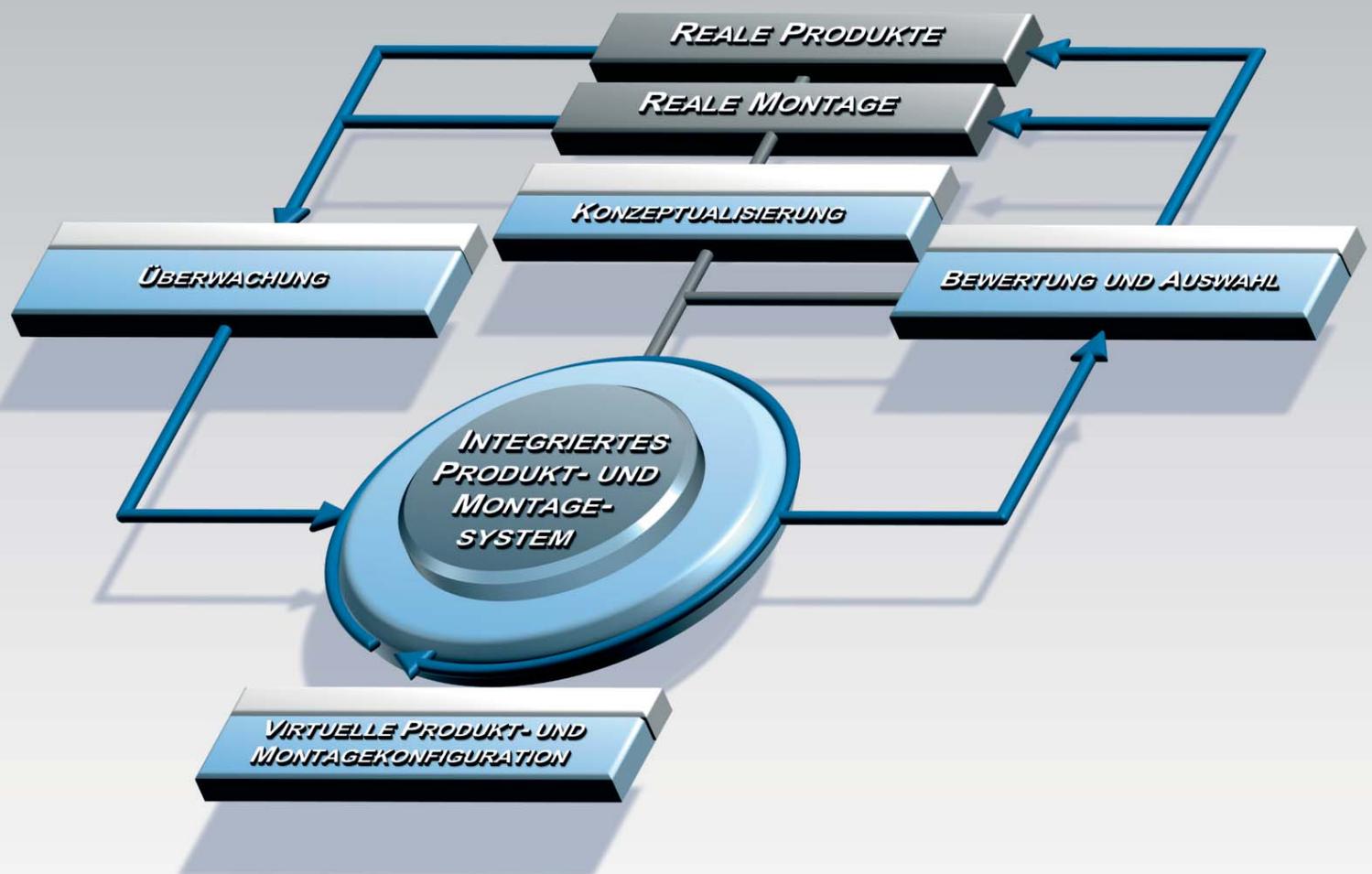


MARTIN HUBERT LANDHERR

Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung



Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Martin Hubert Landherr

**Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration
für die variantenreiche Serienfertigung**

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-00, Telefax 07 11 9 70-13 99
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
der Universität Stuttgart

Titelbild: © Martin Hubert Landherr

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-0809-8

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2014

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
Telefax 07 11 9 70-25 08
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.

GELEITWORT DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis“ (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ in der breiten Fachwelt als substantiell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper

Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung

Von der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Martin Hubert Landherr

aus Garmisch-Partenkirchen

Hauptberichter: Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult.
Engelbert Westkämper

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Dombrowski

Tag der Einreichung: 8. April 2014

Tag der mündlichen Prüfung: 24. September 2014

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2014

Danksagung des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering GSaME der Universität Stuttgart in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA.

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Menschen bedanken, ohne die es mir nicht gelungen wäre, die Arbeit in vorliegender Form zu erstellen. Den bedeutendsten Einfluss hatte mein Doktorvater, Herr Professor Engelbert Westkämper. Ich danke ihm für seine intellektuellen Herausforderungen und für seine Unterstützung in zahlreichen Gesprächen und fachlichen Diskussionen sowie für die Erfahrungen, die ich im Rahmen verschiedener, gemeinsamer Aktivitäten sammeln konnte. Auch bei Herrn Professor Uwe Dombrowski bedanke ich mich für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Ebenso gilt mein Dank den Kolleginnen und Kollegen des IPA und den Doktorandinnen und Doktoranden der GSaME für die kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit. Besonders den Herren Michael Neumann, Johannes Volkmann und Dominik Lucke danke ich nicht nur für viele fröhliche Stunden, sondern auch für unzählige, wertvolle Diskussionen sowie für ihre Unterstützung in anstrengenden Zeiten. Eine weitere Sonderstellung erfährt Herr Hans-Friedrich Jacobi. Ich danke ihm für eine jahrelange Zusammenarbeit in unterschiedlichen Bereichen, die stets von gegenseitigem Respekt, Offenheit sowie Engagement geprägt war und weit über einen geschäftlichen Charakter hinausging.

Zudem bedanke ich mich bei Frau Professor Rohr, Corinna Noltenius und Petra Langbein für ihre unbürokratischen Hilfestellungen, insofern es universitäre Regelungen erlaubten, sowie bei den stets hilfsbereiten und kompetenten Mitarbeiterinnen der Institutsbibliothek des IPA.

Ein besonders herzliches Dankeschön richte ich an meine Eltern, Karin und Josef Landherr. Sie haben mich immer zur Neugierde und zur Gewissenhaftigkeit erzogen sowie mir die Unterstützung und vor allem die Freiheit gegeben, meinen eigenen Weg zu gehen. Ebenso danke ich meinen Geschwistern, deren Familien und meinen Freunden, die mir die Ablenkung und die Bodenhaftung gegeben haben, die ich brauchte. Zuletzt danke ich meiner besten Freundin, die mir trotz aller Entbehrungen und Belastungen immer liebevoll zur Seite stand.

Daher widme ich meiner Frau Jessica diese Arbeit.

Kurzinhalt

Produzierende Unternehmen müssen auf die Erzeugung effizienter und gleichzeitig wandlungsfähiger Strukturen ausgerichtet sein, um auch auf unvorhergesehene Veränderungen schnell und wirkungsvoll reagieren zu können.

Vor diesem Hintergrund liefert die vorliegende Arbeit einen Beitrag, die Effizienz und besonders die Wandlungsfähigkeit in der Montage variantenreicher Erzeugnisse durch die aufwandsarme Anpassung im Sinne einer Konfiguration der technischen Systeme gemäß sich permanent verändernder Randbedingungen und Zielzustände zu erhöhen. Dazu wird eine grundlegende Untersuchung der systemtheoretischen Zusammenhänge zwischen dem Produkt- und dem Montagesystem angestellt, um ein verlässliches Fundament einer integrierten Produkt- und Montagebetrachtung zu ermöglichen. Zur zielgerichteten Bereitstellung von Informationen in Form der Elemente und deren vielfältigen Beziehungen wird dieses Fundament durch eine ontologiebasierte Modellierung und flexible Einbettung in eine eigenentwickelte, informationstechnische Umgebung dem Anwender zugänglich gemacht. Weiterhin wird die industrielle Anwendbarkeit durch die Entwicklung einer strukturierten und zielgerichteten Vorgehensweise unterstützt. Anschließend wird die Verifizierung dieser Anwendbarkeit anhand der Einführung der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration bei einer Montagelinie eines industriellen Unternehmens der Autositzherstellung beschrieben. Die Arbeit schließt mit einer kritischen Würdigung der wissenschaftlichen Ergebnisse, einer Zusammenfassung sowie mit einem Ausblick auf zukünftiges Forschungs- und Entwicklungspotential im Bereich der ganzheitlichen Betrachtung und Organisation wandlungsfähiger und leistungsfähiger Fabriken.

Short Summary

In the structure of manufacturing companies not only efficiency-driven aspects but also aspects of adaptability have to be considered to be able to respond to unforeseen changes in a rapid and effective way.

The work introduced here contributes to the efficiency and in particular to the adaptability of the assembly of mass customized products by the use of configuration aspects for an adaptation of the technical systems considering constantly changing boundary conditions and target states. Therefore the system-theoretical relations between the product and the assembly system were analyzed, to gain a reliable fundament for an integrated consideration of the product and its assembly. This fundament in terms of information about the relevant system elements and their relations can be accessed by the user with help of an ontology-based modeling and a flexible, self-developed information system. The industrial applicability of the integrated product and assembly configuration is supported by a structured and target-oriented procedure. Afterwards, the verification of this applicability by the implementation of the concept for an assembly line of a manufacturing company producing car seats is described. The work closes with a critical acclaim of the scientific results, a summary and an outlook to the potential of prospective research and development in the field of a holistic consideration and organization of adaptable and highly productive factories.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	XI
Abbildungsverzeichnis	XIV
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XVIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	2
1.2 Problemstellung	4
1.3 Zielsetzung und Aufgabenstellung	6
1.4 Forschungssystematik und Struktur der Arbeit	8
2 Relevante Terminologie und Lösungsansätze	12
2.1 Spezifikation der Konfiguration in der variantenreichen Serienmontage	12
2.2 Beschreibung und Klassifizierung technischer Systeme	17
2.3 Stand der Wissenschaft und Technik	22
2.3.1 Dynamisierungsrelevante Produkt- und Produktionskonzepte	22
2.3.2 Konfigurations- und Integrationsansätze in der Montage	26
2.4 Fazit mit abgeleitetem Handlungsbedarf	30
3 Grundlagen der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration	32
3.1 Modellbasierte Problemlösungsunterstützung	32
3.2 Modelltheoretisches Verständnis der technischen Systeme	34
3.2.1 Modelltheoretische Grundlagen des Produktsystems	35
3.2.2 Modelltheoretische Grundlagen des Montagesystems	37
3.3 Dynamik technischer Systeme in der Montage	41
3.3.1 Kontinuierliche Systemveränderung	45
3.3.2 Diskrete Systemveränderung	46
3.4 Regelkreis zur Modellierung dynamischen Systemverhaltens	47
3.5 Ontologien als Abbildungsmöglichkeit komplexer Systeme	48
3.6 Bewertung technischer Systeme	51

3.7	Anforderungen an eine integrierte Produkt- und Montagekonfiguration	52
4	Konzept der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration	55
5	Detaillierung der methodischen Umsetzung	59
5.1	Konzeptualisierung des integrierten Produkt- und Montagesystems	59
5.1.1	Modularisierung der technischen Systeme	59
5.1.2	Strukturierung und Modellierung der technischen Systeme	60
5.1.2.1	Strukturierung und Modellierung des Produktsystems	61
5.1.2.2	Strukturierung und Modellierung des Montagesystems	63
5.1.2.3	Konsolidierung und Integration der Teilmodelle	66
5.2	Umsetzung des ontologiebasierten Informationssystems	68
5.2.1	Softwarearchitektur des Informationssystems	68
5.2.2	Architektur der zugrunde liegenden Informationsbasis	71
5.2.3	Funktionalität des Informationssystems	74
5.2.3.1	Module zur Informationsextraktion	74
5.2.3.2	Module zur Informationsvisualisierung	75
5.2.3.3	Module zur Anwendungscoordination	76
5.2.3.4	Apps als flexible Funktionsbausteine	76
5.3	Identifikation und Synchronisation des Änderungsbedarfs	80
5.4	Virtuelle Produkt- und Montagekonfiguration	82
5.4.1	Auswahl möglicher Maßnahmen	82
5.4.2	Identifikation der Systembeeinflussung	84
5.4.3	Konfiguration valider Systemalternativen	87
5.5	Integrierte Systembewertung und Auswahlunterstützung	91
5.5.1	Kriterien zur Bewertung virtuell konfigurierter Systemalternativen	92
5.5.1.1	Systembewertungskriterium: Effizienz	94
5.5.1.2	Systembewertungskriterium: Zuverlässigkeit	95
5.5.1.3	Systembewertungskriterium: Wandlungsfähigkeit	99
5.5.2	Strukturierte Auswahlunterstützung	102
5.6	Regelkreisbasierte Dynamisierung	104
6	Validierung des Konzepts im industriellen Einsatz	108
6.1	Konzeptualisierung eines IPS in der Automobilindustrie	108

6.2	Durchführung der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration	113
6.2.1	Identifikation des Änderungsbedarfs bei veränderter Nachfrage	114
6.2.2	Virtuelle Systemkonfiguration bei verändertem Produktsystem	115
6.2.3	Vergleichende Bewertung der konfigurierten Systemalternativen	116
6.3	Kritische Würdigung der Forschungs- und Validierungsergebnisse	118
7	Zusammenfassung und Ausblick _____	120
7.1	Zusammenfassung	120
7.2	Ausblick auf zukünftiges Forschungs- und Entwicklungspotential	122
	Summary _____	124
	Literaturverzeichnis _____	126

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Flexibilität und Reaktionsfähigkeit zukünftiger Produktionssysteme	2
Abb. 1.2:	Leistungspotential statischen und dynamischen Adaptionsverhaltens	5
Abb. 1.3:	Reduktion der veränderungsbedingten Leistungseinbußen	7
Abb. 1.4:	Forschungsverständnis in Anlehnung an (Stokes 1997)	8
Abb. 1.5:	Forschungssystematik anwendungsorientierter Grundlagenforschung	9
Abb. 1.6:	Inhaltliche Struktur der Arbeit	10
Abb. 2.1:	Spezifikationen und Bestandteile der Konfiguration	14
Abb. 2.2:	Begriffshierarchie: Zeichen, Daten, Information, Wissen (Bodendorf 2006)	15
Abb. 2.3:	Kategorien und Charakteristika technischer Systeme	18
Abb. 2.4:	Systemtheoretische Modellkonstruktion in Anlehnung an (Ropohl 2009)	19
Abb. 2.5:	Komplexitätsorientierte Systemklassifikation (Ulrich und Probst 1995)	19
Abb. 2.6:	Klassifikation ingenieurwissenschaftlicher Modelle	21
Abb. 2.7:	Das Produktsystem in Anlehnung an (Göpfert 1998)	23
Abb. 2.8:	Münchener Produktkonkretisierungsmodell (Ponn und Lindemann 2011)	23
Abb. 2.9:	Variantenbaum (Schuh und Jonas 1997)	24
Abb. 2.10:	Skalierung produzierender Unternehmen nach dem Stuttgarter Unternehmensmodell (Westkämper 2009b)	25
Abb. 2.11:	Das Polylemma der Produktion (Schuh et al. 2007b)	28
Abb. 2.12:	Integratives Bewertungsmodell (Nußbaum 2011)	29
Abb. 2.13:	Handlungsbedarf im Bereich integrierter Produkt- und Montagekonfiguration	31
Abb. 3.1:	Modellbasierter Problemlösungsprozess (Nyhuis und Wiendahl 2012)	33
Abb. 3.2:	Definition der digitalen Produktion (Westkämper 2013a)	33
Abb. 3.3:	Modelltheoretische Charakteristika des Produktsystems	35
Abb. 3.4:	Funktionsvariabilität von Produktkomponenten	37
Abb. 3.5:	Modelltheoretische Charakteristika des Montagesystems	37
Abb. 3.6:	Die Montage als sozio-technisches System in Anlehnung an (Ropohl 2009)	38
Abb. 3.7:	Funktionale Bestandteile des Montagesystems	39
Abb. 3.8:	Komponenten eines Montagesystems (Foto: (Bosch Rexroth 2008))	40
Abb. 3.9:	Das integrierte Produkt- und Montagesystem in turbulentem Umfeld	41

Abb. 3.10:	Veränderungstypen (Nofen et al. 2005b)	44
Abb. 3.11:	Veränderungsbefähiger in Anlehnung an (Wiendahl et al. 2009)	44
Abb. 3.12:	Lernkurve zur Beschreibung kontinuierlicher FabrikLeistungsveränderung	45
Abb. 3.13:	Qualifikationsabhängigkeit kontinuierlicher FabrikLeistungsveränderung in Anlehnung an (Westkämper 2013c)	46
Abb. 3.14:	Grundaufbau des Technologiekalenders (Löffler 2011)	47
Abb. 3.15:	Regelkreisbasierter Abgleich zwischen realem System und Modell	48
Abb. 3.16:	Grundbausteine eines OWL-Dokuments	49
Abb. 3.17:	Prinzip der logischen Schlussfolgerung in Ontologien	50
Abb. 4.1:	Verständnis des integrierten Produkt- und Montagesystems	55
Abb. 4.2:	Vorgehensweise der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration	56
Abb. 5.1:	Generische Konzeptualisierung des Produktsystems	61
Abb. 5.2:	Informationsquellen und Spezifikation eines Produktmoduls	63
Abb. 5.3:	Generische Konzeptualisierung des Montagesystems	64
Abb. 5.4:	Informationsquellen und Spezifikation eines Montagemoduls	66
Abb. 5.5:	Integration der Modelle des Produkt- und des Montagesystems	68
Abb. 5.6:	Softwarearchitektur des prototypisch umgesetzten Informationssystems	70
Abb. 5.7:	Architektur der ontologiebasierten Informationsbasis	71
Abb. 5.8:	Klassenstruktur der Fach-Ontologie	72
Abb. 5.9:	Vertikale und horizontale Vernetzungsmöglichkeiten	73
Abb. 5.10:	Durch Visualisierungsmodule unterstützte Darstellungsmöglichkeiten	75
Abb. 5.11:	App zur Identifikation und Analyse des Netzwerks funktionaler Beziehungen	77
Abb. 5.12:	App zur Erzeugung und Darstellung von Produkt- und Montagestücklisten	78
Abb. 5.13:	App zur Darstellung verwendeter und geeigneter Montageressourcen	79
Abb. 5.14:	Der Konfigurationskalender	81
Abb. 5.15:	Produkt- und montagesystemspezifische Vorranggraphen	86
Abb. 5.16:	Verknüpfung zu untersuchender Produkt- und Montagemodule	89
Abb. 5.17:	Zielsystem in der variantenreichen Serienmontage	92
Abb. 5.18:	Schema zur Bewertung konfigurierter Systemalternativen	93
Abb. 5.19:	Leistungsanforderung und Leistungsfähigkeit in der Montage	96
Abb. 5.20:	Aspekte technischer Wandlungsfähigkeit	100
Abb. 5.21:	Regelkreisbasierte Dynamisierung des konzeptualisierten IPS	105

Abbildungsverzeichnis

Abb. 6.1:	Montagelinie der zur Validierung verwendeten Autositzfertigung	108
Abb. 6.2:	Ablaufstruktur der konzeptualisierten Montagelinie	110
Abb. 6.3:	Ausgewählte Produktvarianten	111
Abb. 6.4:	Identifikation des produktseitigen Änderungsbedarfs	114
Abb. 6.5:	Integration einer neuen Baugruppe in bestehendes IPM	116

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Spezifikation variantenreicher Serienerzeugnisse	13
Tabelle 2:	Klassifikation ingenieurwissenschaftlicher Systeme	20
Tabelle 3:	Klassifikation integrierter Produkt- und Montagesysteme und -modelle	21
Tabelle 4:	Technische Anforderungen	53
Tabelle 5:	Konfigurationsspezifische Maßnahmen zur Systemadaption	83
Tabelle 6:	Gewichtung der Systembewertungskriterien und Indikatoren	102
Tabelle 7:	Bewertung konfigurierter Systemalternativen	103
Tabelle 8:	Aufstellung der Elemente und Funktionen der Montagelinie	109
Tabelle 9:	Aufstellung der Elemente und Funktionen des Produktsystems	111
Tabelle 10:	Exemplarische Bewertung der konfigurierten Systemalternativen	117

Abkürzungsverzeichnis

BG	<i>Baugruppe</i>
BMBF	<i>Bundeministerium für Bildung und Forschung</i>
BPMN	<i>Business Process Model and Notation</i>
CAD	<i>Computer-aided Design</i>
CE	<i>Concurrent Engineering</i>
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing</i>
CPS	<i>Cyber-physisches System</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung e. V.</i>
EC	<i>Europäische Kommission (European Commission)</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
ET	<i>Einzelteil</i>
FMEA	<i>Fehlermöglichkeits- und -influssanalyse</i>
ID	<i>Identifikator in Form einer Identifikationsbezeichnung oder -nummer</i>
IKT	<i>Informations- und Kommunikationstechnologie</i>
IPE	<i>Integrierte Produktentstehung</i>
IPM	<i>Integriertes Produkt- und Montagemodell</i>
IPS	<i>Integriertes Produkt- und Montagesystem</i>
KVP	<i>Kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KAIZEN)</i>
MS	<i>Montagestation</i>
MTM	<i>Methods Time Measurement</i>
MVC-Muster	<i>Model View Controller Pattern</i>
OWL	<i>Web Ontology Language</i>
SE	<i>Simultaneous Engineering</i>
SFB	<i>Sonderforschungsbereich</i>
SUM	<i>Stuttgarter Unternehmensmodell</i>
SV	<i>Systemalternative</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure e. V.</i>

1 Einleitung

„To improve is to change, so to be perfect is to change often.“
(Churchill 1974)

Produzierende Unternehmen müssen auf die Erzeugung effizienter und gleichzeitig wandlungsfähiger Strukturen ausgerichtet sein, um auch auf unvorhergesehene Veränderungen schnell und wirkungsvoll reagieren zu können (Westkämper 2009a). In einem globalen Wettbewerb mit weltweiter Verteilung des Unternehmens sowie der Absatz- und Beschaffungsmärkte steigt der Druck, individuellen Kundenwünschen durch hochqualitative Produkte möglichst exakt zu entsprechen (Lindemann und Baumberger 2006). Das führt zu einer hohen Produktvarianz und häufigen Produktänderungen bei einer Verkürzung der Produktlebenszyklen (Piller 2006). In Verbindung mit einer schwankenden Nachfrage stellt dies hohe Anforderungen an die Fabriken. Einerseits müssen sie hinsichtlich Art und Stückzahl der zu produzierenden Erzeugnisse äußerst flexibel sein, was eine hohe Komplexität in der Produktion nach sich zieht (Wiendahl et al. 2009). Andererseits stehen sie im Sinne einer effizienten Betriebsführung vor der Herausforderung, die Produktion trotz eines ständigen Wandels des Umfelds nahe dem optimalen Betriebspunkt betreiben zu können (Kletti und Schumacher 2011). Damit verbunden ist auch die Beachtung technischer und technologischer Innovationen im Produkt- sowie im Produktionsbereich. Nur durch die Nutzung aktueller Entwicklungen kann eine langfristige Wettbewerbsfähigkeit ermöglicht werden (Skinner 1986).

Der aktive Umgang mit sich ständig verändernden Randbedingungen und Zielzuständen birgt große Chancen, die eigene Wettbewerbsfähigkeit zu steigern, wenn es gelingt, produzierende Unternehmen als dynamische Systeme zu begreifen und unter Berücksichtigung eines permanenten Wandels zu lenken (Westkämper 2009b). Somit zeichnen sich erfolgreiche Unternehmen durch die Fähigkeit aus, auch in turbulentem Umfeld variantenreiche Produkte mit hoher Qualität zu konkurrenzfähigen Kosten und geringer Lieferzeit sowie hoher Liefertreue produzieren zu können (Schuh et al. 2007a; Som et al. 2011). Eine entsprechende Ausrichtung der Produktion stellt die variantenreiche Serienfertigung dar (Heidereich und Schotten 1999), deren spezifische Eigenschaften im Folgenden als Fokus der Untersuchungen dienen.

