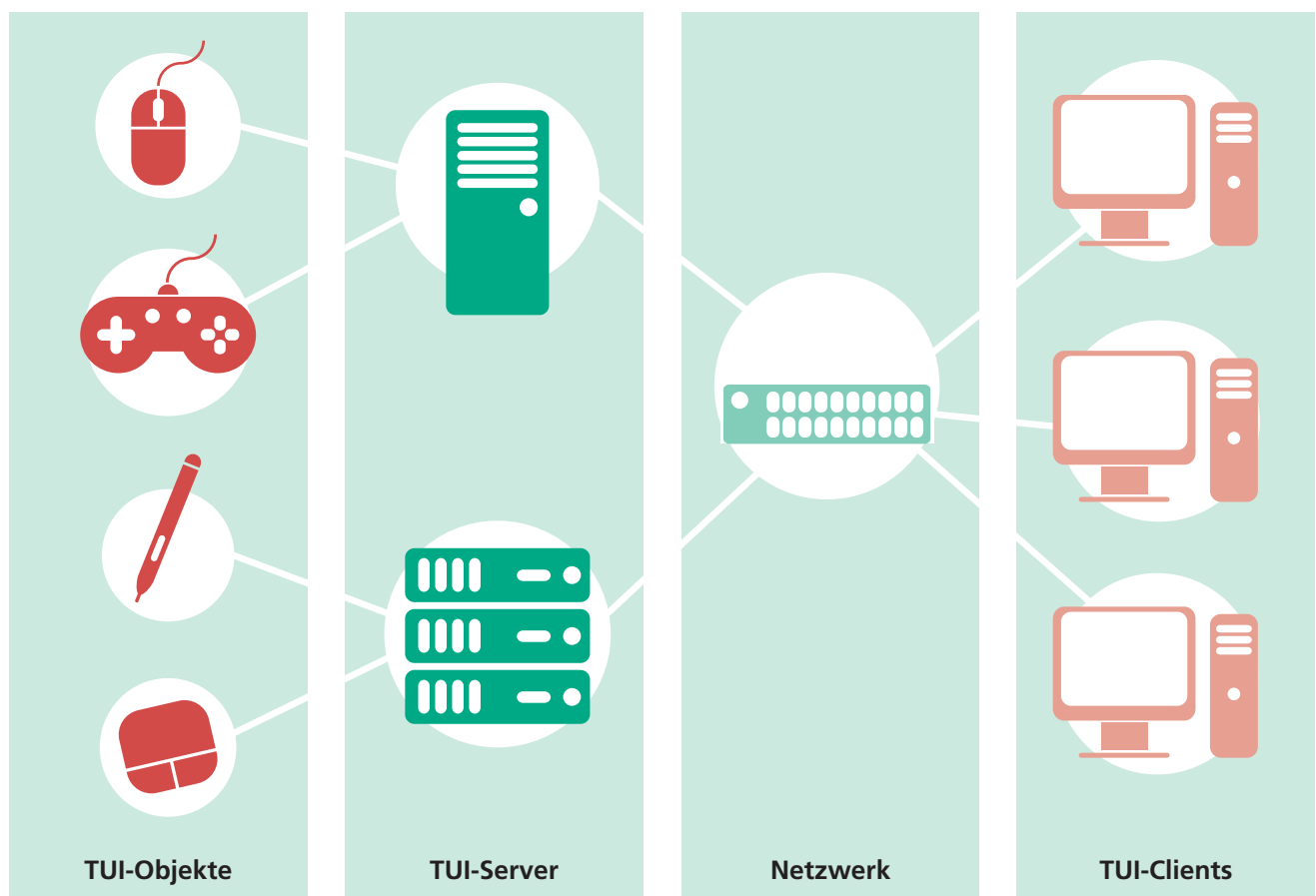


Abb. 20 Konfigurationsbeispiel (nach Belaifa, Israel, 2013)

Zur Anbindung der TUI-Devices (z. B. Tackingsystem, Controller, Buttons) an den TUI-Server werden Dynamic Link Libraries und dazugehörige XML-Dateien benötigt. Mit der Bereitstellung können sie durch eine graphische Oberfläche zu einer TUI-Szene verbunden werden. Durch das passende Verbinden von Ein- und Ausgängen und der Definition eines TUI-Objektes (konkrete Interaktionsgeräte, z. B. Controller + Tracking kombiniert) wird eine TUI-Szene erstellt. Diese kann als XML-Datei exportiert werden und wird als Konfigurationsdatei für den TUI-Server verwendet.

Sind die verschiedenen Klassen einmal erstellt worden, können diese einfach via „Drag and Drop“ zu neuen Szenen zusammengestellt werden. Dies ermöglicht ein extrem schnelles Aufbauen verschiedener Szenen mit unterschiedlichen Interaktionsgeräten. Die Anbindung von SHP-Interaktionsgeräten und der Signalaustausch zwischen WinMOD, SHP-Devices und der Visualisierung werden über das „TUI-Framework“ mittels der im Rahmen des Projektes definierten Erweiterungen realisiert. Die Informationen und Signalflüsse, welche zwischen den Systemen in der „Online-Kopplung“ / während der Simulation ausgetauscht werden, sind in → **Abb. 21** dargestellt.

Das TUI-Framework hat einerseits die Aufgabe, die Prozesssignale für die Manipulation der virtuellen Szene von WinMOD an die VR-Anwendung VRED zu übertragen, andererseits die SHP-Simulation und I/O-Signale der virtualisierten Anlage mit WinMOD, der virtuellen Szene und den Bedien- und Interaktionsgeräten zu koppeln. Die Architektur und der Informationsaustausch zwischen den Systemen ist in → **Abb. 22** dargestellt.

Für die Initialisierung einer VIBN müssen die beteiligten Systeme mit den Anlageinformationen versorgt werden. Hierfür werden das Verhaltensmodell und die Anlagengeometrie für [WinMOD](#)¹² und [VRED](#)¹³ bereitgestellt. In VRED wird die Geometrie in einen Szenegraph übersetzt, welcher die kinematische Kette der Anlage in zu sich relativ bewegte Teilsysteme übersetzt. Bei der Initialisierung des Modells kann eine konfigurierte Oberflächengestaltung der Anlage berücksichtigt werden. Parallel wird auf Basis der Anlagenstruktur, einschließlich der Freiheitsgrade und Signale, eine XML-Datei generiert, welche für die Konfiguration des TUI-Frameworks benötigt werden:

Um den Datenaustausch mit in WinMOD enthaltenen simulationsgesteuerten Signalen zu gewährleisten muss dem Framework mitgeteilt werden, welche Signale dabei bereitgestellt werden und von welchem Typ (bspw. Binär / Float) diese sind. Auf Basis dieser Informationen werden die Daten im zeitlichen Intervall in das TUI-Framework eingelesen. In der Weiterverarbeitung der Signale werden die simulationsgenerierten Daten in einem Python-Client zu Bewegungsinformationen transformiert. Dabei werden die Relativbewegungen der Transformationsknoten anhand eines durch das XML bereitgestellten Verhältnisses von Signal und Position in Verschiebungen zur Initialposition (Translation und Rotation) übersetzt und VRED zur Positionierung der Translationsknoten weitergegeben.

¹² Software für die virtuelle Inbetriebnahme und Verhaltenssimulation des Herstellers Mewes & Partner GmbH

¹³ Software für 3D Visualisierung vom Hersteller AUTODESK

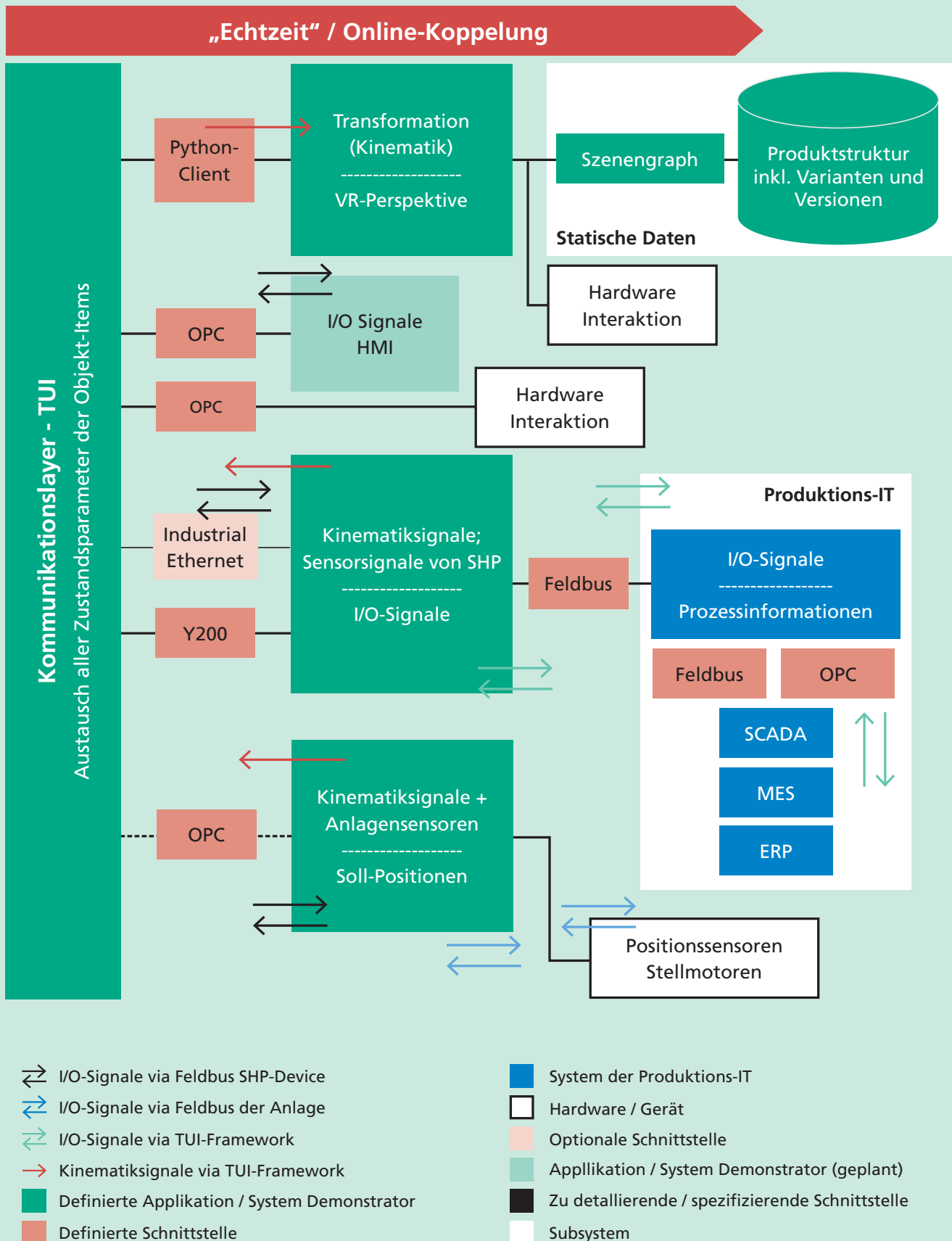


Abb. 21 Informations- und Signalflüsse zwischen den Systemen der „Online-Kopplung“

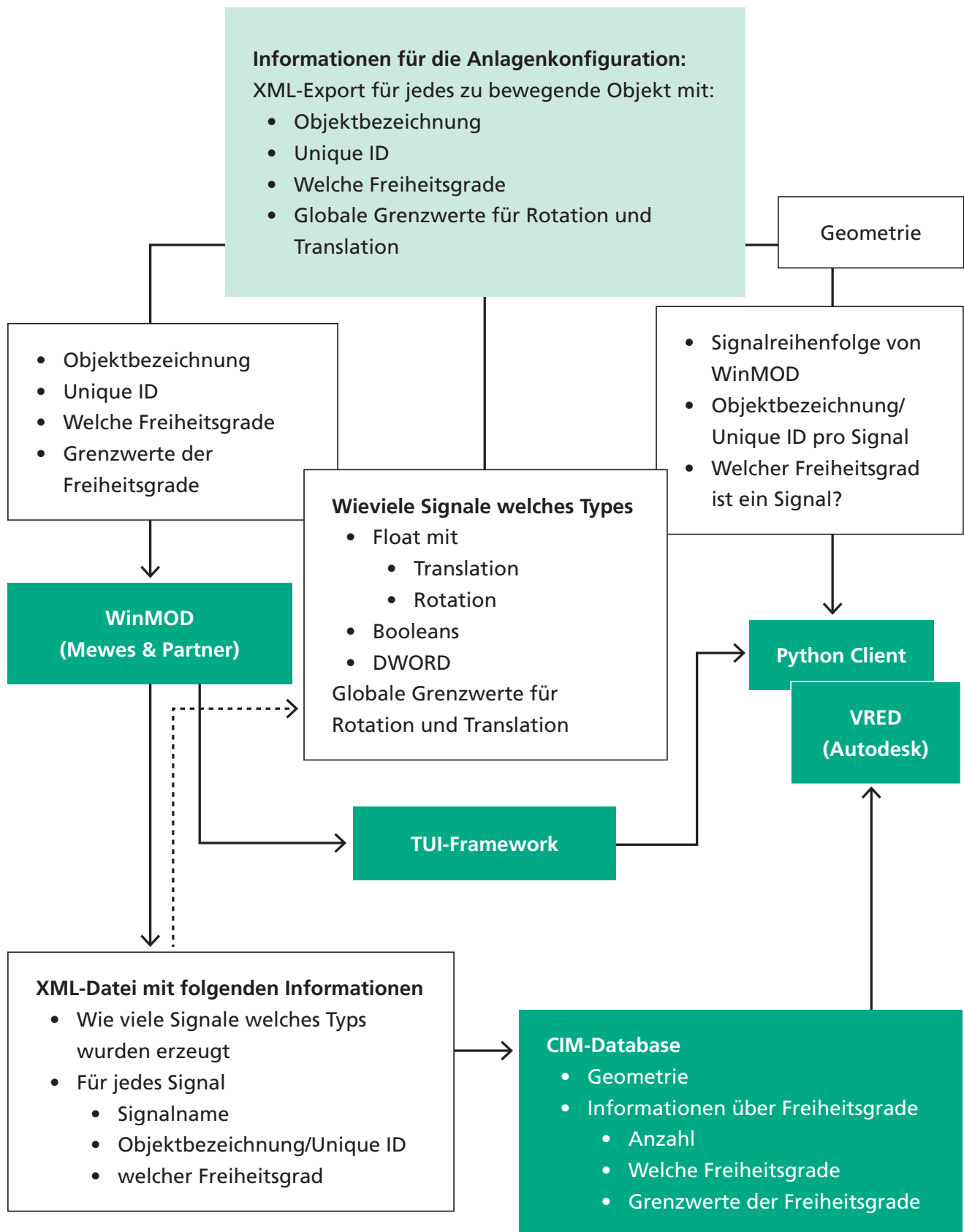


Abb. 22 Architektur und Informationsaustausch zwischen WinMOD, CIM-Database, dem TUI-Framework und der VR-Anwendung VRED

3.5.2 PLM-System

Das PLM-System nimmt in der Softwarearchitektur ([Kapitel 3.4](#)) eine zentrale Rolle ein. Es verwaltet die Elemente des Baukastensystems und seiner Partialmodelle sowie die im Entwicklungskontext benötigten Informationen und Modelle. Damit versorgt es die VIBN mit den benötigten Modellen und Daten.

Um den gesamten Entwicklungsprozess effektiv zu unterstützen, muss das PLM-System eine Vielzahl unterschiedlicher Schnittstellen bereitstellen. Die Entwicklung und die Wartung dieser 1:n Schnittstellen ist aus Sicht des PLM-Systemanbieters mit hohem Aufwand verbunden. Aus diesem Grund werden standardisierte Schnittstellen und Schnittstellenformate für den Austausch bevorzugt.

In → **Abb. 23** werden die verschiedenen IT-Systeme und die für die Schnittstellen genutzten Technologien aus Sicht des PLM-Systems CIM Database PLM abgebildet. Die Versorgung dieser Systeme erfolgt über drei grundlegende Schnittstellentechnologien die mit ihren Charakteristika den spezifischen Anforderungen der einzelnen Systeme gerecht werden.

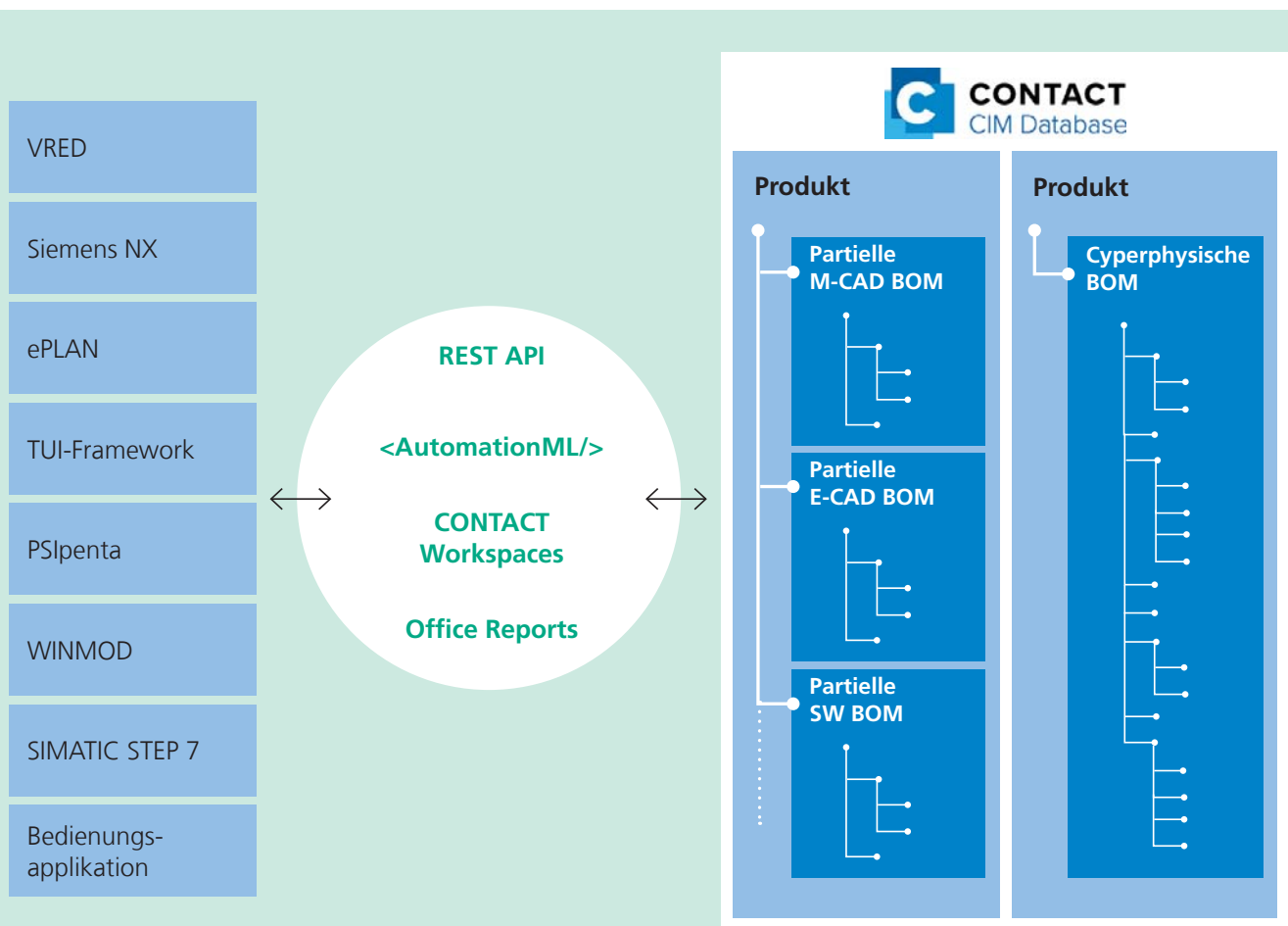


Abb. 23 Schnittstellen zum PLM-System

Die **AutomationML (AML)** als standardisierte Sprache mit einem XML-basierten Austauschformat bietet die Möglichkeit eine Anlage in einem konsistenten Modell zu beschreiben. Es erlaubt die gewerke- und werkzeugübergreifende Modellierung. Dazu zählen die Kinematik und Dynamik, die Topologie, die für die Automatisierungstechnik notwendigen Informationen sowie die dahinterliegenden Verhaltensmodelle. Die Architektur der AML muss daher die verschiedenen Aspekte wie Anlagenhierarchie, Geometrie, Kinematik, Ablaufplanung und Verhalten abbilden können. Kern der AML ist ein XML-basiertes Austauschformat. Es wird für die Modellierung und Speicherung von Objektbäumen genutzt und ist nach IEC 62424 standardisiert. Andere Aspekte mit hinreichend standardisierten Austauschformaten wie Geometrie, Kinematik und Verhalten werden in separate Dokumente ausgelagert. Diese sind in der XML-Datei referenziert. So bedient sich die AML beispielsweise für die Abbildung von Geometrie, Kinematik und Verhalten den Datenformaten COLLADA und PLCopen XML. [Drath, 2010]

Innerhalb der VIB-SHP VIBN wird das AML XML vom CIM Database PLM generiert. Wie in [Kapitel 3.6](#) beschrieben, sind dort alle entwicklungsspezifischen Informationen in Form der cyberphysischen Produktstruktur und der damit verknüpften Dokumente hinterlegt. Es wird primär genutzt, um damit WinMOD und Simline mit den notwendigen Informationen für die VIBN zu versorgen.

Representational State Transfer (REST) ist ein weitverbreitetes Architekturmodell für Webservices auf Basis von http-Befehlen GET, PUT, POST und DELETE zur Beschreibung, Änderung und Löschung von Ressourcen. Es ist primär für die Maschine zu Maschine Kommunikation geeignet und wird vor allem für die Kommunikation zwischen verteilten Anwendungen wie dem World Wide Web genutzt. Durch den objektbezogenen Austausch von Informationen können sehr dynamisch Inhalte zwischen zwei Anwendungen ausgetauscht werden. Damit eignet es sich hervorragend für die live Kommunikation zwischen dem PLM-System und der Bedienapplikation während einer VIBN in der VR-Szene. So können während der Begehung Informationen wie Komponentenstatus, Kosten, Lieferzeiten abgerufen werden. Auch können durch diese Art der Schnittstelle beispielsweise direkt Änderungsprozesse im PLM-System angestoßen oder Testprotokolle hinterlegt werden.