1.1 Ausgangssituation

Zunehmende Erzeugnisvarianz, erhöhte Funktionsintegration (Broy 2010) sowie verkürzte Innovations- und Produktlebenszyklen führen zu einer steigenden Komplexität¹ in der Produkt- und der Produktionsstruktur, die es zu beherrschen gilt. Alle denkbaren Veränderungen voranzuplanen und durch hochflexible Strukturen aufzufangen, wird hinsichtlich des beschriebenen turbulenten Umfelds immer schwerer. Die zur Erzeugung einer solchen Flexibilität bereitzustellenden funktions- und stückzahlbezogenen Überkapazitäten übersteigen zunehmend die Möglichkeiten einer wirtschaftlichen und wettbewerbsfähigen Unternehmensführung. Daher müssen zukünftige Produktionssysteme nicht nur flexibel, sondern auch veränderungsfähig gestaltet sein (Koren 2010), um die große Bandbreite an Produktvarianz abdecken zu können und gleichzeitig durch schnelle und marktgerechte Reaktion auf veränderte Randbedingungen effizient produzieren zu können (ElMaraghy und Wiendahl 2009). Abb. 1.1 veranschaulicht diese Entwicklung zu flexiblen und veränderungsfähigen Produktionssystemen. Induziert durch die Divergenz zwischen den Lebenszyklen der Produkte und der Produktionseinrichtungen (Schenk und Wirth 2004) ist es in der variantenreichen Serienfertigung nicht zielführend, Produktionssysteme für einzelne Produkte auszulegen, sondern es gilt als erfolgsbestimmend, einen angemessenen Spielraum hinsichtlich Produkt- und Produktionsvarianten sowie Anpassungsmöglichkeiten zu berücksichtigen (Vogel-Heuser et al. 2012).

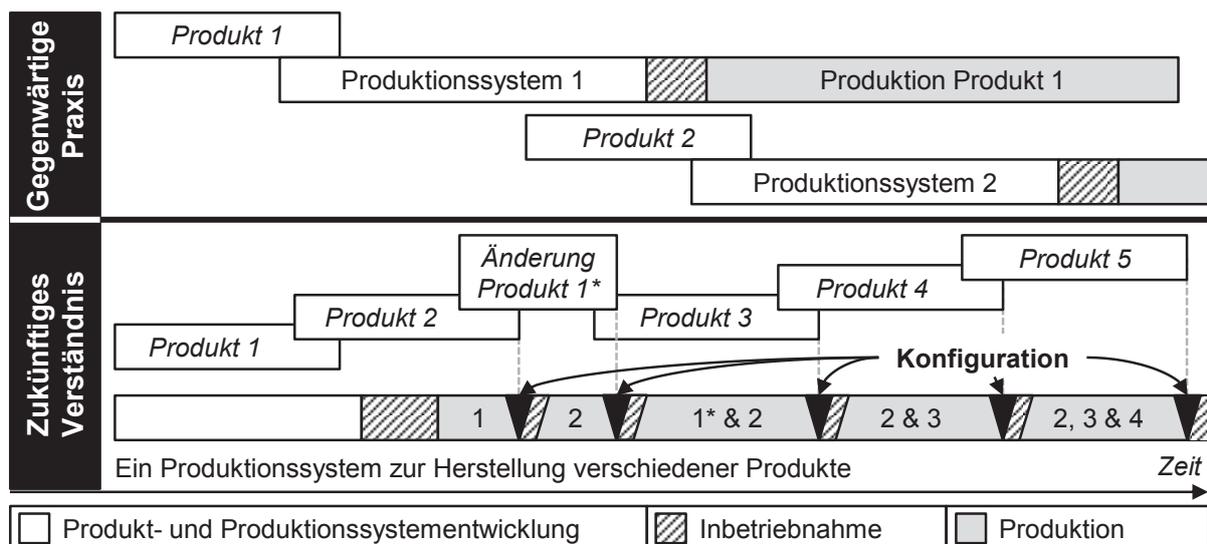


Abb. 1.1: Flexibilität und Reaktionsfähigkeit zukünftiger Produktionssysteme

¹ Eine Spezifikation der Verwendung des Begriffs *Komplexität* kann Kapitel 2.2 entnommen werden.

Mittlerweile ist eine Vielzahl technischer Lösungen verfügbar, die durch den Einsatz standardisierter Abmessungen sowie Steck- oder Clipverbindungen einen schnellen und einfachen Austausch einzelner Teile des Produktionssystems erlauben (Heisel und Stehle 2009). Allerdings halten diese Systeme nur spärlich Einzug in die industrielle Anwendung. Ein Grund dafür wird im hohen Informationsbedarf für die permanente Planung und Optimierung zur Vermeidung ineffizienter Strukturen und Abläufe gesehen (Kluge et al. 2009). Erst durch die Bereitstellung von Informationen darüber, welche Module für welche Aufgabe in Frage kommen und wie diese zu einem funktionierenden sowie effizienten System zusammengeschlossen werden können, sind die beschriebenen Ziele erreichbar (Heisel und Stehle 2009).

Die Informationslage in der Montage variantenreicher Serienerzeugnisse ist jedoch von Unsicherheit und Ungenauigkeit geprägt. Der Bedarf an Flexibilität wird oft als Argument für ungenau definierte Prozesse und einen niedrigen Organisationsgrad angeführt, da nur auf diese Weise unter umfangreichem Einsatz allgemein qualifizierter Arbeitskräfte eine schnelle Reaktionsfähigkeit auf kurzfristige Veränderungen zu erreichen scheint (Schuh et al. 2007a). Auch die Prognostizierbarkeit des Umfelds verringert sich aufgrund kurzfristigerer Bestellungen sowie rapidem technologischem Fortschritt (Westkämper und Zahn 2009a). Der wirtschaftliche Einsatz teil- oder vollautomatisierter Montagelösungen in solch turbulentem Umfeld zur Steigerung der Montageeffizienz und der Erzeugnisqualität wird damit unmöglich. Gleichfalls wird die Prozesssicherheit reduziert, was als Grundvoraussetzung für die Planbarkeit gilt, wodurch Möglichkeiten reduziert werden, Effizienzpotentiale durch Standardisierung, Wiederholeffekte und optimalen Ressourceneinsatz auszuschöpfen (BDI et al. 2005). Auch die verlässliche Absicherung der Montagefähigkeit spezifischer Produktvarianten mit vorhandenen Montageressourcen ist bei der heutzutage geforderten großen Bandbreite an Individualisierungsmöglichkeiten oft mit hohem Aufwand verbunden.²

Die beschriebene Ausgangssituation und die davon abzuleitenden Herausforderungen hinsichtlich einer flexiblen, veränderungsfähigen und trotzdem hoch effizienten Produktion sind nicht neu (Tempelmeier und Kuhn 1993). In zunehmendem Maße werden seitdem Antworten auf dieses Dilemma unter anderem im Einsatz unterstützender Informationssysteme vermutet (Landherr et al. 2013). Die in produzierenden Unternehmen verfolgten Prinzipien herkömmlicher Arbeitsteilung in administrative, planende, forschende, entwickelnde,

² Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Begriff des *Aufwands* als Überbegriff monetären Werteverzehrs durch den Einsatz technischer sowie personeller Ressourcen bezeichnet.

beschaffende, produzierende und unterstützende Bereiche (Hahn und Hungenberg 2001) haben dabei prägenden Einfluss auf die Entwicklung und die Gestaltung digitaler Werkzeuge und der zugrunde liegenden Konzepte. Die digitale Kommunikation wird immer noch auf die Informationsweitergabe auf Basis standardisierter Schnittstellen in Form von gewohnten, formulargestützten Visualisierungsprinzipien ausgelegt. Moderne Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) erlauben allerdings einen sehr viel höheren Grad an Flexibilität und Spontanität was einen fundamentalen Wechsel in den Arbeitsweisen der produktionsnahen Mitarbeiter ermöglicht (Westkämper 2013b). Arbeitsplätze können durch die konsequente Modularisierung nicht nur hinsichtlich der Aufgaben und Tätigkeiten, sondern auch hinsichtlich der individuellen Unterstützung durch Informations- und Kommunikationssysteme flexibel integriert werden (Landherr et al. 2012). Damit sollen der eingangs geforderte Flexibilitätsbedarf und die Adaptionfähigkeit in dynamischem Umfeld erfüllt und trotzdem die Anwendung von Prinzipien zur Leistungssteigerung in der Montage ermöglicht werden (Westkämper 2013b).

1.2 Problemstellung

Vor dem Hintergrund sich ständig ändernder Randbedingungen und Zielzustände ist es von herausragender Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen, dieser Dynamik effektiv und effizient zu begegnen (Wiendahl et al. 2007). Es ergibt sich als Resultat ein kontinuierlich verändernder Zielzustand, der durch Adaption unterschiedlicher Systeme im Unternehmen zu erreichen versucht wird (Taylor 2004). Durch eine Erhöhung der Frequenz dieser Adaptionen mittels Flexibilisierung und Dynamisierung der technisch-organisatorischen Systeme kann zusätzliches Leistungspotential erschlossen werden. Dieses Prinzip ist in Abb. 1.2 verdeutlicht. Oftmals können diese Änderungen durch punktuelle Adaptionen einzelner Maschinen oder Arbeitsplätze kompensiert werden (Heisel und Meitzner 2006). Dem gegenüber stehen Änderungen, die einen tiefgreifenden Eingriff in die Strukturierung und Organisation erfordern. Diese Art der Adaptionsnotwendigkeit tritt vor allem im Bereich der Montage auf. Dabei können auch geringfügige Produktänderungen eine grundlegende Neuordnung der logischen Montagereihenfolge bedingen und somit Auswirkungen auf das gesamte Montagesystem haben. Das liegt unter anderem darin begründet, dass

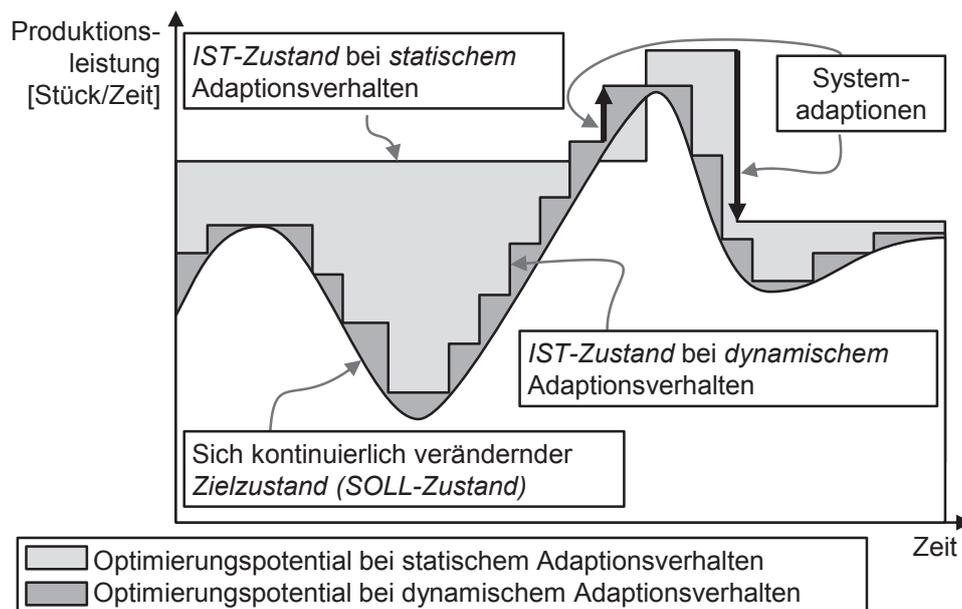


Abb. 1.2: Leistungspotential statischen und dynamischen Adaptionsverhaltens

vor allem in der Endmontage als meist letztes Glied der Wertschöpfungskette alle vorangegangenen Turbulenzen Auswirkungen haben können (Kluge 2011). Beispielsweise kann die Wahl eines alternativen Werkstoffs weitreichende Konsequenzen haben. Verbundwerkstoffe lassen sich im Regelfall deutlich schlechter verschweißen als metallische Werkstoffe. Daher müssen bei einem derartigen stabilitäts- oder gewichtsbedingten Werkstoffwechsel die verwendeten Fügeverfahren und somit die umfassende Montagestruktur überdacht werden. Dies ist meist mit einer vollständigen Neuplanung der Montage verbunden, da detaillierte Informationen über Wechselbeziehungen und somit Konsequenzen spezifischer Veränderungen nicht oder nur sehr eingeschränkt vorhanden sind. Unter Bereitstellung solcher Informationen könnte in vielen Fällen ein umfassender Umbau durch punktuelle Adaptionsmaßnahmen ersetzt werden. Die Relevanz dieser Problematik wird hinsichtlich des hohen Anteils an der Kostenverursachung bei geringer Kostenverantwortung im Produktlebenszyklus während der Montage verdeutlicht (Mateika 2005; Hesse 2012).

Somit resultiert besonders im Bereich der Montage ein Informationsbedarf bezüglich funktionaler Wechselwirkungen zur zuverlässigen Identifikation und Spezifikation von Konsequenzen einzelner Adaptionsmaßnahmen. Dabei lassen sich in Anlehnung an (Abele und Reinhart 2011; Kagermann et al. 2012) folgende Forschungsaspekte identifizieren:

- *Integrierte Produkt- und Montagesystembetrachtung*
Abstimmung und ganzheitliche Beurteilung von Produkt- und Montagesystemen durch das Aufzeigen und Beherrschen von Wechselwirkungen.
- *Integrative Modelle und Beschreibungssprachen*
Integration von Produkt- und Montagemodellen durch die theoretische Analyse der Modellierung technischer Systeme.
- *Produkt- und Montagekomplexität*
Umfassender Einsatz informationstechnischer Unterstützung zur situationsbezogenen Informationsbereitstellung zur Prognose des Systemverhaltens und Absicherung der Montagefähigkeit spezifischer Produktvarianten

Erst durch eine umfassende Betrachtung dieser auf Interdisziplinarität ausgerichteten Aspekte kann eine sinnvolle Bereitstellung aktueller, systematischer und auf die jeweilige Situation bzw. Aufgabenstellung bezogener Informationen zur Identifikation und Spezifikation funktionaler Zusammenhänge in Produkt- und Montagesystemen erfolgen.

1.3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Gemäß der dargestellten Ausgangssituation lässt sich das Ziel vorliegender Arbeit als Unterstützung der abgestimmten Adaption von Produkt- und Montagesystemen in der variantenreichen Serienfertigung hinsichtlich eines sich ständig verändernden Umfelds überschreiben. Da diese Adaptionen neben den gewünschten Effekten auch Aufwand und Leistungseinbußen mit sich bringen (Rhoades 2005), soll eine Methode entwickelt werden, die nicht nur eine zielgerichtete und effiziente Durchführung der Adaptionsmaßnahmen ermöglicht, sondern auch die negativen Folgen der Veränderung durch eine zuverlässige Prognose des Systemverhaltens abschwächt (Abb. 1.3). Bei diesen Adaptionsmaßnahmen sind nicht nur technische Aspekte wie beispielsweise Standardisierung der Schnittstellen und Modularisierung der Betriebsmittel, sondern auch personelle und organisatorische Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Diese sollen in vorliegender Arbeit keinesfalls ausgeschlossen werden. Daher wird der Begriff der *technischen Systeme* in vorliegender Arbeit als umfassende Betrachtung der sozio-technischen Elemente und funktionalen sowie organisatorischen Zusammenhänge betrachteter Produkt- und Montagesysteme verwendet.

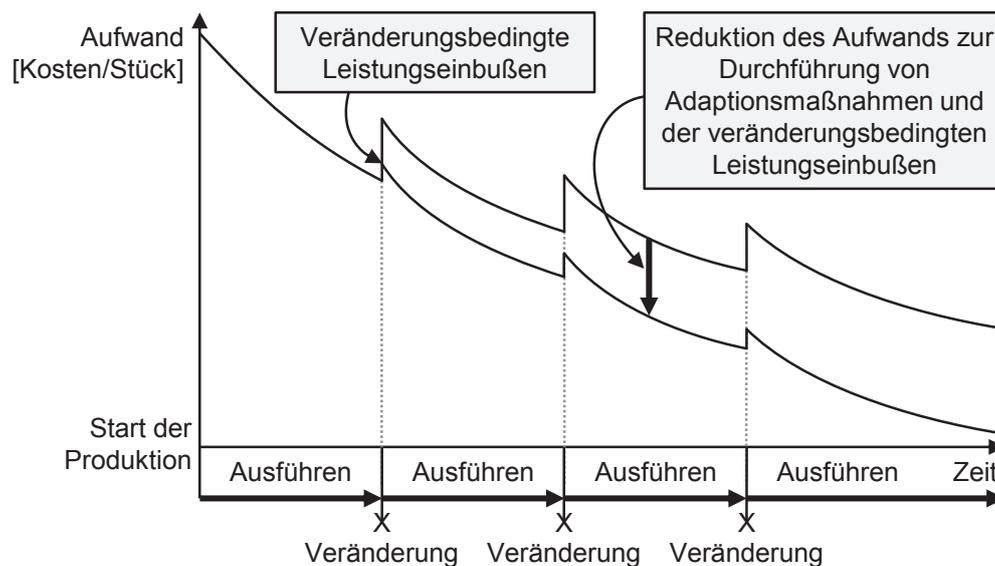


Abb. 1.3: Reduktion der veränderungsbedingten Leistungseinbußen

Die Konfiguration wird als Begriff für eine schnelle und aufwandsarme Anpassung der vorhandenen Produkt- und Montagesysteme an veränderte Rahmenbedingungen benutzt. Damit ist die Herausforderung verbunden, die angestrebten Optimierungs- und Realisierungsziele spezifischer Adaptionsmaßnahmen durch Restrukturierung und Reorganisation bestehender Elemente zu erreichen. Dafür soll eine funktionale Modularisierung der technischen Systeme stattfinden, durch deren Konfiguration neue oder veränderte Leistungen ausgeführt werden können, um eine Anpassung an veränderte Randbedingungen bzw. an einen veränderten Zielzustand zu erreichen. Somit liegt der Fokus des zu entwickelnden Konzepts auf der zielgerichteten Kombination vorhandener Produktkomponenten und Montageressourcen zur Erfüllung situationsbezogener Ziele.

Da das herzustellende Produkt der bestimmende Einflussfaktor in der industriellen Montage ist, muss ein ganzheitliches Verständnis der zusammenhängenden technischen Systeme des Produkts sowie dessen Herstellung mit allen relevanten Elementen und Wechselbeziehungen als Fundament für die integrierte Konfiguration erzeugt werden (Herrmann 2010). Dabei unterstützt das Denken in Systemen. Insbesondere das Begreifen produzierender Unternehmen als komplexe, sozio-technische Systeme wird in zahlreichen Untersuchungen als Grundlage organisatorischer, methodischer, technologischer sowie technischer Maßnahmen angesehen (Stahle 1973; Spur et al. 1994; Felix 1998; Dangelmaier 2003; Buchholz und Clausen 2009; Westkämper 2009a; Wiendahl et al. 2009; Schenk et al. 2010). Dafür sollen diese Systeme auf systemtheoretischer Ebene unter Berücksichtigung der spezifischen

Besonderheiten des Einsatzbereichs analysiert, strukturiert und abgebildet werden, um eine geeignete Modularisierung und flexible Integration zu ermöglichen. Anhand der damit angestrebten Unterstützung abgestimmter Adaptionsmaßnahmen des Produkts sowie der Montage an veränderte Randbedingungen sollen zuverlässigere und wirkungsvollere Entscheidungen getroffen werden können. Zu diesem Zweck sollen Informationen über die Elemente und deren Wechselbeziehungen innerhalb des Systems bereitgestellt werden.

Damit soll die Montagefähigkeit spezifischer Produktvarianten abgesichert sowie die Effektivität und die Effizienz der Produktion durch die Unterstützung kurz- und mittelfristiger Adaptionsmaßnahmen gesteigert werden. Dies folgt dem Ziel, trotz einer hohen Komplexität und Volatilität der technischen Systeme und einem sich permanent verändernden Zielzustand, jederzeit und überall exakt die Leistung bereitzustellen, die in Form von Erzeugnissen bestimmter Stückzahl und Qualität sowie in einer bestimmten Zeit gefordert wird.

1.4 Forschungssystematik und Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit lässt sich in den Bereich der Technikwissenschaften einordnen (acatech 2013). Sie bleibt nicht bei der bloßen Analyse und Beschreibung eines Phänomens oder einer Problemstellung, sondern beschäftigt sich auch mit der Synthese und der Anwendung des entwickelten Fortschritts in Form einer Methode. Neben einer zielgerichteten Vorgehensweise wird auch eine modellhafte Beschreibung der technischen Systeme (Produkt und Montage) zur Problemlösungsunterstützung entwickelt. Das entspricht den Grundzügen anwendungsorientierter Grundlagenforschung (Abb. 1.4).

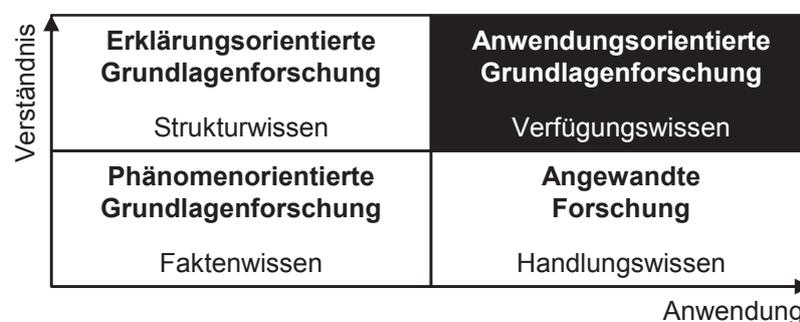


Abb. 1.4: Forschungsverständnis in Anlehnung an (Stokes 1997)

Einerseits wird ein systemtheoretisches Grundverständnis der zu integrierenden technischen Systeme erzeugt und andererseits wird ein Bezug zur industriellen Anwendung sichergestellt sowie eine Validierung in praktischem Umfeld durchgeführt. Diese Zuordnung ermöglicht die zielorientierte Ableitung einer fundierten Forschungsstrategie. Gerade in einem solchen Forschungsbereich mit sowohl Theorie- als auch Praxisbezug erfährt die Festlegung und Verfolgung einer Forschungsstrategie zur Sicherstellung einer strukturierten und wissenschaftlich korrekten Vorgehensweise eine besondere Bedeutung. In Abb. 1.5 wird die verwendete Forschungssystematik skizziert.

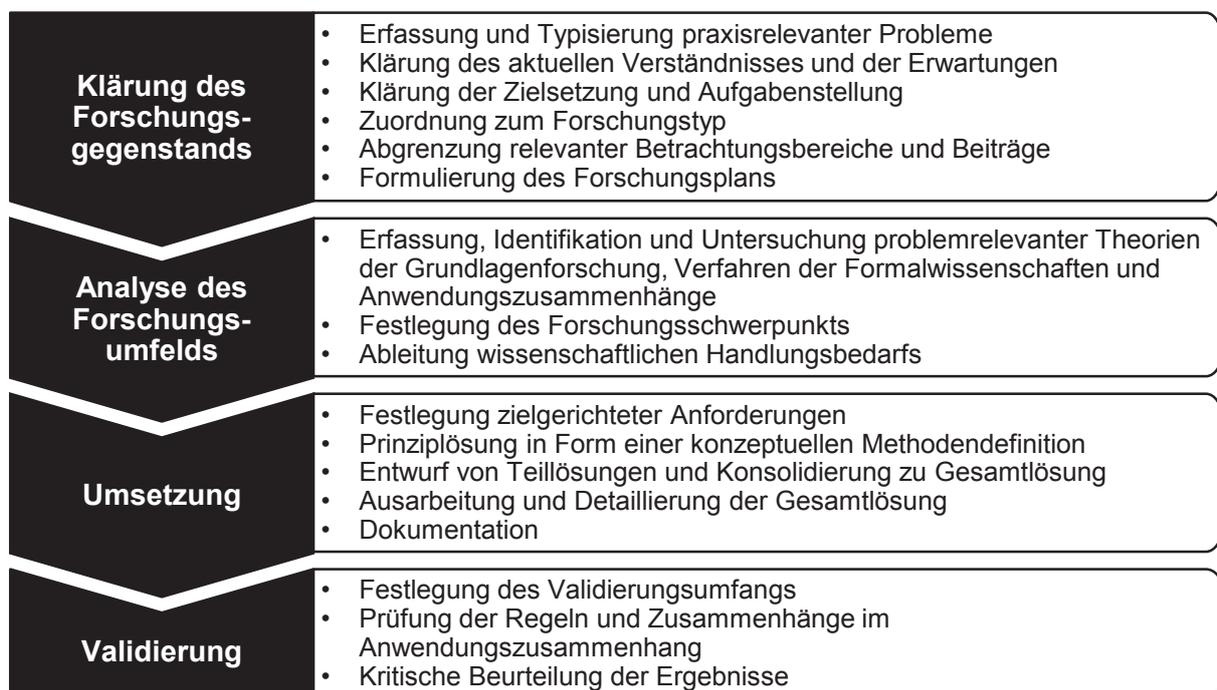


Abb. 1.5: Forschungssystematik anwendungsorientierter Grundlagenforschung

Um eine individuelle, zielgerichtete, strukturierte sowie wissenschaftliche Vorgehensweise sicher zu stellen, handelt es sich bei vorliegender Forschungssystematik um eine anwendungsspezifische Adaption etablierter Vorgehensweisen von (Ulrich 1981; Pahl et al. 2007; Blessing und Chakrabarti 2009). Zur Darstellung der Ergebnisse wird für die folgende Arbeit in Anlehnung an den Aufbau wissenschaftlicher Arbeiten nach (Kornmeier 2007; Blessing und Chakrabarti 2009) folgende Struktur abgeleitet (Abb. 1.6). Initial erzeugt die *Einleitung* ein einheitliches Verständnis des Forschungsumfelds. Dabei stellt die Herausforderung, Montagesysteme in sich ständig verändernden Randbedingungen und Zielzuständen leistungsfähig und produktiv zu strukturieren und zu organisieren, den Ursprung der Motivation für die vorliegende Arbeit dar.

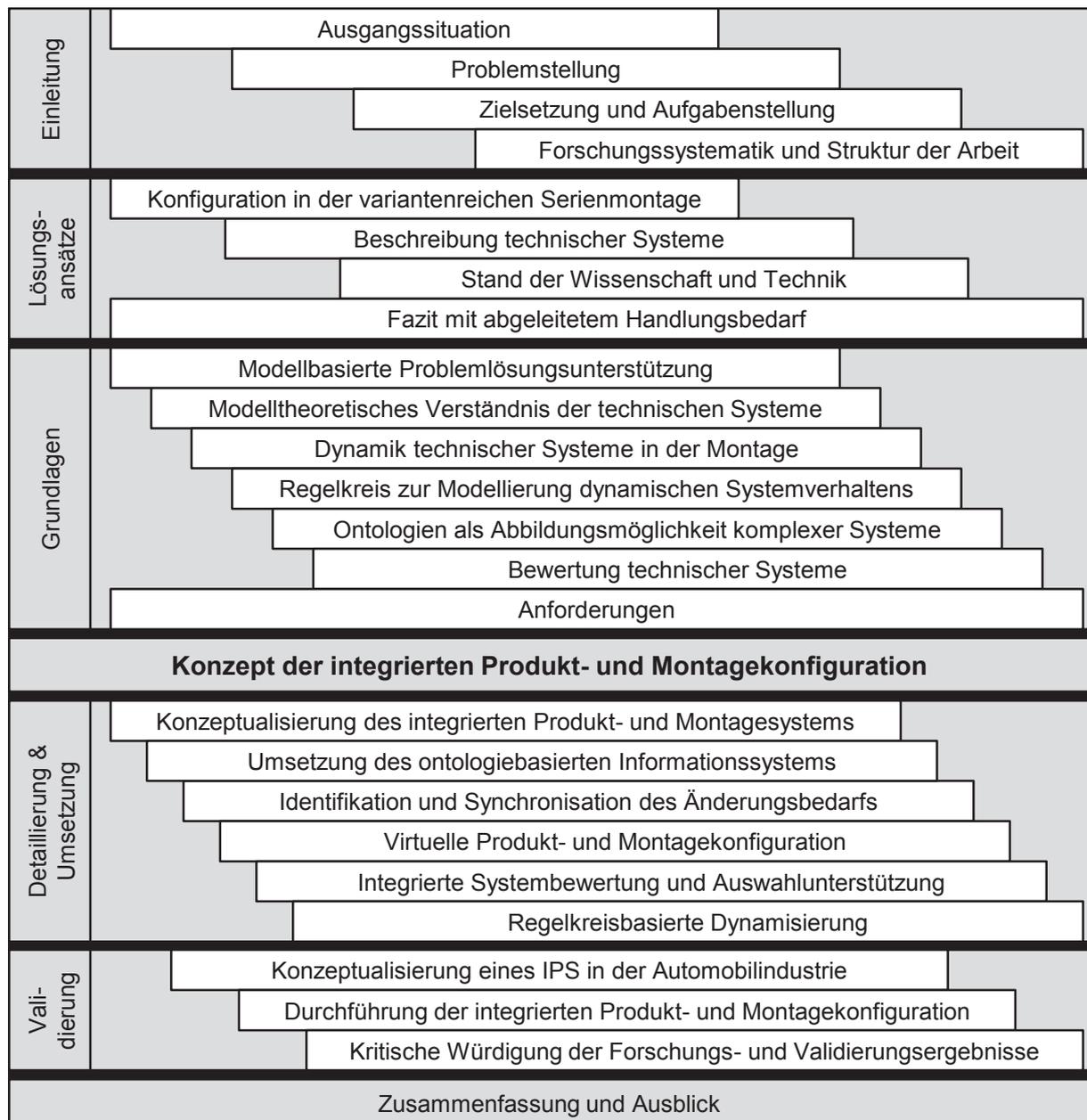


Abb. 1.6: Inhaltliche Struktur der Arbeit

Daraus resultiert das Ziel einer Absicherung der Montagefähigkeit sowie einer Unterstützung von Adaptionenmaßnahmen in der Montage variantenreicher Serienerzeugnisse durch eine integrierte Produkt- und Montagekonfiguration. Nachdem anschließend relevante und nicht hinreichend geklärte Begrifflichkeiten und deren Verwendung im Rahmen dieser Arbeit spezifiziert sind, findet eine kritische Auseinandersetzung mit relevanten Forschungs- und Entwicklungsansätzen als Übersicht des *Standes der Wissenschaft und Technik* auf dem Gebiet der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration und angrenzenden Bereichen statt. Diese Betrachtung wird mit einer Ableitung wissenschaftlichen Handlungsbedarfs geschlossen. Im

darauf folgenden Kapitel werden die verwendeten *Grundlagen* beschrieben, die die Entwicklung eines systematischen Verständnisses, die Konzeptualisierung sowie die Bewertung komplexer technischer Systeme ermöglichen. Damit lassen sich die Anforderungen an eine integrierte Produkt- und Montagekonfiguration spezifizieren, die zugleich als Zielgrößen der Validierung der Anwendung dienen. Anschließend wird der konzeptuelle Lösungsansatz in Form der *integrierten Produkt- und Montagekonfiguration* vorgestellt und im darauf folgenden Kapitel detailliert dargestellt. Hier wird auch das prototypisch umgesetzte Informationssystem zur Modellierung des integrierten Systems sowie zur Bereitstellung konfigurationsrelevanter Informationen als Teil des Lösungskonzepts vorgestellt. Die Diskussion der Ergebnisse findet anhand einer *Validierung* der praktischen Anwendung der vorgeschlagenen Methode in industriellem Umfeld statt. Die Arbeit schließt mit einer *Zusammenfassung*, einer *kritischen Würdigung* und dem Aufzeigen *zukünftigen Forschungs- und Entwicklungspotentials* auf dem Weg zu einer vollständigen Dynamisierung der technischen Systeme, um auch in turbulentem Umfeld eine hochqualitative, leistungsstarke und zuverlässige Montage zu realisieren.

2 Relevante Terminologie und Lösungsansätze

Durch die Verwendung diverser in der Fachliteratur teils unterschiedlich und teils widersprüchlich verwendeter Begriffe ist eine Einordnung dieser als Basis für ein eindeutiges Verständnis der im Rahmen der vorgestellten Forschungsarbeiten relevanten Aspekte notwendig. Anschließend wird der Stand der Wissenschaft und Technik aufgezeigt und der wissenschaftliche Handlungsbedarf abgeleitet.

2.1 Spezifikation der Konfiguration in der variantenreichen Serienmontage

Zur Festlegung des Gebrauchs und des Verständnisses der verwendeten Terminologie im Zusammenhang mit der Konfiguration in der variantenreichen Serienmontage werden im Folgenden relevante Begriffe wie die Montage variantenreicher Serienerzeugnisse, die Konfiguration, die Modularisierung und die Integration spezifiziert sowie die Begriffe Daten, Informationen und Wissen voneinander abgegrenzt.

Montage variantenreicher Serienerzeugnisse

Die Produktion wird als Bereich eines Unternehmens definiert, der sich mit der Erzeugung und Herstellung von Waren und Gütern befasst (Duden 2011). Bei einer überwiegenden Betrachtung der technischen und weniger der betrieblichen Aspekte wird die Produktion als Fertigung bezeichnet (Gabler 2013). Die Montage wird dabei unter technischen Gesichtspunkten als Teilbereich der Fertigung angesehen und befasst sich mit dem Zusammensetzen vorgefertigter Teile und Baugruppen zu Enderzeugnissen (Voigt 2013).

In vorliegender Arbeit findet eine Konzentration auf die Montage variantenreicher Serienerzeugnisse statt. Diese Form der Montageausrichtung stellt die Verfolgung einer hybriden Wettbewerbsstrategie dar. Es werden konkurrierende Ziele verfolgt, die aus den beiden grundlegenden Wettbewerbsstrategien der Differenzierung und der Kostenführerschaft nach (Porter 2013) resultieren (Volling 2008). Zur näheren Spezifikation werden variantenreiche Serienerzeugnisse in Tabelle 1 von Sonderanfertigungen und individualisierten Produkten in Anlehnung an (Lindemann und Baumberger 2006) abgegrenzt.

	Variantenreiche Serien- erzeugnisse	Individualisierte Produkte	Sonder- anfertigungen
Erzeugung der Varianz	Kombination eindeutig definierter, konfigurierbarer Module	Kombination definierter Module mit individuell anpassbaren Komponenten in vorentwickelter Grundstruktur	Vollständige Neuentwicklung individueller Lösungen
Integration des Kunden	Vielfach auftragsunabhängige Entwicklung und Fertigung der Module mit auftragsspezifischer Montage	Auftragsspezifische, individuelle Anpassung definierter Produktbereiche an Kundenbedürfnisse	Kundenspezifische Gestaltung in beliebigen Produktbereichen
Umgang mit Komplexität	Reduktion und Beherrschung kombinatorischer Komplexität durch Variantenreduktion und intelligenter Produktion	Beherrschung hoher struktureller Produkt- und Prozesskomplexität durch flexible Unternehmensstrukturen	Reduktion und Beherrschung durch sequentielle Produkterstellung (once at a time)
Fokus der Zielsetzung	Wirtschaftliche Herstellung von Erzeugnissen mit hoher äußerer und geringer innerer Varianz unter Verwendung von Prinzipien der Serienfertigung (Standardisierung, Skaleneffekte)	Wirtschaftliche Herstellung kundenindividueller Produkte mit kundenspezifischem Entwicklungsprozess bei erhöhten Ertragspotentialen (erhöhte Zahlungsbereitschaft durch Kundenintegration)	Realisierung individueller Kundenwünsche
Beispiele	Automobil- und Zulieferindustrie	Investitions- und Konsumgüterindustrie	Manufakturen

Tabelle 1: Spezifikation variantenreicher Serienerzeugnisse

Die Besonderheit variantenreicher Serienerzeugnisse gegenüber Sonderanfertigungen wie beispielsweise Produkten von Manufakturen ist das Vorhandensein vorgefertigter Module. Auch bei individualisierten Produkten wie beispielsweise Konsum- und Investitionsgütern kommen Standardkomponenten zum Einsatz, die allerdings um kundenspezifische Anteile ergänzt werden (Baumberger 2007). Die Grenze zwischen variantenreichen und individualisierten Erzeugnissen wird in vorliegender Arbeit anhand der Genauigkeit der jeweiligen Produktdefinition gezogen. Auch bei variantenreichen Serienerzeugnissen ist ein hoher Grad an Kundenindividualisierung möglich. Dies geschieht jedoch im Gegensatz zu individualisierten Produkten unter Verzicht auf unscharf definierte Produktbereiche. Die Entstehung der Erzeugnisvarianz entsteht dabei einzig aus der Kombination vordefinierter Produktkomponenten. Auch wenn die Unterstützung der Montage individualisierter Produkte durch das vorgestellte Konzept nicht ausgeschlossen werden soll, so findet dennoch eine Konzentration

auf die Montage variantenreicher Serienerzeugnisse statt. Eben dieses Zusammenspiel aus variantenreichen Produkten zur Erfüllung vielfältiger Kundenwünsche und dem Bestreben, diese unter Verwendung von Prinzipien der Serienmontage effizient und zuverlässig herzustellen, wird in vorliegender Arbeit als *Montage variantenreicher Serienerzeugnisse* oder *variantenreiche Serienmontage* bezeichnet.

Konfiguration

Die zielgerichtete Kombination von Produkt- und/oder Montageelementen kann als Konfiguration bezeichnet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird keine Unterscheidung zwischen einer Neustrukturierung im Sinne einer *Konfiguration* und einer Umstrukturierung im Sinne einer *Rekonfiguration* verfolgt, da die jeweiligen Anforderungen und Randbedingungen identisch sind. Daher wird im weiteren Verlauf die *Konfiguration* als Überbegriff für diese beiden Aspekte benutzt. Eine Konfigurationsaufgabe geht dabei von einer gegebenen vordefinierten Auswahl von Komponenten aus, die durch Eigenschaften, Verbindungsmöglichkeiten, Bedingungen zur Einschränkung der jeweiligen Verbindungsmöglichkeiten und anderen strukturellen Restriktionen beschrieben sind (Mittal und Frayman 1989). Daraus werden eine oder mehrere Lösungen konfiguriert, die hinsichtlich den Randbedingungen und den Zielsetzungen zulässig sind (Abb. 2.1). Zur Übertragung dieses Prinzips auf Adaptionaufgaben wird das System aus Produkt und entsprechender Montage analysiert und durch konsequente Modularisierung für die Anwendung von Konfigurationskonzepten befähigt.

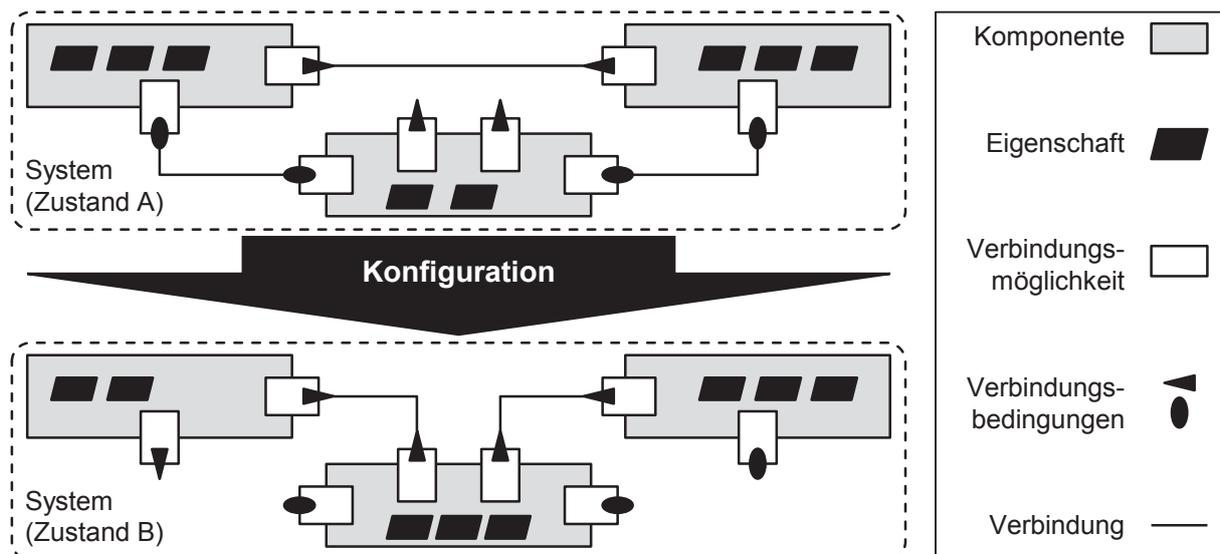


Abb. 2.1: Spezifikationen und Bestandteile der Konfiguration

Daten – Information – Wissen

Die Grundlage der Beschreibung von Systemen bilden Informationen, die aus internem Wissen generiert und zielgerichtet sowie situationsbezogen zur Verfügung gestellt werden müssen. Es genügt dabei nicht, auf der Ebene der Datenbereitstellung und -kommunikation zu argumentieren, da erst durch die Verknüpfung mit spezifischen Bedeutungen (Semantik) und der Beschreibung des Umfelds (Kontext) nützliche Informationen abgeleitet werden können. Die Abgrenzung der hier zur Anwendung kommenden Begriffe wie Zeichen, Daten, Informationen und Wissen ist in Abb. 2.2 veranschaulicht. Das Verständnis von Daten und der damit einhergehenden Generierung von Informationen geschieht vordringlich im Bewusstsein der Anwender digitaler Werkzeuge (Landherr und Constantinescu 2012). Allerdings enthält die bedeutungsrelevante bzw. semantische Beschreibung von Daten in einer maschinenlesbaren Art und Weise zur automatisierten Generierung von Informationen ein großes Potential (Ammar-Khodja und Bernard 2008; Rezaei 2010). Dieses Potential wurde bereits früh erkannt und brachte viele Bestrebungen hervor, den Anwender durch die Bereitstellung fertiger Lösungen im Sinne der Anwendung von Wissen nicht nur zu unterstützen, sondern gar zu ersetzen (Liao 2005; Beierle und Kern-Isberner 2006). Diese sogenannten Expertensysteme oder wissensbasierten Systeme stehen immer noch vor nicht überwundenen Herausforderungen wie sie bereits 1985 beschrieben wurden (Bell 1985). Die vordringlichen Probleme stellen dabei weniger die bekannten Herausforderungen der Entwicklung komplexer Softwaresysteme (Balzert 2009) dar, sondern die Formulierung impliziten Expertenwissens (Polanyi 1985) und die Sicherstellung, dass das System in der gewünschten Form reagiert.

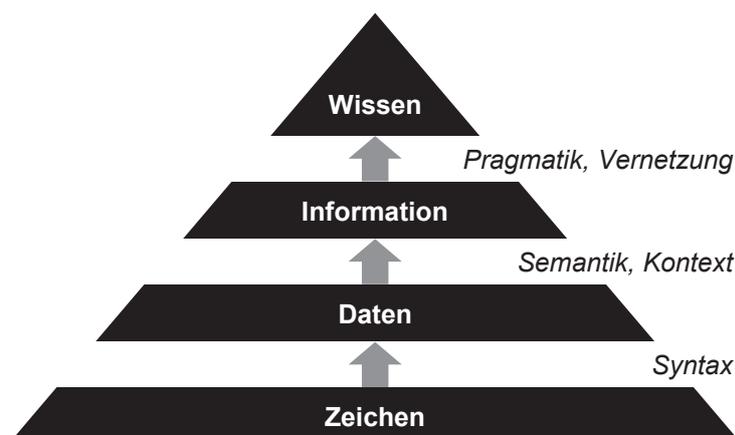


Abb. 2.2: Begriffshierarchie: Zeichen, Daten, Information, Wissen (Bodendorf 2006)

Die vorliegende Arbeit widmet sich weniger diesen Herausforderungen deren Lösung wohl in informationstechnischen Entwicklungen zu suchen ist, sondern konzentriert sich auf die Unterstützung der Anwender bei der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration durch Generierung und Bereitstellung ergänzender Informationen. Dies wird durch ein Informationssystem zur Modellierung und Darstellung von Elementen und deren Wechselwirkungen eines integrierten Produkt- und Montagesystems verfolgt. Darin werden Daten (Elemente) durch die zusätzliche und maschinenlesbare Beschreibung der Bedeutung (Semantik) in spezifischen Situationen (Kontext) beschrieben, um sie in Form von Informationen zu speichern und wiederzuverwenden.

Modularisierung

Die Modularisierung stellt eine Möglichkeit dar, die Komplexität umfassender Systeme zu verringern. Dies wird durch die Teilung des Gesamtsystems in einfacher handhabbare Glieder erreicht (Wörn 2008). Die einzelnen, als Module bezeichneten Glieder bilden unabhängige, geschlossene Funktionseinheiten, durch deren Zusammenspiel die Funktion des Gesamtsystems erfüllt wird (Marshall et al. 1998; Ericsson und Erixon 1999). Ein Modul ist somit ein System geringerer Komplexität als das übergeordnete System und besitzt wohldefinierte und eindeutige Schnittstellen (Nilles 2001). Ein Modul kann dabei nicht nur aus einem unteilbaren Element bestehen, sondern kann auch als Kapselung mehrerer Elemente auftreten. Dabei gibt es große Parallelen zum Axiomatic Design, wobei das angestrebte System durch die anforderungs- und funktionsgemäße Zerlegung in Axiome vereinfacht wird (Suh 2001).

Im Zusammenhang mit einer integrierten Produkt- und Montagebetrachtung wird somit eine Modularisierung des Gesamtsystems in funktionsrelevante Einheiten verfolgt, um ein ganzheitlich systematisches Verständnis zu erreichen und eine flexible und trotzdem effektive sowie effiziente Konfiguration zu ermöglichen. Zusätzlich zur Kapselung einzelner Komponenten und zur Beschreibung des modulspezifischen Beitrags zur Gesamtfunktion müssen die Module dafür Informationen über mögliche Verbindungen und Wechselwirkungen zu anderen Elementen bereitstellen.

Integration

Für die Herstellung eines funktionsfähigen Systems aus diesen sogenannten Modulen wird der Begriff Integration verwendet (Weerth 2013). Gemäß dieser Spezifikation wird das modulbasierte Zusammenführen des Produkt- und des Montagesystems zu einem übergeord-

neten, funktionsfähigen System als Integration bezeichnet. Dies geschieht weniger durch eine direkte Kopplung physisch vorhandener Gegenstände wie Produktkomponenten und Montageressourcen, sondern durch eine modellbasierte Beschreibung der Module und deren Wechselbeziehungen. Dies wird auch als eine indirekte Integration bezeichnet (Oedekoven et al. 2012).

Die Integration kann im Sinne eines Zusammenfügens als Gegenpol zur Modularisierung im Sinne eines Zerlegens angesehen werden (Rude 1998). Im Regelfall wird durch die Integration im Sinne der Bildung einer Einheit eine Steigerung der Effizienz des Systems verfolgt. Dies ist beispielsweise im Produktionsumfeld durch die Integration von Prozessen bekannt. Dabei werden Produktionsschritte zusammengefasst und als eine Einheit betrachtet, um eine kontinuierliche Fließfertigung zu realisieren, in dem das Produkt ohne Unterbrechung hergestellt wird (Ohno 1993; Rother und Shook 2004; Erlach 2010). Wohingegen eine Modularisierung die Verringerung der Komplexität bei steigender Varianz bzw. Veränderungsfähigkeit des Systems ermöglichen soll (Westkämper 2001). Dabei lassen sich Analogien zum Dilemma zwischen Skalen- und Differenzierungseffekten erkennen (Nyhuis et al. 2008). Zur Vereinbarung dieser vordergründig widersprüchlichen Ziele der Effizienzsteigerung bei gleichzeitiger Erhöhung der Veränderbarkeit werden Konfigurationskonzepte benutzt, die anhand der systematischen Beschreibung der Module eine flexible Integration ermöglicht. In vorliegender Arbeit wird die Konfiguration somit als situationsorientiertes Zusammenspiel aus Modularisierung und Integration verstanden.

2.2 Beschreibung und Klassifizierung technischer Systeme

Produkte und Montageeinrichtungen sind nicht bloß eine Ansammlung einzelner Elemente. Erst durch die zielgerichtete Kombination einzelner Funktionen wird die angestrebte Gesamtfunktion erreicht. Dabei weisen die Elemente vielfältige Wechselwirkungen untereinander auf und leisten einen spezifischen Beitrag zur Gesamtfunktion. Daraus erwächst das Bedürfnis nach systematischen Ansätzen zum Verständnis und zur Beschreibung dieser Elemente und Zusammenhänge (Bertalanffy 1971). Im Folgenden werden das Verständnis und die Verwendung von Begriffen aus dem Bereich der Systemklassifizierung und -beschreibung bzw. -modellierung spezifiziert, da sie in verschiedenen Anwendungsfeldern teils zu allgemein für den vorliegenden Zweck und teils widersprüchlich verwendet werden.