Der **Workspace Manager** als generische Schnittstellentechnologie der CONTACT Software GmbH ist in der Lage dokumentenzentrierte Informationen zwischen dem PLM-System und externen IT-Systemen auszutauschen. Durch zusätzliche IT-werkzeugspezifische Plugins werden Informationen innerhalb der Dokumente zugänglich und können ausgelesen sowie geschrieben werden. Dadurch werden Komfortfunktionen wie das Auslesen von Shaderinformationen aus den nativen Geometriedaten für die spätere Bereitstellung von speziellen Shadern für die Darstellung der virtuellen Szene in VRED möglich. Mittels des Workspace Managers werden Informationen für verschiedene IT-Systeme bereitgestellt.

Für VRED werden die Geometrieinformationen in Form von JT-Datensätzen bereitgestellt. Diese wurden vom CIM Database PLM eigenen Konverter aus den nativen 3D-CAD Datensätzen generiert. Zusätzlich stellt CIM Database für VRED benötigte VR-Shader, VR-Umgebungen und die Signalinformationen zu den kinematischen Knoten innerhalb der Modelle durch einen speziell ausgeleiteten Excel-Report auf Basis der cyberphysischen Produktstruktur zur Verfügung. Das TUI Framework wird durch einen über den Workspace Manager bereitgestellten Power Report mit den notwendigen Signalinformationen und ihren IT-Quellen und -Senken versorgt. Ebenfalls wird der SPS Quellcode durch den Workspace Manager bereitgestellt.

3.5.3 PLM-SCADA: Anlagenintegration mittels AML und OPC/UA

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Verwendung des cyberphysischen Produktdatenmodells – als AML-Export aus dem PLM-System in [MES](#)¹⁴/[SCADA](#)¹⁵-Systemen – auch in späteren Anlagen-Lebenszyklusphasen (für die Betriebsführung) genutzt werden kann.

Die Integration auf Basis von AML Anlagenbeschreibungen in ein MES/SCADA-System umfasst dabei die Identifikation von relevanten Informationen, sowie die Konvertierung in ein systemkonformes Datenformat. Dabei kann das AML Dokument einmalig als Konfigurationsbasis verwendet werden, oder zyklisch zum Update der Anlagenstruktur herangezogen werden. Da AutomationML darauf ausgerichtet ist den Engineering-Prozess in allen Phasen (Anforderungsanalyse, Architektur, Entwurf, Domäne-Entwicklung, Integration und Test sowie Abnahme) abbilden zu können, lassen sich auch beispielsweise für SCADA-Systeme relevante Verbindungsinformationen in die Anlagenbeschreibung integrieren. OPC/UA ist ein solcher moderner Kommunikationsstandard. Es nutzt ein Client-Server-Modell bei dem einzelne Feldgeräte eine Verbindung zum OPC Server aufbauen und ihre Daten dort in so genannte „Nodes“ eintragen, welche als Datencontainer fungieren. Vorteile der „Unified Architecture“ gegenüber der „Classic“-Version von OPC sind zum einen die Plattformunabhängigkeit und dass Nodes auch zusätzliche Informationen, sogenannte Metainformationen wie Einheiten, Faktoren oder Messbereiche enthalten können, welche Zielanwendungen die Interpretation der Daten erleichtern. Eine Kombination von Datenmodellstandards wie AutomationML und Kommunikationsstandards wie OPC/UA birgt großes Potential beispielsweise bei der Simulation bzw. virtuellen Inbetriebnahme von Anlagen, da ihre physische und logische Struktur und gleichzeitig kommunikationsrelevante Daten bereitgestellt werden können. In DIN SPEC 16592 werden Methoden solcher Integrationen vorgestellt, wobei der Fokus auf der Modellierung einer AutomationML Anlagenbeschreibung in einem OPC-Datenmodell liegt.

¹⁴ MES (Manufacturing Execution System): Prozessnahes Fertigungsmanagementsystem

¹⁵ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): IT-System zur Überwachung und Steuerung technischer Systeme

Im Rahmen einer Forschungsarbeit wurde eine Anlagenbeschreibung auf Datengrundlage von AutomationML Dokumenten und den darin integrierten OPC Verbindungsinformationen ausgelesen, extrahiert und in eine Zielanwendung überführt (→ **Abb. 24**). Konkret ist die Zielanwendung ein SCADA-System der Firma PSI. In dieser Arbeit ist ein Software-Tool zur universellen Interpretation, Modellierung und Verarbeitung von Datenformaten wie AML entstanden. Dieses Tool ist modular in Kern, Importer und Exporter unterteilt. Während das Kernmodul lediglich Steuerungsfunktionen im Konvertierungsprozess übernimmt und interne Datenmodelldefinitionen enthält, ist die eigentliche Funktionalität in den Importer- und Exportermodulen integriert. Diese können mittels bereitgestellter API-Schnittstellen applikationsspezifisch entwickelt und integriert werden. Als Standardablauf einer Konvertierung gilt für das Konvertierungstool, dass der Dateiimport von einer Datenquelle ausgeht und der Datelexport zu einer Applikation erfolgt. Allerdings ist durch Modifikation des Tools auch eine Umkehrung aus In- und Output-Quelle möglich. Ein besonderer Fokus bei der Entwicklung des Konvertierungstools liegt auf dem generischen internen Datenmodell, mit diesem lassen sich beliebig komplexe Strukturen abbilden und anschließend anhand spezieller Kriterien filtern. Jedes Objekt kann um beliebig viele Attribute erweitert werden. Diese können selbst wiederum komplexe Strukturen bilden. Zwischen den Objekten können uni- oder bidirektionale Verbindungen bestehen, welche ebenfalls mittels Attributen charakterisiert werden können. Der Einsatz eines solchen internen Datenmodells ist sinnvoll, wenn zwischen mehreren Datenformaten und der gleichen Zielapplikation bzw. zwischen einem zentralen Datenformat und mehreren verschiedenen Zielapplikationen kommuniziert werden soll, da sich in einem solchen Fall der Implementierungsaufwand für Kommunikationsinterfaces reduziert. Die konkrete Modellierung des internen Datenmodells findet durch Ausführen der „Import“-Funktion durch das Importer-Modul statt.

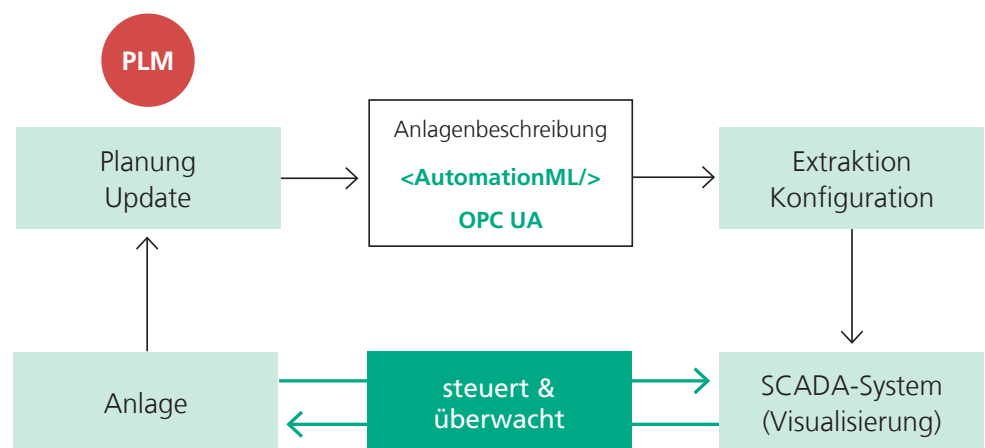


Abb. 24 Workflow zur Integration der AutomationML Anlagenbeschreibung in SCADA-Systeme

Für den Import einer im VIB-SHP-Projekt entstandenen Anlagenbeschreibung in AutomationML in das [PSIjscada](#)¹⁶ System wird diese zunächst um die notwendigen Verbindungsinformationen zu OPC/UA erweitert. Ein Standard-AML-Importermodul liest das Dokument ein und modelliert die Daten generisch in dem internen Datenmodell nach. Ein applikationsspezifisches Exporter-Modul extrahiert anschließend die OPC/UA Daten aus dem internen Datenmodell und bereitet diese für das PSIjscada-System auf. In einem Praxistest konnte so die WinMOD-Simulationsumgebung mittels einer AutomationML Anlagenbeschreibung im PSIjscada System automatisch konfiguriert werden (→ **Abb. 25**).

¹⁶ SCADA-Lösung für die Smart Factory vom Hersteller PSI Automotive & Industry GmbH

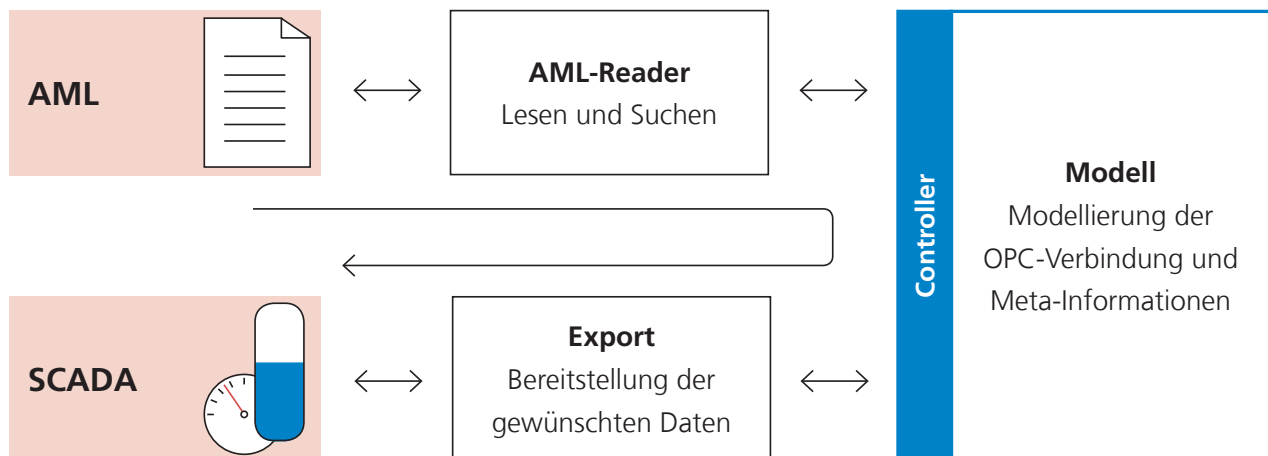


Abb. 25 Konvertierungsprozess des universellen Konvertierungstools

3.5.4 Betriebswirtschaftliche Daten (ERP-Daten)

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde das cyberphysische Produktdatenmodell definiert und es erfolgte eine Festlegung zur Verwaltung und Speicherung eben dieses Modells in einem PLM-System. Wie bereits im vorherigen Abschnitt dargestellt, finden sich in der betrieblichen Informationssysteme-Landschaft vielfältige Systeme, welche verschiedene Informationen zu dem cyberphysischen Produktmodell beisteuern können. In modernen Enterprise Resource Planning Systemen (ERP) wird eine Vielzahl von betriebswirtschaftlichen, kaufmännischen, aber auch produktionsrelevanten Daten verwaltet. Im Rahmen des Projekts wurde deutlich, dass solche Informationen auch für die Simulation und VIBN von Fertigungsanlagen wertvoll sein können. So können Daten zu Fertigungs- und Lieferzeiten sowie Kosten einzelner Baukasten-Elemente oder kompletter Fertigungs-Anlagen für den Entscheidungsprozess zwischen verschiedenen Varianten solcher Elemente von signifikanter Bedeutung sein.

Für eine Unterstützung dieser generellen Anforderung müssen etablierte Schnittstellen zwischen PLM- und ERP-Systemen erweitert werden. Dabei werden in diesem Anwendungsfall sowohl erweiterte Datenstrukturen als auch ein zusätzlicher Informationsfluss/Prozess benötigt.

Üblicherweise erfolgt die Speicherung von Anlagen als eine Struktur von Baukastenelementen oder hier Funktionsgruppen. Diese können im klassischen Sinne wie eine Stückliste verstanden werden. Eine einzelne Stücklistenposition entspricht demnach einer spezifischen Komponente (ein Baukastenelement / eine Funktion). Bei der Komposition einer neuen Fertigungsanlage ist es denkbar, dass bestimmte Elemente dieser Stückliste auf Basis von bestehenden Baukastenelementen ähnlichen Typs spezifiziert werden. Von diesen Muster-Elementen (auch Templates oder Vorlage-Artikel) können relevante kaufmännische Informationen aus dem ERP-System für eine erste Beurteilung herangezogen werden. Somit können bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt während der Konstruktion der Anlage im PLM-System relevante Daten aus dem ERP-System auf Basis der Vorlagenartikel genutzt werden. Für jene Baukastenelemente, welche nicht auf Basis einer Vorlage konstruiert werden, und für die somit keine ERP-Daten zu einem frühen Zeitpunkt vorliegen, werden im Laufe des Konstruktions- und Freigabeprozesses diese Daten aus dem ERP-System ermittelt. Hierfür erfolgt eine Übergabe der relevanten, neuen Baukastenelemente als Artikel an das ERP-System. In diesem werden dann die zusätzlichen, betriebswirtschaftlichen Daten erfasst und vor finaler Freigabe der konstruierten Anlage für die Simulation und VIBN im PLM-System erfolgt eine Abfrage der Daten aus dem ERP-System (→ **Abb. 26**).

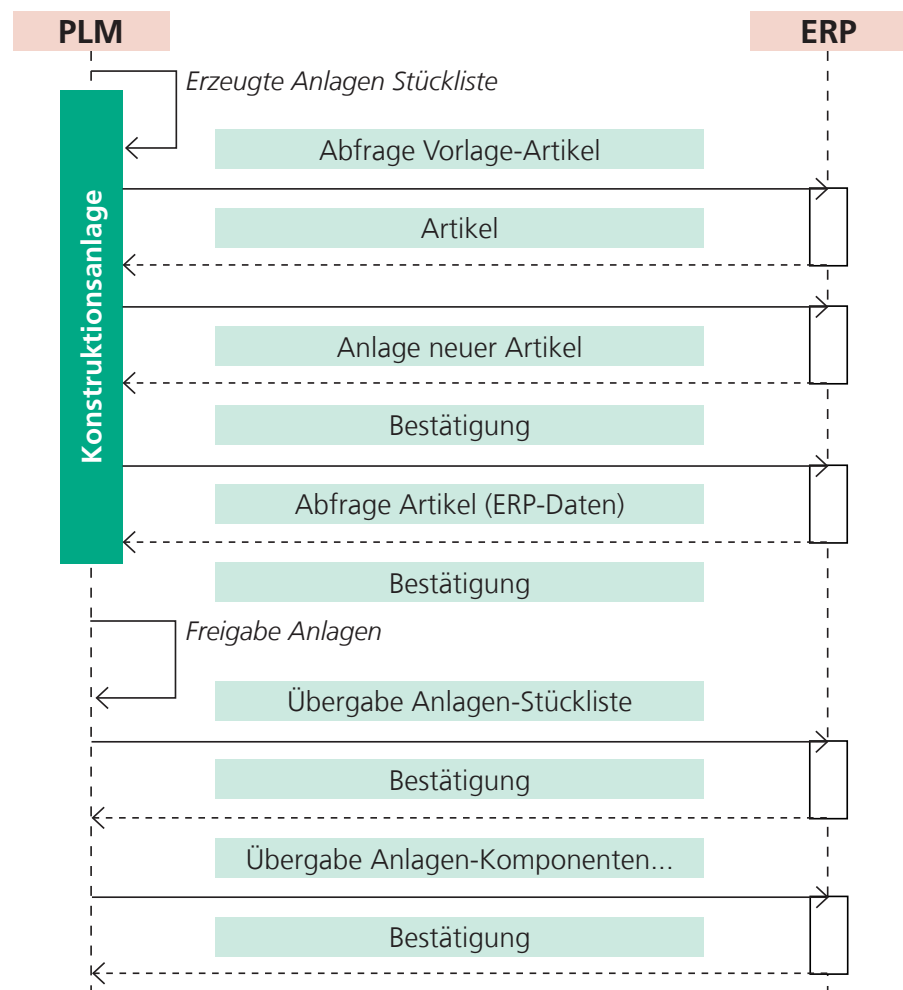


Abb. 26 Sequenz Schnittstelle PLM-ERP

Für die Unterstützung dieses Anwendungsfalls wurden die Schnittstellen des im Projekt verwendeten ERP-Systems PSIpenta erweitert. Die PLM-ERP-Schnittstelle basiert technisch auf der Bereitstellung von RESTful WebServices zum PSIpenta-System. Diese sind implementiert auf Basis von Jersey, der Referenzimplementierung der Spezifikation JSR 311: JAX-RS: The Java™ API for RESTful Web Services. Die Erweiterung umfasste dabei einerseits die Bereitstellung zusätzlicher Daten vom Business Objekt „Artikel“ (im Sinne eines Baukastenelements, einer Funktionsgruppe) wie Durchlaufzeiten, Beschaffungszeiten, Gültigkeiten und Kosten (→ **Abb. 27**). Hierbei wurde bewusst eine exemplarische Reduktion der vielfältigen Möglichkeiten zur Kosten und Zeit-Ermittlung für Artikel innerhalb des ERP-Systems vorgenommen.

Attribut	Feldtyp	Länge	Bemerkung
DLZ_WBZ	numerisch	5	WBZ = Wiederbeschaffungszeit für Fremdbezugsteile in Fabrikkalendertagen DLZ = Durchlaufzeit für Eigenfertigungsteile in Fabrikkalendertagen
ERSATZ_FUER_ARTIKEL	String	35	Angabe, welcher Artikel durch den vorliegenden Artikel ersetzt wurde.
ERSETZT_AB	String	8	Angabe, ab wann der Artikel durch den „Ersetzt-durch-Artikel“ ersetzt wird.
ERSETZT_BIS	String	8	Angabe, bis wann der Artikel durch den „Ersetzt-durch-Artikel“ ersetzt wird.
ERSETZT_DURCH_ARTIKEL	String	35	Angabe, welcher Artikel den vorliegenden Artikel ersetzt hat.
GUELT_DATUM	String	8	Gültigkeitsdatum in Abhängigkeit vom Gültigkeitskennzeichen
MD_GUELT_KZ	String	1	generell gültig: G generell ungültig: U gültig ab: + gültig bis: -
DURCHSCHNITTSPREIS	numerisch	12	Der gleitende Durchschnittspreis bezogen auf die Bestandsmengeneinheit mit der zugehörigen Preiseinheit.

Abb. 27 Zusätzliche ERP-Daten in PLM-ERP Schnittstelle

Weiterhin wurde die Schnittstelle funktional um die Möglichkeit der Anlage eines neuen Artikels auf Basis eines Vorlage-Artikels erweitert. Dabei wird der Vorlage-Artikel vom PLM-System über die bereits etablierten Schnittstellenprozesse ausgelesen und in der Konstruktion weiterverarbeitet und erweitert. Bei Abschluss der Konstruktion erfolgt eine Übergabe des neuen Artikels an das ERP-System unter Verwendung des eindeutigen Schlüssels des Vorgabeartikels. Im ERP-System wird dabei eine Kopie des Vorlageartikels erstellt und diese dann mit den Daten des neuen Artikels überschrieben. Nach Freigabe der Anlage im PLM-System erfolgt ggf. eine Übergabe der kompletten Anlageninformationen (Anlagen-Stückliste und Anlagen-Komponenten), zuzüglich ggf. notwendiger Dokumente (Zeichnungen, etc.).

Mit einer in dieser Form erweiterten PLM-ERP-Schnittstelle können kaufmännische Informationen/Daten aus ERP-Systemen frühzeitig im Anlagenentstehungsprozess für die Simulation und VIBN verwendet werden.

3.6 Das cyberphysische Produktmodell

Lucas Kirsch und Pascal Lünemann

Das cyberphysische Produktmodell als Weiterentwicklung des mechatronischen Produktmodells zeichnet sich durch seine hochgradig interdisziplinäre Zusammensetzung aus. Es ist für die Verwaltung von hochgradig vernetzten Produkten und Produktionssystemen mit besonders hohem Anteil an Software ausgelegt. Um die Entwicklung von Industrie 4.0 Produkten zu unterstützen werden im cyberphysischen Produktmodell eine Reihe von disziplinspezifischen Partialmodellen berücksichtigt, die im mechatronischen Produktmodell so noch kaum oder keine Berücksichtigung gefunden haben. Dazu zählt beispielsweise die modellzentrierte Verwaltung von Signalen oder die Integration von Verhaltensmodellen und Softwarekomponenten. Nun stellt sich die Frage:

→ *In welchem IT-System sollen cyberphysische Produktmodelle verwaltet werden?*

Innerhalb heutiger Unternehmen gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Autorenwerkzeugen und Daten- und Modellmanagementwerkzeugen, die die Informationen verwalten. → **Abb. 27** zeigt eine moderne IT Landschaft wie sie in heutigen Unternehmen vorherrscht. Dabei können unterschiedliche Autorenwerkzeuge direkt oder über ein Domain Data Management System, das für die spezielle Disziplin ein eigenes Datenmanagement bereitstellt, an das Engineering Backbone angebunden werden.

Bei Betrachtung der Abbildung und unter der Berücksichtigung, dass eine cyberphysische Produktstruktur interdisziplinären Charakter hat, kommen nur noch IT-Systeme aus der Ebene des Engineering Backbone als Antwort auf die Frage nach

einem geeigneten System für die Verwaltung einer cyberphysischen Produktstruktur in Betracht. Die in dieser Ebene gängigen PLM-Systeme bieten heute schon eine Reihe geeigneter Funktionen, um cyberphysische Produktstrukturen zu verwalten: Das **Dokumentenmanagement** ist auch im modellgetriebenen Entwicklungsprozess eine zentrale Funktion. Viele der heutigen Modelle werden noch nicht datenbankzentriert im Entwicklungsprozess gesichert, sondern in Form von einzelnen Dateien und Dokumenten. Ebenfalls ist ein vollständig modellbasierter Entwicklungsprozess – ohne Office-Dokumente und Co. – heute und in absehbarer Zukunft ohnehin nicht denkbar. Insbesondere die externe Kommunikation und das gesamte Vertragswesen basiert heute noch auf einer Vielzahl von Dokumenten [Eigner et al., 2017b].

Dokumente, Modelle und Modellartefakte bilden somit wichtige Informationseinheiten, oder auch Konfigurationseinheiten des Entwicklungsprozesses. Über den Entwicklungsprozess unterliegen sie einer stetigen Änderung. Diese Änderungen müssen durch ein geeignetes **Versionsmanagement** überwacht und gesteuert werden. [Eigner et al., 2017b]

Die Arbeit in verteilten Teams und eine globale Kollaboration bedingt ein gesteuertes und proaktives **Arbeits- und Kollaborationsmanagement**. Ziel ist es, den beteiligten Mitarbeiter standortunabhängig die richtigen Entwicklungsartefakte zur Verfügung zu stellen und Integrationsaufwände durch nicht gesteuerte parallele Änderungsvorgänge innerhalb des Entwicklungsprozesses zu vermeiden. Das kann durch „Lock-Modify-Unlock“ (oder auch „Pessimistic Locking“) oder ein „Copy-Modify-Merge“ (oder auch „Optimistic Locking“) geschehen. [Eigner et al., 2017b]

Wie in [Kapitel 3.1](#) beschrieben gewinnen kombinierte CTO und ETO Prozesse im Anlagenbau an Bedeutung. Ein regelbasiertes **Variantenmanagement**, das sowohl innerhalb des Baukastens als auch innerhalb des Entwicklungsprozesses das Binden von Varianz erlaubt ist in PLM-Systemen heute ohne große Entwicklungsaufwände zu implementieren.

Die Pflege von Baukastensystemen sowie der Anlagenentwicklungsprozess an sich benötigen ein **Freigabemanagement** von Entwicklungsartefakten. Das heißt, dass sie abhängig von ihrem Reifegrad unterschiedliche Status durchlaufen können und somit eine hohe Prozess- und Qualitätssicherheit gewährleistet ist. [Eigner et al., 2017b]

PLM-Systeme bieten heute auch schon eine Vielzahl an unterschiedlichen **Klassifizierungsmechanismen**. Eine der am weitesten verbreiteten Methoden ist die typische Sachmerkmalsleiste. Aber auch flexiblere Methoden der Klassifizierung sind heute denkbar. [Eigner et al., 2017b]

Einen hohen Mehrwert im Entwicklungsprozess stellt ebenfalls das voll integrierte **Projekt- und Prozessmanagement** dar. Bei erstem können durch klassische

Mechanismen wie Meilenstein- und Ressourcenplanung Entwicklungsprozesse effizient geplant und durchgeführt werden. Aber auch agile Methoden halten zunehmend Einzug in moderne PLM-Software. Prozesse können neben dem typischen Projektmanagement durch Methoden, wie beispielsweise ein Workflowmanagement teilautomatisiert werden. [Eigner et al., 2017b]

Diese Funktionalität bringen PLM-Systeme heute schon im Standard mit. In den Unternehmen sind heute oft sogenannte Legacy Systeme im Einsatz, die mit modernen PLM-Systemen nicht mehr zu vergleichen sind. Moderne PLM-Systeme bestehen heute nicht mehr aus monolithischer Software, sondern setzen sich aus Micro Services zusammen. Diese Micro Services besitzen ihren eigenen Innovationszyklus und können unabhängig voneinander aktualisiert werden. Unter diesem Paradigma wird es den Anlagenbauern vereinfacht, ihre IT-Systeme auf dem neusten Stand zu halten auch wenn es zu kundenspezifischen Softwareanpassungen kommt. Bimodale Ansätze ermöglichen zudem die schnelle Integration von Neusystemen in eine bestehende IT-Systemlandschaft. Dadurch werden flexible IT-Landschaften wie in → **Abb. 28** erst möglich.

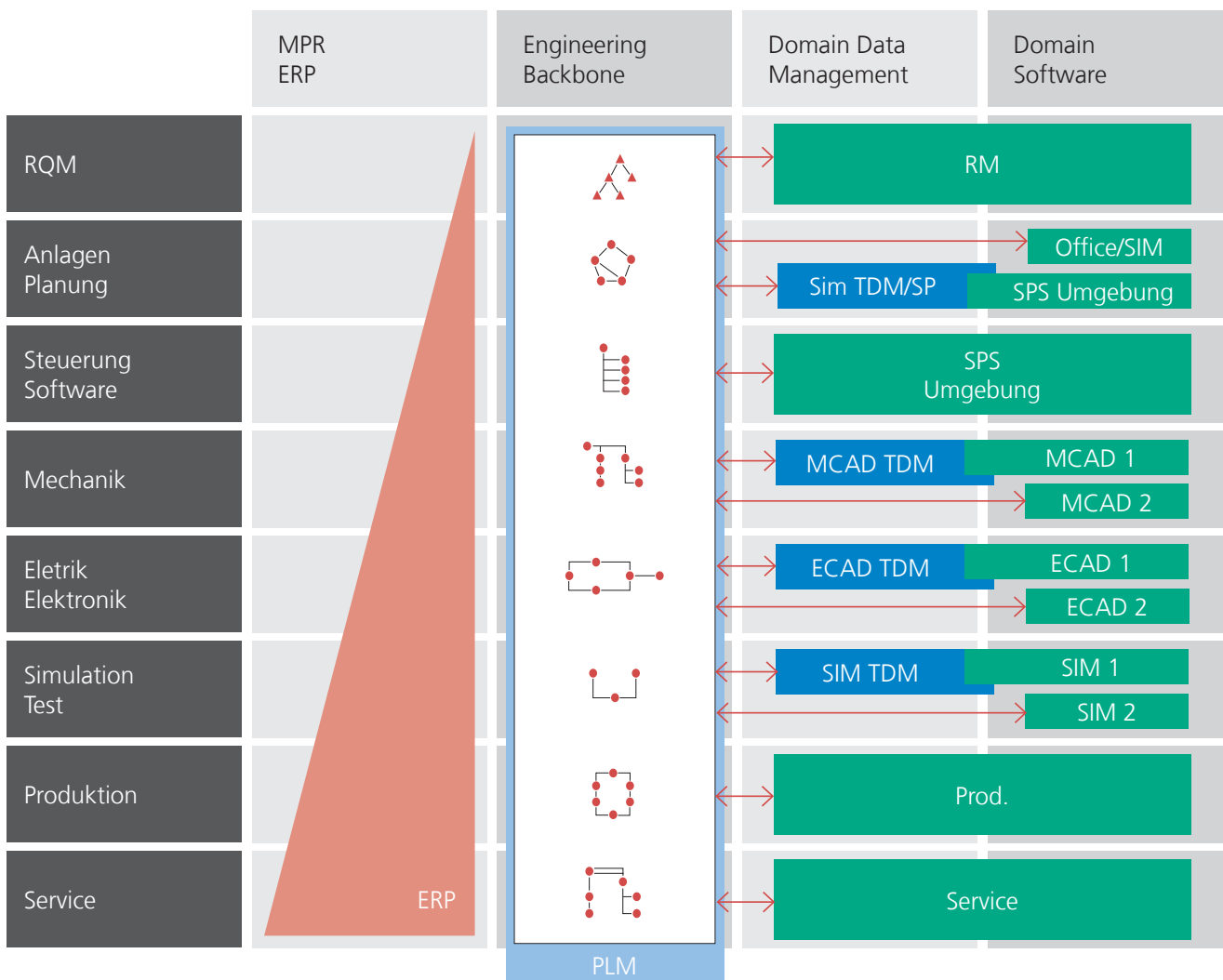


Abb. 28 Moderne IT-Landschaft, in Anlehnung an [Eigner et al., 2017b]

3.6.1 Vom mechatronischen zum cyberphysischen Produktmodell

Das Konzept des Product Lifecycle Management hat den Anspruch, Informationen über den gesamten Lebenszyklus abzubilden [Eigner, Roubanov und Zafirov, 2014]. Das zugrundeliegende Produkt- oder Datenmodell muss im Rückschluss dieses ebenfalls unterstützen. Unter dem Begriff des mechatronischen Produktmodells versteht man im Speziellen die Kombination der Teilmodelle der Mechanik, Elektrik/Elektronik und der Softwaredomäne.

Das Ziel einer mechatronischen Produktstruktur ist es, die verschiedenen Modellartefakte aus den Teilmodellen aufeinander abzubilden und eine gemeinsame Sicht auf das gesamte Produktmodell zu ermöglichen. Das ist notwendig, um die Prozesse innerhalb der Entwicklung zu befähigen. Angefangen bei der disziplinübergreifenden Beschreibung bis hin zu den Entwicklungsdisziplinen (Mechanik, Elektrik und Elektronik, Software) sollen im mechatronischen Produktmodell die einzelnen Informationsquellen konsistent zusammengeführt werden. Insbesondere das aufeinander Abbilden von Informationen der einzelnen Entwicklungsdisziplinen ist für Anwender und IT-Systemvendoren heute immer noch eine Herausforderung. In [Kapitel 3.1](#) werden die Herausforderungen und Ziele erläutert.

Das Konzept des cyberphysischen Produktmodells geht noch einen Schritt weiter. Es hat den Anspruch die für cyberphysische Produkte immer wichtiger werdenden Domänen der Systemarchitektur und der Verhaltensbeschreibung unter dem Aspekt eines modularisierten Baukastensystems zu erfassen.

3.6.2 Konzept des cyberphysischen Produktmodells

Das Konzept des cyberphysischen Produktmodells integriert die Komponenten der einzelnen Disziplinen und bringt sie in Form einer cyberphysischen Produktstruktur zusammen. Die Grundlage bildet dabei ein cyberphysisches Produktdatenmodell, das die einzelnen disziplinspezifischen Partialmodelle aufnehmen und verwalten kann. Bewusst wurde das Konzept der cyberphysischen Produktstruktur so offen gestaltet, dass sie nicht an einen bestimmten Prozess gebunden ist, sondern generisch genutzt werden kann. Gleichzeitig soll das Konzept heute schon bekannte Methoden, Modelle und ihre Darstellungsformen aufgreifen, um die Nutzerakzeptanz zu erhöhen. Die cyberphysische Produktstruktur als Erweiterung der klassischen Produktstruktur besteht zum einen aus den Komponenten der Partialmodelle. Ergänzt wird diese Struktur durch virtuelle Komponente, die unterschiedliche Funktionen innerhalb der Produktstruktur übernehmen. Im Folgenden werden die wichtigsten Komponenten der cyberphysischen Produktstruktur erläutert:

- **Virtuelle Anlagen- und Baukastenkomponente:** Diese Komponenten bestehen aus virtuellen Klassen, in denen die Partialmodelle eines Baukas-

tenelements oder der gesamten Produktionsanlagen zusammengeführt werden. Sie ordnen die cyberphysische Produktstruktur hinsichtlich der Anlagentopologie. Die Topologie kann unterschiedlichen Paradigmen folgen, wie zum Beispiel einem funktionalen oder bauraumorientierten Paradigma. Eine Produktionsanlage hat beispielsweise einen virtuellen Anlagenknoten unter dem u.a. die Baukastenelemente in Form von virtuellen Komponenten zusammengeführt werden.

- **Virtuelle mechatronische und cyberphysische Komponenten:** Diese Komponenten bestehen aus virtuellen Klassen innerhalb der topologischen Struktur, die es ermöglichen, identische Komponenten in unterschiedlichen Partialmodellen aufeinander abzubilden. Bedingt durch die Modellierung einzelner Teilaspekte des Produktionssystems in unterschiedlichen Disziplinen kann dieser Fall vorkommen. Virtuelle mechatronische bzw. cyberphysische Komponenten aggregieren in sich vordefinierte Attribute der ihnen zugeordneten Partialmodell-Komponenten.
- **Partialmodell-Komponenten:** Diese Komponenten werden direkt aus den einzelnen Partialmodellen der Disziplinen extrahiert. Die Auflösungstiefe der Partialmodelle in Modellartefakte innerhalb der cyberphysischen Produktstruktur kann variieren und hängt von der IT-Systemlandschaft sowie den Anwendungsfällen auf Basis der cyberphysischen Produktstruktur innerhalb des Unternehmens bzw. des Einsatzszenarios ab. Die Partialmodell-Komponenten werden hinsichtlich ihres Ursprungsmodells und des Typs (Baugruppe, Einzelteil, Signal, Anschluss etc.) kategorisiert bzw. klassifiziert und dynamisch mit Attributen versehen.

Zwischen den Komponenten der cyberphysischen Produktstruktur besteht eine Eltern-Kind- Beziehungen. Durch die unterschiedlichen Modellparadigmen innerhalb der Disziplinen ist eine Abbildung gleicher Modellkomponenten nicht trivial und benötigt eine kontextsensitive Zuordnung von Partialmodell-Komponenten. Der Kontext einer gültigen Eltern-Kind-Beziehung variiert. Die Zuordnung kann generisch sein, projektspezifisch oder aber auch einen höheren Detailgrad (baugruppenspezifisch etc.) besitzen.

Beispielsweise wird eine Baugruppe in der Mechanik auf Basis von einer Eltern-Kind-Beziehung zu einer übergeordneten Baugruppe wiederverwendet. Soll diese mechanische Baugruppe einem Gegenstück in der Elektrotechnik zugeordnet werden, muss das aufgrund unterschiedlicher projektspezifischer Attribute – wie der Ortskennzeichen (OKZ) und Betriebsmittelkennzahl (BMK) – zumindest projektorientiert erfolgen. Eine direkte Wiederverwendung ohne Anpassung dieser Attribute ist in diesem Fall nicht möglich und müssen vom Elektrik-/Elektronik-Ingenieur automatisch unter Berücksichtigung einer vordefinierten Vergabelogik im PLM vergeben werden. → **Abb. 29** zeigt die Benutzungsoberfläche zur Konfiguration einer cyberphysischen Produktstruktur in CIM Database PLM. Die äußeren Produktstrukturen sind disziplinspezifisch. Die cyberphysische Produktstruktur befindet sich in der Mitte.

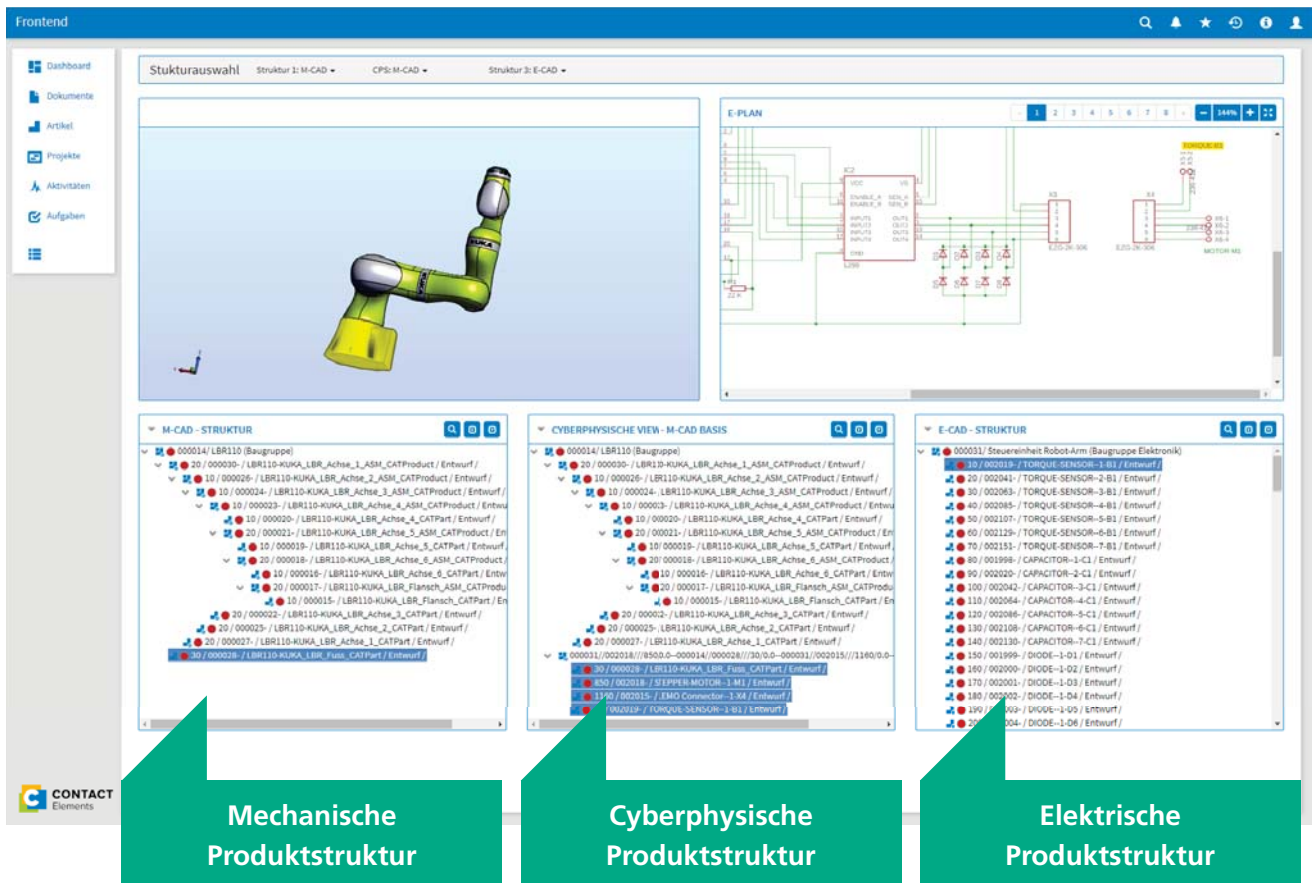


Abb. 29 Prototypische Benutzeroberfläche für die Konfiguration der cyberphysischen Produktstruktur in CIM Database PLM

3.6.3 Perspektiven und Sichten (View Points and Views)

Die cyberphysische Produktstruktur ist somit eine Gesamtsicht auf das Produktionssystem und die beteiligten Partialmodelle. Rollen- oder disziplinspezifische Sichten (Views) ermöglichen dem Nutzer die Komplexität zu reduzieren und auf die von ihm gewünschten Komponenten einzuschränken. Die Sichten sind transiente Darstellungen der cyberphysischen Produktstruktur. Dadurch werden Inkonsistenzen zwischen den Sichten vermieden. → Abb. 30 zeigt beispielhaft zwei mögliche Sichten – die der Mechanik und der Elektrik/Elektronik – auf eine cyberphysische Produktstruktur. Durch vordefinierte Perspektiven wird die Filterlogik für eine Sicht definiert. Diese Regeln bestimmen die Modellelemente einer Sicht. Alle nicht benötigten Modellelemente werden in der jeweiligen Sicht ausgeblendet.

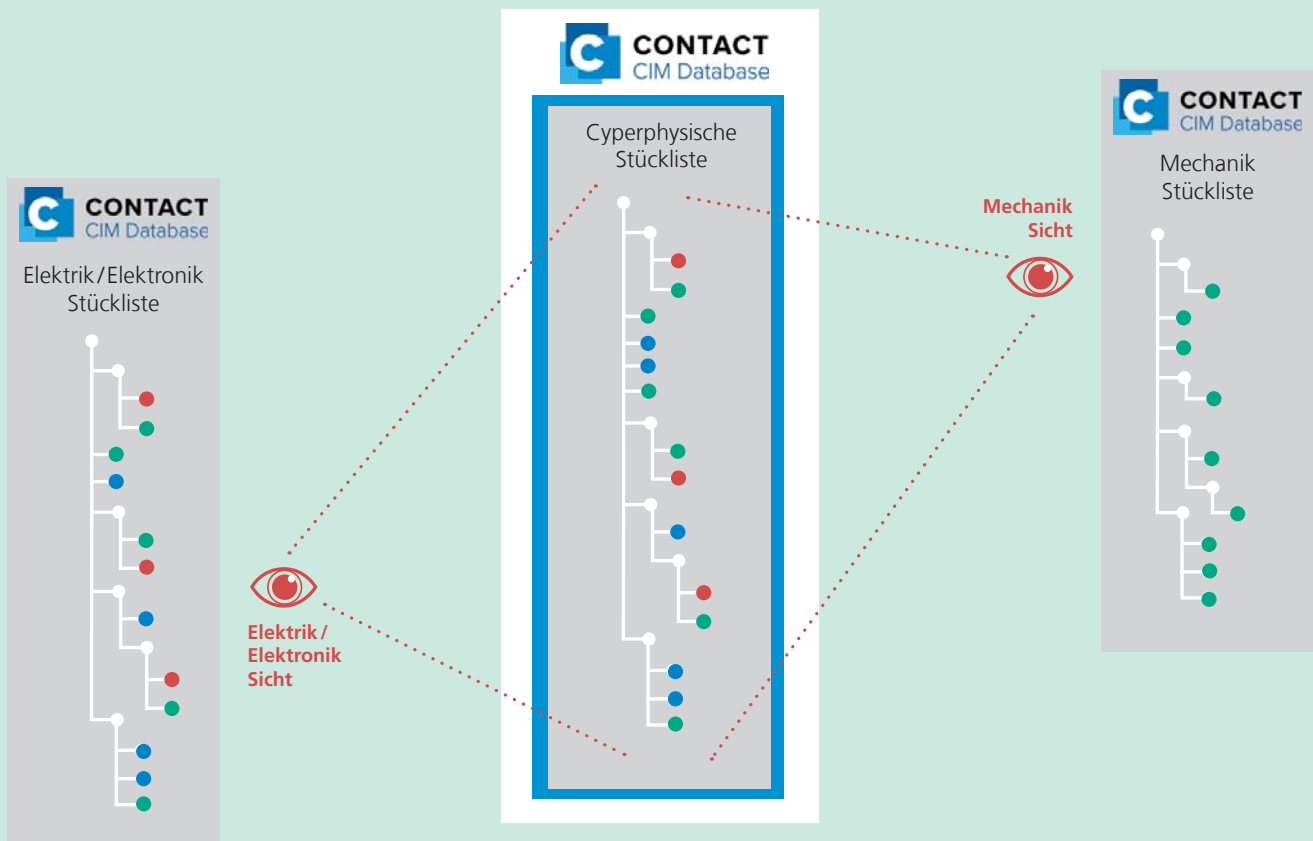


Abb. 30 Sichtenkonzept für eine cyberphysische Produktstruktur

3.6.4 PLM-Funktionen auf Basis der cyberphysischen Produktstruktur

Die cyberphysische Produktstruktur wird neben den partiellen Modellen ebenfalls im PLM-System geführt, beinhaltet jedoch dieselben Komponenten. Lediglich ihre Eltern-Kind-Beziehungen können sich in der cyberphysischen Produktstruktur ändern. Dadurch wird eine redundante Datenhaltung vermieden. Zum Freigabeprozess innerhalb der Disziplinen und ihren Partialmodellen kann auf Basis der cyberphysischen Produktstruktur ein systemorientierter Freigabeprozess erfolgen. Nachgelagerte Prozesse wie der Einkauf oder die Produktion werden durch die disziplinübergreifende Konsistenz innerhalb der cyberphysischen Produktstruktur ebenfalls vereinfacht. Beispielsweise können dadurch Materialnummern eindeutig über mehrere Disziplinen homogenisiert und konsistent gehalten werden.