System

Gemäß der Herkunft vom griechischen Wort *sýstēma* ist ein System das aus mehreren Teilen zusammengesetzte und gegliederte Ganze (Duden 2011). Unter dem Begriff der allgemeinen Systemtheorie vereinigen sich wissenschaftliche Untersuchungen zur Beschreibung der Ebenen, der Bestandteile und der unterschiedlichen Ausprägungen von Systemen, wobei die Zielsetzung durch die Vermeidung einer Überspezialisierung beim Verständnis und bei der Entwicklung von Systemen geprägt ist (Bertalanffy 1971). Daraus gehen grundlegende Kategorien hervor, die eine Unterteilung technischer Systeme unterstützen und deren interne und externe Wirkbeziehungen charakterisieren (Patzak 1982; Ropohl 2012) (Abb. 2.3).

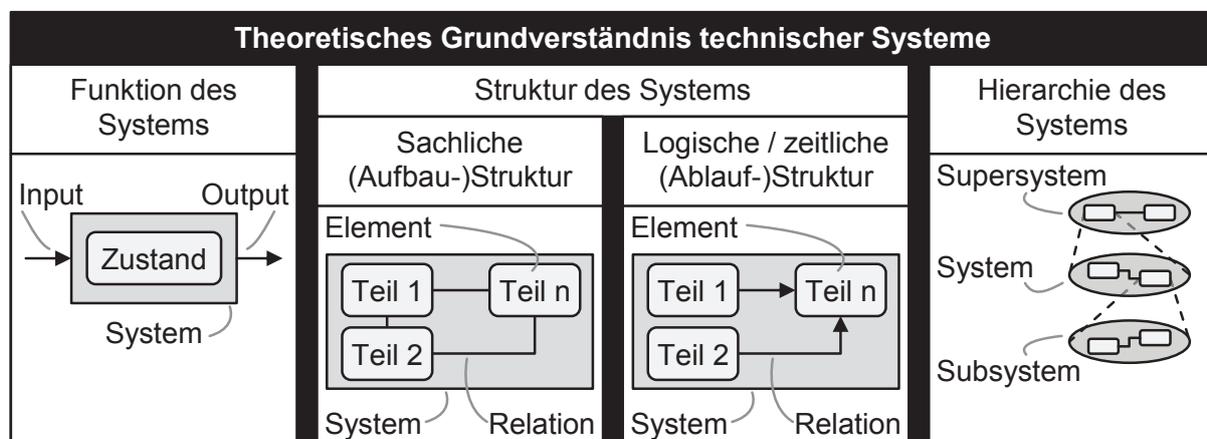


Abb. 2.3: Kategorien und Charakteristika technischer Systeme

Die *Funktion* des Systems wird durch die Veränderung des Zustands eines Betrachtungsgegenstands ausgedrückt. Sie lässt sich als Unterschied zwischen dem Output und dem Input des Systems ausdrücken. Die innere *Struktur* der Systems kann einerseits statisch hinsichtlich des Aufbaus und andererseits dynamisch hinsichtlich des Ablaufs verstanden und beschrieben werden. Hierbei werden die Wirkbeziehungen (Relationen) anhand deren Berücksichtigung einer gerichteten Komponente beispielsweise in zeitlicher Hinsicht unterschieden. Die weitere Detaillierung bzw. Strukturierung einzelner Systemelemente geschieht durch die Bildung von Subsystemen. Dadurch entsteht eine *hierarchische* Strukturierung von Systemen, wobei ein Subsystem immer ein integraler Bestandteil des Systems ist. Das jeweils übergeordnete System wird als Supersystem bezeichnet.

Diese Kategorien dienen als fundamentale Stützen des Verständnisses eines Systems, was in vorliegender Arbeit eine Überführung eines realen Systems in ein Systemmodell entspricht (Abb. 2.4). Diese Überführung wird auch als Konzeptualisierung bezeichnet.

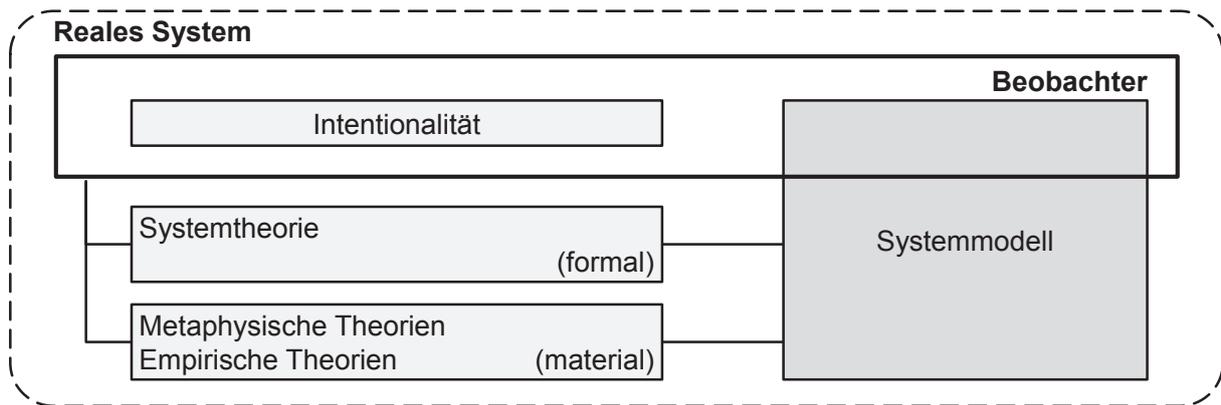


Abb. 2.4: Systemtheoretische Modellkonstruktion in Anlehnung an (Ropohl 2009)

Ein Modell ist das Abbild von etwas bzw. von natürlichen oder künstlichen Originalen. Dabei werden im Allgemeinen nicht alle Attribute des Realen abgebildet, sondern es findet eine Konzentration auf relevante Merkmale für bestimmte Subjekte, bestimmte Zeitintervalle und auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen statt (Stachowiak 1973). Diese Einschränkungen werden durch die Festlegung des Betrachtungsrahmens, der Steuerung und der Ziele (Intentionalität) der Anwendung sowie den entsprechenden Fähigkeiten des Modells bestimmt (Avgoustinov 2007).

Allgemeine Klassifikation technischer Systeme

Für eine zielführende Modellierung ist eine anfängliche Klassifizierung des betrachteten Systems bzw. dessen angestrebte modellhafte Umsetzung notwendig. Einerseits lassen sich Systeme hinsichtlich der vorliegenden Vielfalt und Dynamik klassifizieren (Abb. 2.5).

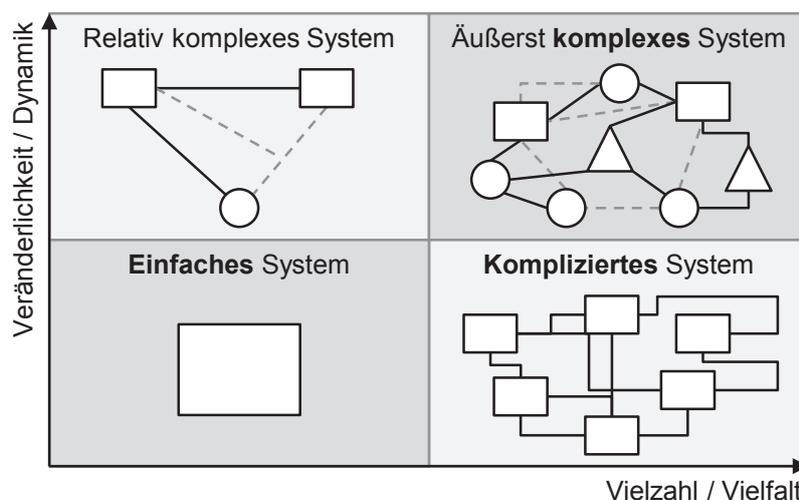


Abb. 2.5: Komplexitätsorientierte Systemklassifikation (Ulrich und Probst 1995)

Hierbei ist ein integriertes Produkt- und Montagesystem als äußerst komplexes System zu klassifizieren (ElMaraghy et al. 2005), da es von mehrskaligen, hierarchischen Strukturen, zahlreichen Elementen mit vielfältigen Wechselwirkungen sowie einer hohen Veränderungsrate bzw. einer hohen Dynamik geprägt ist. Des Weiteren handelt es sich um ein sozio-technisches System, da einerseits die technischen Einrichtungen sowie das technische Wissen bzw. die Technologie (Spath et al. 2011) und andererseits der Mensch mit dessen Fähigkeiten als Kernfunktionsträger in den Fokus der Betrachtung gestellt werden (Westkämper 2008).

Ingenieurwissenschaftliche Klassifikation technischer Systeme und Modelle

Im ingenieurwissenschaftlichen Bereich sind noch weitere Einordnungen zur näheren Spezifikation des Systems möglich (Jockisch und Rosendahl 2010). In einem ersten Schritt lässt sich die Klassifikation des betrachteten Systems hinsichtlich der Umgebung, der Funktion und der Struktur in Anlehnung an (Ropohl 2012) weiter detaillieren (Tabelle 2).

Kategorie	Merkmal	Merkmalsausprägung		
Umgebung	Einfluss	Technisch	Sozial	Ökonomisch
	Beziehung	Abgeschlossen	Relativ isoliert	Offen
Funktion	Zeitabhängigkeit	Statisch	Dynamisch	
	Funktionswerte	Kontinuierlich	Diskret	
	Funktionsbestimmtheit	Deterministisch	Stochastisch	
	Verhaltensform	Instabil	Stabil	Ultrastabil
Struktur	Zeitabhängigkeit	Starr	Flexibel	Selbst-organisierend
	Anzahl der Subsysteme	Einfach	Kompliziert	
	Anzahl der Relationen	Einfach	Komplex	Äußerst Komplex
	Strukturform	Unspezifische Formen	Spezifische Graphen	Rückgekoppelt

Tabelle 2: Klassifikation ingenieurwissenschaftlicher Systeme

Bei der Konzeptualisierung eines Systems durch die Überführung in ein Modell erfährt besonders der Einsatzzweck eine zusätzliche Bedeutung. Erst durch die Spezifikation dieses Einsatzzwecks sind eine sinnvolle Auswahl der Art der zu berücksichtigenden Informationen und deren geeignete Abstraktion zu bestimmen. Abb. 2.6 zeigt eine Übersicht zur Klassifizierung ingenieurwissenschaftlicher Modelle nach (Scholl 2008).

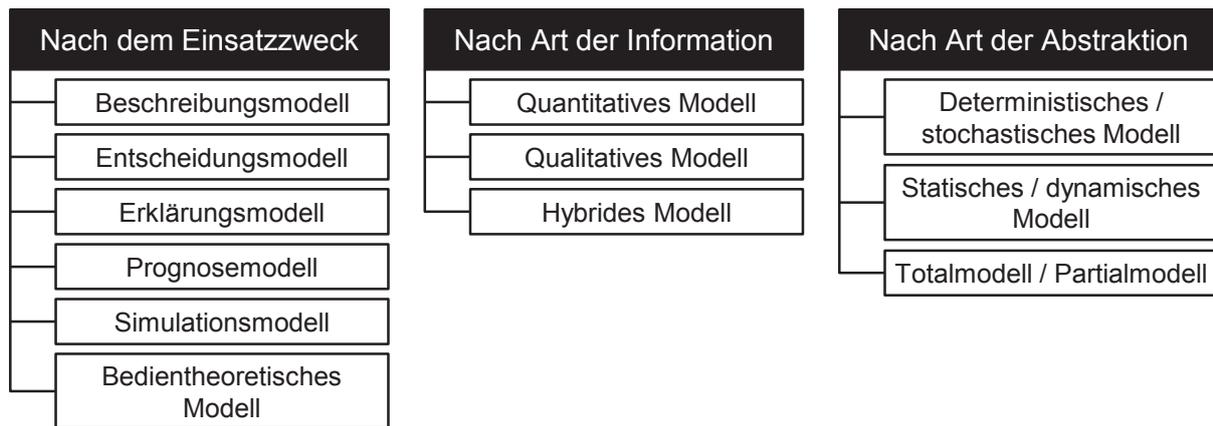


Abb. 2.6: Klassifikation ingenieurwissenschaftlicher Modelle

Modelle werden in den Ingenieurwissenschaften zur Beschreibung von Strukturen, zur Erklärung von Abläufen, als Prognose- oder Entscheidungshilfe sowie zur Simulation oder als bedientheoretische Beschreibung und Auswertung von Wartesystemen eingesetzt. Aus dem jeweiligen Einsatzzweck lassen sich die spezifischen Anforderungen ableiten. Dabei ist zu entscheiden, ob quantitative oder qualitative Informationen notwendig sind. Anschließend kann der Grad und die Art der zulässigen und notwendigen Abstraktion festgelegt werden. Damit lässt sich das Modell innerhalb der hier vorgestellten integrierten Produkt- und Montagekonfiguration charakterisieren (Tabelle 3).

Merkmal	Vorliegende Merkmalsausprägung
Einsatzzweck	Problemlösungsunterstützung durch Prognose des Systemverhaltens
Art der Informationen	Hybrid
Einfluss	Sozio-technisch
Beziehung zu Umgebung	Offen
Zeitabhängigkeit	Statisch
Funktionswerte	Diskret
Funktionsbestimmtheit	Deterministisch
Zeitabhängigkeit	Flexibel
Anzahl der Subsysteme	Kompliziert
Anzahl der Relationen	Äußerst komplex
Strukturform	Spezifische Graphen mit partieller Rückkopplung

Tabelle 3: Klassifikation integrierter Produkt- und Montagesysteme und -modelle

In der vorliegenden Arbeit wird der Bereich der Beschreibung vernetzter Strukturen zur Entscheidungsunterstützung durch die Prognose des Systemverhaltens bei Veränderungen fokussiert. Dafür werden größtenteils qualitative Informationen wie funktionale Zusammenhänge konzeptualisiert. Aber auch quantitative Daten werden speziell im Rahmen der Bewertung von Systemalternativen berücksichtigt. Zur Berücksichtigung der äußeren Einflüsse sowie der vielfältigen Elemente und Beziehungen müssen integrierte Produkt- und Montagesysteme als komplexe offene Systeme betrachtet werden. Hierbei ist die eindeutige Definition der Schnittstellen zur Identifikation und Spezifikation der äußeren Einflüsse zu beachten. Für den vorliegenden Einsatzzweck der Unterstützung von Konfigurationsmaßnahmen genügen statische Informationen mit deterministischem Charakter und meist diskreten Funktionswerten.

2.3 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel findet eine Konzentration auf Ansätze statt, die die Effizienz und die Wandlungsfähigkeit in der Montage variantenreicher Serienerzeugnisse unterstützen. Es werden dynamisierungsrelevante Produkt- und Produktionskonzepte sowie Konfigurations- und Integrationsansätze in der Montage analysiert und zusammengefasst.

2.3.1 Dynamisierungsrelevante Produkt- und Produktionskonzepte

Die integrierte Produkt- und Montagekonfiguration benötigt nicht nur eine informationstechnische Unterstützung zur Identifikation relevanter Elemente und funktionaler Zusammenhänge, sondern auch flexible, veränderungsfähige und damit wandlungsfähige Produkt- und Produktionskonzepte, die die aufwandsarme Umsetzung vorgeschlagener Maßnahmen erlauben. Zur Verringerung und Beherrschung der Komplexität und zur Handhabung von Änderungen bei variantenreichen Erzeugnissen gibt es produktseitig diverse Ansätze (Pahl et al. 2007). Dabei ist zu beachten, dass neben einer Modularisierung auf Baugruppenebene in Form von Plattform-, Baukästen- oder Baureihenstrukturen (REFA 1993) die Kreation einer übergeordneten logischen und funktionalen Beschreibung der Module notwendig ist (Lindemann und Maurer 2006). Diese wird als Produktfunktionsstruktur in Ergänzung zur Produktstruktur bezeichnet und bildet gemeinsam die Produktarchitektur (Feldhusen und Gebhardt 2008), was im Folgenden als das Produktsystem angesehen wird (Abb. 2.7).

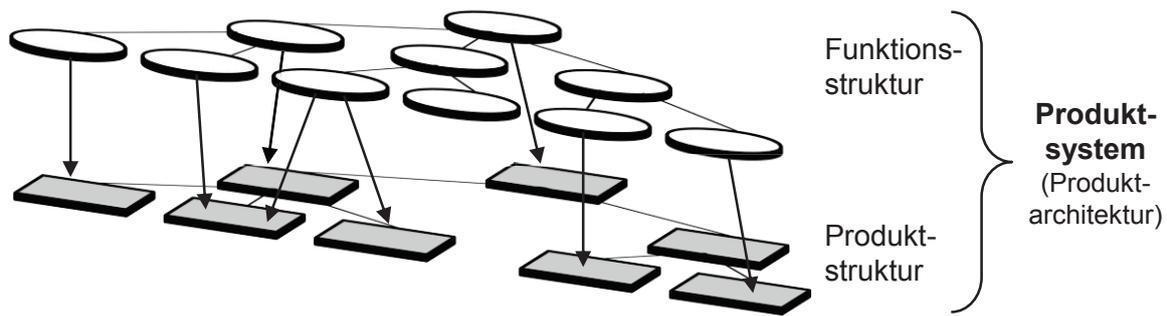


Abb. 2.7: Das Produktsystem in Anlehnung an (Göpfert 1998)

Hinsichtlich der Produktentstehung durchläuft das Produktsystem verschiedene Phasen mit spezifischen Modellvorstellungen. Dahingehend ergänzt das Münchner Produktkonkretisierungsmodell die vorgestellten Bestandteile des Produktsystems mit einer Wirkebene und legt besonderen Wert auf einen zu definierenden Anforderungsraum (Abb. 2.8).

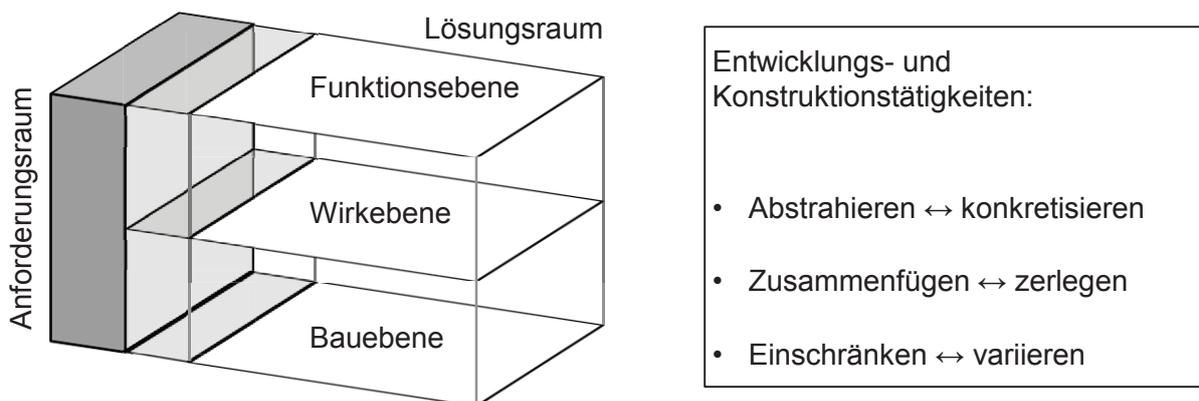


Abb. 2.8: Münchner Produktkonkretisierungsmodell (Ponn und Lindemann 2011)

Im bereits definierten Betrachtungsbereich variantenreicher Serienerzeugnisse weist das Produktsystem eine hohe Komplexität hinsichtlich Veränderungsfrequenz sowie Elementanzahl und Kombinationsmöglichkeiten auf. Zur Aufbereitung und Veranschaulichung von Erzeugnissen dieser Art wurden neben Mengen-, Struktur- und Baukasten- oder Baureihenstücklisten (Eversheim und Krause 1996) bereits früh auch Variantenstücklisten (Schaller 1980) vorgeschlagen. Allerdings leidet bei diesen Möglichkeiten mit steigender Variantenzahl die Übersichtlichkeit der Darstellung, auch wenn aktuelle Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Komplexitätsbeherrschung mittels Baukastensystemen vorhanden sind (Arnoscht 2011). Aus diesem Grund wird zur Aufbereitung und Darstellung variantenreicher Erzeugnisse der Variantenbaum (Abb. 2.9) vorgeschlagen (Schuh 2005). Hierbei werden die variantenbestimmenden Merkmale und Ausprägungen analysiert und in Form eines Merkmalbaums repräsentiert.

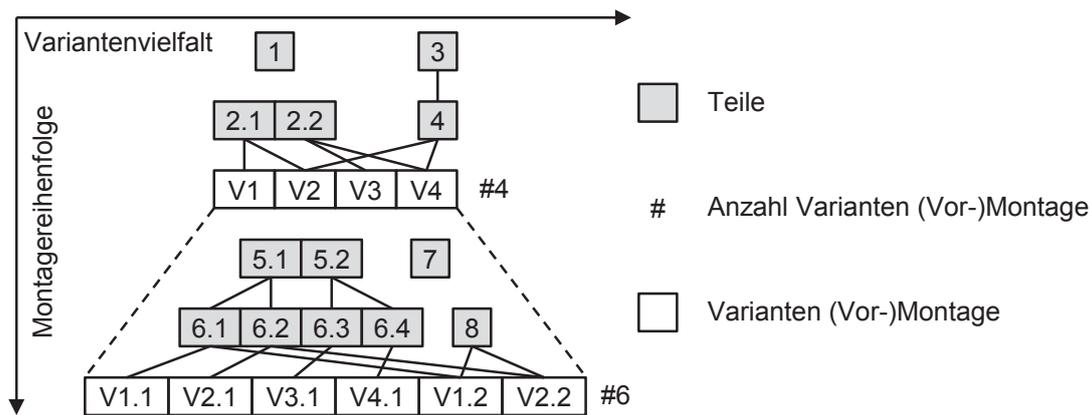


Abb. 2.9: Variantenbaum (Schuh und Jonas 1997)

Nachdem Kombinationsverbote und -zwänge hinterlegt sind, lassen sich mittels Softwareunterstützung in Form des Complexity Managers die Typen generieren, Variantenzahlen ermitteln und gesammelt im Variantenbaum darstellen. Durch die hierarchische Gliederung des Produkts nach der Montagereihenfolge wird ein erster Bezug zur Montage hergestellt.

Gerade das Ziel der Reduzierung der Varianz in der Montage verfolgt das Produktionsstufenkonzept (Wiendahl et al. 2009). Dabei wird bei konstanter äußerer Varianz eine Verringerung der inneren Varianz und damit der Komplexität der gesamten Produktion durch eine späte Variantenbildung angestrebt. Die äußere Varianz ist dabei die für den Kunden erkennbare, nach außen wirkende Vielfalt des Produkts, wohingegen die innere Varianz die in der Produktion auftretende Vielfalt an unterschiedlichen Baugruppen und Teilen darstellt (Bartuschat 1994). Durch das Ziel, die Komplexität in der Produktion dadurch zu verringern, dass die Varianz im Idealfall erst im letzten Schritt der Montage erzeugt wird, werden hohe Anforderungen hinsichtlich Flexibilität und Wirtschaftlichkeit an diesen Schritt gestellt. Darauf wurde im Rahmen eines durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts eine Antwort in Form von *hochflexiblen Produktionsendstufen (PEflex)* entwickelt (Wiendahl et al. 2004). Dabei wird eine Auflösung der Unterscheidung zwischen Fertigung und Montage bei gleichzeitiger Klassifizierung in variantenspezifische und variantenneutrale Produkt- und Produktionselemente angestrebt, welche dann hinsichtlich der Variantenentstehung optimal angeordnet werden können.

Eine technisch wie auch organisatorisch konsequente Teilung eines produzierenden Unternehmens in sogenannte Fraktale stellt das Konzept der *fraktalen Fabrik* dar (Warnecke und Hüser 1996), was auch heute noch aktuell ist (Bauernhansl 2012) und als Grundlage für das

im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 467 „*Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion*“ entwickelte *Stuttgarter Unternehmensmodell* (SUM) gilt (Westkämper und Zahn 2009b). Hierbei werden wandlungsfähige Unternehmensstrukturen durch das ganzheitliche Verständnis der Produktion als sozio-technisches System und dessen Gliederung in selbstorganisierende und selbstoptimierende Leistungseinheiten erzeugt (Abb. 2.10).