¹⁷ Engl. Engineering Change

Bei einem Änderungsprozess ([EC](#)¹⁷) sollen unter anderem disziplinübergreifend Komponenten identifiziert und bewertet werden, die von den Änderungen betroffen sein könnten. Durch die disziplinübergreifende Sicht auf die cyberphysische Produktstruktur kann dieser Prozess unterstützt werden. Durch im PLM-System hinterlegte komponentenbezogene [RAS](#)¹⁸-Schemen können schnell die für den EC benötigten Stakeholder identifiziert werden.

¹⁸ Responsibility, Approval, Support and Inform

Durch die Beaufschlagung dieser cyberphysische(n) Produktstruktur(en) mit einem regelbasierten annotativen Variantenmanagement werden innerhalb eines Baukastensystems weitgehend redundante Baukastenelemente vermieden. Innerhalb des konkreten Anlagenentwicklungskontextes können effektiv verschiedene Varianten verwaltet werden und somit verschiedene Designvarianten parallel entwickelt werden. Das ermöglicht Designentscheidungen zum geeigneten Zeitpunkt und wenn nötig erst spät im Entwicklungsprozess ohne großen Mehraufwand treffen zu müssen. Aufwändige EC-Prozesse mit großen Mehraufwänden können trotzdem vermieden werden. In beiden Fällen wird orthogonal zur Produktstruktur ein Variabilitätsmodell, bestehend aus Merkmalen, Merkmalsausprägungen und Zwangsbedingungen (Constraints) aufgebracht. Dadurch können variable Positionen in der cyberphysischen Produktstruktur gefiltert werden.

3.6.5 Vorteile im Vergleich zum dokumentenorientierten Arbeiten

Die cyberphysische Produktstruktur nutzt modellgetriebene Ansätze, um die Informationen der Anlagenentwicklung konsistent zusammenzuführen. Im Gegensatz zur dokumentenzentrierten Arbeitsweise mit einer Vielzahl disziplinspezifischer und verteilter Dokumente ist sie ein Modell, das den beteiligten Rollen die notwendigen Informationen konsistent und disziplinübergreifend bereitstellt. Insbesondere in Änderungsprozessen sollen dadurch disziplinübergreifende Klarheit geschaffen und Arbeitsaufwände, bspw. durch Abänderung redundanter Informationen in verteilten Dokumenten, vermieden werden.

3.7 Benötigte neue Jobrollen/Engineering Disziplinen

Pascal Lünemann

Durch die Umgestaltung des Entwicklungsumfelds ergeben sich neue Kompetenzansprüche an die Entwicklungsbeteiligten. Eine wesentliche Neuerung stellt die virtualisierte Anlage dar. Eine Herausforderung ist es dabei, die heterogene Systemlandschaft durch den Einsatz des TUI-Frameworks auf Signalebene Daten durchgängig zu gestalten und durch den Einsatz von XML-Files die Signale in den beteiligten Systemen einheitlich zu interpretieren. Hier ist sowohl ein umfassendes Schnittstellen-Verständnis als auch ein tiefgehendes Signal-Verständnis eine wesentliche Voraussetzung. Durch die fortlaufende Innovation in verwendeten Teilsystemen ist stets die Gefahr gegeben, dass initialisierte Schnittstellen oder Konfigurationen angepasst werden müssen. Ein fortlaufendes und proaktives Sichten dieser Definitionen kann die Anwendbarkeit im Entwicklungskontext jedoch sicherstellen.

Für die Entwickelnden ergibt sich aus der virtualisierten Anlage im immersiven Raum ein neues Arbeitsumfeld mit neuen Eindrücken, Freiheiten, Richtlinien und Werkzeugen. Dabei ist nicht jedem Menschen die Anwendung von künstlichen Realitäten angenehm. Für jene, die sich in der Umgebung zurechtfinden, ist das Erlernen der neuen Funktionen zur Interaktion im virtuellen Raum die nächste Herausforderung.

Eine weitere Facette ist die Einführung eines Baukastensystems. Für die Etablierung des Systems ist ein bewusster Umgang und eine umfassende Schulung der Entwicklungsbeteiligten notwendig. Die Verantwortung, Bauteile in einem Baukastensystem freizugeben ist höher als jene in den Entwicklungsprojekten: Übersehene Fehler und Schwachstellen übertragen sich in den Anwendungen ggf. auf zahlreiche Entwicklungsprojekte und können schnell hohe Mehraufwände erzeugen. Gleichzeitig impliziert die Freigabe die Vereinbarkeit der verwendeten Modelle. Die freigebende Instanz muss im gesamten mechatronischen System in seinen Verhaltensmodellen, SPS-Anteilen, ECAD- und MCAD-Modellen über ein zur Freigabe ausreichendes Wissen verfügen, sodass die Modellkonsistenz gewahrt bleibt.

Um die datentechnische Integration im Produktmodell auch in der Entwicklung abzubilden empfiehlt sich die Arbeit in eng vernetzten Entwicklungsteams. Die Fachdomänen sollten in stetigem Austausch unter der Leitung eines Systemingenieurs durch die Entwicklung gehen, um die bestehenden Abhängigkeiten der Anlagenkomponenten diskutieren und abstimmen zu können.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde ein übergeordnetes Anwendungsszenario definiert, welches in mehreren Stationen die virtuelle Inbetriebnahme mittels Smart Hybrid Prototyping erläutert.

4 ANWENDUNGSSZENARIO UND EVALUIERUNG DES VIB-SHP-ANSATZES

Claas Blume, Simon Kind und Pascal Lünemann

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde ein übergeordnetes Anwendungsszenario definiert, welches in mehreren Stationen die virtuelle Inbetriebnahme mittels Smart Hybrid Prototyping erläutert. → **Abb. 31** zeigt das auf zwei in Beziehung stehenden Anlagen basierende Szenario. Die eine Anlage fügt eine hoch-elastische Komponente in ein Blech, welches im Prozess der zweiten Anlage in eine Aufnahme geführt wird. Neben diesem Prozessschritt erfolgt die Bestückung eines Werkstückträgers mit einer Tiefziehkomponente und zwei daran zu montierenden thermisch aktivierbaren Schäumlingen-Komponenten. Die eigentliche Montage auf Basis der Bestückung erfolgt durch einen Leichtbauroboter, welcher für die direkte Zusammenarbeit mit Menschen freigegeben ist.

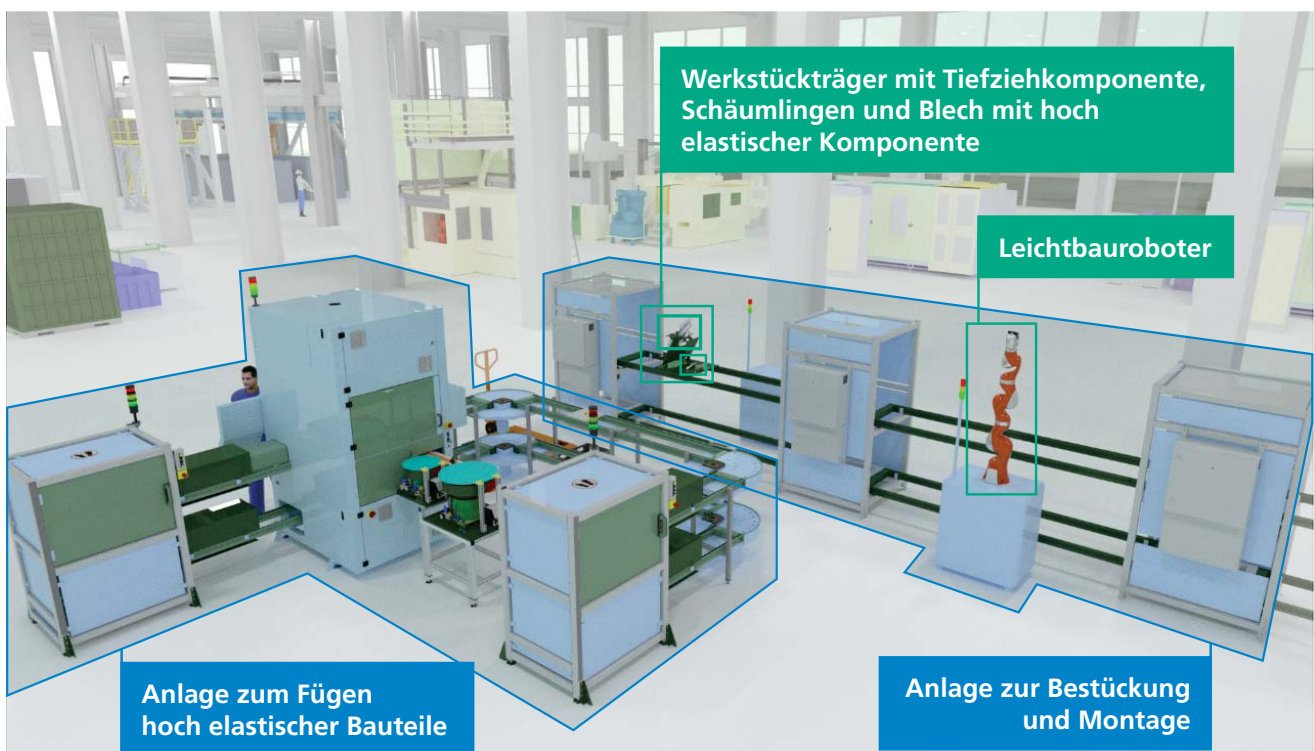


Abb. 31 Gemeinsames Anwendungsszenario im Projekt VIB-SHP (Szene einer Montage von Schäumlingen in ein Innenblech einer Karosserietragstruktur)

Für eine Betrachtung des Anwendungsszenarios unter Industrie 4.0-Aspekten wurden folgende Festlegungen getroffen:

Aufgabenbeschreibung: Rohbaukarossen beinhalten eine große Anzahl von Schäumlingen, welche unter Wärmeeinwirkung (KTL-Behandlung) ihr Volumen auf das 10-15 fache vergrößern und damit das Dämm-/Antivibrationsverhalten verbessern. Eine der wenigen manuellen Tätigkeiten, neben dem befüllen von sog. Low Cost Automation-Lösungen (LCA' s etc.), ist das Positionieren und Einklipsen von Schäumlingen.

Hier wird die erforderliche Qualität des Einklipsvorganges nicht immer umgesetzt. Es wird die Existenz der Schäumlinge vor dem Verbauen der Bauteile automatisiert abgefragt, aber nicht der „richtige Sitz“, was zum Abfall des Schäumlings führen kann. Durch den Einsatz eines Roboters mit sensitiven Eigenschaften, dient diese Applikation neben der Entlastung des Werkers vor allem der Qualitätssicherung/-steigerung.

Die **zu montierenden Bauteile** werden nachfolgend erläutert. Die Bauteile werden am Arbeitsplatz bereitgestellt:

- Die C-Säulenverstärkungen werden in Gitterboxen angeliefert
- Die Schäumlinge werden vorkonfektioniert als Schüttgut in Kleinladungsträgern (KLT) bereitgestellt
- Alle drei Bauteile werden über ein Transportsystem mit Pufferfunktion an den Leichtbau Roboter (LBR)-Arbeitsplatz transportiert

Ablaufbeschreibung – Produktionsfacharbeiter (→ Abb. 32):

- Der Werker vereinzelt die C-Säule und legt diese in die Vorrichtung/Aufnahme auf dem Fördersystem/Puffer
- Der Werker fixiert die C-Säule mittels zweier Schnellspanner
- Der Werker vereinzelt die Schäumlinge aus den Kleinladungsträgern und setzt diese in definierte Positionen in der Vorrichtung/Aufnahme
- Der Werker entnimmt das Blech mit eingepressten Stopfen aus der Ausgabeeinheit der Pressstraße und fixiert dies an der C-Säule mittels zweier Schnellspanner

Ablaufbeschreibung – Roboter (→ Abb. 33):

- Der Roboter startet nach Erkennen der drei Bauteile (C-Säule, Schäumling Groß + Klein) den Fügeprozess
- Der Roboter entnimmt den ersten Schäumling und setzt ihn in die das Blech
- Nach erfolgreicher Zugprobe des ersten Schäumlings, nimmt der LBR Schäumling zwei und fügt in ebenfalls ein
- Zum Abschluss öffnet der Roboter beide Schnellspanner und kehrt in Startposition zurück
- Nach erfolgreicher Kontrolle der Bauteile, ebenfalls durch Sensoren, wird die Baugruppe in die Nebenanlage transportiert



Abb. 32 Arbeitsplatz des Produktionsfacharbeiters



Abb. 33 Roboter-Arbeitsplatz

Sicherheitsbetrachtung: Wie bei jeder Anlage gilt auch für Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK)-Stationen, dass nach üblichen Maschinenrichtlinien und Normen geplant und konzipiert wird. Entsprechend muss ein Steuerungskonzept, Not-Halt-Konzept, Sicherheitslayout, sowie eine Roboter Safe Analyse erstellt werden. DIN EN ISO 10218-1 [DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2012a] und DIN EN ISO 10218-2 [DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2012b] sind Maschinenrichtlinien für den Anlagenbau. Des Weiteren wird momentan eine technische Spezifikation (TS 15066) ausgearbeitet die speziell für MRK-Systeme ausgelegt sein wird. Diese gilt es bei der Planung zu berücksichtigen.

Risikobetrachtung: Die Risikobetrachtung gehört ebenso zur Anlagenkonstruktion dazu und darf nur von Fachpersonal durchgeführt werden. Vollautomatisierte Nebenanlagen gilt es durch Sicherheitszäune vor Eintritt Unbefugter zu sichern. An der Anlage müssen mehrere Not-Aus-Schalter angebracht sein, welche die Anlage im Notfall still setzen. Die C-Säule gelangt über das Kettenförderband in die Nebenanlage und ist durch eine Pendelklappe zu sichern. Die Sicherung des Werkers vor dem Roboter übernimmt der KUKA LBR iiwa selbst. Durch seine Sicherheitssteuerung „Kuka Sunrise“ und Momentensensorik ist er in der Lage, den Roboter schnellstmöglich zum Stillstand zu bringen.

4.1 Evaluierung

Claas Blume, Simon Kind und Pascal Lünemann

Die Anforderungen an die VIBN-Lösung werden nicht wie üblich über Anforderungslisten, sondern über User Stories validiert. Bei einer klassischen sequenziellen Produktentwicklung sind Anforderungen im Laufe der Entwicklung nur bedingt verhandelbar, werden gleich zu Beginn in detaillierter Form festgelegt und sollen für sich alleine stehen. In VIB-SHP wurden die Einzelheiten einer Anforderung hingegen in den während des gesamten kontinuierlich geführten Gespräches sowohl in zeitlicher als auch in inhaltlicher Hinsicht bedarfsorientiert ausgearbeitet, so dass die Teams mit dem Bau der entsprechenden Funktionalitäten beginnen können.

Die Entwicklung innerhalb des Projektes war aufgrund des hohen Innovationsgrades von großem Risiko geprägt. Deswegen wurden nicht bereits im Vorfeld alle Anforderungen aufgestellt. Manche Anforderungen und Designentscheidungen treten erst zutage, wenn die Produktentwicklung bereits im Gang ist. Daher wurden in Anlehnung an [SCRUM](#)¹⁹ User Stories eingeführt, die als maßgebliche Repräsentationsform der Anforderungen dienen.

Zur Evaluierung der aufgestellten User Stories wurden während eines Workshops alle User Stories am entwickelten Demonstrator, mit dem implementierten Anwendungsszenario, durchgeführt. Die Durchführung war so aufgebaut, dass jeweils Tandems aus Anwendungspartner und Entwicklungspartner gebildet wurden. Anschließend erfolgte die Evaluation anhand von Experteninterviews.

¹⁹ Scrum (n): Ein Rahmenwerk, innerhalb dessen Menschen komplexe adaptive Aufgabenstellungen angehen können, und durch das sie in die Lage versetzt werden, produktiv und kreativ Produkte mit höchstmöglichem Wert auszuliefern.

4.1.1 User Stories

Die User Stories von VIB-SHP sind wie folgt aufgebaut: „Als **<Anwenderrolle>** möchte ich **<Ziel>** erreichen, so dass ich **<Vorteile>** habe“. Die User Story ist nicht dazu gedacht, alle Informationen zu erfassen, aus denen eine Anforderung besteht. Sie drückt lediglich das Wesen und die Absicht einer Anforderung aus und dient als Platzhalter für ausführliche Diskussionen, die zwischen den Entwicklungs- und Anwendungspartnern stattfinden. Zusätzlich sind jeder User Story **<Akzeptanzkriterien>** zugeordnet. Zusammengefasst werden die User Stories durch folgende vier Attribute beschrieben:

- **Anwenderrolle:** Klasse der Benutzer
- **Ziel:** Was die Klasse der Benutzer erreichen möchte
- **Vorteile:** Der Nutzen oder warum die Benutzer das Ziel erreichen wollen
- **Akzeptanzkriterien:** Externe Qualitätsmerkmal, welches ein gewünschtes Verhalten definiert. Es wird verwendet, um festzustellen, ob ein Element richtig entwickelt wurde

Es wurden insgesamt zehn User Stories erstellt, die wie folgt beschrieben sind:

1. **User Story „Erstellung einer Layout Variante“:** Als Anlagen-System-Entwickler möchte ich aus Baukastenelementen (Funktionsgruppen) möglichst früh realistische Layoutvarianten entsprechend dem Kundenwunsch designen, sodass ich schneller und in besserer Qualität arbeiten kann. Dazu müssen die benötigten Baukastenelemente (Funktionsgruppen) zur Verfügung stehen, sich zielgenau finden lassen und zueinander positionierbar sein.
2. **User Story „Vergleich verschiedener Layout Varianten“:** Als Anlagen-System-Entwickler möchte ich erstellte Layoutvarianten miteinander vergleichen können, damit ich fundierte Bewertungen durchführen kann. Dazu müssen die erstellten Layouts zur Verfügung stehen und in einer virtuellen Umgebung erfahrbar sein.
3. **User Story „Bewertung eines Layouts“:** Als Anlagen-System-Entwickler möchte ich die Qualität eines Layouts im virtuellen Raum bewerten, um z. B. zu prüfen wie die Anlage im Raum steht, die Zugänge zur Anlage beschaffen sind, ob die Notausgänge erreichbar bleiben oder wie die Materialversorgung gestaltet werden könnte. Durch die Bewertung in der virtuellen Realität können alle Stakeholder frühzeitig fundierte Entscheidungen treffen. Dazu müssen die erstellten Layouts zur Verfügung stehen und in einer virtuellen Umgebung erfahrbar sein.
4. **User Story „Anpassen eines Layouts“:** Als Anlagen-System-Entwickler möchte ich ein bestehendes Layout verändern können, damit Änderungen eingepflegt werden können. Dazu müssen erstellte Layouts zur Verfügung stehen und in neuen Versionen abgelegt werden können.
5. **User Story: „Kalkulatorische Bewertung eines Layouts“:** Als Anlagen-System-Entwickler möchte ich die Layouts mit Hilfe der Daten aus einem ERP-System bewerten können, um auch die Kosten schon frühzeitig zu

berücksichtigen. Dazu müssen erstellte Layouts zur Verfügung stehen und das Layout muss mit den ERP-Informationen gekoppelt werden.

6. **User Story „Bearbeitung von Anlagenkomponenten“:** Als Mechanikentwickler möchte ich mit meinem CAD-System Veränderungen an den verwendeten Baukastenelementen vornehmen können. Dazu müssen einzelne Anlagenkomponenten in ein CAD-System geladen, dort verändert und als neue Version in die Anlage eingebunden werden können.
7. **User Story „Bearbeitung von Verhaltensmodellen“:** Als Simulationsverantwortlicher möchte ich die Verhaltensmodelle der verwendeten Baukastenelemente verändern können, um die Verwendung von neuen Komponenten (z. B. Antriebe) abbilden zu können. Dadurch können Änderungen schnell eingepflegt und abgesichert werden. Dazu müssen einzelne Verhaltensmodelle in ein Simulationssystem geladen, dort verändert und als neue Version in die Anlage eingebunden werden können.
8. **User Story „Simulation des Anlagenverhaltens“:** Als Simulationsverantwortlicher möchte ich das Verhalten der gesamten Anlage auch mit einer Hardware SPS absichern können, um das Anlagenverhalten frühzeitig im Produktentwicklungsprozess abzusichern, sodass mögliche Änderungen günstiger ausfallen. Dazu muss die Simulation der Anlage mit einer SPS gekoppelt werden können.
9. **User Story „Absicherung der Ergonomie und Interaktion“:** Als Anlagensystementwickler möchte ich die Ergonomie der durchzuführenden Montageaufgaben absichern, um den Menschen, die Liefervereinbarungen und die Anlagenleistung nachhaltig sicherzustellen. Dazu müssen die ergonomischen Randbedingungen erfassbar sein und mit der Anlagensimulation im virtuellen Raum erlebbar gemacht werden können.
10. **User Story „Erstellung neuer Baukastenelemente“:** Als Baukastenverantwortlicher möchte ich ein neues Baukastenmodul anlegen, es mit CAD-, Simulationsmodellen und ERP-Informationen anreichern und freigeben können, um stetig weitere Baukastenelemente erstellen zu können. Dazu müssen neue Elemente angelegt, CAD-Dateien, Simulationsmakros und ERP-Informationen hinzugefügt werden können. Ebenfalls muss ein Freigabeprozess existieren und die Elemente im Baukasten auffindbar eingeordnet sein.

4.1.2 Ergebnisse

Es wurde ein mehrtägiger Workshop mit allen am Projekt beteiligten Partnern durchgeführt. Die Entwickler einer Funktion (User Story) und die Anwendungspartner, die die Anforderungen an die Funktion definiert haben, wurden jeweils zu Tandempartnern zusammengeschlossen. Die Tandempaare haben, nach einer kurzen Einführung, die jeweiligen User Stories am Anwendungsszenario erprobt. Anschließend erfolgten mit allen Personen Experteninterviews und eine gemeinsame Diskussion. Alle User Stories konnten erfolgreich umgesetzt werden.