Im Rahmen des durch das BMBF geförderten Verbundprojekts „*Produktions- und Organisationsflexibilisierung im Life Cycle – ProfiL*“ ist ebenfalls das Begreifen des Unternehmens als lebensfähiges System von zentraler Bedeutung (Bergmann und Herrmann 2009). Hier wird ebenso wie beim SFB 467 das Modell lebensfähiger Systeme nach (Beer 1979) als Grundlage des umfassenden Verständnisses und der Steuerung produzierender Unternehmen benutzt. Auch wenn der Fokus im Gegensatz zu vorliegender Arbeit auf der strategischen Ausrichtung von Maßnahmen zur integrierten Modernisierung von Unternehmen liegt, so weist es doch große Parallelen hinsichtlich der Verknüpfung funktionaler Anforderungen und entsprechender Lösungsbausteine auf (Dombrowski et al. 2009).

Die aufgeführten Ansätze zeigen eine Übersicht dynamisierungsrelevanter Konzepte der Produkt- und Produktionsstrukturierung. Diese markieren die Eckpfeiler eines weiten Felds, das das forschungstechnische Umfeld vorliegender Arbeit darstellt.

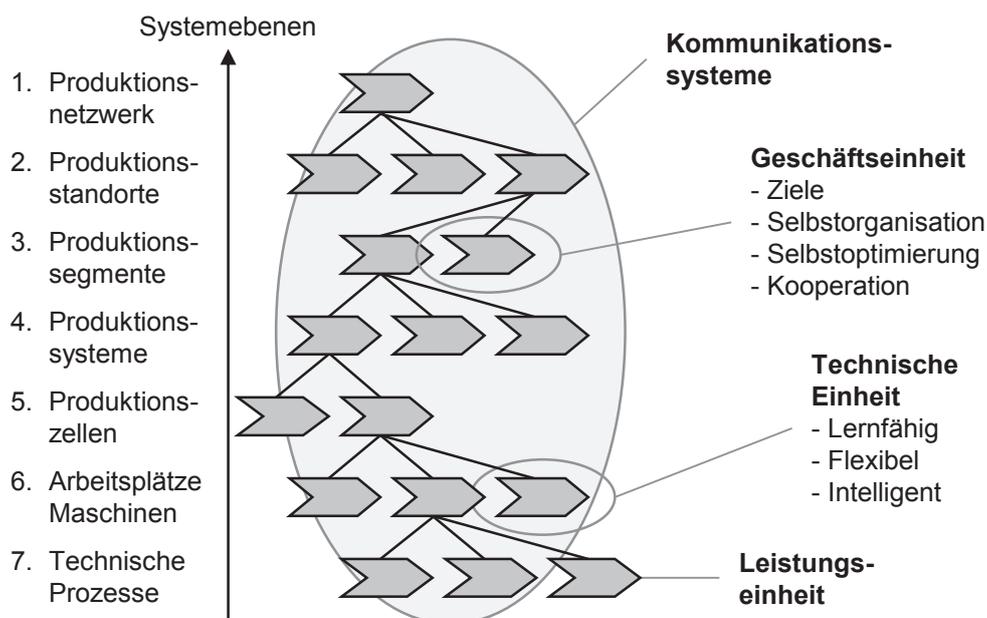


Abb. 2.10: Skalierung produzierender Unternehmen nach dem Stuttgarter Unternehmensmodell (Westkämper 2009b)

2.3.2 Konfigurations- und Integrationsansätze in der Montage

Nach der Beleuchtung dynamisierungsrelevanter und modularisierungsorientierter Produkt- und Produktionskonzepte wird in diesem Kapitel der Fokus auf Integrationsaspekte gelegt, wobei Ansätzen eine besondere Bedeutung beigemessen wird, die die Integration im Sinne einer Zusammenführung von Produkt und Produktion mit spezieller Beachtung der Montage adressieren. Dabei erfahren konzeptuelle Integrationsansätze eine größere Beachtung als deren informationstechnische Unterstützung wie sie unter anderem im Bereich der Digitalen Fabrik (Landherr et al. 2013) vorangetrieben wird. Für das Ziel der Arbeit eine permanente Adaption bestehender Produkt- und Montagesysteme zu unterstützen, weisen integrative Planungs- und Gestaltungsansätze wertvolle Grundlagen mit hoher Relevanz zur behandelten Forschungsthematik auf.

Das Simultaneous (SE) oder das Concurrent Engineering (CE) kann dabei als Startpunkt der Parallelisierung von Produkt-, Produktions- und Vertriebsgestaltung herangezogen werden (Bochtler und Laufenberg 1995). Dabei steht vor allem die Anpassung und zumindest teilweise gleichzeitige Ausführung von Entwicklungsprozessen im Vordergrund. Dies wird auch im Rahmen der *integrierten Produktentstehung (IPE)* verfolgt, dessen Grundlagen im Rahmen des SFB 336 „*Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung*“ erarbeitet wurden (Ehrlenspiel 2009; Müller 2007). Zahlreiche Werkzeuge und Methoden zur Verkürzung der Zeit zwischen der ersten Produktidee und dem Start der (Serien-)Produktion werden mit diesen Begriffen zusammengefasst (Parsaei und Sullivan 1993). Neben der Standardisierung und Integration von Prozessen wurde die Relevanz von Informations- und Kommunikationstechnologien zur Unterstützung integrierender Methoden und Abläufe sowie der Vernetzung getrennter Arbeitsbereiche erkannt und beispielsweise in dem durch die europäische Kommission (EC) geförderten Projekt „*CONSENS – Concurrent Simultaneous Engineering System*“ umfassend behandelt (Bullinger und Warschat 1996). Auch im Rahmen des SFB 346 „*Rechnerintegrierte Konstruktion und Fertigung von Bauteilen*“ wurden Erkenntnisse in den Bereichen der Erfassung und Modellierung von Kundenanforderungen zur Verwendung einer verteilten Produktentwicklung sowie der rechnergestützten Planung und Arbeitsvorbereitung unter intensiver Verwendung bereits generierter Daten erarbeitet, um eine durchgängige Prozesskette von der Konstruktion bis zur

Teilefertigung informationstechnisch zu unterstützen und zu optimieren (Grabowski et al. 1993; Grosse et al. 1997).

Im ebenfalls durch die EC geförderten Projekt „*COMA – CO*nfiguration*MAN*agement for the machine industry“ stand die Zusammenarbeit zwischen Vertriebs- und Entwicklungsbereichen im Mittelpunkt. Das Ziel war die Verbesserung der entsprechenden Kommunikation durch die Aufbereitung und Darstellung von Konfigurationswissen. Dafür wurde die *Konfigurations- und Verträglichkeitsmatrix* entwickelt (Bongulielmi 2002). Diese verbindet die technische Sicht eines Produkts über eine Verträglichkeitsbetrachtung mit der Kundensicht (Puls 2002). Allerdings konzentriert sich dieser Ansatz auf Produktdaten und schafft keine Verknüpfung zur Produktion (Henseler 2003). Dennoch stellt die Konfigurations- und Verträglichkeitsmatrix eine einfache Möglichkeit zur Repräsentation von konfigurationsrelevantem Wissen mit starkem Bezug zu vorliegender Arbeit dar.

Besonders die Berücksichtigung der frühen Phasen der Produktentwicklung stand beim SFB 361 „*Modelle und Methoden zur integrierten Produkt- und Prozeßgestaltung*“ im Vordergrund. Dieser lieferte umfangreiche Erkenntnisse hinsichtlich des Umgangs mit unsicheren und unscharfen Informationen bei der Integration von Produkt- und Prozessgestaltung im Sinne eines SE oder CE (Eversheim und Schuh 2005). Es wurde erkannt, dass eine permanente Rückkopplung von Informationen, Anforderungen und Randbedingungen in die vorgelagerten Bereiche stattfinden muss, damit die Aktualität und Integrität der relevanten Informationen gesichert werden kann. Diese Informationen wurden dann unter anderem für eine frühzeitige Bewertung von Fertigungsfolgen (Klocke et al. 2005) und zur Generierung alternativer Technologieketten (Fallböhrer 2000) herangezogen.

Im Rahmen des durch das BMBF geförderten Verbundprojekts „*VireS – Virtuelle Synchronisation von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung*“ wurde ebenfalls an einem Instrumentarium für die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem geforscht. Hierbei spielte besonders die frühzeitige Berücksichtigung der Aspekte Kosten und Robustheit eine hervorgehobene Rolle (Gausemeier et al. 2012b). Die Grundlage bildete hierfür unter anderem das V-Modell zum iterativen Vorgehen beim Entwurf von Produktionssystemen für mechatronische Erzeugnisse (VDI 2206). Zur Beschreibung der Produkt- und Produktionssystemkomponenten kam die bereits erwähnte Spezifikationstechnik *CONSENS*

zum Einsatz, worauf auch der *Mechatronic Modeller* zur Modellierung prinzipieller Lösungen basiert (Gausemeier et al. 2012a).

2006 wurde der Exzellenzcluster 128 „*Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*“ eingerichtet. Dieser sucht nach Antworten auf die Frage, wie Unternehmen in Hochlohnländern erfolgreich entwickeln und produzieren können. Dafür sollen zukunftsfähige, produktionswissenschaftliche Strategien und Theorien sowie dafür notwendige Technologieansätze erforscht und entwickelt werden (Brecher et al. 2011). Als Ziel der integrativen Produktionstechnik wurde die Auflösung des Polylemmas zwischen Mengenvorteilen (Scale) und Spezialisierungsvorteilen (Scope) sowie zwischen Wert- und Planungsorientierung formuliert (Abb. 2.11).

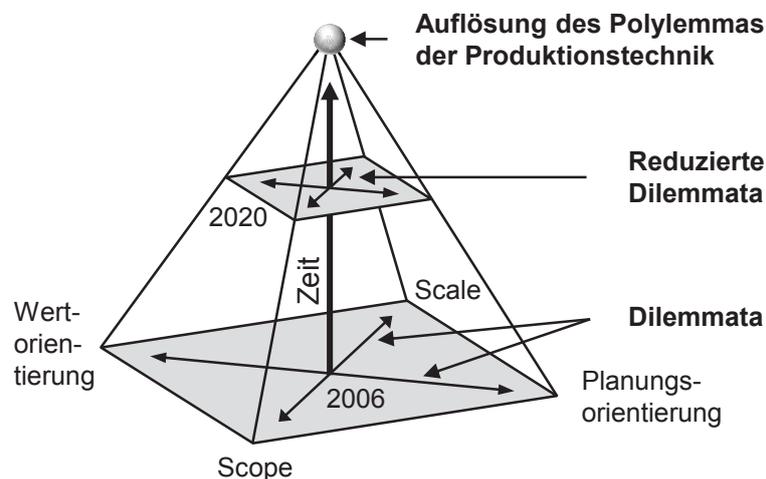


Abb. 2.11: Das Polylemma der Produktion (Schuh et al. 2007b)

Unter anderem wurde ein *integratives Bewertungsmodell* vorgestellt, das besonders hinsichtlich der Beurteilung vorgeschlagener Systemkonfigurationen eine hohe Relevanz zur vorgestellten Forschungsthematik aufweist. Dabei wird auf die dichotomen Beziehungen innerhalb des Produktprogramms, der Produktarchitektur, der Supply-Chain und der Produktionsstruktur eingegangen und eine multikriterielle Einordnung vorgenommen (Abb. 2.12).

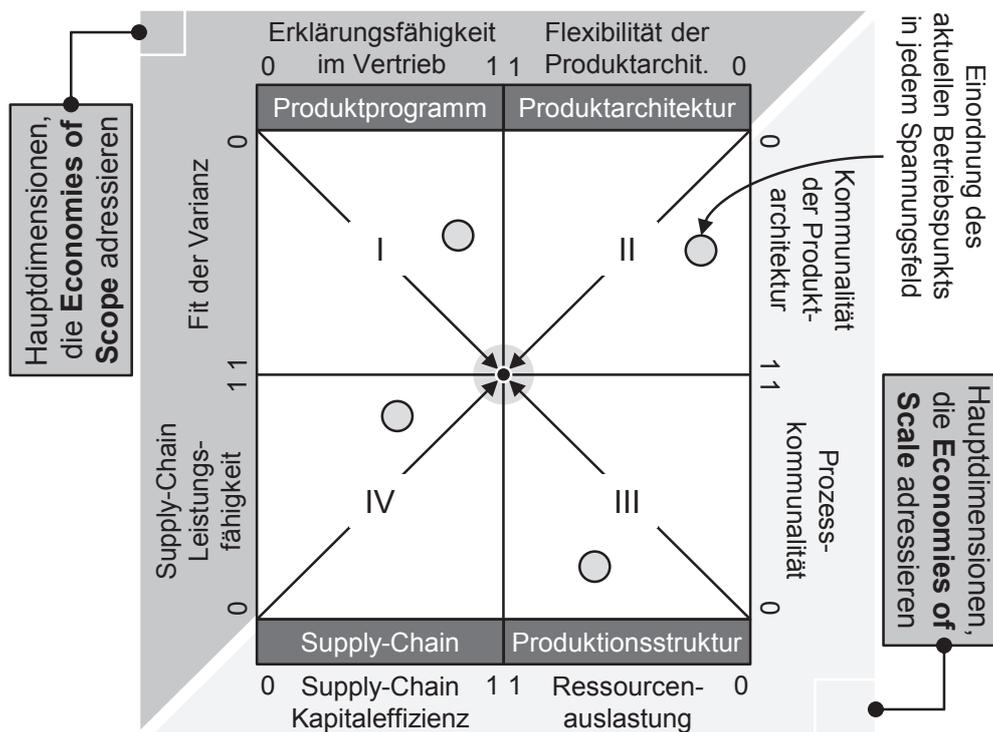


Abb. 2.12: Integratives Bewertungsmodell (Nußbaum 2011)

Diese Bewertung dient anschließend als erster Schritt der integrativen Konfigurationslogik, die nach der initialen Bewertung des Produktionssystems eine Analyse komplexitätsbezogener Wirkbeziehungen der Produkt- und Prozessmorphologie vorsieht. Anschließend sollen integrative Lösungsprinzipien implementiert sowie konstituierende Produkt- und Prozessmerkmale definiert werden. Dieses Vorgehen ermögliche eine Nivellierung komplexitätsbezogener Flaschenhälse und Überkapazitäten (Schuh et al. 2011a).

Das wiederum durch das BMBF geförderte Verbundprojekt „*RePlaMo - Wandlungsfähigkeit durch rekonfigurierbare Plattformkonzepte für die Montage*“ konzentrierte sich auf die Weiterentwicklung bestehender Ansätze zur Modularisierung und Skalierung von Montageanlagen. Hierbei lag der Fokus auf den physischen Aspekten der Entwicklung rekonfigurierbarer Plattformkonzepte und weniger auf den logischen und strukturellen Beziehungen zwischen und innerhalb einzelner Module (Brecher et al. 2013). Diese Aspekte wurden im Verbundprojekt „*WamoPro – Wandlungsfähigkeit durch modulare Produktionssysteme*“ nicht nur hinsichtlich technischer Modularisierung, sondern auch unter Berücksichtigung von Organisation und Personal analysiert und somit eine Flexibilität und Modularisierung des gesamten Produktionssystems angestrebt (Meier et al. 2012).

2.4 Fazit mit abgeleitetem Handlungsbedarf

Die vorangestellte Diskussion des relevanten Stands der Wissenschaft und Technik zeigt, dass eine Vielzahl an Ansätzen zur zielgerichteten Modularisierung und Integration von Produkt- und Produktionssystemen vorhanden ist. Auch die Möglichkeit der Anwendung von Konfigurationskonzepten wird dabei teilweise beleuchtet. In den Bereichen der Aufbereitung und Repräsentation konfigurationsrelevanter Informationen und der Bewertung konfigurierter Lösungsvarianten sind ebenfalls Vorarbeiten vorhanden.

Allerdings lässt sich hinsichtlich der Realisierung effizienter und gleichzeitig flexibler sowie veränderungsfähiger Montagestrukturen ein Forschungs- und Entwicklungspotential im Bereich der systematischen Beschreibung und Integration des Produkt- und Montagesystems auf technisch-organisatorischer Ebene identifizieren. Bisherige Ansätze im Bereich variantenreicher Serienmontage konzentrieren sich auf eine Integration der Planungs- und Entwicklungsprozesse sowie auf die Verringerung der Erzeugnisvarianz durch eine verbesserte Abstimmung des Produktportfolios und der Kundenbedürfnisse. Dies leistet zwar einen Beitrag zur Reduktion der varianten- und turbulenzinduzierten Komplexität in der Produktion, wobei kein signifikanter Beitrag zum technisch-organisatorischen Verständnis und zur Steuerung der funktionalen Zusammenhänge zwischen variantenreichen Produkten und deren Montage erkennbar ist. Es mangelt an einer domänenübergreifenden Strukturierung und systematischen Beschreibung der interagierenden und voneinander abhängigen Systeme. In Teilen ist eine methodische Unterstützung der Abstimmung der unterschiedlichen Fachgebiete vorhanden. Jedoch sind diese nur eingeschränkt für eine durchgängige Unterstützung einer integrierten Produkt- und Montagebetrachtung verwendbar. Damit einhergehend ist auch ein Entwicklungspotential hinsichtlich fundierter informationstechnologischer Unterstützung interdisziplinärer Problemlösung an den Schnittpunkten zwischen Produkt und Montage erkennbar.

Dem Ziel der Dynamisierung der Montage durch eine zielgerichtete Konfiguration des integrierten Produkt- und Montagesystems folgend, wird ein systemtheoretisches Verständnis technisch-organisatorischer Aspekte des Produkts sowie der Montage als notwendige Grundlage identifiziert, um das Systemverhalten bei spezifischen Veränderungen prognostizieren zu können (Abb. 2.13).

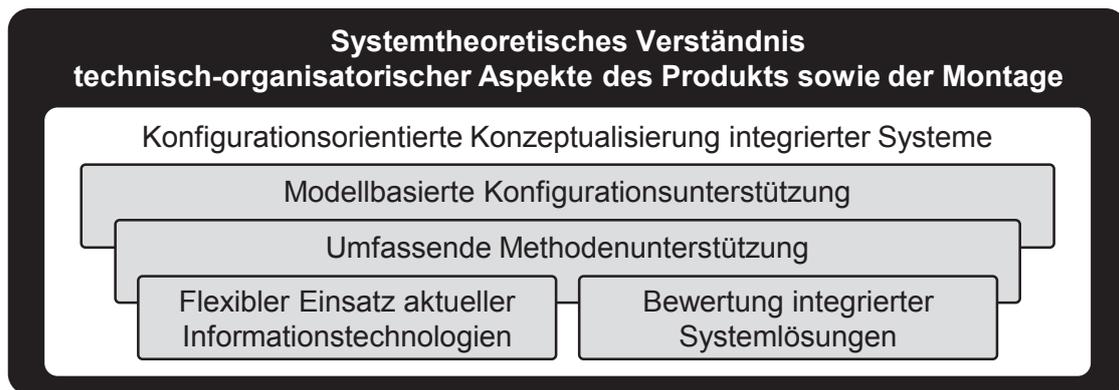


Abb. 2.13: Handlungsbedarf im Bereich integrierter Produkt- und Montagekonfiguration

Aufbauend auf dieser Grundlage sind geeignete Ansätze zur Konzeptualisierung der vorliegenden komplexen Systeme zu analysieren, um damit eine modellbasierte Problemlösungsunterstützung zu realisieren. Zur Steigerung der industriellen Anwendungsfähigkeit ist zusätzlich eine durchgängige und umfassende Unterstützung der Konfiguration durch methodische und informationstechnologische Werkzeuge sowie ein schnelles und aufwandsarmes Vorgehen zur Bewertung konfigurierter Systemlösungen von großer Bedeutung.

3 Grundlagen der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration

Das im Anschluss an dieses Kapitel vorgestellte Konzept der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration baut auf weitreichenden Grundlagen mit interdisziplinärem Charakter auf. Die Vorgehensweise nutzt eine modellbasierte Problemlösungsunterstützung, wobei ein integriertes Produkt- und Montagemodell den Kern darstellt. Die Identifikation des Änderungsbedarfs stützt sich auf die Analyse relevanter Einflüsse, die anschließend auf Grundlage diskreter und kontinuierlicher Systemveränderungen strukturiert und synchronisiert werden. Bevor das Kapitel mit der Ableitung von Anforderungen an die integrierte Produkt- und Montagekonfiguration schließt, werden der informationstechnologische Ausgangspunkt für die Modellierung und die Entwicklung der softwaretechnischen Unterstützung sowie das theoretische Fundament für die Bewertung konfigurierter Systemlösungen erläutert.

3.1 Modellbasierte Problemlösungsunterstützung

Modelle sind ein grundsätzliches Instrument zur Beschreibung, Erklärung, Prognose, mathematischen Berechnung, experimentellen Untersuchung, Planung und Optimierung unterschiedlichster Betrachtungsgegenstände (Töllner et al. 2010). Im Allgemeinen lassen sich diese Applikationsmöglichkeiten mit dem Ziel der Problemlösungsunterstützung zusammenfassen (Eichhorn 1979) und in sechs Schritte einteilen (Ulrich und Probst 1995):

- Bestimmen der Ziele – Modellierung der Problemsituation
- Analysieren der Wirkungsverläufe
- Erfassen und Interpretieren der Veränderungsmöglichkeiten
- Lenkungsmöglichkeiten abklären
- Strategien und Maßnahmen planen
- Problemlösung verwirklichen

Im Sinne einer Konzentration auf den vorliegenden Betrachtungsbereich sozio-technischer Systeme im Produkt- und Montagebereich dient der in Abb. 3.1 dargestellte modellbasierte Problemlösungsprozess als grundlegende Orientierung.

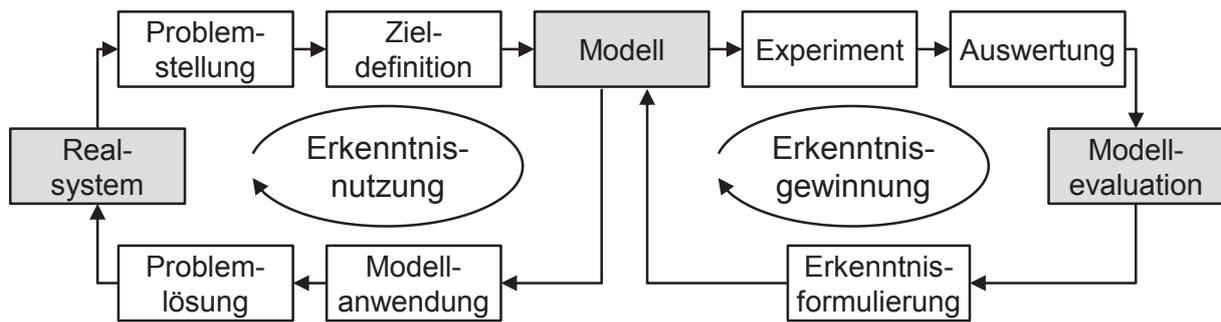


Abb. 3.1: Modellbasierter Problemlösungsprozess (Nyhuis und Wiendahl 2012)

Durch die bereits definierten Systemgrenzen des Betrachtungsbereichs und durch den angestrebten Einsatz zur Realisierung abgestimmter Produkt- und Montagelösungen bei sich permanent verändernden Randbedingungen ist eine weiterführende Spezifizierung möglich. Unter dem Schlagwort der *digitalen Produktion* werden Ansätze zusammengefasst, die sich eben diesem Ziel durch den Einsatz rechnergestützter Werkzeuge, Methoden und Modelle widmen. Abb. 3.2 zeigt, wie sich dieses grundlegende Konzept der modellbasierten Problemlösungsunterstützung im Sinne einer digitalen Produktion adaptieren lässt. Dieses Konzept dient als Grundlage der modellbasierten Vorgehensweise zur konfigurationsgestützten Realisierung dynamischer Produkt- und Montagestrukturen.