Da es sich um einen Demonstrator handelt, gab es jedoch insbesondere Anmerkungen bezüglich der Anwendungsfreundlichkeit, insbesondere bei der PLM-System-Anbindung. Dies stand jedoch nicht im Fokus der Entwicklung und die Umsetzung ist für Folgeprojekte geplant. Es konnte zusammenfassend nachgewiesen werden, dass alle geforderten Funktionen entwickelt wurden.

Die Funktionalitäten des Konzeptes wurden ebenfalls auf dem ProSTEP Symposium 2017 in der Form eines Workshops präsentiert und das Fachpublikum wurde dazu angehalten zukünftige Entwicklungen zu erarbeiten. Folgende Aussagen wurden dabei gesammelt:

- „...Mensch-Maschine Kollaboration soll weiter integriert werden...“
- „... Ergonomie und Sicherheitsaspekte sind wichtig für die Entscheidungsfindung...“
- „... die Visualisierung der Kosten ist wichtig für den Vergleich von Layouts in einer VR...“
- „... die Integration der Anforderung ist notwendig für die Verifikation von Produktionsanlagen...“
- „... Notwendigkeit zur Modellierung des Funktionsverhaltens von Fertigungssystemen ...“
- „... Standards (z. B. AutomationML, SysML) sind notwendig für eine Integration ...“
- „... eine 3D-immersive Erfahrung ist unerlässlich ...“
- „... der Detaillierungsgrad muss je nach Zeit und Bedarf variieren ...“
- „... das VIB-SHP Konzept kann auch als Trainingssystem für den Prozessplaner funktionieren...“
- „... die Grundlage für den Digital Twin während der Betriebsphase ...“
- „... Animation der für das Verständnis wichtigen Funktionsabläufe ...“
- „... einfachere und effektivere Schulungen in VR (insb. gefährliche Umgebungen) ...“

4.2 Anwendungsfälle

Simon Kind, Ingolf Rehfeld, Jonas Schmidt, Andreas Geiger, Gerhard Lechler und Lucas Kirsch

Um die Funktionsweise der VIB-SHP Lösung aus Praxissicht nachvollziehen zu können werden die drei wesentlichen Funktionselemente nachfolgend dargestellt. Zu diesen zählen:

- Prozess- und Layoutplanung per Baukasten ([Kapitel 4.2.1](#))
- Virtuelle Absicherung ([Kapitel 4.2.2](#))
- Materialflusssimulation und virtuelle Inbetriebnahme ([Kapitel 4.2.3](#))

4.2.1 Prozess- und Layoutplanung per Baukasten

Für eine konsistente und disziplinübergreifende Anlagengestaltung und Layoutplanung ist es notwendig, die Entwicklungstätigkeiten im Anlagenentwicklungsprozess (s. [Kapitel 3.4.1](#)) unter Berücksichtigung der beteiligten Engineering Disziplinen (s. [Kapitel 3.7](#)) zu verknüpfen und deren interdisziplinäre Entwicklungsartefakte über einen Baukasten bereitzustellen. In diesem Kapitel wird sowohl die Arbeitsweise mit dem hierfür im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelten Baukasten vorgestellt, als auch dessen Struktur und Aufbau konkreter erläutert. Ergänzend zu den im weiteren Verlauf vorgestellten und berücksichtigten Modularisierungsansätzen für Baukastensysteme wird zudem noch auf Aspekte der Modellierungs- und Abbildungsgüte eingegangen und hierfür kontextbezogene Gestaltungsebenen für die Prozess- und Layoutplanung vorgestellt.

Zielstellung und Potentiale

Basierend auf einer funktionalen Anlagenmodellierung ist es eine zentrale Zielstellung für die Layoutplanung mithilfe von Baukästen und einer sinnhaften Modularisierungsstrategie einen hohen Anteil an Wieder- und Weiterverwendung bereits modellierter Anlagenbestandteilen zu erreichen. Ergänzend lässt sich eine Anlage auch durch Parametrisierung und Anpassung von bestehenden Entwicklungsdaten aufwandsarm abbilden. Die einzelnen Anlagenbestandteile werden demnach durch Gliederung und Klassifizierung in funktionale Produktkomponente eingeordnet und deren Entwicklungsartefakte, sog. Partialmodellen zugewiesen und über benötigte Querverweise verknüpft. Dies betrifft aus einer ganzheitlichen Anlagenbetrachtung von einer geometrisch, kinematisierten Abbildung durch erweiterte CAD-Modelle auch die Bereiche Elektroprojektierung unter Berücksichtigung von Schaltplänen, Signallisten und Anschlusskonfigurationen. Für eine steuerungstechnische Absicherung werden innerhalb des Baukastens sowohl der abzusichernde Steuerungscode als auch die benötigten Verhaltensmodelle, die das zeitbasierte Antwortverhalten der virtualisierten Anlage abbilden ergänzt. Die Summe und Verknüpfung der genannten Partialmodelle ist in der Lage eine ganzheitliche Anlagenmodellierung, Layoutplanung und auch Absicherung von Anlagenprozessen bis hin zur Materialflusssimulation und Virtuellen Inbetriebnahme zu ermöglichen, wie bereits in [Kapitel 3.1](#) Anforderungen und Lösungselemente skizziert.

TUI Framework Konfiguration

Die TUI-Konfiguration wird im Demonstrator vom PLM-System CIM Database teilautomatisiert erstellt und in Form einer XML-Konfigurationsdatei bereitgestellt. Für die weitere Bearbeitung der Konfiguration ist auch ein Editor im TUI-Framework nativ verfügbar, mittels dem die auszutauschenden Signale definiert werden und als XML-Konfiguration gespeichert werden.

Für die Kopplung von Verhaltenssimulation, Interaktionsgeräten und Virtualisierung in der VIBN mittels SHP verfügt das Framework über folgende Schnittstellen (→ **Abb. 34**):

- Y200: Anbindung der Verhaltenssimulation
- OPC: Anbindung von haptischen Interaktionsgeräten
- Python-Client: Anbindung der virtuellen Szene

Die Kopplung der Simulationswerkzeuge mit der Visualisierungsumgebung wurde durch die Erweiterung des TUI-Framework realisiert.

Eine Eigenschaft der Y200-Schnittstelle ist es, dass in WinMOD angelegte Signale nach Variablentyp bereitgestellt werden und nicht in der Folge der Definition oder in einer anderen beliebigen Form. Entsprechend erfolgt die Aufteilung der Speicherbereiche der Y200-Schnittstelle in Steuersignale durch den WinMOD-Reader (Auslesen der Signalzustände) und WinMOD Demuxer (Splitten der Signalzustände in einzelne Signale) anhand einer XML-Konfiguration. Diese wird vom PLM-System bereitgestellt und während der Initialisierung des Servers eingelesen.

Für die Manipulation der virtuellen Szene setzt ein Python-Client die durch das TUI-Framework bereitgestellten Signale in eine Manipulation von Transformationsknoten in der virtuellen Szene / im Szenegraph um.

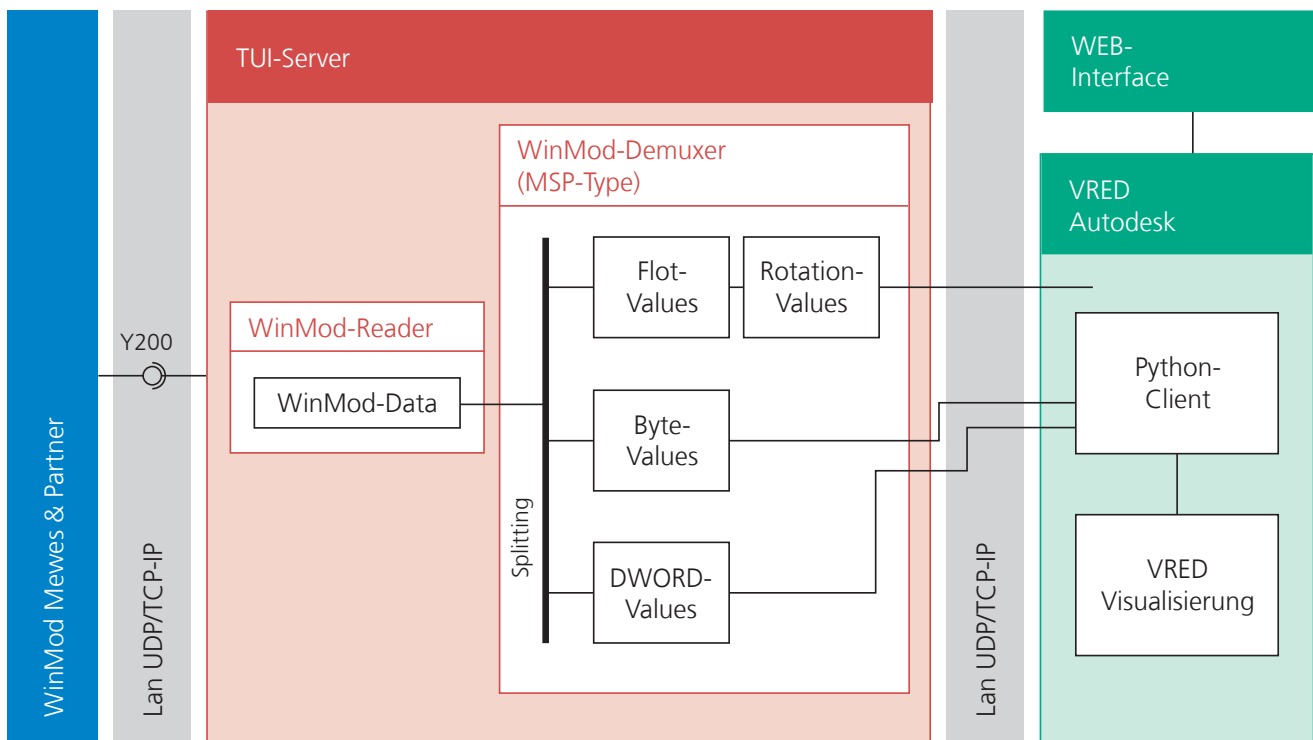


Abb. 34 Kopplung der Simulationswerkzeuge mit der Visualisierungsumgebung

Für die Verarbeitung der Signale des TUI-Frameworks bzw. des TUI-Servers seitens des Python-Clients und die Zuordnung zu Freiheitsgraden der Baukastenelemente zu den Strukturknoten der Geometrieobjekte in der virtuellen Szene wird ebenfalls eine XML-Konfiguration benötigt (→ **Abb. 35**).

Der Python-Client liest die XML-Konfiguration ein, identifiziert in der Struktur die variabel zu steuernden Knoten mittels eines XML-Parsers und ermöglicht somit die Manipulation der virtuellen Szene über das TUI-Framework. Die Definition des Zusammenhangs von Signal und zu manipulierender Bewegung (Skalierung) erfolgt initial im PLM-System anhand der Signalinformation. Die Berechnung während der Laufzeit wird durch das TUI-Framework umgesetzt.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no"?>
<!--document xmlns:xi='http://www.w3.org/2001/XInclude'--><document xmlns:xi="http://www.
w3.org/2001/XInclude">
  <ServerConfig>
    <ServerStartupConfig/>
    <DeviceTypeSequence>
      <DeviceType name="DummyDeviceWinMod">
        <PortTypeSequence>
          <PortType name="w0" sink="0" source="1" typename="WinModChannel">
            <Description/>
          </PortType>
        </PortTypeSequence>
      </DeviceType>
    </DeviceTypeSequence>
    <ParameterTypeDefSequence/>
    <ParameterTypeSequence/>
    <ParameterGroup name="Client">
      <Parameter name="boolSize" value="6"/>
      <Parameter name="floatSize" value="56"/>
      <Parameter name="timer" value="10"/>
    </ParameterGroup>
  </ServerConfig>
  <MSPTTypeSequence>
    <MSPTType name="PackedFloatToFloatMSP">
      <PortTypeSequence>
        <PortType name="in" sink="1" source="0" typename="PackedAnalog">
          <Description/>
        </PortType>
        <PortType name="out" sink="0" source="1" typename="AnalogChannel">
          <Description/>
        </PortType>
        <PortType name="outPacked" sink="0" source="1" typename="PackedAnalog">
          <Description/>
        </PortType>
      </PortTypeSequence>
    </MSPTType>
  </MSPTTypeSequence>
</document>
```

4.2.2 Virtuelle Absicherung

Aufbauend auf den in [Kapitel 3.5](#) beschriebenen Werkzeugen für eine interdisziplinäre Anlagenentwicklung mit Baukästen werden in diesen beiden Kapiteln ([4.2.2 virtuelle Absicherung](#) und [4.2.3 Materialfluss und virtuelle Inbetriebnahme](#)) die Ergebnisse aus der Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten virtueller Techniken für den Anlagenbau vorgestellt. In diesem Zusammenhang wurde sowohl die Absicherung manueller Montagevorgänge und intuitiver Mensch-Maschine-Interaktion ([Kap. 4.2.2](#)) als auch die virtuelle Inbetriebnahme unter Berücksichtigung der Steuerungsauslegung und -entwicklung einer Anlage zur Abbildung eines akkuraten Materialflusses ([Kap. 4.2.3](#)) berücksichtigt.

Für einen durchgängigen Anlagenentwicklungs- und Absicherungsprozess greifen die oben genannten Absicherungs- und Simulationswerkzeuge auf die zuvor in der Layoutplanung entstandenen, interdisziplinären Planungs- und Konstruktionsdaten zurück. Diese Zusammenhänge lassen sich anhand der im Projekt entwickelten IT-Architektur für die virtuelle Absicherung ([Kapitel 3.5](#), siehe auch → [Abb. 36](#)) nachvollziehen.

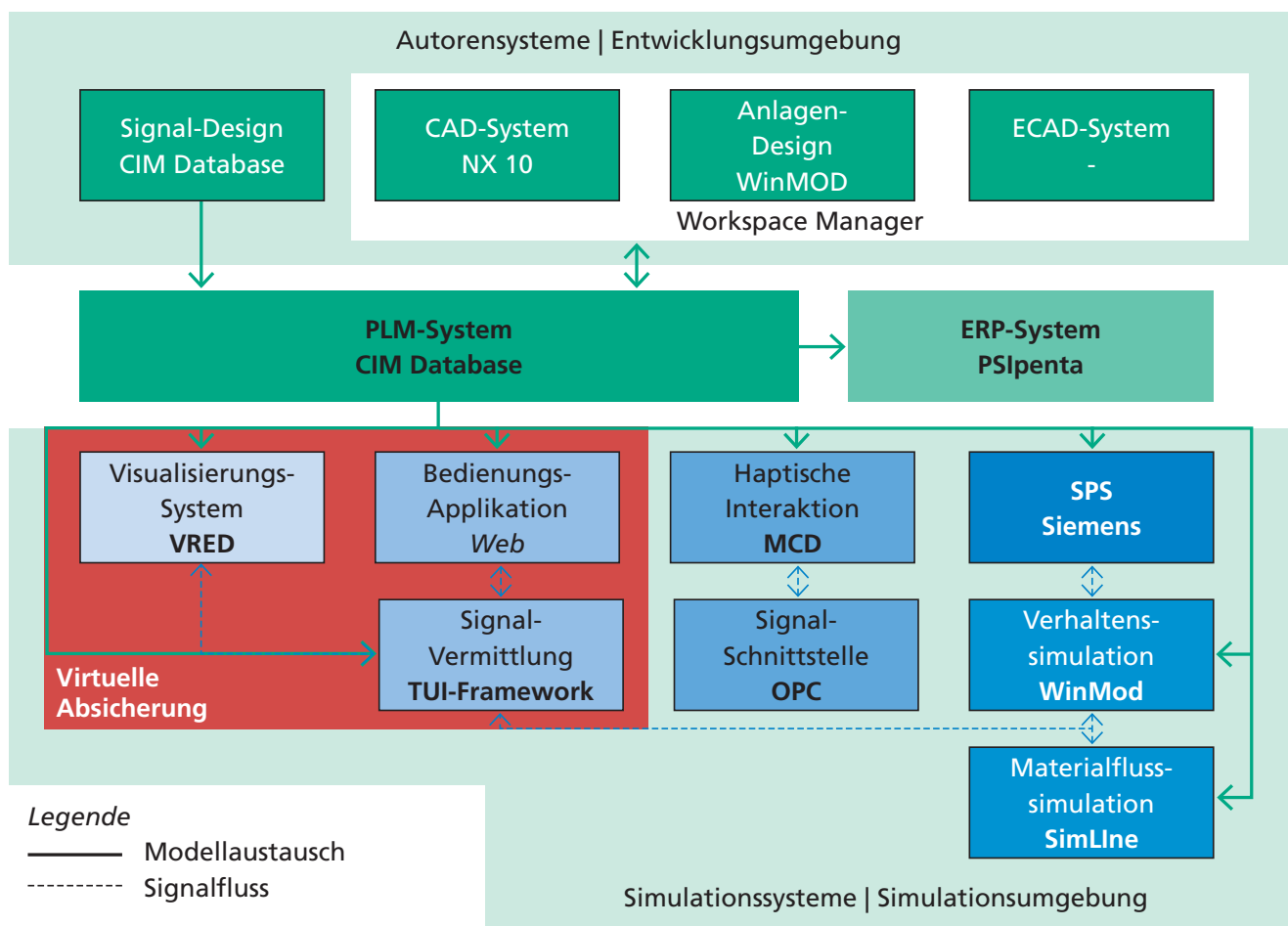


Abb. 35 XML-Konfigurationsdatei für den Python-Client (am Beispiel des KUKA LBR / IIWA)

Virtuelle Begehung eines 3D-Anlagenlayouts mithilfe virtueller Realität

Für eine präzise und anschauliche Absicherung des geplanten Anlagenlayouts eignen sich sogenannte virtuelle Design Reviews in einer Virtual Reality-Umgebung. Hierbei werden die vorhandenen 3D-Layoutdaten hinsichtlich der späteren, realen Anlage aufbereitet, ggf. bezüglich vorhandener Freiheitsgrade einzelner funktionaler Anlagenbestandteile kinematisiert (sofern interaktive Anlagenbestandteile berücksichtigt werden sollen) und mithilfe von unterschiedlichen VR-Technologien (CAVE-Umgebung bzw. VR-Brillen) visualisiert. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine Konfigurationsumgebung entwickelt, mithilfe derer sich das geplante Anlagenlayout auch in unterschiedliche vordefinierte Fabrikhallen integrieren lässt (→ **Abb. 37**), hierbei sind hinsichtlich eines realitätsnahen Immersionsgefühls für den Betrachter zentrale Faktoren wie z. B. die Platzierung von realistischen Lichtquellen im Raum, die Verwendung von ansprechenden Texturen für eine realitätsnahe Darstellung von Oberflächen und Materialien als auch die Möglichkeit sich frei innerhalb der virtuellen Anlage bewegen zu können und diese im Detail bewerten zu können. Für die zuvor genannten Faktoren wurden Mechanismen und Algorithmen innerhalb der Visualisierungsumgebungen entwickelt und für eine realitätsnahe Begehung und Navigation innerhalb der Anlage erfolgreich getestet.



Abb. 36 Workflow für die virtuelle Anlagenabsicherung manueller Montagevorgänge

Durch den Einsatz von interaktiven VR-Technologien bieten sich nunmehr einige unterschiedliche Absicherungsmöglichkeiten. Anhand des interaktiv begehbaren Anlagenlayouts bieten sich Möglichkeiten sowohl für einen kollaborativen Informationsaustausch der unterschiedlichen Entwicklungsdisziplinen als auch zur Abnahme des Anlagendesigns im Rahmen von Design Reviews gegenüber dem Management bzw. auch gegenüber dem Endkunden der Anlage. Neben der zuvor beschriebenen Absicherung einer Anlage ermöglicht ein interaktives Anlagendesign auch sogenannte Werkertrainings.

Absicherung manueller Montagevorgänge

Bei einer Berücksichtigung und funktionalen Aufbereitung der Planungsdaten in Richtung der Absicherung einer konkreten Montageaufgabe ist es demnach auch möglich, innerhalb des Anlagenprozesses kritische Montage- und Handhabungsvorgänge des Werkers abzubilden und gleichzeitig damit abzusichern. Der Worker wird hierdurch in die Lage versetzt, die spätere Montageaufgabe bereits anhand früherer Entwicklungsdaten durchführen zu können, ohne dass eine konkrete Anlage bereits bestehen oder in Betrieb genommen sein muss. Frühe Optimierungen lassen sich somit kostensparend ermitteln. Für die in → **Abb. 38** exemplarisch abgebildete Pick-and-Place-Aufgabe ließ sich im Rahmen des Forschungsprojekts sogar auch eine Optimierung des Materialflusses, initiiert durch die Absicherung der einzelnen Montageaufgaben, ableiten. Es zeigte sich bei der Durchführung der konkreten Montageaufgabe, dass sich durch die initiale Positionierung der Werkstückträger auf dem Förderband weder die durch den Worker zu platzierenden Schäumlinge intuitiv positionieren ließen, noch eine ergonomisch schwierige Erreichbarkeit der Befestigungselemente des Werkstücks (eines Fahrzeugkarosserieteils) vorlag. Durch Rotation der Werkstückträger und erneuter Überprüfung des Anwendungsfalls ließ sich die Montageaufgabe im Folgenden intuitiv und ergonomisch optimiert durchführen. Diese Änderung des Ablaufplans und Materialflusses wurde daraufhin auch im Rahmen der darauffolgenden Virtuellen Inbetriebnahme weiterberücksichtigt.

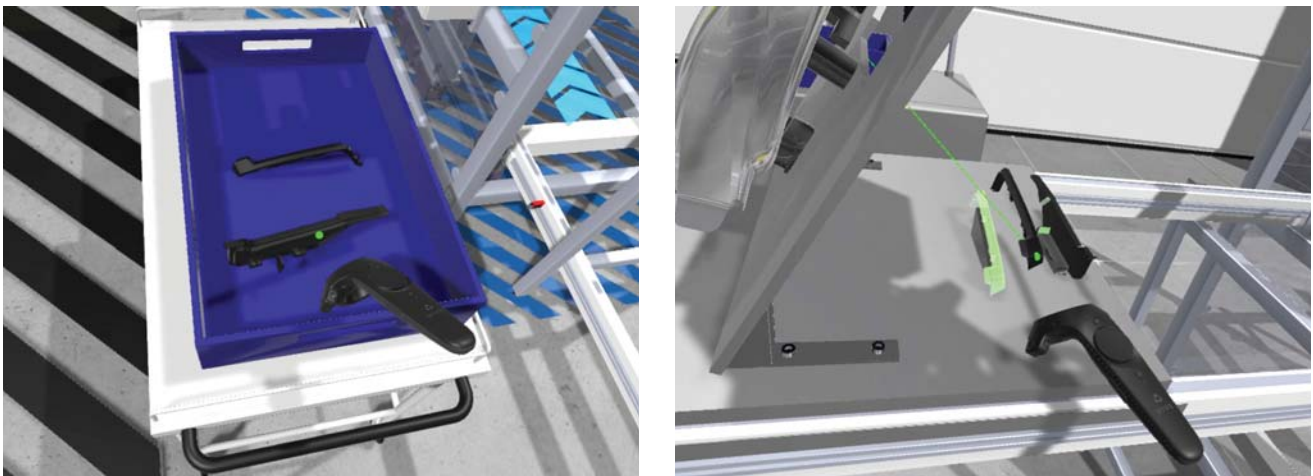


Abb. 37 Einsatz von VR-Technologien für interaktive Design Reviews

Intuitive Interaktion mit einer virtuellen Anlage mithilfe von SHP-Technologien

Ergänzend zur Abbildung einer konkreten manuellen Montageabsicherung wurden neben der rein visuellen Aufbereitung der Anwendungsfälle auch sogenannte Smart Hybrid Prototyping (SHP)-Technologien im Rahmen des Forschungsprojekts erprobt. Diese Technologie ermöglicht zusätzlich zu der im Bereich der Virtual Reality üblichen visuellen Bereitstellung eines Anwendungsfalls auch eine intuitive Mensch-Maschine-Interaktion. Hierfür kamen die im Folgenden näher erläuterten Interaktionsgeräte zum Einsatz.

Hintergrund dieser Technologie ist eine weitere Erhöhung des Immersionsgrades für den Nutzer bzw. Betrachter einer VR-Anwendung durch die Ergänzung um physische Aufbauten. Der Nutzer wird demnach in die Lage versetzt, unterschiedliche Anwendungsfälle ganzheitlich – also auch unter Betrachtung der einzusetzenden Bedienelemente einer Anlage – nutzen zu können. Durch eine Erweiterung der virtuellen Umgebung um die Kinematisierung der vorhandenen Anlagenbestandteile als auch einer signaltechnischen Kopplung mit den Bedienelementen wird es ermöglicht, den Anlagenprozess bzw. -ablauf zu beeinflussen und zu steuern (siehe Bedienpult der Anlage in → **Abb. 39**, links).

Ergänzend hierzu kamen unterschiedliche am Fachgebiet Industrielle Informationstechnik entwickelte Force-Feedback-Geräte, wie beispielsweise die sogenannte Haptikzelle, zum Einsatz. Durch deren spezielle Kinematik und eingesetzte, elektrische Antriebe sowie Algorithmen wird mit besonders hoher Immersion ermöglicht, beispielsweise ein Bauteil frei im Raum zu bewegen und unter Berücksichtigung von Kollisionen bzw. Computerhaptik realitätsnah im Werkstückträger zu positionieren. Entsprechend der Aufbereitung des Anwendungsfalls lassen sich somit auch besonders kritische Ein- und Ausbausituationen unter Berücksichtigung einer realitätsgetreuen, kollisionsbehafteten Umgebung abbilden (siehe haptische, erlebbare Positionierung eines Bauteils in → **Abb. 39**, rechts).

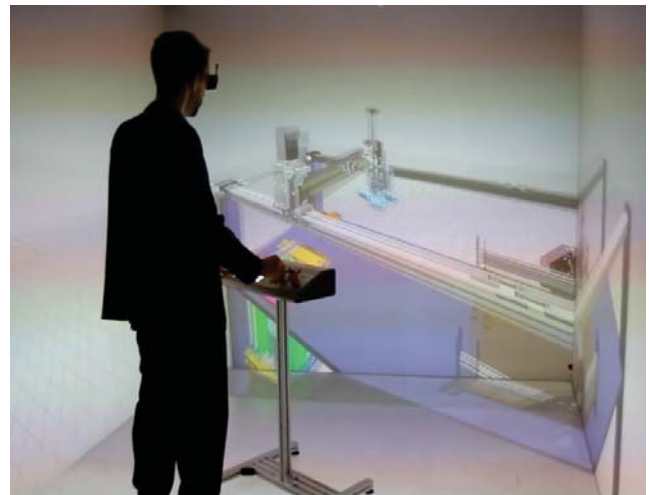


Abb. 38 Virtuelle Absicherung einer manuellen Pick-and-Place-Aufgabe eines Werkers

4.2.3 Materialflusssimulation und virtuelle Inbetriebnahme

Neben den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen virtuellen Technologien zur Absicherung und intuitiven Interaktion mit einer Anlage (siehe [Kapitel 4.2.2](#)) wurden im Rahmen des Forschungsprojekts auch die Bereiche Materialflusssimulation und virtuelle Inbetriebnahme untersucht, die ebenfalls auf den in [Kapitel 4.2.1](#) beschriebenen, interdisziplinären Planungs- und Entwicklungsdaten aufsetzen. Fokus der im Folgenden beschriebenen virtuellen Techniken liegt hierbei auf den teil- bzw. vollautomatisierten Prozessen einer Anlage sowie deren Entwicklung und Programmierung. Ziel ist es, anhand einer funktional modellierten Anlage, deren konkretes, zeitbasiertes Verhalten frühzeitig abzubilden und evaluieren zu können, als auch die im Rahmen der späteren, realen Inbetriebnahme einzusetzende Steuerung bereits frühzeitig auslegen und programmieren zu können. Die Zusammenhänge und Bereitstellung der Entwicklungsdaten für diese virtuellen Technologien sind anhand der im Forschungsprojekt entwickelten IT-Architektur in → **Abb. 40** nachzuvollziehen.

Für die Verhaltensmodellierung einer Anlage wurde im Rahmen des Forschungsprojekts in den im Folgenden beschriebenen Untersuchungen der Schwerpunkt auf das korrekte logische und zeitliche Verhalten der zu entwickelnden Anlage gelegt. Der Fokus dieses Bereichs liegt demnach auf Funktionalitäten der SPS-Steuerung sowie dem entsprechenden Reaktionsverhalten der zu untersuchenden Anlage. Physikalische Effekte im Anlagenkontext wie beispielsweise Reibungseffekte, Kraft- und Momenteneinflüsse wurden ausschließlich im Rahmen der virtuellen Absicherung ([Kapitel 4.2.2](#)) mitbetrachtet.

Funktionale Virtualisierung und steuerungstechnische Abbildung einer Anlage

Zur Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) wurden die folgenden Arbeitsschritte berücksichtigt:

- Erstellung eines Ablaufplans zur Definition der Arbeitsstationen und Anlagenabläufe
- Verhaltensmodellierung der einzelnen Anlagenbestandteile
- Materialflusssimulation der geplanten Anlagenabläufe
- Steuerungsentwurf und -entwicklung zum Betreiben der Anlage
- Virtuelle Inbetriebnahme anhand des Anwendungsszenarios

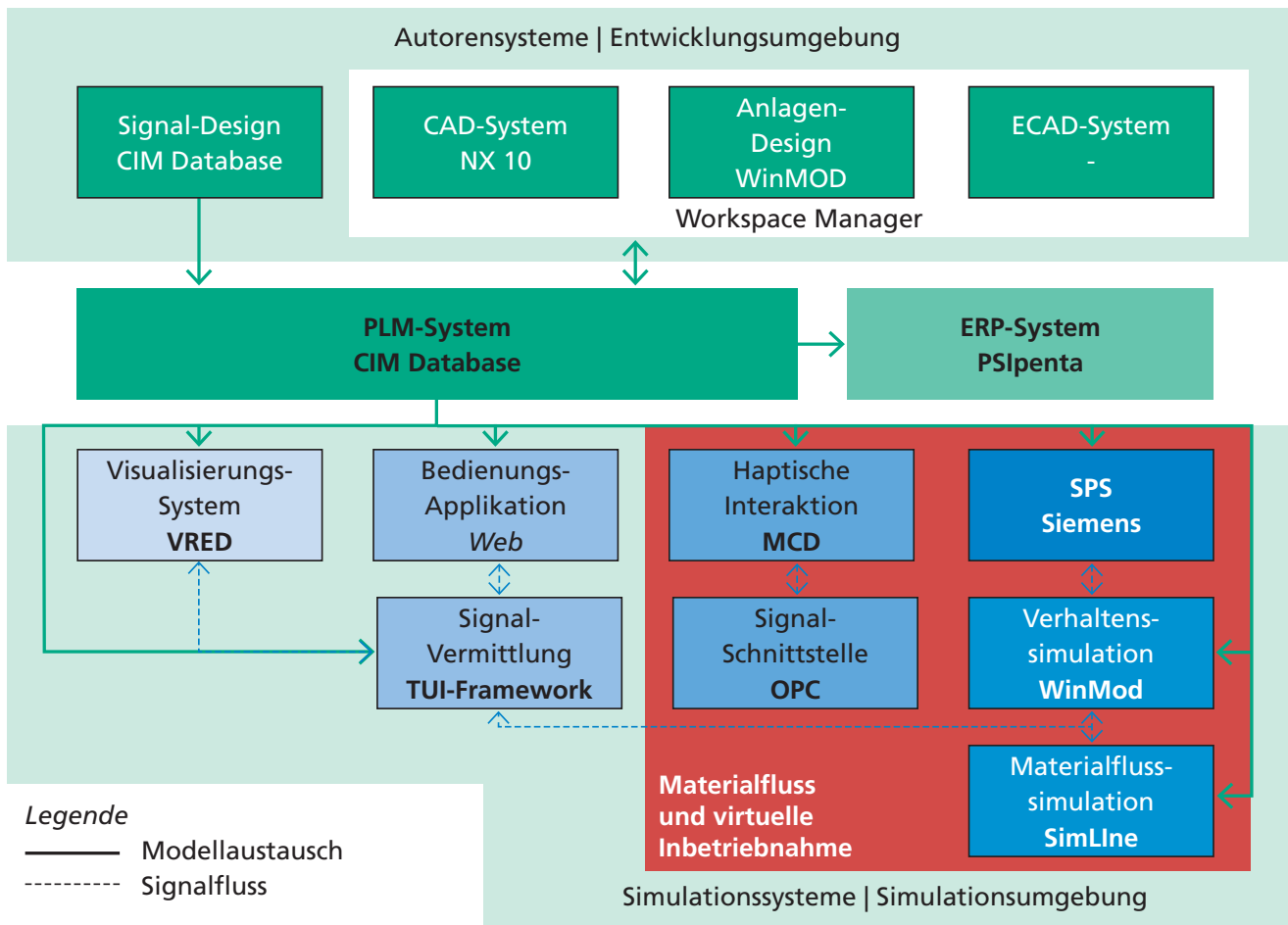


Abb. 39 Intuitive Anlageninteraktion und Werkertraining durch hybride Prototypen

Ablaufplanung durch Verhaltensmodellierung der Anlagenbestandteile

Für eine präzise Abbildung des Materialflusses und als Grundlage für eine virtuelle Inbetriebnahme einer Anlage ist essentiell, neben der geometrischen Modellierung der Anlagenbestandteile auch das funktionale Verhalten der Anlage abzubilden. Hierfür wurde in einem initialen Entwurf – aufbauend auf dem Montagegraphen – ein sogenannter Ablaufplan erstellt. Unter Berücksichtigung der Layoutplanung wurde der Fokus auf die zu berücksichtigenden Abläufe, die Positionierung ablaubrelevanter Funktionsgruppen sowie der einzusetzenden Sensorik der Gesamtanlage gelegt. Diese ganzheitliche und vorwiegend steuerungorientierte Sicht bietet somit eine präzise Vorlage bzw. Blaupause für die darauf aufbauenden Modellierungsanteile der Verhaltensmodelle als auch für die Auslegung und Programmierung der Steuerung.

Im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme wird unter Berücksichtigung des Ablaufplans demnach die gesamte steuerungstechnische Kette abgebildet – ausgehend von der zu programmierenden Steuerung über eine Abbildung der kompletten Signallisten (Ein- und Ausgänge) bzw. Kommunikationsperipherie der Anlage bis hin zum logischen und zeitgetreuen Verhalten der einzelnen Anlagenbestandteile. Dies schließt selbstverständlich auch ein akkurates Antwortverhalten der Anlagenbestandteile gegenüber der zu entwickelnden Steuerung mit ein.

Nach der Festlegung des Ablaufplans werden entsprechend der zu berücksichtigenden Funktionsgruppen entlang des Anlagenablaufs die notwendigen funktionalen Verhaltensmodelle modelliert bzw. vordefinierte Verhaltensmodelle aus einer Modellbibliothek verwendet. Ziel ist es, jegliche Anlagenbestandteile, die einen Einfluss bzw. Abhängigkeiten mit dem Materialfluss der Anlage besitzen entsprechend deren räumlichen und funktionalen Freiheitsgrade konsistent mit den in [Kapitel 4.2.1](#) entwickelten Layoutdaten zu erweitern. Hierfür wurden Modellierungskonventionen in Absprache mit den unterschiedlichen Entwicklungsdisziplinen getroffen, um Layoutdaten und Verhaltensmodelle zusammenhängend entwickeln bzw. anpassen zu können. Exemplarisch wurden in diesem Kontext beispielsweise die positive Förderrichtung der Förderbänder und konsistente Referenzpunkte für die eingesetzten Hubtische festgehalten und abgestimmt. Ergänzend hierzu wurde entsprechend der Festlegungen im Ablaufplan eine initiale Signalliste abgeleitet, die die zu berücksichtigende Sensorik sowie jegliche weitere, relevante steuerungstechnische Ein- und Ausgänge der Anlage und ergänzender Kommunikationskanäle, wie beispielsweise die Auslegung der einzusetzenden Bussysteme berücksichtigt. Diese ganzheitliche Ergänzung und Modellierung der steuerungstechnischen Bestandteile unter Berücksichtigung der Nachbildung der Anlagenperipherie bietet eine Grundlage für die hierauf aufbauende Materialflusssimulation.

Die durch die funktionale Virtualisierung einer Anlage mithilfe von logischen und zeitbasierten Verhaltensmodellen ermöglichte Materialflusssimulation gibt dem Anlagenplaner eine erste Validierungs- und Verifikationsmöglichkeit der ursprünglichen Planungsdaten hinsichtlich zentraler Planungsgrößen, wie beispielsweise der Einhaltung einer geforderten Taktzeit sowie auch der Umsetzbarkeit des initial erstellten Ablaufplans.

Steuerungsentwicklung und Virtuelle Inbetriebnahme

Aufbauend auf einem konsistenten Anlagenlayout sowie einer präzisen Verhaltensmodellierung der zu entwickelnden Anlage wird dem Steuerungs- und Automatisierungstechniker im Folgenden eine Vorlage an Simulations- und Modelldaten an die Hand gegeben, mithilfe dieser sich der initiale Steuerungscode für die spätere Anlagensteuerung auslegen und projektieren lässt. Für die Steuerungsentwicklung ist es hierbei zielführend, den initial entwickelten Ablaufplan unter Berücksichtigung der vorliegenden Signallisten zu berücksichtigen und diese in einem stetigen Wechsel bzw. in stetiger Synchronisierung anhand der Materialflusssimulation zu überprüfen und zu verifizieren. Ergebnis der Steuerungsentwicklung stellt ein vollständiges SPS-Programm dar (siehe Steuerungsentwicklung → **Abb. 41**), das entweder durch eine Soft-SPS oder direkt auf der späteren Steuerung der Anlage umgesetzt wird und im Zusammenspiel gegenüber der funktional, virtualisierten Anlage getestet werden kann.

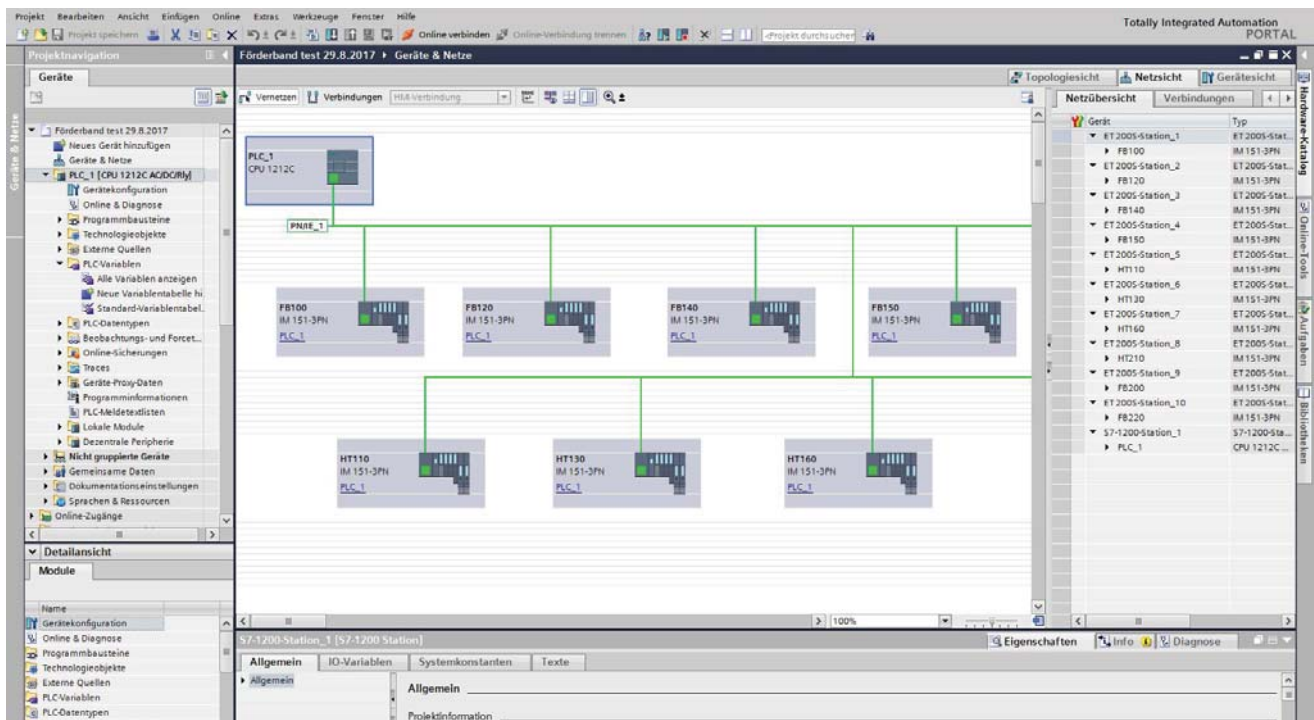


Abb. 40 Workflow für Verhaltens- bzw. Materialflusssimulation und Steuerungsauslegung

Das im Rahmen des Forschungsprojekts exemplarisch erreichte Ziel und Ergebnis der virtuellen Inbetriebnahme stellt eine konsistente Kopplung zwischen einem virtuell und interaktiv begehbaren Anlagenlayout, der hiermit eng verknüpften funktionalen Verhaltensmodellierung der gesamten Anlage als auch dem final abgesicherten Steuerungscode für die Übertragung auf die reale Anlage im Rahmen der finalen Inbetriebnahme dar. Zur Überprüfung und Validierung der Entwicklungsdaten dient die in diesem Zusammenhang entstandene und durchgängige Materialflusssimulation.

Für die Implementierung der Vorgehensweisen in Unternehmen ist eine Einführungs- und Operationalisierungsstrategie zu entwickeln. Dafür wird auf das EOS als Handreichung verwiesen. Die Autoren laden zum Diskurs ein.

5 ANWENDUNGSTRANSFER

Patrick Müller, Hendrik Grosser und Rainer Stark

Dieses Buch hat aufgezeigt, welche Möglichkeiten mit der virtuellen Inbetriebnahme und dem Smart Hybrid Prototyping praktisch erschlossen werden können und was dafür prozedural, methodisch, technisch und in Bezug auf Datenmodelle zu tun ist. Damit ist die Nachweisführung einer praktischen Machbarkeit erfolgt.

Für den Transfer in die betriebliche Anwendung sind weitere Schritte notwendig. Es werden weitere Anwendungsfallstudien motiviert, die im Rahmen von Testbeds auf konkrete Problemstellungen eingehen. Hierbei gilt es die jeweils typischen Handlungsfelder zu identifizieren, die für die jeweilige Unternehmenssituation symptomatisch erscheinen.

Die Integration der und die Umstellung auf die neuen integrierten virtuellen Lösungen aus dem Projekt VIB-SHP werden vom Endnutzer der Produktionsanlage motiviert und getriggert (d. h. i. d. R. durch den OEM). Eine Motivation dafür wäre die Erzielung eines zeitlichen Vorteils gegenüber der bisherigen Planung und Umsetzung der Produktionsanlage. D. h. aber auch im Umkehrschluss, dass der OEM eine einmalige Anschubfinanzierung für den Aufbau der smart hybriden Baukästen mitzutragen hätte, könnte dann aber mit dem Generalunternehmer für die Produktionsanlage für alle weiteren Projekte mit einer Einsparung bis zu 25 % rechnen und auch ein höheres Maß an Absicherung bis hin zur frühzeitigen Werkerschulung erzielen.

Der große Vorteil für den Know-how Aufbau beim OEM wäre, dass die Produktionsplaner des OEM sukzessiven Know-how Aufbau erhalten: durch das aktive Mitwirken bei der integrierten Modellierung und beim frühzeitigen VR-Einsatz im Rahmen der Prozessplanung, Anlagenautomatisierung und Absicherung des gesamten logischen Verhaltens der Anlage. Der Anlagenanbieter bzw. -zulieferer verringert das Risiko der späten Änderungen und kann zumindest zu Beginn auch höhere Erlöse erzielen, da bei einem typischen Festpreisansatz eine höhere Marge nach dem erstmaligen Etablieren der neuen Möglichkeiten zu erzielen ist. Der Anlagenhersteller bzw. -zulieferer kann darüber hinaus mit seinen Partnern und Zulieferern weitere Synergien etablieren. Dieses OEM getriebene Szenario wird umso wahrscheinlicher, je mehr Industrie 4.0 und IoT getriebene Produktionsprozesse Einzug halten werden. Die Angst vor der späten Überraschung auf dem industriellen Shop-Floor („Hallenboden“) wird die OEMs insbesondere auch hinsichtlich ihrer Technologieumstellungen (z.B. Umbau der Fabriken durch die Veränderung der Antriebsstränge) zu diesen sinnvollen neuen Maßnahmen treiben.