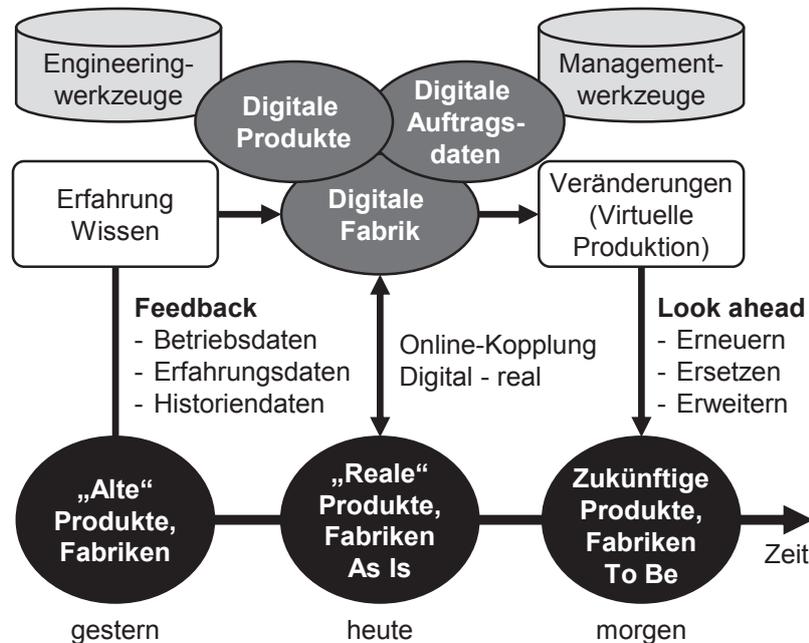


Abb. 3.2: Definition der digitalen Produktion (Westkämper 2013a)

3.2 Modelltheoretisches Verständnis der technischen Systeme

Als Voraussetzung einer verlässlichen und effizienten Unterstützung müssen Modelle technischer Systeme gemäß (Becker et al. 2012) folgenden Grundsätzen entsprechen:

- *Richtigkeit*
Hier ist die syntaktische und semantische Richtigkeit zu unterscheiden. Die syntaktische Richtigkeit entspricht dabei der Einhaltung aller durch die verwendete Modellierungssprache vorgegebenen Regeln, wohingegen die semantische Richtigkeit auf die korrekte Repräsentation des abzubildenden Systems abzielt. Damit geht auch das Verlangen nach logischer und formaler Konsistenz des Modells einher.
- *Relevanz*
Jedes Modell wird bewusst von Dingen des realen Systems abstrahiert, die keinen Nutzen für den Modellnutzer beinhalten. Es sollen also nur die Sachverhalte modelliert werden, die für den zugrunde liegenden Modellierungszweck relevant sind.
- *Wirtschaftlichkeit*
Darunter wird die Erfüllung des Modellierungsziels unter minimalem Aufwand verstanden. Übertragen auf den vorliegenden Betrachtungsgegenstand muss bezüglich der Wirtschaftlichkeit die Frage nach dem ausreichenden und notwendigen Detailgrad beantwortet werden. Der durch die Verwendung des Modells erzielte Nutzen muss den zur Modellierung und Anwendung aufzubringenden Aufwand übersteigen.
- *Klarheit*
Die Verständlichkeit der Modelle ist im Zusammenhang mit der Repräsentation konfigurationsrelevanter Informationen von besonderer Bedeutung, da nicht nur eine Maschinenlesbarkeit zur Anwendung automatisierter Prozesse wie der rechnergestützten Schlussfolgerung logischer Beziehungen (Inferenz), sondern auch das Verständnis durch das bedienende Personal sichergestellt werden muss.
- *Vergleichbarkeit*
Einerseits müssen Gegebenheiten, die in der realen Welt als gleich angesehen werden, auch in der modellierten Welt als gleich erkannt werden können. Andererseits müssen Modelle ein und derselben realen Gegebenheit unabhängig von der Modellierungssprache vergleichbar und ineinander überführbar sein.

- *Systematischer Aufbau*

Nur durch Einhaltung systemtheoretischer Grundsätze bei der Modellierung kann eine Konsistenz zwischen der realen und der modellierten Welt erreicht werden.

Die Einhaltung dieser sechs Grundsätze bei der Modellierung technischer Systeme unter immanenter Berücksichtigung der Ziele bzw. der späteren Anwendung des Modells stellt das Fundament für die nun folgende Diskussion der Elemente des integrierten Produkt- und Montagemodells dar.

3.2.1 Modelltheoretische Grundlagen des Produktsystems

Unter Berücksichtigung der thematischen Konzentration auf die Montage variantenreicher Serienerzeugnisse gilt es nun, die modelltheoretischen Grundlagen hinsichtlich des hierarchischen, strukturellen und funktionalen Aufbaus des Produktsystems unter Berücksichtigung der möglichen Variationen des Produkts und dessen Komponenten darzustellen.

Im Betrachtungsbereich wird das Produktsystem als Sachziel einer Unternehmung definiert, das aus verschiedenen Komponenten unter Berücksichtigung der Teil- und Gesamtfunktion zusammengesetzt wird. Die modelltheoretischen Aspekte des Produktsystems werden in Abb. 3.3 veranschaulicht. Die Komponenten des Produkts können als Einzelteile oder Baugruppen auftreten, wobei das Enderzeugnis wiederum als spezielle Baugruppe höchster Ordnung aufgefasst wird. Dabei können Einzelteile und Baugruppen Bestandteile übergeordneter Baugruppen sein. Diese über- und untergeordneten Produktkomponenten können als Super- und Subsysteme verstanden werden. Dadurch entsteht eine *hierarchische* Gliederung des Produktsystems. Diese Gliederung steht in enger Korrelation mit der Reihenfolge, in der das Produkt montiert werden kann.

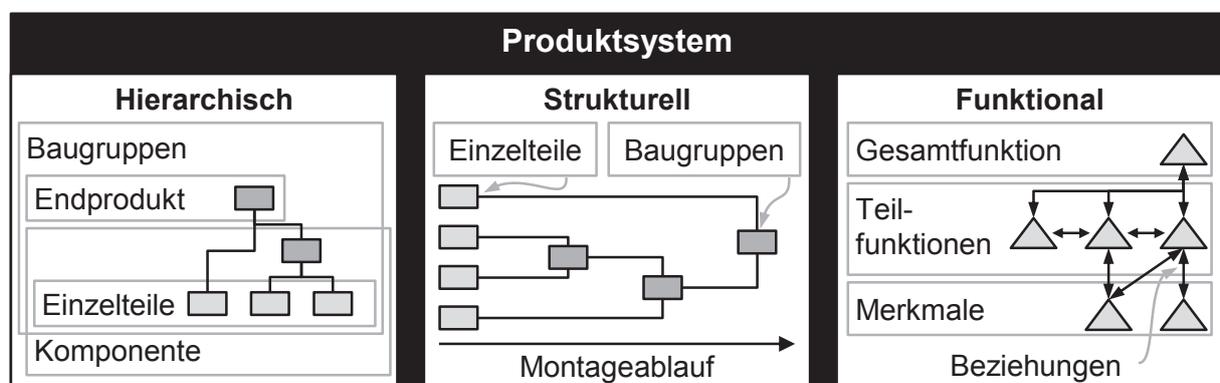


Abb. 3.3: Modelltheoretische Charakteristika des Produktsystems

Allerdings ist der Montageablauf nicht nur davon abhängig, welche Produktkomponenten Bestandteil welcher Baugruppen sind, sondern es müssen dabei auch Gesichtspunkte der Montierbarkeit beachtet werden. Eine dahingehende Aufbereitung des Produktsystems wird als die produktsystemspezifische Ablaufstruktur bezeichnet (Bullinger 1986) und stellt die im Rahmen dieser Arbeit fokussierten *strukturellen* Charakteristika des Produktsystems dar. Verbreitete Darstellungsformen der Ablaufstruktur sind der Vorranggraph (Prenting und Battaglin 1964) sowie die Strukturstückliste (REFA 1993). Für ein weites Einsatzfeld sind auch lebenszyklusorientierte Produktstrukturierungen von essentieller Bedeutung. Allerdings liefert diese Art der strukturellen Charakterisierung von Produktsystemen keinen Beitrag zum vorgestellten Konzept und wird daher nicht tiefergehend behandelt. Für weiterführende Literatur hinsichtlich des Konzepts des Produktlebenszyklusmanagements (PLM) kann auf (Arnold et al. 2011; Eigner und Stelzer 2009; Feldhusen und Gebhardt 2008; Lindemann 2007) zurückgegriffen werden.

Als abschließender Aspekt bei der Modellierung von Produktsystemen sind die *funktionalen* Charakteristika und Beziehungen zu berücksichtigen (Birkhofer 1980). Erst die Beschreibung einzelner Komponenten hinsichtlich ihrer Funktion und ihres spezifischen Beitrags zur Gesamtfunktion des Produkts ermöglicht eine zielgerichtete Modularisierung. Dabei ist zu beachten, dass sich die Funktion der Komponenten in unterschiedlichen Systemkonfigurationen in Bezug auf ihren Beitrag zur angestrebten Gesamtfunktion unterscheiden kann. Eine kontextsensitive Berücksichtigung der Funktion einzelner Elemente ist somit der Schlüssel zu einer effektiven Konfiguration, wobei im Regelfall eine (Teil-)Funktion durch ein Modul, was aus einem oder mehreren Komponenten bestehen kann, repräsentiert wird. Das Modul ist dabei in produktspezifischer Hinsicht eine funktionale Einheit, die aus einer oder mehrerer Komponenten besteht. Damit wird eine Entkopplung der Produkt- und der Funktionsstruktur verfolgt, um eine konsequente Modularisierung zu ermöglichen. Die Bildung von Produktvarianten findet somit auf einer funktionalen Ebene statt, wobei sich die Funktionsvariabilität in einen skalierbaren Bereich, in obligatorische und optionale Funktionen sowie Grundfunktionen gliedern lässt (Abb. 3.4).

Zur Veranschaulichung dieser Funktionskategorien lässt sich ein Autositz benutzen. Dabei stellt beispielsweise das Vorhandensein einer Rückenlehne eine unveränderliche Grundfunktion dar. Zum Teil ist die Größe des Autositzes wählbar, was oft im Premiumsegment angeboten wird.

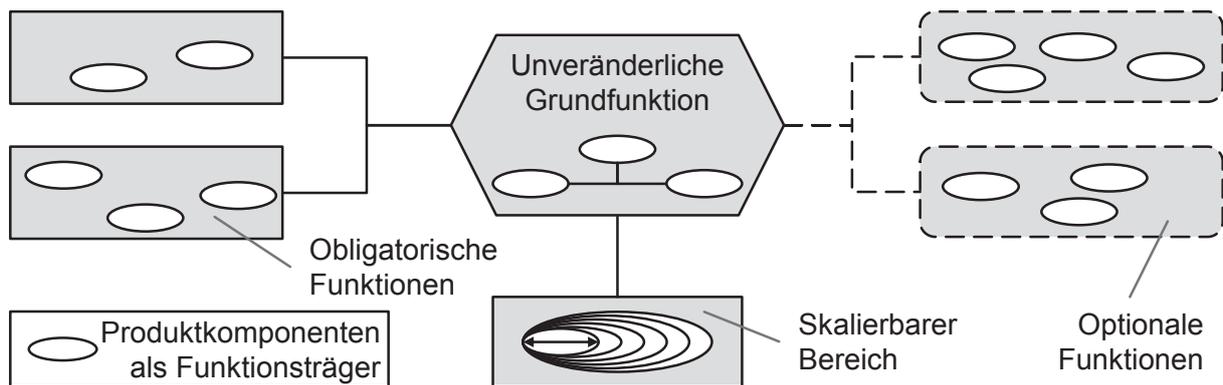


Abb. 3.4: Funktionsvariabilität von Produktkomponenten

Diese mögliche Größenanpassung kann dann als skalierbarer Bereich bezeichnet werden. Der Bezug des Autositzes gilt als obligatorische Funktion, da er vorhanden sein muss, allerdings ist die Ausprägung, beispielsweise ob als Material Leder oder ein anderes Textil verwendet wird, meist vollständig wählbar. Funktionen werden als optional bezeichnet, wenn sie nicht vorhanden sein müssen. Im Rahmen des Beispiels eines Autositzes lassen sich Funktionen wie eine Sitzheizung oder eine Massagefunktion als optional einordnen.

3.2.2 Modelltheoretische Grundlagen des Montagesystems

Um eine korrekte und verlässliche Integration des Produkt- und des Montagesystems gewährleisten zu können, muss eine gemeinsame Basis geschaffen werden (Vgl. Grundsatz der Vergleichbarkeit, Kapitel 3.2). Daher werden auch für die Diskussion des Montagesystems modelltheoretische Grundlagen untersucht sowie im Folgenden charakterisiert und dargestellt (Abb. 3.5). Das Montagesystem weist ebenfalls *hierarchische* Charakteristika auf. Das SUM bietet dahingehend eine etablierte Grundlage. In den Ebenen des SUM, die in Kapitel 2.3.1 angeführt sind, findet im Rahmen dieser Arbeit eine Konzentration auf die Ebenen der

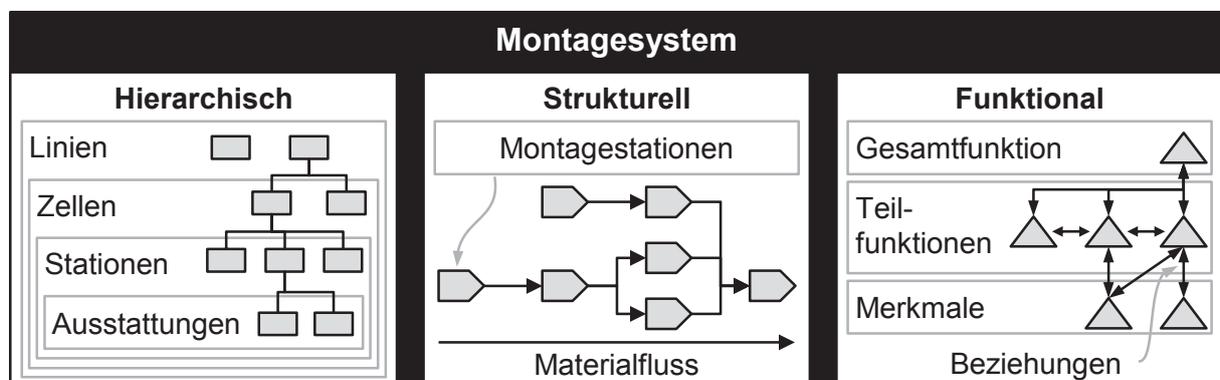


Abb. 3.5: Modelltheoretische Charakteristika des Montagesystems

Montagelinie, der Montagezellen und der Montagestationen statt. Eine Montagestation bildet hierbei eine Einheit durch die mindestens ein Montageschritt ausgeführt wird. Zur Ausführung dieser Montageschritte sind die Montagestationen mit Maschinen bzw. Automaten, Werkzeugen, Vorrichtungen und Fähigkeiten ausgestattet. Unter Fähigkeiten werden menschliche Arbeitskräfte verstanden. Der Mensch bildet meist einen fundamentalen Bestandteil der Montage. Besonders im Bereich der Montage variantenreicher Erzeugnisse hat dieser nicht nur die Aufgabe der Steuerung und Überwachung, sondern wird häufig als ausführende Einheit zur Erzeugung hoher Flexibilität eingesetzt. Allerdings wird dieser lediglich unter Aspekten der technischen Fähigkeiten betrachtet, die beispielsweise zur Erzeugung einer Verbindung oder zum Bedienen einer Maschine benötigt werden. Dies spiegelt die Einordnung der Montage als ein sozio-technisches System wieder, wie es in Abb. 3.6 dargestellt ist. Somit stellt eine Montagestation eine Zusammenfassung einzelner Ausstattungen zur Ausführung spezifischer Arbeitsschritte dar. Vielfach ist es sinnvoll mehrere Montagestationen zu einer Zelle zusammenzufassen, um beispielsweise entkoppelte Systembereiche wie Vormontage- oder Prü fzellen zu kennzeichnen oder organisationale Zuständigkeiten abzugrenzen. Diese Montagezellen werden wiederum zu einer Montagelinie zusammengeschlossen. Vergleichbar mit dem Produktsystem steht auch beim Montagesystem in *struktureller* Hinsicht der Montageablauf im Mittelpunkt des Interesses. Dieser wird als montagesystem-spezifische Ablaufstruktur bezeichnet.

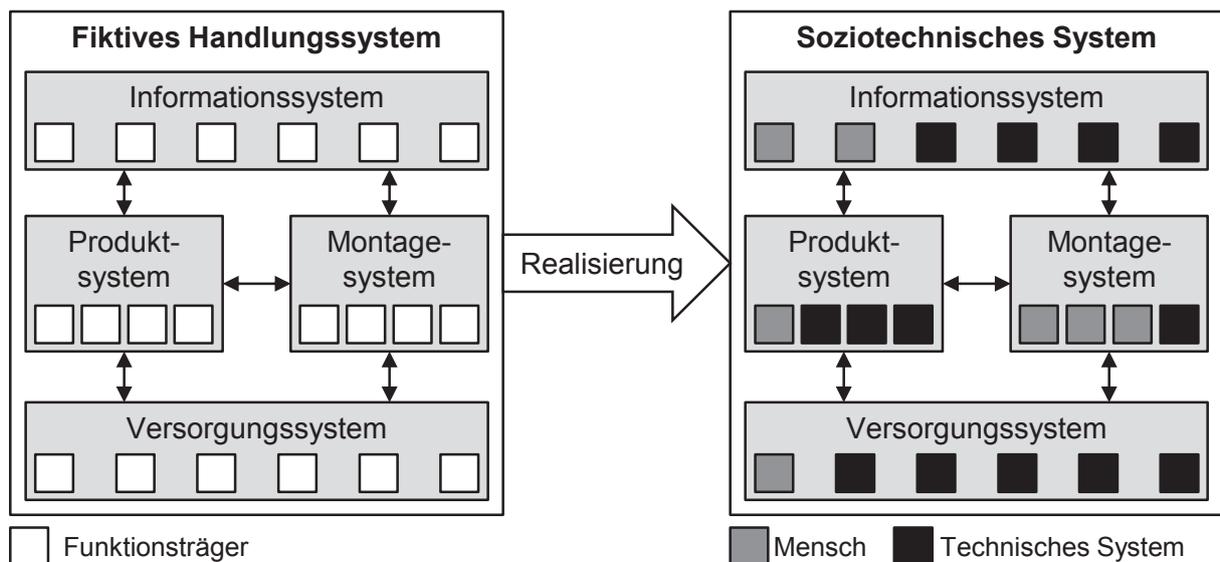


Abb. 3.6: Die Montage als sozio-technisches System in Anlehnung an (Ropohl 2009)

Da die Arbeitsschritte an den jeweiligen Montagestationen ausgeführt werden, wird der mögliche Montageablauf durch den Funktionsumfang der einzelnen Montagestationen und deren Verknüpfungen festgelegt. Die montagesystemspezifische Ablaufstruktur bzw. die möglichen Montageabläufe können durch die Adaption von Montagestationen beispielsweise durch eine zusätzliche Ausstattung oder durch die Adaption der materialflusstechnischen Verknüpfung der Montagestationen verändert werden.

In *funktionaler* Hinsicht lässt sich der Zweck des Montagesystems mit dem Zusammensetzen vorgefertigter Einzelteile und Baugruppen zu einem fertigen Enderzeugnis (Voigt 2013) unter Berücksichtigung entsprechender Unternehmensziele überschreiben. Zur Beschreibung der Teilfunktionen eines Montagesystems eignet sich eine Einordnung in die standardisierten Kategorien von Fertigungsverfahren (DIN 8580; DIN 8593-0) und Handhabungsprozessen (VDI 2860) mit einer spezifischen Erweiterung durch Sonderoperationen (Lotter 2012). Abb. 3.7 bietet eine Übersicht über relevante Montagefunktionen zur funktionalen Beschreibung eines Montagesystems und dessen Elemente.

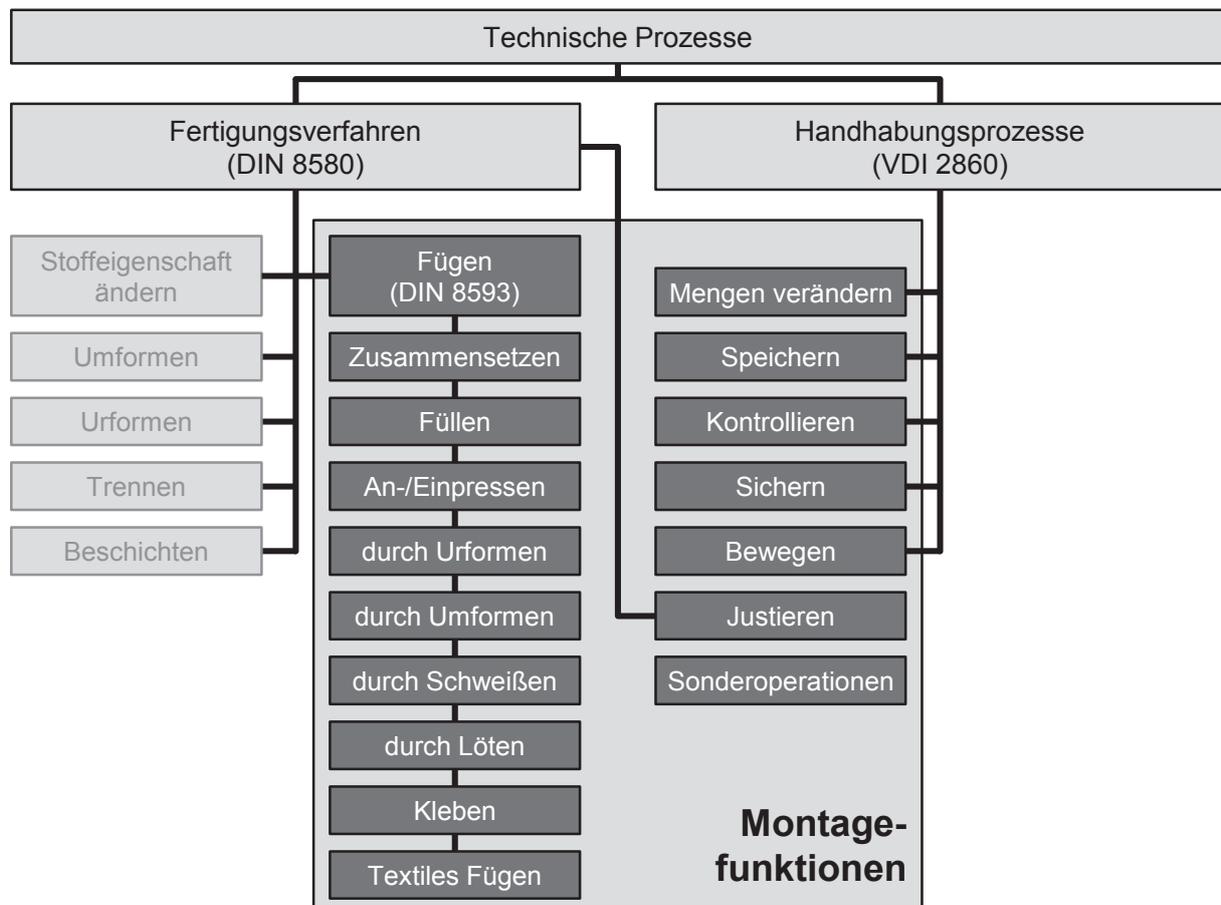


Abb. 3.7: Funktionale Bestandteile des Montagesystems

Analog zur funktionalen Beschreibung des Produktsystems wird auch hier eine strikte Entkopplung der Funktions- von der Montagestruktur eingehalten, wodurch eine konsequente Modularisierung und eine zielführende Integration des Produkt- und des Montagesystems ermöglicht werden kann. Abschließend werden die Komponenten des Montagesystems in Abb. 3.8 veranschaulicht.

Darin ist eine Montagelinie (1) erkennbar, die mehrere manuelle (2.1) und automatisierte (2.2) Montagestationen umfasst. Die Montagestationen sind wiederum mit Werkzeugen (3.1), Vorrichtungen (3.2), Fähigkeiten (3.3) und Maschinen bzw. Automaten (3.4) ausgestattet. Weitere Bestandteile eines Montagesystems sind Informations- und Kommunikationssysteme (4) zur Bereitstellung von Steuerungs-, Montage- oder Auftragsinformationen und Materialsysteme (5) zur Bereitstellung von Produktkomponenten sowie Hilfs- und Betriebsstoffen. Die Gesamtfunktion des Montagesystems kann als Umwandlung von Produktkomponenten durch Fügeoperationen in höherwertige Erzeugnisse beschrieben werden. Dabei werden nicht nur Baugruppen gebildet, sondern auch Informationen generiert, was als Nebenfunktion aufgefasst werden kann (Westkämper 2006c). Damit ist das modelltheoretische Fundament für die konsequente Modularisierung und zielgerichtete Integration des Produkt- und des Montagesystems gelegt. Zur Ableitung des Änderungsbedarfs aufgrund innerer oder von außen einwirkender Turbulenzen, werden im Folgenden dafür verantwortliche Treiber diskutiert und die Werkzeuge vorgestellt, die als Grundlage einer strukturierten Identifikation und Synchronisation abgestimmter Adaptionen herangezogen werden.

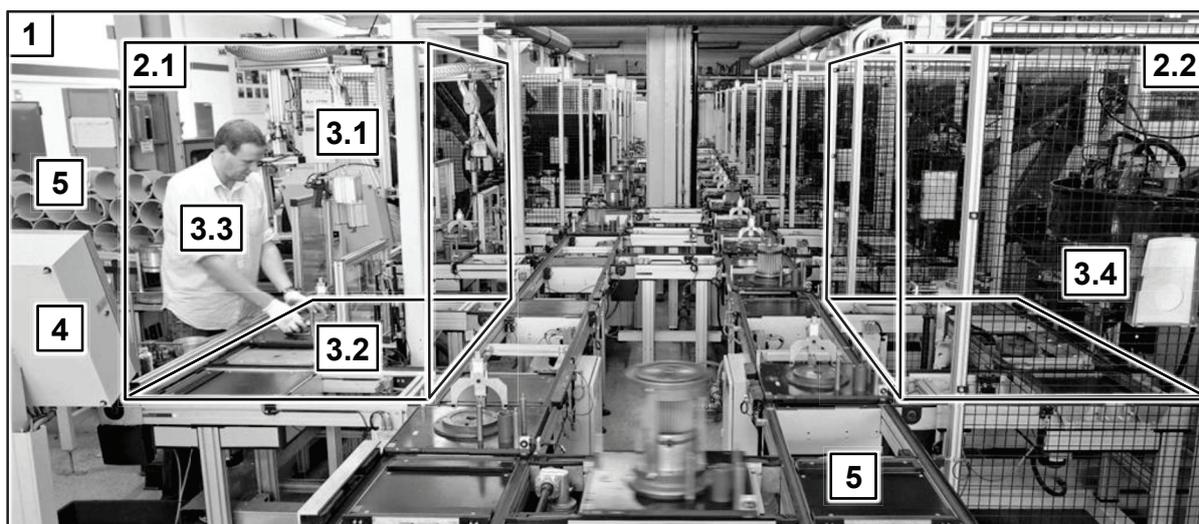


Abb. 3.8: Komponenten eines Montagesystems (Foto: (Bosch Rexroth 2008))

3.3 Dynamik technischer Systeme in der Montage

Nachdem das grundlegende Verständnis zur Integration des Produkt- und des Montagesystems umrissen ist, werden in diesem Kapitel die Veränderungen und die entsprechenden Treiber, so genannte Veränderungstreiber, für intern oder extern induzierte Turbulenzen diskutiert. Abb. 3.9 veranschaulicht die Kategorisierung externer Veränderungstreiber, zeigt die internen Treiber eines integrierten Produkt- und Montagesystems und rückt diese in den Zusammenhang mit spezifischen Herausforderungen in der variantenreichen Serienmontage.

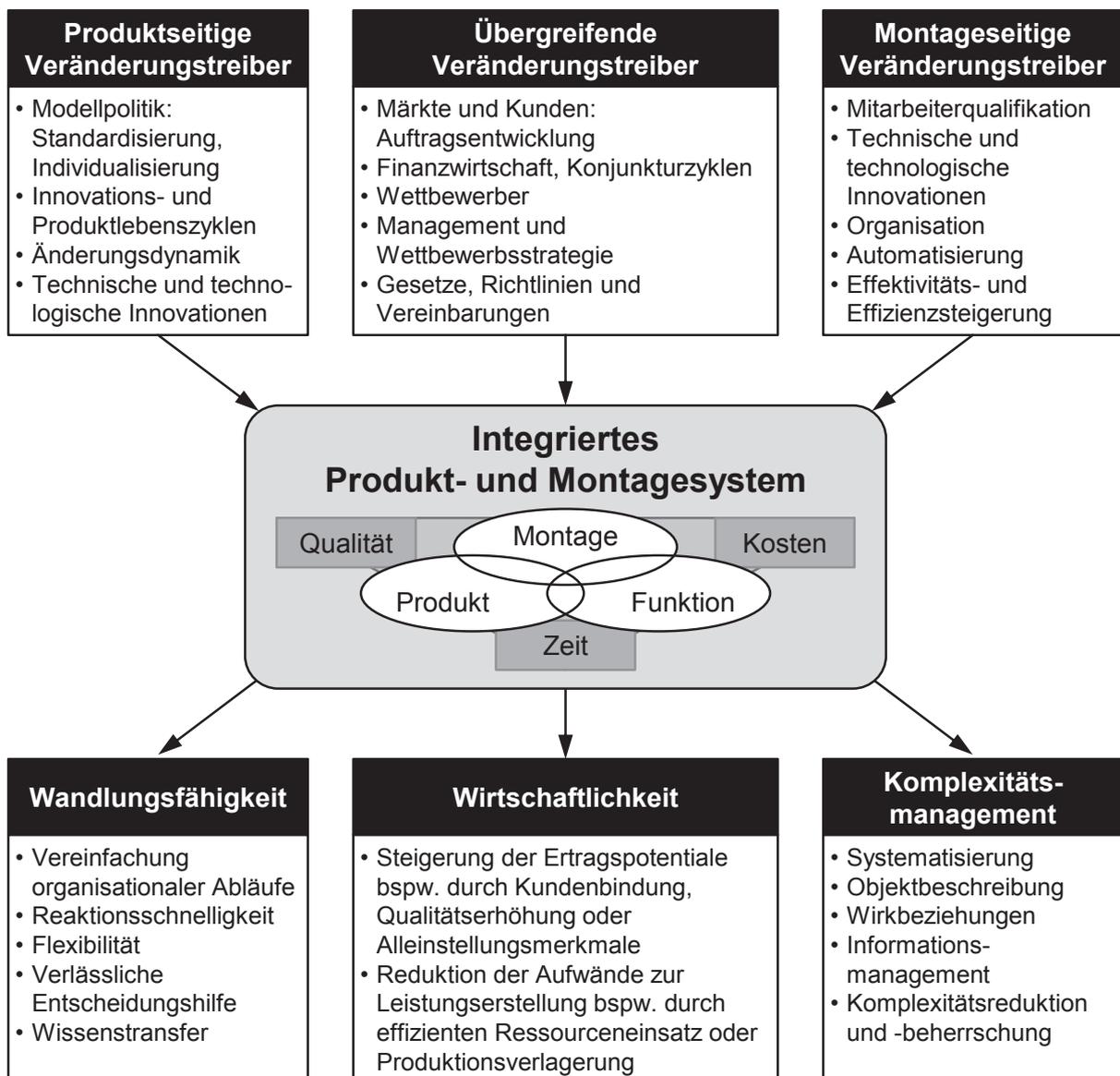


Abb. 3.9: Das integrierte Produkt- und Montagesystem in turbulentem Umfeld

Externe Veränderungstreiber lassen sich in produktseitige, montageseitige und übergreifende Veränderungstreiber gliedern. *Produktseitig* werden dabei die verfolgte Modellpolitik hinsichtlich des in Kapitel 2.3.2 bereits diskutierten Dilemmas zwischen Mengen- (Standardisierung) und Spezialisierungsvorteilen (Differenzierung), sich verkürzende Produkt- und Innovationszyklen, zunehmende Änderungsdynamik aufgrund produktseitiger Fehlerbehebungen oder Optimierungen sowie technische und technologische Innovationen eingeordnet.

Als *montageseitige* Veränderungstreiber werden ebenfalls die technischen und technologischen Innovationen, die Mitarbeiterqualifikation, die Aufbau- und Ablauforganisation, die Automatisierung bzw. die Veränderungen im Anteil automatisierter Lösungen sowie Maßnahmen zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung aufgefasst. *Übergreifende* Veränderungen erwachsen aus den Märkten und Kunden, der Finanzwirtschaft und deren Konjunkturzyklen, den Wettbewerbern, dem Management und der verfolgten Wettbewerbsstrategie sowie aus neuen, veränderten oder aufgehobenen Gesetzen, Richtlinien und Vereinbarungen. Diese Veränderungstreiber wirken von außen auf das System und induzieren Turbulenzen.

Die Turbulenzen können allerdings auch intern entstehen. Sie erwachsen aus den zum Teil konkurrierenden strategischen Wettbewerbsfaktoren *Zeit* im Sinne der Lieferzeit, *Qualität* im Sinne der Ausschussrate und Termintreue sowie den *Kosten* im Sinne einer wirtschaftlichen Herstellung nachgefragter Erzeugnisse (Aggteleky 1990). Diese Faktoren werden stellenweise durch den Aspekt der Flexibilität erweitert (Bogaschewsky und Rollberg 1998), doch wird diese in der vorliegenden Arbeit den anderen drei Wettbewerbsfaktoren untergeordnet und im Zuge der zusätzlichen Berücksichtigung strategischer Ziele als Bestandteil der anzustrebenden Wandlungsfähigkeit angesehen. Durch die Fokussierung der Arbeit auf technisch-organisatorische Aspekte des integrierten Produkt- und Montagesystems rücken das *Produkt*, die *Montageressourcen* sowie die *Produkt- und Montagefunktionen* in das Zentrum des Betrachtungsrahmens. Die Erreichung der jeweiligen Unternehmensziele soll hierbei durch abgestimmte Organisation und Koordination dieser Bereiche unterstützt werden.

Die Herausforderungen mit direktem Bezug zum Betrachtungsgegenstand eines integrierten Produkt- und Montagesystems in der variantenreichen Serienmontage werden in die Kategorien Wandlungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Komplexitätsmanagement eingeordnet. *Wandlungsfähigkeit* fasst dabei die Ansätze zusammen, die dazu beitragen, das System dazu zu befähigen, von innen heraus auf geplante und ungeplante Veränderungen außerhalb eines

vordefinierten Handlungsspielraums unter geringem Aufwand zu reagieren (Nofen et al. 2005a). Diese Reaktionsfähigkeit stellt damit eine veränderungsorientierte Erweiterung der Flexibilität dar, weshalb diese beiden Aspekte als komplementäre Bestandteile der Wandlungsfähigkeit verstanden werden (Reinhart et al. 1999). Zusätzlich werden hier die Vereinfachung organisatorischer Abläufe, eine verlässliche Entscheidungsunterstützung und ein effektiver Wissens- und Informationstransfer berücksichtigt.

Eng mit der Wandlungsfähigkeit ist die Kategorie des *Komplexitätsmanagements* verbunden. Erst durch das systematische Begreifen und Verstehen der zahlreichen Elemente und vielfältigen Beziehungen innerhalb der Produktion können die technischen Systeme zielgerichtet den veränderlichen Randbedingungen und Zielzuständen folgen. Dabei lässt sich die Komplexitätsreduktion durch eine Anpassung der Produkt- oder Montagestrukturen von einer Komplexitätsbeherrschung unterscheiden. Ein Mittel zur Beherrschung der Komplexität ist die Steigerung des Verständnisses der Zusammenhänge durch eine modellhafte Abbildung des Systems. Dabei gilt, dass die Varietät des Modells als Steuerungssystem unter Beachtung des Ashbyschen Gesetzes mindestens ebenso groß sein muss, wie die Varietät der auftretenden, relevanten Störungen (Ashby 1957). Eine verbesserte Beherrschung der Komplexität führt dabei nicht nur zu verringerten Ausschussraten, sondern zeigt auch unentdeckte Verbesserungspotentiale auf und ermöglicht eine effektive und effiziente Durchführung der entsprechenden Optimierungsmaßnahmen (Schuh et al. 2011b).

Damit trägt das Komplexitätsmanagement unter anderem der Steigerung der *Wirtschaftlichkeit* bei. Des Weiteren werden bei der Verfolgung wirtschaftlichkeitsrelevanter Herausforderungen einerseits Maßnahmen zur Steigerung der Ertragspotentiale und andererseits zur Reduktion der Aufwände zusammengefasst. Ertragspotentiale in Form des Preises, den der Abnehmer bereit ist für eine bestimmte Leistung zu zahlen, können durch die Schaffung von Alleinstellungsmerkmalen, der Erhöhung der Erzeugnisqualität oder durch stärkere Kundenbindung erhöht werden. Aufwände in Form des Werteverzehrs zur Erstellung der Leistung können unter anderem durch effizienten Ressourceneinsatz oder durch Verlagerung der Produktion in Regionen geeigneterer Kostenstrukturen oder an externe Zulieferer verringert werden. Hinsichtlich der Strukturen können diese Treiber einen Bedarf an Veränderungen auf unterschiedlichen Ebenen der technischen Systeme hervorrufen (Abb. 3.10).

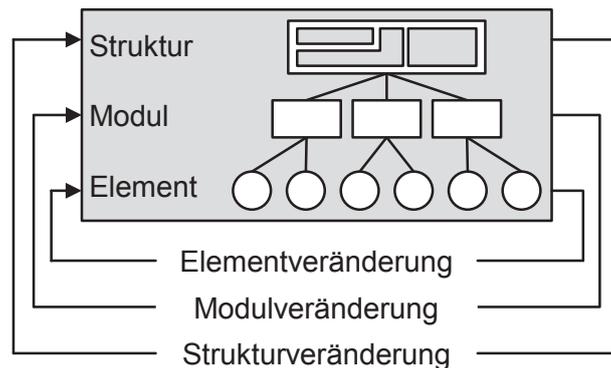


Abb. 3.10: Veränderungstypen (Nofen et al. 2005b)

Wie bereits in Kapitel 3.2.1 für das Produktsystem eingeführt, lassen sich die *Veränderungstypen* auch auf das Montagesystem übertragen und somit für den Betrachtungsgegenstand verallgemeinern. Damit werden für die betrachteten technischen Systeme elementare, modulare und strukturelle Adaptionen unterschieden. Elementare Veränderungen umfassen Adaption, Substitution, Addition oder Elimination von Elementen innerhalb einzelner Module, ohne die Funktion und die Schnittstellen des Moduls zu beeinflussen. Modulare Veränderungen repräsentieren Substitution, Adaption, Addition oder Elimination einzelner Module. Für den Fall, dass eine dieser Veränderungen eine tiefgreifende Adaption des integrierten Systems mit einer Neuordnung oder Anpassung der Modulverknüpfung verursacht, wird sie als strukturelle Veränderung bezeichnet. Die Veränderungen werden hierbei durch sogenannte Veränderungsbefähiger ermöglicht oder zumindest erleichtert (Abb. 3.11). Diese Befähiger müssen nicht nur hinsichtlich der technischen Einrichtungen und Komponenten berücksichtigt werden, sondern als integraler Bestandteil des Systems auch hinsichtlich der Organisation verstanden werden (Koren und Ulsoy 2002). Neben dem Veränderungstyp, der eine Aussage über die Ebene der Veränderung ermöglicht, ist auch die Art der Veränderung zu unterscheiden. Darunter ist die Differenzierung zwischen kontinuierlicher und diskreter Systemveränderung zu verstehen.

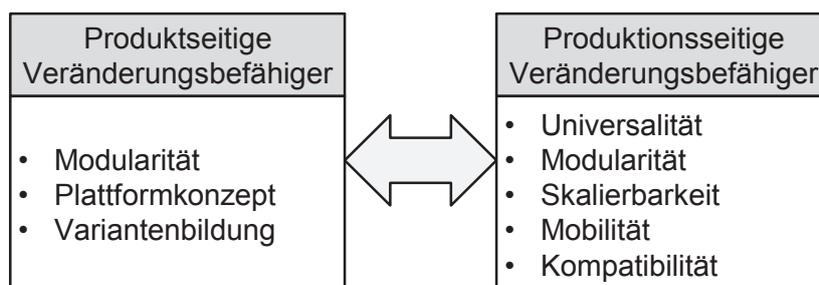


Abb. 3.11: Veränderungsbefähiger in Anlehnung an (Wiendahl et al. 2009)

3.3.1 Kontinuierliche Systemveränderung

Das Produkt und dessen Montage sind kontinuierlichen Veränderungen unterworfen. Diese treten nicht nur durch aktives Eingreifen bspw. im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) (Rother 2009) auf, sondern besonders durch das Einfahren und die Abnutzung technischer Einrichtungen sowie durch Lerneffekte. Zur Identifikation und Messung kontinuierlicher Systemveränderungen bietet sich die Auseinandersetzung mit der Leistung einer Fabrik an (Aldinger 2009; Wildemann 2009). Als Bezugsgröße der Fabrikleistungsmessung wird im Rahmen dieser Arbeit der monetäre Aufwand zur Montage einer Einheit herangezogen. Die Betrachtung der Entwicklung dieser Kosten ermöglicht die messbare Erfassung der kontinuierlichen Veränderung des Systems. *Lernkurven* ermöglichen die zuverlässige Prognose zur Quantifizierung der entsprechenden stückkostenbezogenen Degressionseffekte. Abb. 3.12 illustriert eine derartige Leistungsveränderung in der Fabrik unter Verwendung des als Linearhypothese formulierten Lerngesetzes nach (Wright 1936).

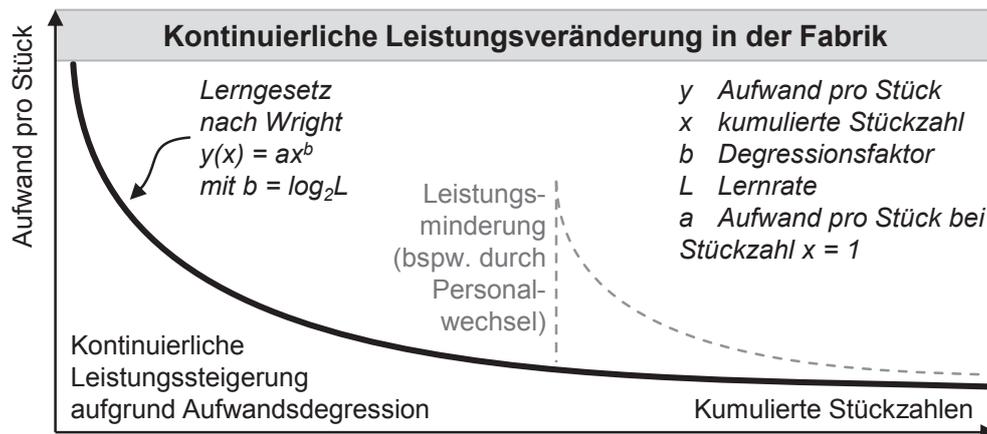


Abb. 3.12: Lernkurve zur Beschreibung kontinuierlicher Fabrikleistungsveränderung

Die Anwendungsfähigkeit einer solchen Linearhypothese zur Prognose der kontinuierlichen Leistungsveränderung von Fabriken hinsichtlich der Degression des stückbezogenen Aufwands gilt als empirisch belegt (Henderson 1984). Bei einem Personalwechsel kann durch Methoden des Wissens- und Informationsmanagements Vieles des durch vorangegangene Arbeitskräfte Erlernen und erfahrenen Wissens weitergegeben werden. Allerdings bedeutet ein Personalwechsel unter der Prämisse einer vergleichbaren Qualifikation immer eine Leistungsminderung (Flörchinger et al. 2013). Besonders durch die Erhöhung der Qualifikation der Mitarbeiter lässt sich der anfängliche stückbezogene Aufwand reduzieren, wodurch Effizienzeinbußen durch Systemveränderungen verringert werden können (Abb. 3.13).



Abb. 3.13: Qualifikationsabhängigkeit kontinuierlicher Fabrikleistungsänderung in Anlehnung an (Westkämper 2013c)

Damit lässt sich die Montage komplexer und variantenreicher Erzeugnisse mit häufiger Veränderung der Montageaufgaben durch den Einsatz allgemein qualifizierter Mitarbeiter verbessern. Dieser Aspekt wird für die vorgestellte Methode einer integrierten Produkt- und Montagekonfiguration empfohlen, damit der Aufwand für die dadurch zu erwartende Zunahme von Systemadaptionen verringert wird, was zu einer Steigerung der Reaktionsfähigkeit führt. Bei der Diskussion kontinuierlicher Systemveränderungen im Rahmen dieses Grundlagenteils ist zu beachten, dass die Veränderungen auch ohne äußeres Einwirken stattfinden. Dies deutet bereits daraufhin, dass der Zustand des integrierten Produkt- und Montagesystems sowie aller Elemente aktiv und permanent überwacht werden muss, um die Aktualität und damit die Korrektheit der bereitzustellenden Informationen sicherzustellen.

3.3.2 Diskrete Systemveränderung

Neben kontinuierlichen Systemveränderungen finden im betrachteten System auch diskrete also in abgrenzbaren Schritten erfolgende Veränderungen statt. Der Technologiekalender bietet eine wissenschaftlich fundierte und industriell erprobte Möglichkeit, solche Veränderungen zu identifizieren, zu strukturieren und in einer zeitlichen Abfolge zu synchronisieren (Westkämper 2006b). Die Methode weist große Parallelen zum Technologie Roadmapping auf (Phaal et al. 2004) und ist eine flexible Möglichkeit zur übersichtlichen Darstellung von Beziehungen zwischen Markt-, Produkt- und Technologieveränderungen (Burgstahler 1996). Abb. 3.14 veranschaulicht einen exemplarischen Aufbau eines Technologiekalenders.

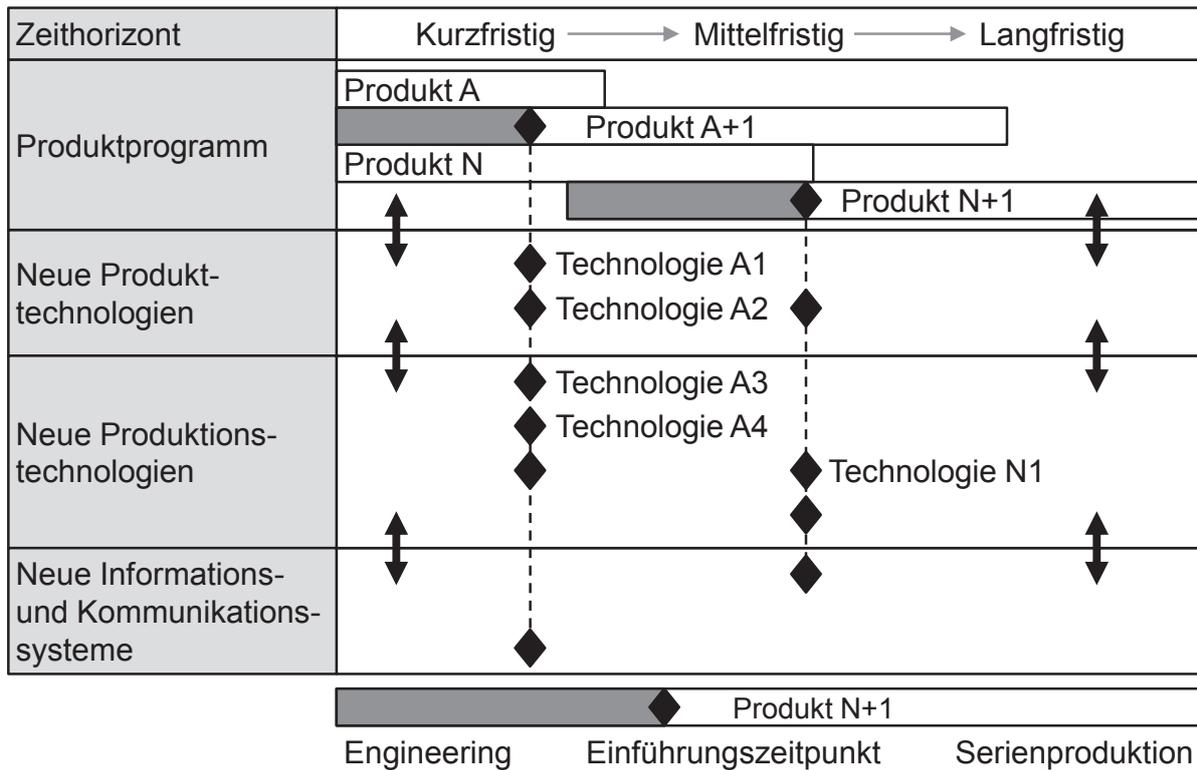


Abb. 3.14: Grundaufbau des Technologiekalenders (Löffler 2011)

Jedoch sind es meist die ungeplanten und zunehmend kurzfristigen Turbulenzen, die das betrachtete Produkt- und Montagesystem vor große Herausforderungen stellen. Diese im Zuge der vorgestellten Arbeit fokussierten Turbulenzen mit Einfluss auf den operativen Betrachtungshorizont können ebenfalls mit Hilfe des Technologiekalenders identifiziert, strukturiert und synchronisiert werden. Dafür dient der Technologiekalender als Grundlage und wird umfassend überarbeitet, um auch im Bereich kurzfristiger Änderungen als unterstützendes Werkzeug zu dienen (Kapitel 5.3).