Treiber für diese neue integrierte Form der modernen Planung, Entwicklung und frühzeitige bzw. kontinuierliche Absicherung der Produktionsanlage ist der Anlagenhersteller selbst. Hier werden sich in absehbarer Zeit recht schnell die digitalen Technologieführer herauskristallisieren. Die deutschen KMUs in dieser Branche stehen somit vor der Herkulesaufgabe ihre tiefen technologischen und klassischen innovativen Maschinen- und Fertigungstechnologiekompetenzen mit den neuen Möglichkeiten des smart-hybriden Prototyping und der virtuellen Techniken geschickt zu erweitern und zu einem neuen Engineering zu formen. Hierzu haben die Partner im Projekt VIB-SHP gezeigt, dass die angewandte Forschung und die digitalen Technologieanbieter in Deutschland zusammen diesen Know-how Aufbau bei den Anlagenbauern maßgeblich bewirken und unterstützen können und sogar müssen. Hierzu sind die folgenden Etablierungsstufen sinnvoll und zielorientiert:

- a. Die Analyse der internen Engineering-Vorgänge und der Abstimmungen mit den jeweiligen Auftraggebern ist zu analysieren, um eine Business-orientierte Impact-Analyse für das jeweilige Unternehmen durchzuführen.
- b. Zunächst werden die Maßnahmen der neuen VIB-SHP-Lösung als Kandidaten vorgesehen, die bei ähnlichem Zeitaufwand die Robustheit und die Absicherung mit dem Auftraggeber maßgeblich erhöhen. Hierdurch wird sichergestellt, dass keine unnötigen zeitlichen Abfolgevereinbarungen neu zu verhandeln sind. Der Anlagenanbieter agiert aus eigener Souveränität heraus.
- c. Danach werden voraussichtlich die ambitionierteren Maßnahmen ergriffen, die sowohl vom Skill-Set als auch vom Marktgeschehen mehr Innovationen erfordern und bei denen der Grad der Digitalisierung stark steigen wird. Hierfür sind dann ggf. auch neue Verhandlungen mit dem Auftraggeber notwendig, welches dann aber auch zu neuen digitalen Wertschöpfungselementen führt.

Es erscheint derzeit als notwendig, dass der deutsche Maschinenbau insbesondere bei einem solchen sukzessiven Stufenplan größere Unterstützungen benötigt – und insgeheim auch erwartet – als von der Politik gemeinhin eingeschätzt wird. Daher ergeben sich aus dem Projekt VIB-SHP nunmehr große Impulse in derartige Transferprojekte auch förder technisch einzusteigen.

Es wird empfohlen, in weiterführenden Diskussionen eine Einordnung der Lösungsbausteine (Prozesse, Methoden, Werkzeuge) des VIB-SHP-Ansatzes in die Rahmenwerke der Industrie-4.0-Architekturen vorzunehmen, um sie in gängigen Ordnungssystemen der industriellen Digitalisierung zu positionieren. Hier seien beispielsweise RAMI (Reference Architectural Model for Industrie 4.0) und IIRA (Industrial Internet Reference Architecture) genannt [\[Industrial Internet Consortium, 2017; BMWI, 2018\]](#).

Für die Implementierung der Vorgehensweisen in Unternehmen ist für die Umsetzung der gezeigten Ansätze eine Einführungs- und Operationalisierungsstrategie zu entwickeln. Dafür wird auf das EOS als Handreichung verwiesen. Es ist davon auszugehen, dass je nach Fähigkeitsgrad der Unternehmen in den Bereichen PLM, ERP, Modellierung, Simulation, Virtualisierung und Produktvernetzung unterschiedliche Einführungsstrategien notwendig und mit den Vorhaben zu digitalen Transformation abzustimmen sind. Die Autoren laden zum Diskurs ein.

GLOSSAR

Das Glossar definiert Begriffe, die im Projekt VIB-SHP verwendet werden.

Anwendungsszenario	Beispielhafte Montageanlage, die zur Darstellung des Projektes SHP-VIBN verwendet wird.
Applikation	Bezeichnung für ein Softwareprogramm oder Programmpaket, das einem Benutzer die Durchführung bestimmter Aufgaben, bspw. Textverarbeitung, ermöglicht (Word, Excel, Solidworks, E-Plan usw.).
Bauelement / Element	Damit sind alle Elemente gemeint, die im SHP-Baukasten hinterlegt sind und auf die der Nutzer des Baukastens zugreifen kann, um das mechatronische System virtuell zu erstellen (Maschinen-Elemente, Elektrokomponente, Antriebe, Verstärker). Den virtuellen Elementen entsprechen in der Regel reale Elemente, aber auch Vorlagen zur Darstellung von Fertigungsabläufen u. ä.
Demonstrator	Ein Gerät – typischerweise ein PC – der zur Vorführung und Erläuterung eines Entwicklungsergebnisses verwendet wird. Auf dem PC sind alle Software-Pakete, Datenbanken usw. installiert, die für diese Aufgabe benötigt werden. Die Applikationssoftware kann auch auf anderen Rechnern bereitgestellt werden (z. B. solidworks, CATIA, E-Plan usw.).
Device Server	Er wandelt Daten verschiedener serieller Schnittstellen in Ethernet-kompatible Daten. Device-server werden zwischen dem USB-Geräteinterface und einer Ethernet-Schnittstelle eingesetzt.
Echtzeit	Beschreibt die Fähigkeit von Informationssystemen, bestimmte Ereignisse oder Abläufe zuverlässig wiederzugeben. Das heißt, daß das Zeitintervall des Informationssystems auf die Geschwindigkeit des Ereignisses/Ablaufes abgestimmt sein muß.
ERP-System	Enterprise-Resource-Planing system (auf deutsch: Produktionsplanungssystem). Mit einem ERP-System werden alle Vorgänge in einem Fertigungsbetrieb geplant, angefangen bei der Angebotserstellung, der Auftragsbearbeitung, der Fertigungsplanung und -steuerung, dem Erstellen von Rechnungs- und Lieferscheinen, der Reparaturverwaltung usw. ERP-Systeme werden meist mit PDM gekoppelt.
Graphical User Interface (GUI)	Bedienerschnittstelle zur Maschine

Hybrid	Das Substantiv „Hybrid“ und das Adjektiv „hybrid“ beziehen sich auf etwas Gebündeltes, Gekreuztes oder Vermischtes, z. B. verbindet ein Hybridantrieb einen Verbrennungsmotor mit einem Elektromotor. In der Technik wird somit hybrid als Verbindung eigentlich getrennter Felder/Funktionen/Prinzipien gesehen. Die Verbindung der digitalen („virtuellen“) Welt mit der realen ist z. B. eine „hybride“ Verbindung.
Immersion	Wenn sich die Realität und das virtuelle Bild immer stärker annähern.
Interaktionsgeräte	Damit sind Geräte gemeint, die es ermöglichen, Informationen, Befehle u. ä. an eine Steuerung zu übergeben und Daten zu empfangen. Diese Geräte sind in der Regel mit graphischen Benutzeroberflächen (GUI = Graphical User Interface) oder allgemeiner: Benutzeroberflächen (HMI = Human Machine Interface) ausgerüstet.
Lastenheft	Forderungen des Kunden an die vom Auftraggeber zu erarbeitende Lösung, z. B. eine Montagemaschine. Im Lastenheft sind Stückzahlen/Zeiteinheit, verfügbarer Platz, zugelassene Bauteile usw. spezifiziert.
Manufacturing execution system (MES)	deutsch: Produktionsleitsystem Das MES-System kann als eine fertigungsprozeßnahe Planungsschicht gesehen werden.
Metadaten	Daten, die Informationen über Merkmale anderer Daten enthalten, aber nicht diese Daten selbst.
Modellierung	Mit der Modellierung ist die Nachbildung des realen Verhaltens einer Baugruppe gemeint.
Partialmodell	Mit Partialmodell wird – abweichend vom üblichen Sprachgebrauch – ein Teilmodell beschrieben, also z. B. von einer modellierten Anlage eine komplexe Baugruppe. Mit dem Begriff „Teilmodell“, „Baugruppenmodell“, „Komponentenmodell“ ist eine selbsterklärende Alternative vorhanden.
Produktdatenmanagement (PDM)	Produktdatenmanagement (PDM) ist ein Konzept, welches zum Gegenstand hat, produktdefinierende, -repräsentierende, -präsentierende Daten und Dokumente als Ergebnis der Produktentwicklung zu speichern, zu verwalten und in nachgelagerten Phasen des Produktlebenszyklus zur Verfügung zu stellen. Grundlage dieses Wirkens ist ein integriertes Produktmodell. Des Weiteren ist die Unterstützung der Produktentwicklung durch geeignete Methoden auf Basis von Prozessmodellen dem PDM zuzurechnen.
Pflichtenheft	Der Auftragnehmer beschreibt und definiert im Pflichtenheft die Lösung, mit der das Lastenheft erfüllt werden soll.

Produktdatenmodell	Ein Produktdatenmodell ist ein Schema für die formale Abbildung von Produktdaten. Es bildet die Grundlage für die Datenablage von beispielsweise Modellen aus Autorenwerkzeugen. [Wirtz, 2001]
Produktmodell	Ein Produktmodell ist die Abbildung eines konkreten Produkts in Form eines formalen Modells. Zur Abbildung aller relevanter Produktaspekte bedient es sich des Produktdatenmodells. [Wirtz, 2001]
Proprietäre Software	(lateinisch propriē „eigentümlich“, „eigen“, „ausschließlich“) bezeichnet eine Software, die das Recht und die Möglichkeiten der Wieder- und Weiterverwendung sowie Änderung und Anpassung durch Nutzer und Dritte stark einschränkt. Es gibt einige Mechanismen, die eine Software „proprietär“ machen und halten können: durch Softwarepatente, das Urheberrecht, Lizenzbedingungen (EULAs), das Aufbauen der Software auf herstellerspezifischen, nicht veröffentlichten Standards und die Behandlung des Quelltextes als Betriebsgeheimnis (englisch closed source).
Prototyping	Mit Prototyping ist die Herstellung eines „Baumusters“ gemeint, z. B. bei der Entwicklung eines Krankenbettes mit Elektroantrieb, oder der Prototyp einer Saftmaschine usw. Am Prototyp werden dann die geforderten Eigenschaften des neuen Produktes untersucht und verbessert.
Prozess	Eine Reihenfolge von miteinander verbundenen Vorgängen, die einer Vielzahl von Einflußgrößen unterworfen sind.
Prozessmodellierung	Prozesse, Teilprozesse, Prozessabschnitte können in Abhängigkeit der Komplexität modelliert werden, d. h. die Abläufe werden mit Hilfe mathematisch-physikalischer Gesetzmäßigkeiten beschrieben und für die Digitalisierung vorbereitet.
Smart Hybrid Prototyping (SHP)	Smart Hybrid Prototyping stellt eine innovative Form des Entwickelns entlang des Produktentwicklungsprozesses von der Idee bis zur Freigabe von mechanischen und mechatronischen Systemen dar, bei der die jeweils digital verfügbaren Bauelemente virtuell oder physikalisch ausgelegt und kombiniert werden, um die spätere Produktfunktion für die Entwickler und Kunden schon frühzeitig im Produktentwicklungsprozess in Echtzeit erlebbar darstellen zu können.
SHP-Device	Mit einem SHP-Device ist in der virtuellen Welt ein Gerät gemeint, das die Nachbildung des physikalischen Verhaltens eines Bauteils ermöglicht. Beispiel: Eine Fahrzeugtür soll virtuell betätigt werden, dabei soll der Nutzer die gleichen Kräfte und die gleiche Dynamik erfahren (fühlen), die das reale Element hat.

Sicherheitsfunktion	Die Sicherheitsfunktion beschreibt eine Lösung, mit der eine Gefährdung beseitigt wird (z. B. STO: Sichere Verhinderung des unbeabsichtigten Anlagenstarts, SLS: Sicher begrenzte Geschwindigkeit).
SISTEMA	Ein Software-Paket der Berufsgenossenschaften zur Ermittlung von erforderlichen Performance-Level-Werten und den durch die Sicherheitsmaßnahmen tatsächlich erreichten Werten.
Smart	pfiffig, klug, gerissen, gewieft, gewandt, geschickt.
Stakeholder	Der „Stakeholder“ überprüft das Pflichtenheft/die angebotene Lösung auf bestimmte Merkmale: Ist das Pflichtenheft vollständig erfüllt? Sind die Interessen des Anbieters – Preise, Lieferzeiten – berücksichtigt? Kann die Anlage ohne Probleme zum Kunden transportiert werden usw.
Technologie	Fertigungsverfahren, z. B. Schweißen, Löten, Kleben, Schrauben, Fügen
TUI-Framework	TUI-Framework ist eine zeichenorientierte Benutzerschnittstelle, (text-based user interface, kurz TUI). Ein TUI-Framework erlaubt den Zugriff auf verschiedene Applikationen.
TUI-Server	kurz für: text-based user interface - Server Der TUI-Server ist eine Software, die es ermöglicht, daß verschiedene Applikationen kommunizieren können.
Verfahrensmodell	Ein technologisches Verfahren wird häufig modelliert, um es virtuell ablaufen zu lassen. <i>Beispiel: Das Punktschweißen kann mit einer Modellierung soweit digitalisiert werden, daß die Technologie am Modell untersucht und optimiert werden kann.</i>
Verhaltensmodell	Dieser Begriff ist in den Sozialwissenschaften entwickelt worden und ist daher stark psychologiegeprägt. Für technische Zusammenhänge ist der Begriff daher weniger geeignet, da es in der Technik meist um deterministische Prozesse geht. Im Zusammenhang mit der VIBN wird unter Verhaltensmodell die wirklichkeitsgetreue virtuelle Nachbildung des Verhaltens einer Baugruppe verstanden.
Virtual reality (VR)	Virtuelle Realität ist die Darstellung der Wirklichkeit in einer computergenerierten, interaktiven virtuellen Umgebung. <i>Anmerkung: offenbar ist Virtual Reality besser verständlich als Virtuelle Realität.</i>
Virtuell	Virtualität ist die Eigenschaft einer Sache, nicht in der Form zu existieren, in der sie zu existieren scheint, aber in ihrem Wesen oder ihrer Wirkung einer in dieser Form existierenden Sache zu gleichen

LITERATURVERZEICHNIS

- Anderl, R.; Eigner, M.; Sendler, U. und Stark, R. (2012): *Smart Engineering: Interdisziplinäre Produktentstehung*, Berlin, Heidelberg: Springer.
- Auricht, M.; Beckmann-Dobrev, B. und Stark, R. (2012): "Evaluation am Beispiel einer PKW-Heckklappe: Frühzeitige multimodale Absicherung virtueller Prototypen", *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF*, (107)5, pp. 327–331.
- Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. und Vogel-Heuser, B. (eds.) (2014): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration*, Berlin: Springer.
- Beier, G. (2014): *Verwendung von Traceability-Modellen zur Unterstützung der Entwicklung technischer Systeme*, Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2013, Stuttgart: Fraunhofer Verl.
- BMW (2018): "Plattform INDUSTRIE 4.0", BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, <http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Home/home.html> (current Feb. 26, 2018).
- Bös, M. (2008): "Methoden der Digitalen Fabrikplanung: ein praxisorientierter Ansatz für KMU", *Advances in simulation for production and logistics applications*, pp. 407–415.
- Bowman, D. A. (2005): *3D user interfaces: Theory and practice*, Boston: Addison-Wesley.
- Bracht, U.; Geckler, D. und Wenzel, S. (eds.) (2011): *Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele*, Berlin, New York: Springer.
- builder, w media Ltd \textbar Olaf Wiedfeldt-based on jquery UI AutomationML, Automa-tionml.org, <http://www.automationml.org/o.red.c/home.html> (current Jan. 10, 2018).
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Industrial automation systems and integration: Product data representation and exchange - Part 210: Application protocol: Electronic assembly, interconnected and packaging design, (25.040.40)DIN EN ISO 10303-210:2002-12.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2012a): *Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter*, 2011st edition, (25.040.30)DIN EN ISO 10218-1, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2012b): *Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersysteme und Integration*, 2011st edition, (25.040.30)DIN EN ISO 10218-2, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Drath, R. (ed.) (2010): *Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML: Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Duffy, V. G. und Salvendy, G. (2000): "Concurrent engineering and virtual reality for human resource planning", *Computers in Industry*, (42)2-3, pp. 109–125.
- Eigner, M.; Koch, W. und Muggeo, C. (eds.) (2017a,b und c): *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme: Der PLM-unterstützte Referenzentwicklungsprozess für Produkte und Produktionssysteme*, Berlin: Springer Vieweg.

- Eigner, M., Roubanov, D. und Zafirov, R. (2014): *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*, Berlin: Springer.
- Eigner, M. und Stelzer, R. (2009): *Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*, 2., neu bearb. Aufl., Dordrecht: Springer.
- Feldhusen, J. und Grote, K.-H. (eds.) (2013): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- FRAUNHOFER IEM (2017): "GEMiNI 4.0", <http://www.geschaeftsmodelle-i40.de/index.php?id=38> (current Feb. 26, 2018).
- Fraunhofer IPK (2018) *VIB-SHP*, <http://vib-shp.de>.
- Geissbauer, R.; Schrauf, S.; Brettram, P. und Cheraghi, F. (2017): "Digital Factories 2020: Shaping the future of manufacturing", <https://www.pwc.de/de/digitale-transformation/digital-factories-2020-shaping-the-future-of-manufacturing.pdf> (current Mar. 29, 2018).
- Hundt, L. (2012): *Durchgängiger Austausch von Daten zur Verhaltensbeschreibung von Automatisierungssystemen: Ein Beitrag zum Datenmanagement beim Engineering von Produktionsanlagen*, <https://www.amazon.de/Durchg%C3%A4ngiger-Austausch-Daten-Verhaltensbeschreibung-Automatisierungssystemen/dp/3832532587>
- Industrial Internet Consortium (2017): "The Industrial Internet of Things: Volume G1: Reference Architecture" (current Mar. 29, 2018).
- Israel, J. H. (2011): *Hybride Interaktionstechniken des immersiven Skizzierens in frühen Phasen der Produktentwicklung*, Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2011, Stuttgart: Fraunhofer Verl.
- Kern, T. A. (2009): *Entwicklung Haptischer Geräte: Ein Einstieg für Ingenieure*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kiefer, J. (2007): *Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszeilen im Bereich Karosserierohbau*, Zugl.: Saarbrücken, Univ., Diss., 2007, Saarbrücken: Univ. des Saarlandes Lehrstuhl für Fertigungstechnik.
- Kind, S.; Exner, K.; Stark, R. und Neumeyer, S.: "Smart Engineering im Kontext von Industrie 4.0: Baukastensysteme für die erlebbare Absicherung von Montageanlagen" in Brökel, K., F. Rieg, R. Stelzer, J. Feldhusen, K.-H. Grote, P. Köhler, N. Müller, G. Scharr (eds.) 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: KT2016 - 6. und 7. Oktober 2016 in Rostock, pp. 251–258.
- Kirsch, L. (2017): *Neue Entwicklungsansätze für Industrie*, *INDUSTR.com - Das Industrie-Portal*, https://www.industr.com/de/A-und-D-Magazin/_storage/asset/2252179/storage/master/file/14988892/CONTACT%20Software_Whitpaper.pdf (current Jan. 10, 2018).
- Krause, F.-L.; Franke, H.-J. und Gausemeier, J. (2007): *Innovationspotenziale in der Produktentwicklung*, München: Hanser.
- Lotter, B. (1992): *Wirtschaftliche Montage: Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik*, 2., erw. Aufl., Düsseldorf: VDI-Verl.
- Lotter, B. und Wiendahl, H.-P. (eds.) (2006): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis* ; mit 16 Tabellen, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Lünnemann, P.; Stark, R.; Wang, W. M. und Manteca, P. I. (2017): *“Engineering activities – considering value creation from a holistic perspective”* in Jardim-Gonçalves, R. (ed.) Engineering, technology & innovation management beyond 2020: new challenges, new approaches: 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC) conference proceedings, Piscataway, NJ: IEEE, pp. 315–323.
- Lünnemann, P., Wang, W. M. und Stark, R.: *“Methodische Analyse der Entwicklungsaktivitäten”* in Peter Köhler (ed.) 15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2017: DuEPublico: Duisburg-Essen Publications Online, University of Duisburg-Essen, Germany, pp. 89–98.
- Mujber, T. S.; Szecsi, T. und Hashmi, M.s.J. (2004): *“Virtual reality applications in manufacturing process simulation”*, (155), pp. 1834–1838.
- Müller, P. (2014) *Integrated engineering of products and services: layer-based development methodology for product-service systems*, Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2013, Stuttgart: Fraunhofer Verl.
- Müller, P.; Muschiol, M. und Stark, R. (2012): *“PLM-Based Service Data Management in Steam Turbine Business”*, Product Lifecycle Management. Towards Knowledge-Rich Enterprises. PLM 2012, (388), pp. 170–181.
- Neuhausen, J. (2001): *Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion*, Aachen.
- OPC Foundation (2018): *“What is OPC?”*, <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/> (current Mar. 28, 2018).
- OSLC (2018) *Open Services for Lifecycle Collaboration*, <http://open-services.net/> (current Jan. 10, 2018).
- Stark, R.; Beckmann-Dobrev, B.; Schulze, E.-E.; Adenauer, J. und Israel, J. H. (2009): *“Smart Hybrid Prototyping zur multimodalen Erlebbarkeit virtueller Prototypen innerhalb der Produktentstehung”* in 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme BWMMMS’09: Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme, Berlin, pp. 437–443.
- Runde, C. (2007): *Konzeption und Einführung von virtueller Realität als Komponente der digitalen Fabrik in Industrieunternehmen*, Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2007, Heimsheim, Stuttgart: Jost-Jetter; Univ.
- Scheer, A.-W. und Cocchi, A. (2006): *Prozessorientiertes Product Lifecycle Management: Mit 3 Tabellen*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Schenk, M. und Schumann, M. (eds.) (2016): *Angewandte virtuelle Techniken im Produktentstehungsprozess: AVILUSplus*, Berlin: Springer Vieweg.
- Schreiber, W. und Zimmermann, P. (2011): *Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Siemens Industry Software GmbH (2018): *“PLM XML: Siemens PLM Software”*, <https://www.plm.automation.siemens.com/de/products/open/plmxml/> (current Jan. 10, 2018).
- Stähler, P. (2002): *Geschäftsmodelle in der digitalen Ökonomie: Merkmale, Strategien und Auswirkungen*, 2. Aufl., Zugl.: St.Gallen, Univ., Diss., 2001

u.d.T.: Stähler, Patrick: Merkmale von Geschäftsmodellen in der digitalen Ökonomie, Lohmar: Eul.

- Stark, R. und Beckmann-Dobrev, B. (2010):** *„Ein interdisziplinärer Ansatz zur multimodalen funktionalen Absicherung mechatronischer Systeme am Beispiel einer PKW-Heckklappe“* in 3. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, pp. 18–29.
- Stark, R.; Krause, F.-L.; Kind, C.; Rothenburg, U.; Müller, P.; Hayka, H. und Stöckert, H. (2010):** *„Competing in engineering design: The role of Virtual Product Creation“*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, (3)3, pp. 175–184.
- T. Fielding, R. (2000):** *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures*.
- VDI: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2011):** *Digitale Fabrik*, (03.100.50, 35.240.50)VDI 4499, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2015):** *„Thesen und Handlungsfelder: Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik in der Ingenieurarbeit der Zukunft“*, https://m.vdi.de/fileadmin/user_upload/VDI_Thesen-und-Handlungsfelder_Einsatz-von-IKT-in-Ingenieurarbeit.pdf.
- VDI: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2016):** *Virtuelle Inbetriebnahme*, 2nd edition, (25.040.40, 35.240.50)VDI/VDE 3693, Berlin: Beuth Verlag GmbH (current Jan. 17, 2018).
- VDMA (2018):** *„VDMA Homepage“*, <https://www.vdma.org> (current Mar. 29, 2018).
- Virtual Dimension Center VDC (2011):** *„Whitepaper Wirtschaftlichkeitsbewertung VR“, Nutzen, Kosten, Modelle, Indikatoren*, https://www.vdc-fellbach.de/files/Whitepaper/2011%20VDC-Whitepaper%20Wirtschaftlichkeit%20VR_v06.pdf.
- Virtual Dimension Center VDC (2012):** *„Whitepaper Virtual Reality im Anlagenbau: Anwendungen, Nutzen, Technologien“*, https://www.vdc-fellbach.de/fileadmin/assets/Publikationen/Whitepaper/2012_VDC-Whitepaper_VR_im-Anlagenbau_v08.pdf.
- Ware, C. (2009):** *Information visualization: Perception for design*, 2. ed., [Nachdr.], Amsterdam: Elsevier.
- Westkämper, E. und Runde, C. (2006):** *„Anwendungen von Virtual Reality in der Digitalen Fabrik – eine Übersicht“*, wt-online3, pp. 99–103.
- Wikipedia (2018):** *„Proprietäre Software“*, https://de.wikipedia.org/wiki/Propriet%C3%A4re_Software (current Mar. 29, 2018).
- Wirtz, J. (2001):** *Ein Referenzmodell zur integrationsgerechten Konzeption von Produktdatenmanagement*, Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2001, München: Utz Wiss.
- Wolf, J. (2007):** *Linux-Unix-Programmierung: Das umfassende Handbuch ; [Einstieg, Praxisbeispiele, Referenz; System- und Netzwerkprogrammierung; X Window, GTK+, SDL, Werkzeuge, Sicherheit; inkl. Openbooks zu C, Unix und Debian]*, 2., aktualisierte und erw. Aufl., 1. Nachdr, Bonn: Galileo Computing.

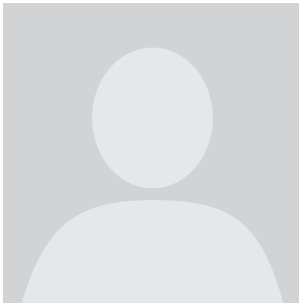
ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1	Verallgemeinerter Entwicklungs- und Angebotsprozess im Anlagenbau [Müller, Muschiol und Stark, 2012]	12
Abb. 2	Bearbeitung C-Säule mit Roboter und Werksarbeitern, Illustration in CIM Database PLM	13
Abb. 3	Anwendungsfälle in VIB-SHP	15
Abb. 4	Definition von Smart Hybrid Prototyping.	26
Abb. 5	Produktentstehungsprozess von Fertigungsanlagen und Einbindung der SHP-Baukastenmethode in diesen Prozess	36
Abb. 6	Planungsphasen	38
Abb. 7	Engineering Operating System nach [Lünnemann et al., 2017]	49
Abb. 8	Kategorisierung von Anlagenbestandteilen nach Entwicklungsdisziplinen	52
Abb. 9	Zusammenhänge der disziplinspezifischen Entwicklungsmodelle in einem Baukasten	53
Abb. 10	Der interdisziplinäre Baukasten, seine Elemente und ihre Partialmodelle	54
Abb. 11	Verortung und Zusammenhänge der disziplinspezifischen Partialmodelle einer Funktionsgruppe bzw. einer Gesamtanlage	55
Abb. 12	Beispiel einer Klassifizierung im PLM-System, CIM Database PLM	56
Abb. 13	Paradigma zur Gestaltung modularer Produktionssysteme [Neuhausen, 2001]	57
Abb. 14	Gestaltungsebenen der Modularisierung [Neuhausen, 2001]	58
Abb. 15	Auszug der Elemente des VIB-SHP Baukastensystems	59
Abb. 16	Allgemeiner prozessualer Ablauf der Anlagenentwicklung mit virtueller Inbetriebnahme	60
Abb. 17	Planungssystematik nach Lotter [Lotter, 1992]	62
Abb. 18	Mögliche Systemwelt zu VIBN mit Smart-Hybrid-Prototyping	68
Abb. 19	Produktstruktur mit Freiheitsgrad und zugeordnetem Signal	70
Abb. 20	Konfigurationsbeispiel (nach Belaifa, Israel, 2013)	72
Abb. 21	Informations- und Signalflüsse zwischen den Systemen der „Online-Kopplung“	74
Abb. 22	Architektur und Informationsaustausch zwischen WinMOD,	75
Abb. 23	Schnittstellen zum PLM-System	76
Abb. 24	Workflow zur Integration der AutomationML Anlagenbeschreibung in SCADA-Systeme	79
Abb. 25	Konvertierungsprozess des universellen Konvertierungstools	80
Abb. 26	Sequenz Schnittstelle PLM-ERP	81
Abb. 27	Zusätzliche ERP-Daten in PLM-ERP-Schnittstelle	82
Abb. 28	Moderne IT-Landschaft, in Anlehnung an [Eigner et al., 2017b]	85
Abb. 29	Benutzungsoberfläche des Software-Prototyps für cyberphysischen Produktstruktur im PLM-System CIM Database PLM	88

Abb. 30	Sichtenkonzept für eine cyberphysische Produktstruktur	89
Abb. 31	Gemeinsames Anwendungsszenario im Projekt VIB-SHP (Szene einer Montage von Schäumlingen in ein Innenblech einer Karosserietragstruktur)	95
Abb. 32	Roboter Arbeitsplatz	97
Abb. 33	Arbeitsplatz des Produktionsfacharbeiters	97
Abb. 34	Kopplung der Simulationswerkzeuge mit der Visualisie- rungsumgebung	103
Abb. 35	XML-Konfigurationsdatei für den Python-Client (am Beispiel des KUKA LBR / IIWA)	104
Abb. 36	Workflow für die virtuelle Anlagenabsicherung manueller Montagevorgänge	105
Abb. 37	Einsatz von VR-Technologien für interaktive Design Reviews	106
Abb. 38	Virtuelle Absicherung einer manuellen Pick- and Place Aufgabe eines Workers	107
Abb. 39	Intuitive Anlageninteraktion und Workertraining durch hybride Prototypen	108
Abb. 40	Workflow für Verhaltens- bzw. Materialflusssimulation und Steuerungsauslegung	110
Abb. 41	Steuerungsentwicklung für die Virtuelle Inbetriebnahme einer Anlage	112

AUTOREN UND PARTNER

AUTOREN



Waldemar Becker vertrat das Unternehmen Mewes und Partner im Rahmen des Projektes VIB-SHP.



Niels Biedermann ist Simulationsverantwortlicher Robotik bei der EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG am Standort Sindelfingen. Die Schwerpunkte seiner Tätigkeit liegen in der Anlagen- und Robotersimulation und Roboter- und Fügetechnologien.



Claas Blume ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IPK im Bereich modellbasiertes Entwickeln. Er überträgt Forschungsthemen aus den Bereichen Digitale Fabrik und (modellbasiertes) Systems Engineering in die industrielle Praxis.
<https://www.linkedin.com/in/claasblume/>



Andreas Geiger ist stellv. Abteilungsleiter der Abteilung Modellbasiertes Entwickeln am Fraunhofer IPK.
www.linkedin.com/in/geigerand



Dr.-Ing. Hendrik Grosser ist Senior Consultant bei der Detecon International GmbH im Bereich Digital Engineering.
<https://www.linkedin.com/in/dr-hendrik-grosser-b6312033/>



Maximilian Hertzer ist B.Sc. der Informatik und ist als Junior Analytiker im Produktmanagement bei CONTACT Software angestellt. Der Schwerpunkt seiner Tätigkeit liegt auf Forschungsarbeiten im Bereich Systems Engineering, auch im modellbasierten Ansatz. Im Rahmen dieser Forschungstätigkeit war er an dem Entwurf des Anlagenbaukastens und der Demonstratoren beteiligt.



Simon Kind (M. Sc.) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Industrielle Informationstechnik der Technischen Universität Berlin. Er beschäftigt sich mit der Entwicklung hybrider Prototypen für eine intuitive Mensch-Maschine-Interaktion im Kontext der digitalen Fabrik sowie dem Thema der Virtuellen Inbetriebnahme.

www.linkedin.com/in/SimonKindTUBI/



Lucas Kirsch ist Consultant bei der CONTACT Software. Als Mitglied der Abteilung Produktmanagement berät er Unternehmen im (modellbasierten) Systems Engineering und Product Lifecycle Management. Parallel koordiniert und partizipiert er in CONTACT Vorentwicklungs- und Verbundforschungsprojekten.

<https://www.linkedin.com/in/lucas-kirsch/>



Konstantin Könecke ist Application Specialist bei der PSI Automotive & Industry GmbH, Berlin.

https://www.xing.com/profile/Konstantin_Koennecke/



Dr.-Ing. Gerhard Lechler ist Gründer der Fa. ProMESS GmbH.



Pascal Lünemann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IPK im Bereich Informations- und Prozesssteuerung. Er beschäftigt sich mit der ganzheitlichen, menschenzentrierten Digitalisierung des Ingenieurs-Entwicklungsumfelds.
https://www.xing.com/profile/Pascal_Luennemann/



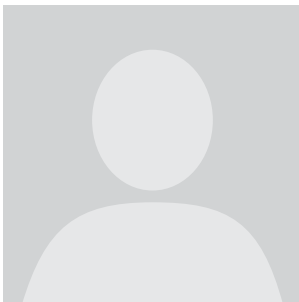
Bernhard Mathes ist Projektleiter im Anlagenengineering bei der EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG am Standort Sindelfingen. Die Schwerpunkte seiner Tätigkeit liegen in der gesamtheitlichen Verantwortung der Projektabwicklung von Großprojekten sowie dem Controlling aller Projekte am Standort Sindelfingen.



Dr. Patrick Müller arbeitet bei der CONTACT Software GmbH in Bremen. Dort übernimmt er fachliche Führung als Senior Product Manager PLM und Personalführung als Leiter des Teams Engineering Transformation. Projekte der angewandten Forschung, wie auch das Projekt VIB-SHP, gehören zu seinem Aufgabenumfang.



Ingolf Rehfeld ist Geschäftsführer der nVIZ GmbH.
<https://www.linkedin.com/in/ingolf-rehfeld-2003b84/>



Jonas Schmidt vertrat das Unternehmen Datenflug im Projekt VIB-SHP.



Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark ist Leiter des Fachgebietes Industrielle Informationstechnik der Technischen Universität Berlin und Direktor des Geschäftsfeldes Virtuelle Produktentstehung des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK).



Maximilian Weidemann studiert im Master Prozessorientierte Wirtschaftsinformatik an der HTW Dresden.



Herr Jörg-Uwe Zuchold ist Leiter Forschung bei der PSI Automotive & Industry GmbH , Berlin.

https://www.xing.com/profile/JoergUwe_Zuchold

UNSERE PARTNER



Die **CONTACT Software GmbH** hat ihren Sitz in Bremen und setzt mit einem internationalen Netzwerk global anspruchsvolle Projekte im digitalen Daten- und Prozessmanagement um.

CONTACT ist der führende Anbieter von offener Standardsoftware für den Produktentstehungsprozess und die digitale Transformation. Unsere Produkte helfen, Projekte zu organisieren, Prozesse verlässlich auszuführen und weltweit anhand von virtuellen Produktmodellen und dem digitalen Zwilling zusammenzuarbeiten. Unsere offene Technologie und unsere CONTACT Elements Plattform sind ideal, um weitere IT-Systeme der Produktentwicklung und des Internet of Things zu verbinden und durchgängige Geschäftsprozesse zu ermöglichen.

Das Lösungsangebot von CONTACT bietet schon heute eine stabile Basis, um sowohl innovative Ansätze der Entwicklung Cyber-Physischer Systeme (CPS) zu unterstützen. Durch die langjährige Erfahrung als Forschungspartner ist CONTACT in der Lage auf Basis von Forschungsprojekten sein Angebotsportfolio (Standardsoftware und Beratung) systematisch zu erweitern und die Forschungsergebnisse effektiv zu industrialisieren.



Die **Datenflug GmbH** mit Sitz in Berlin hat sich auf die Entwicklung interaktiver 3D-Anwendungen spezialisiert. Wir realisieren Projekte im Bereich Virtual Reality, Augmented Reality und Mixed Reality. Für Herausforderungen, die durch Trends der Digitalisierung wie Industrie 4.0 und Big Data entstehen, schaffen wir kreative Lösungen, die Ihren Arbeitsalltag erleichtern. Unsere langjährige Erfahrung bei der Entwicklung und dem Einsatz von VR-Techniken sowie 3D-Echtzeitanwendungen hilft uns, für unsere Kunden innovative Lösungen zu entwickeln. Durch eigens entwickelte Software und neueste Technologien wie Oculus Rift, HTC Vive oder HoloLens sowie die Verwendung von Standardsoftware wie Unity und Co. entstehen so kundenspezifische Softwareprodukte. Unsere Lösungen werden von Kunden aus der Industrie, insbesondere dem Maschinen- und Anlagenbau eingesetzt. Auch in den Bereichen Real Estate, Event, Beratung oder sogar in politischen Institutionen profitieren Kunden von virtuell geschaffenen Welten.



Die **EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG** beschäftigt aktuell mehr als 1.400 Mitarbeiter an 27 Standorten und ist ein weltweit tätiger Entwicklungsbegleitender Engineeringdienstleister. Sie bildet mit der Entwicklung von Produktionsanlagen und Fabrikkonzepten die Schnittstelle zwischen der Produktentwicklung und dem Anlagenbau. Durch das ganzheitliche Verständnis für Fahrzeuge und Fertigungsanlagen kann die EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG den Entstehungsprozess von Beginn der Anlagenplanung an bis hin zur Inbetriebnahme maßgeblich mitgestalten.

Am **Geschäftsfeld Virtuelle Produktentstehung** des **Fraunhofer IPK** werden Methoden, Technologien und Organisationsansätze zur ganzheitlich orientierten Unterstützung der Produktentstehung von der Produktidee, über die Produktentwicklung und -simulation bis hin zur Produktionsplanung entwickelt, die auch die Digitalen Fabrik einschließen. Im Bereich Informations- und Produktdatenmanagement des Geschäftsfelds werden unter anderem kundenindividuelle Produktdaten in innovative ganzheitliche Produktdatenmanagement-Gesamtlösungen integriert. Im Forschungsfeld „Intuitive Interaktion“ werden neue, innovative Interaktionstechniken für die Werkzeuge der Virtuellen Produktentstehung entwickelt und evaluiert, oft auch im Industrieauftrag.

Die **Jonas & Redmann Automationstechnik GmbH (J&R)** ist ein inhabergeführtes Familienunternehmen mit Sitz in Berlin. Die Automationstechnik GmbH gehört zur Jonas & Redmann Group GmbH. Von der Sondermaschine bis zur Verkettung von kompletten Produktionslinien ist Jonas & Redmann in den Geschäftsfeldern „Medical engineering“, „Montageautomation“, „Photovoltaik“ und „Batterietechnik“ tätig.

Die Kernkompetenz von Jonas & Redmann liegt in der Automatisierung von Maschinen und Produktionsprozessen, die bei der Herstellung von Produkten mit hochsensiblen Bauteilen eingesetzt werden. Dabei bietet J&R angefangen bei der Beratung der Kunden zu ihren Produktionsprozessen über die Konzeptionierung der Anlagen, Konstruktion, Montage und Inbetriebnahme beim Kunden vor Ort die komplette Bandbreite der Realisierung der Produktionsanlagen an.



Die **Mewes & Partner GmbH** wurde 1991 gegründet und ist seither in Hennigsdorf bei Berlin ansässig. Virtualisierung und Virtuelle Inbetriebnahme für die Automatisierung - dafür entwickelt die Firma Mewes & Partner seit 1991 die WinMOD-Systemplattform. Die daraus konfigurierbaren WinMOD-Systeme sind weltweit für die Absicherung der Softwarequalität in der Fabrik-Automation und der Prozess-Automation im Einsatz. Wir sind in der Lage die verschiedensten Prozesse aus den unterschiedlichsten Branchen in Echtzeit mit allen funktionalen Einheiten darzustellen. Langjährige Projekterfahrungen, detaillierte Prozesskenntnisse, Einblicke in die Abläufe in den Branchen und ein Team von hochqualifizierten Mitarbeitern bilden hierfür die Grundlage.

nVIZ unterstützt führende Unternehmen bei der Optimierung ihrer digitalen Prototypen-Prozesse. Wir entwickeln prozessorientierte Methoden zur automatischen Erstellung von digitalen Prototypen für die Echtzeit-Visualisierung in fotorealistischer Qualität oder für die Simulation der funktionellen Absicherung.



Die **PROMESS Montage- und Prüfsysteme GmbH** entwickelt, fertigt und vertreibt elektromechanische Komponenten für die Montagetechnik. Dazu gehören elektromechanische Präzisionspressen im Kraftbereich von 10 N bis 500 kN, Drehmomentmodule von 0,1 Nm bis 200 Nm, schnelle Montagepressen mit Fügegeschwindigkeiten bis 1500mm/s, Sondermodule nach Kundenspezifikation und Einzelarbeitsplätze für komplexe Fügeaufgaben. Alle Komponenten werden mit der erforderlichen Sicherheitstechnik und einer sehr leistungsfähigen Software für plug-and-play geliefert. Die Komponenten zeichnen sich durch eine sehr hohe Lebensdauer, mechanische Stabilität und bedienerfreundliche Software aus.

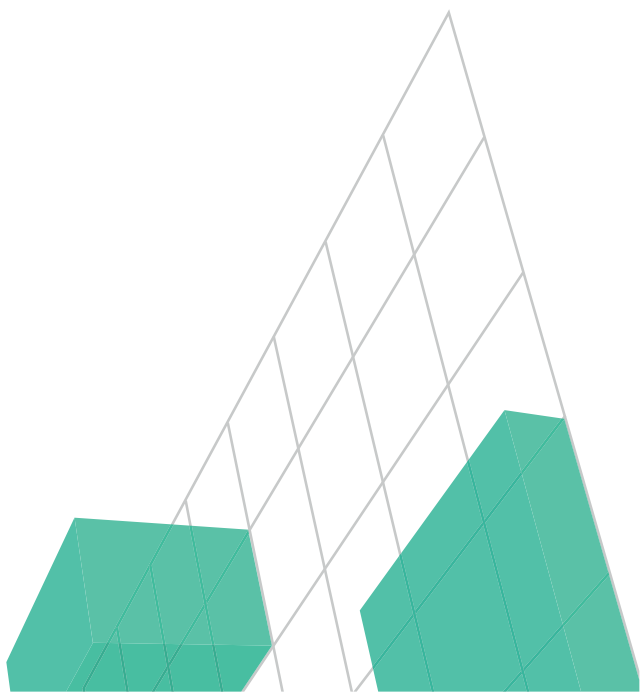


Die **PSI Automotive & Industry GmbH** entwickelt als eine der größten eigenständigen Gesellschaften der PSI Software AG und in Kooperation mit Großunternehmen, mittelständischen Marktführern und führenden Forschungseinrichtungen unter der Produktmarke PSIpenta modulare Komplett-Lösungen für die Fertigungs-Industrie 4.0, unter anderem Module für Produktionsplanung und -steuerung (ERP, MES), Mobile Lösungen (Industrial Apps), Adaptive Fertigungssteuerung, Mehrwerkefähigkeit (Multisite) und Elektronischen Datenaustausch (EDI). Dabei werden sowohl Fertiger des Maschinen- und Anlagenbaus, des Automobilbaus und der Automobilzuliefererindustrie als auch Instandhaltungsdienstleister angesprochen. Die PSI Automotive & Industry GmbH ist im Rahmen eines Konzernzertifikats nach ISO 9001 selbst zertifiziert.



Das **Fachgebiet Industriellen Informationstechnik** an der **Technischen Universität Berlin** beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung von digitalen Lösungen zur Verbesserung und Erweiterung der Ingenieurstätigkeiten im gesamten Ablauf der virtuellen Produktentstehung von der Produktidee über die Produktentwicklung bis hin zur Planung und Anlaufabsicherung der Produktion.

Zentrale Forschungsschwerpunkte am Fachgebiet sind in diesem Bereich sowohl eine intuitive und kontextbezogene Informationsmodellierung, die Entwicklung intuitiv bedienbarer und funktional erlebbarer virtueller Prototypen, als auch eine funktionsorientierte, virtuelle Produkt- und Produktionsabsicherung. Speziell im Bereich der Produktionsplanung und Anlaufabsicherung werden unterschiedliche, virtuelle Techniken und Absicherungsmethoden – wie beispielsweise die Virtuelle Inbetriebnahme – untersucht und erprobt.



Herausgeber

**Rainer Stark
Patrick Müller
Hendrik Grosser**

Autoren

**Waldemar Becker
Niels Biedermann
Claas Blume
Andreas Geiger
Hendrik Grosser
Maximilian Hertzner
Simon Kind
Lucas Kirsch
Konstanz Könnicke**

**Gerhard Lechler
Pascal Lünemann
Bernhard Mathes
Patrick Müller
Ingolf Rehfeld
Jonas Schmidt
Rainer Stark
Weidemann
Uwe Zuchold**

ISBN 978-3-8396-1416-7



9 783839 614167