3.4 Regelkreis zur Modellierung dynamischen Systemverhaltens

Aus der Diskussion der Dynamik technischer Systeme ist der Bedarf nach einer Möglichkeit zum permanenten Abgleich der realen Gegebenheiten mit der konzeptualisierten Abbildung in Form eines Modells abzuleiten. Zu diesem Zweck werden Grundlagen der Regelungstechnik (Unbehauen 2008) benutzt, einen geschlossenen Regelkreis zu entwickeln und somit eine modellbasierte Konfigurationsunterstützung anhand aktueller und korrekter Informationen zu ermöglichen (Abb. 3.15).

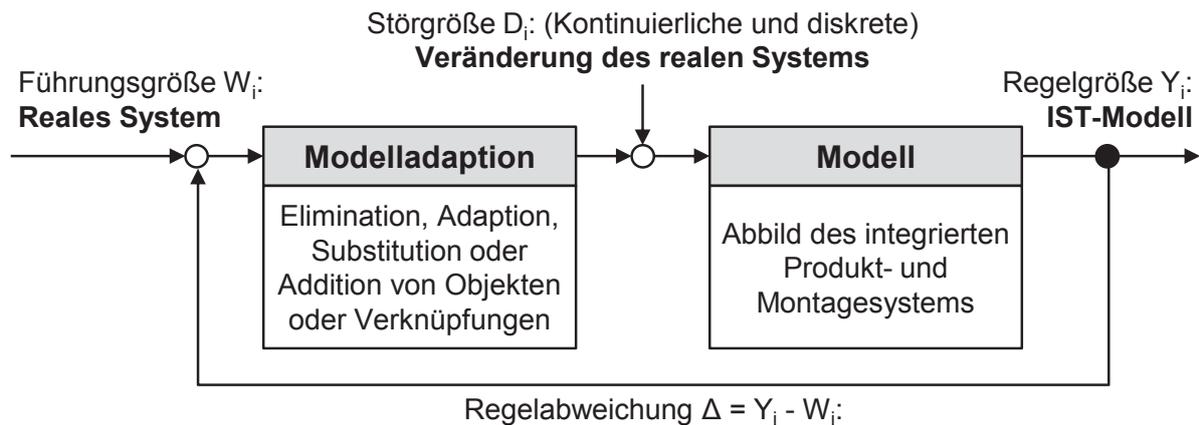


Abb. 3.15: Regelkreisbasierter Abgleich zwischen realem System und Modell

Die Führungsgröße W_i ist dabei das reale System, das durch soeben diskutierte Veränderungstreiber als Störgrößen D_i verändert werden kann. Dieses System wird in ein Modell übersetzt, was die Regelgröße Y_i repräsentiert. Die Regelabweichung Δ ergibt sich somit aus der Differenz zwischen dem realen System und dem IST-Modell. Diese Differenz gilt es zu minimieren und dient somit als Orientierung zur Modelladaption. Allerdings ist die praktische Realisierung eines permanenten Abgleichs der realen Gegebenheiten mit dem digitalen Abbild nur durch vollständige Automatisierung der Informationsgenerierung und Informationsbereitstellung zu bewerkstelligen. Da Erfahrungen im Rahmen des Computer Integrated Manufacturing (CIM) (Scheer 1990) gezeigt haben, dass diese vollständige Automatisierung der Produktion wirtschaftlich nicht umsetzbar ist (Jacobi 2013), gilt es, angemessene Grenzen identifizierter Differenzen zwischen realem und digitalem System zu setzen, die ein Eingreifen in Form einer Modelladaption erfordern.

3.5 Ontologien als Abbildungsmöglichkeit komplexer Systeme

Um die Produkt- und Montagesysteme abzubilden und somit einer modellgestützten Konfiguration zugänglich zu machen, sind mächtige Modellierungswerkzeuge notwendig. Die Literatur und die Industrie stellen eine Vielzahl an Ansätzen zur Verfügung (Grabowski et al. 1993; Boyer und Freyssenet 2003; Bandow und Holzmüller 2010). Aufgrund der enormen Anforderungen nicht nur hinsichtlich Komplexität und Dynamik, sondern auch hinsichtlich Flexibilität und Integrierbarkeit der heterogenen Systeme aus den unterschiedlichen Domänen des Produkts und deren Montage, erwachsen berechtigte Zweifel an der Anwendbarkeit

etablierter Modellierungsnotationen wie die Unified Modeling Language (UML) oder Business Process Model and Notation (BPMN). Auch wenn eine Orientierung an bestehenden Produkt- und Produktionsmodellen (Kapitel 2.3 und 3.2) stattfindet, werden hinsichtlich der Umsetzung aktuelle Möglichkeiten analysiert und auf deren Adaptionfähigkeit hin untersucht.

Mit dem Begriff des Semantic Web wird eine Vielzahl an Technologien zur Formalisierung heterogener Informationen zusammengefasst. Dabei gehören Ontologien³ zu den grundlegenden Technologien zur Repräsentation komplexer Wirkzusammenhänge (Hitzler et al. 2008). Eine Ontologie stellt ein System von Informationen mit logischen Beziehungen dar (Duden 2011) und wird als explizite Spezifikation einer Konzeptualisierung definiert (Gruber 1993). Sie lässt sich somit zur Formalisierung, Speicherung und Aufbereitung konfigurationsrelevanter Informationen verwenden. Als Modellierungssprache wird die zweite erweiterte und überarbeitete Version der Web Ontology Language (OWL) verwendet (W3C 2012), wobei zu dessen Modellierung und Bearbeitung der Ontologieeditor *Protégé 4.3* zum Einsatz kommt (Gennari et al. 2003). Ein OWL Dokument besteht im Allgemeinen aus Klassen, Individuen und Properties (Abb. 3.16). Die Individuen stellen Instanzen der Klassen dar, die durch Properties miteinander verknüpft werden. Diese Properties sind Assoziationen und werden auch als Rollen bezeichnet. Sie stellen die Beziehungen zwischen Elementen der Ontologie her. Der Vorteil ontologiebasierter Modellierung liegt in der Speicherung und Darstellung komplexer Systeme mit einer Vielzahl logischer Beziehungen (Landherr und Constantinescu 2011).

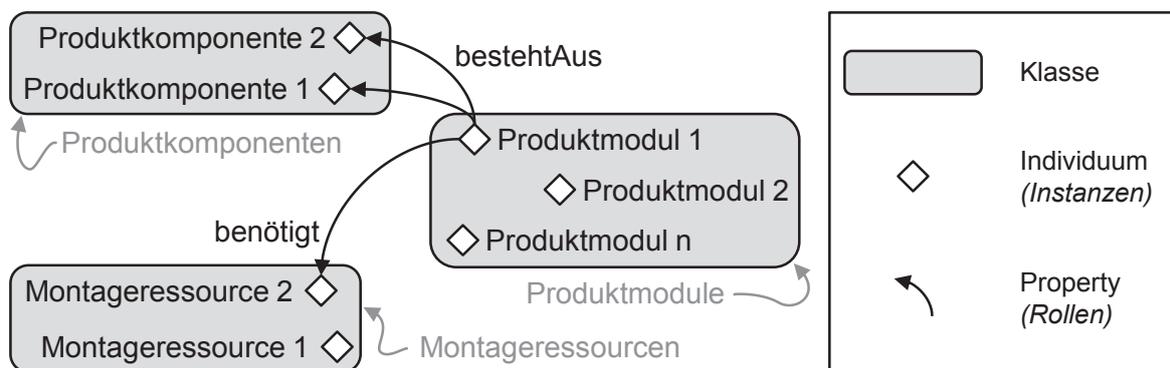


Abb. 3.16: Grundbausteine eines OWL-Dokuments

³ Der Begriff der *Ontologie* wird in vorliegender Arbeit ausschließlich in informationstechnischem Zusammenhang und nicht in philosophischem Sinn verwendet.

3.6 Bewertung technischer Systeme

Bei einem derart komplexen System, wie es bei einer Integration des Produkts und der Montage entsteht, gibt es nahezu unendlich viele Konfigurationslösungen, die ein funktionsfähiges System darstellen können. Die detaillierte Diskussion, was ein funktionsfähiges System auszeichnet, findet in Kapitel 5.5 statt. Um aus dieser unüberschaubaren Menge an Möglichkeiten zuerst geeignete Optionen und schlussendlich die Systemkonfiguration mit dem maximalen Nutzen auszuwählen, wird im Rahmen dieser Arbeit auch die Bewertung konfigurierter Lösungen betrachtet. Dabei drängt sich die Frage in den Vordergrund, was der Nutzen ist und wie er gemessen werden kann. Aus theoretischer Sicht gilt die Lösung als ideal, die den maximalen Nutzen in Form des geringsten Werteverzehrs (Zangemeister 1976) bzw. die maximale Differenz zwischen dem Werteverzehr und dem Grad der Zielerreichung aufweist.

Im Bereich einer integrierten Produkt- und Montagebetrachtung lassen sich die Ziele dem Produktionsziel unterordnen, das eine wirtschaftliche Herstellung nachfragegerechter Produkte in einer angestrebten Qualität mit hoher Liefertreue bei gleichzeitig geringer Lieferzeit umfasst. Mit zunehmender Häufigkeit wird dieses Zielsystem um eine soziale und eine ökologische Komponente erweitert beispielsweise zur Realisierung produzierender Standorte innerhalb urbaner Umgebungen wie den zunehmenden Ballungszentren (Matt et al. 2013). Eine weiterführende Diskussion der Zusammenhänge zwischen der strategischen Ausrichtung als Orientierung zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit und der individuellen Zielsetzung industrieller Produktionen bieten unter anderem (Westkämper 2007; Aldinger 2009; Upitz 2013).

Für die vergleichende Bewertung konfigurierter Systemalternativen ist zu beachten, dass das Produktionsziel als veränderlicher Kompromiss der konkurrierenden Ziele aufzufassen ist und im Einzelfall verstanden und situationsbezogen definiert werden muss. Diese Erkenntnis dient als Grundlage für die Struktur des entwickelten Bewertungsschemas. Somit zeigt sich, dass bei einer Bewertung konfigurierter Systemalternativen konkurrierende Zieldimensionen auftreten und deren Ausprägungen sowie Gewichtung als veränderlich angesehen werden müssen. Daher muss deren Erfüllung durch die Systemkonfigurationen unabhängig voneinander bewertet und gemäß den aktuellen Produktionszielen gewichtet werden. Durch dieses

Vorgehen wird ein verlässlicher Vergleich konfigurierter Systemalternativen anhand einer situationsbezogenen Bewertung ermöglicht.

Die Anwendung von Methoden zur umfassenden Bewertung technischer Systeme ist meist mit einem hohen Aufwand verbunden. Dieser Aufwand muss bei der Durchführung der vergleichenden Bewertung konfigurierter Systemlösungen im Rahmen des vorgestellten Konzepts drastisch gesenkt werden. Durch das Ziel der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration, wandlungsfähige Strukturen durch hohe Reaktionsfähigkeit und häufige Systemadaptionen hinsichtlich eines sich ständig verändernden Zielzustands zu erreichen, ist es essentiell, den Aufwand bei der Durchführung so gering wie möglich zu halten. Daher muss ein Kompromiss zwischen einem hohen Detailgrad bei der Bewertung konfigurierter Systemalternativen und einem geringen Aufwand im Rahmen der Durchführung der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration gefunden werden.

In Kapitel 5.5 werden grundlegende Systembewertungskriterien definiert, die einen umfassenden Vergleich unterschiedlicher Systemlösungen erlauben. Dort wird der eben angesprochene Kompromiss für jedes einzelne Kriterium diskutiert und festgelegt. Da die zugrunde gelegten Methoden und Kennzahlen zur Systembewertung kriterienspezifisch erfasst und benutzt werden, werden diese ebenfalls erst in Kapitel 5.5 eingeführt.

3.7 Anforderungen an eine integrierte Produkt- und Montagekonfiguration

Aus der vorangestellten Diskussion des relevanten Stands der Wissenschaft und Technik sowie der Darstellung der zum Einsatz kommenden Grundlagen lassen sich unter Berücksichtigung der eingangs formulierten Ausgangssituation und Zielstellung spezifische Anforderungen an die Unterstützung einer integrierten Produkt- und Montagekonfiguration ableiten.

Einerseits resultieren die Anforderungen *aus dem unternehmerischen Umfeld*. Der Nutzen des vorgestellten Konzepts muss den Aufwand für die Schaffung der strukturellen, organisatorischen und informationstechnischen Voraussetzungen zur Anwendung von Konfigurationskonzepten übersteigen. Dies ist ein bedeutender Baustein anwendungsorientierter Forschung, die die industrielle Anwendbarkeit als Bestandteil der Umsetzung betrachtet. Aus diesem Grund ist die Minimierung des Aufwands in allen Bereichen der Durchführung der integrier-

ten Produkt- und Montagekonfiguration zu berücksichtigen. Des Weiteren ist eine Vielzahl unterschiedlicher Fachbereiche im Bereich des Produkts und der Montage involviert. Daher erfordert der betriebliche Einsatz einen hohen Grad an Flexibilität bei der Anwendung der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration. Besonders die Informationsbereitstellung muss auf einen weiten Anwenderkreis ausgelegt sein und situationsbezogen erfolgen. Andererseits werden *aus technischer Sicht* die in Tabelle 4 aufgeführten Anforderungen an das betrachtete System sowie an dessen modellhafte Konzeptualisierung gestellt.

Technische Anforderung	Erläuterung	Begründung
Akkuranz und Relevanz	Ausreichend genaue Konzeptualisierung der Realität	Voraussetzung der Bereitstellung verlässlicher Informationen
Richtigkeit und Angemessenheit	Syntaktisch, logisch und semantisch korrekte Konzeptualisierung der Realität	Voraussetzung der korrekten und automatisierten Informationsgenerierung und -bereitstellung
Anpassbarkeit	Adaption, Substitution, Elimination oder Addition von Objekten und Beziehungen	Voraussetzung der Anpassung oder des Austauschs von Modulen
Dynamisierbarkeit	Aktualität der Informationen durch permanenten Abgleich des realen Systems und dessen digitalen Modells	Berücksichtigung kontinuierlicher und diskreter Veränderungen des Systems
Integrierbarkeit	Schnittstellendefinition der Module zur Integration von Produkt- und Montagesystem	Identifikation des situationspezifischen Beitrags einzelner Module zur Gesamtfunktion
Modularisierbarkeit	Zerlegung und Neukombination funktionaler Einheiten	Voraussetzung der Anwendung von Konfigurationskonzepten
Skalierbarkeit	Ausweitung oder Konzentration des Betrachtungsbereichs sowie Abstrahierung oder Detaillierung der modellhaften Abbildung	Flexibilisierung der Anwendungsmöglichkeiten der modellhaften Konzeptualisierung
Übertragbarkeit	Zuordnung neuer Funktionen zu gleichen Modulen oder Erfüllung gleicher Funktionen durch neue Module	Unterstützung der Anpassung oder des Austauschs von Modulen
Verfügbarkeit	Plattformunabhängige Informationsbereitstellung	Flexibilisierung der Informationsbereitstellung: Zugang zu Informationen überall und jederzeit

Tabelle 4: Technische Anforderungen

Diese Anforderungen dienen nicht nur zur Präzisierung des verfolgten Ziels, sondern bilden auch die Grundlage zur Evaluation der Zielerreichung. Im Folgenden wird das erarbeitete Konzept einer integrierten Produkt- und Montagekonfiguration vorgestellt, bevor die Inhalte in Kapitel 5 detailliert ausgeführt werden.

4 Konzept der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration

Zur abgestimmten Adaption von Produkt- und Montagesystemen in der variantenreichen Serienfertigung hinsichtlich eines sich ständig verändernden Umfelds wird ein Konzept für die zielgerichtete und effiziente Durchführung der Adaptionsmaßnahmen unter Reduzierung der negativen Folgen der Veränderung durch eine zuverlässige Prognose des Systemverhaltens entwickelt. Dabei werden die Wechselbeziehungen innerhalb und zwischen den relevanten Systemen und deren Elementen durch die Zusammenführung des Produkts und der Montage zu einem integrierten System aufgezeigt und einer weiteren Verwendung zugänglich gemacht (Abb. 4.1).

Dies ermöglicht die Identifikation von Konsequenzen spezifischer Veränderungen auf das betrachtete System, was als Voraussetzung für die integrierte Produkt- und Montagekonfiguration dient. Dadurch kann das Systemverhalten bei der Adaption einzelner Teile prognostiziert werden. Somit kann beispielsweise die Beeinflussung der Montage und dessen Systemstruktur durch die Adaption des Produktsystems durch neue oder veränderte Produktvarianten nachvollzogen werden. Um dabei ein sicheres Fundament für einen weiten Einsatzbereich zu schaffen und verlässliche Aussagen treffen zu können, baut diese Integration auf systemtechnischen Grundlagen auf.

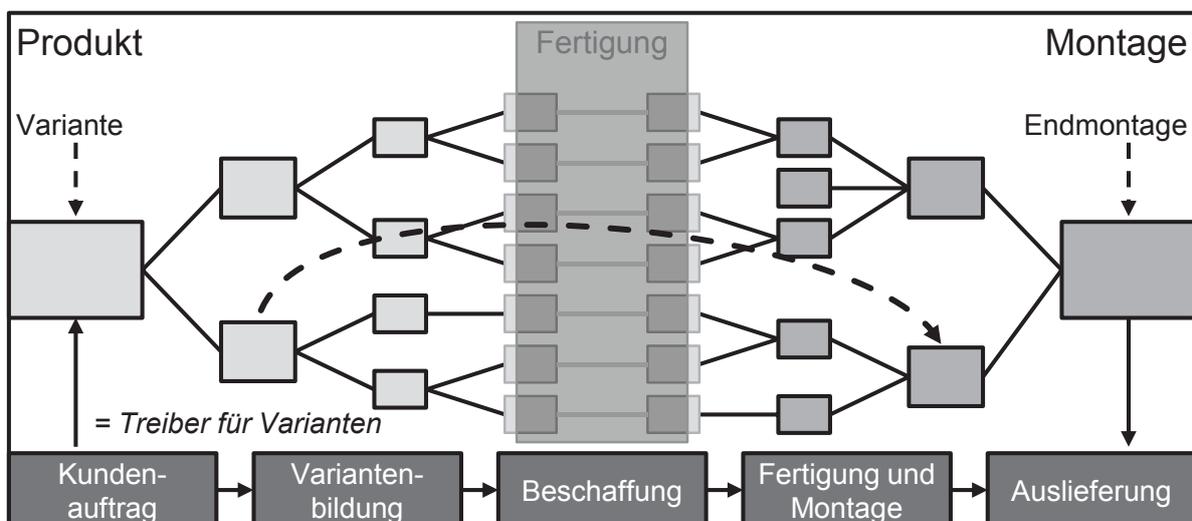


Abb. 4.1: Verständnis des integrierten Produkt- und Montagesystems

Dabei unterscheidet sich die Phase 0 der initialen Konzeptualisierung von den Phasen 1 bis 3 darin, dass sie im Regelfall nur einmal durchgeführt wird, wohingegen die übrigen Phasen als begleitende, permanente Planungswerkzeuge zu begreifen sind. Im Rahmen der initialen Konzeptualisierung werden die Elemente, Funktionen und Strukturen der betrachteten Systeme aufgenommen, modularisiert und modelliert. In dieser Phase findet bereits die modellgestützte Integration des Produkt- und des entsprechenden Montagesystems durch die funktionale Verknüpfung beiderseitiger Module statt. Das Ergebnis dieser Phase stellt das *integrierte Produkt- und Montagesystem* dar, was im weiteren Verlauf der Arbeit durch *IPS* abgekürzt wird. Dieses IPS bzw. dessen modellhafte Abbildung muss zur Bereitstellung korrekter Informationen für alle weiteren Phasen dem aktuellen Zustand der vorhandenen Systeme entsprechen. Dazu wird eine regelkreisbasierte Verknüpfung des digitalen Modells und des realen Betrachtungsgegenstands vorgenommen.

Phase 1 hat die Aufgabe einer *permanenten Überwachung des Änderungsbedarfs*. Hierbei werden mögliche Veränderungstreiber identifiziert und die Durchführung der entsprechenden Maßnahmen synchronisiert. Da das Umfeld und das IPS selbst einem ständigen Wandel unterworfen sind, muss auch die Überwachung des Änderungsbedarfs permanent erfolgen. Damit werden die Planung und Optimierung von Fabriken nicht mehr als einzelne Fabrikplanungsprojekte mit strikten Abläufen, sondern als permanente Aufgabe der Anpassung und Koordination spezifischer Maßnahmen verstanden.

Durch die Identifikation eines Änderungsbedarfs beispielsweise in Form einer Produktadaptation aufgrund einer veränderten Nachfragestruktur wird die Phase 2 initiiert. Hierbei findet die *virtuelle Konfiguration valider Produkt- und Montagesystemalternativen* statt. Diese Phase ist in drei Abschnitte unterteilt: der Auswahl möglicher Maßnahmen um dem Änderungsbedarf zu begegnen (Abschnitt 2.1), der Identifikation der Konsequenzen dieser Maßnahmen auf das umfassende System (Abschnitt 2.2) sowie der virtuellen Konfiguration valider Systemalternativen (Abschnitt 2.3). Alle Abschnitte werden durch ein prototypisch implementiertes Informationssystem unterstützt, das als Informationsbasis das Modell des IPS nutzt, welches in Phase 0 anhand des realen Produkts und dessen Montage gebildet wird. Dieses Systemmodell wird besonders im Zusammenhang mit der informationstechnischen Unterstützung auch als *integriertes Produkt- und Montagemodell* bezeichnet, das im weiteren Verlauf der Arbeit durch *IPM* abgekürzt wird. Das Informationssystem stellt Informationen bezüglich der Elemente und Zusammenhänge des betrachteten Systems bereit, wodurch die Beziehungen

einzelner Module zu anderen Modulen des Systems aufgezeigt werden können. Daraus können die Konsequenzen spezifischer Maßnahmen zur Befriedigung des identifizierten Änderungsbedarfs abgeleitet werden, was dem zweiten Abschnitt dieser Phase entspricht. Anhand dieser Konsequenzen werden die Maßnahmen unterschieden, ob sie Veränderungen einzelner Elemente, ganzer Module oder der Struktur des Systems nach sich ziehen. Dazu findet ein Abgleich zwischen den funktionalen und strukturellen Montageanforderungen des Produkts und den durch das vorhandene Montagesystem bereitgestellten Funktionen und Kapazitäten statt. Aus funktionaler Sicht entspricht dieser Abgleich einer Analyse der für die Montage einer spezifischen Baugruppe notwendigen Fähigkeiten und Montageressourcen wie Werkzeuge und Vorrichtungen mit den durch das Montagesystem bereitgestellten Fähigkeiten und Montageressourcen. Der strukturelle Abgleich entspricht einer Untersuchung der durch die Aufbau- und Ablauforganisation des Montagesystems realisierbaren Montageabläufe und der durch den Produktaufbau gegebenen produktspezifischen Ablaufstruktur. Auf Basis dieser Informationen kann im folgenden Abschnitt die virtuelle Konfiguration valider Systemalternativen durchgeführt werden, die ein an das veränderte Umfeld angepasstes Produkt- und Montagesystem sowie Informationen bezüglich der für die Veränderung notwendigen Adaptionen bereitstellt.

Aus diesen Alternativen wird in der abschließenden Phase 3 die *Systemkonfiguration ausgewählt*, die die größte Entsprechung zwischen dessen spezifischen Charakteristika und den situationsbezogen festzulegenden Zielen aufweist. Zu diesem Zweck wird ein Bewertungsschema entwickelt, dessen Fokus auf dem schnellen und aufwandsarmen Vergleich verschiedener, virtuell konfigurierter Systemalternativen liegt. Als Resultat dieser Phase und somit der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration werden Informationen über eine Konfigurationsmöglichkeit des IPS bereitgestellt, die einerseits dem eingangs identifizierten Änderungsbedarf begegnet und andererseits eine Verbesserung gegenüber dem vorhandenen System hinsichtlich einer situationsbezogenen Zielsetzung darstellt.

5 Detaillierung der methodischen Umsetzung

Das vorgestellte Konzept der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration zur Absicherung der Montagefähigkeit spezifischer Produktvarianten und zur permanenten Verbesserung der Systemauslegung in turbulentem Umfeld umfasst eine modellbasierte Vorgehensweise zur integrierten Konzeptualisierung, virtuellen Konfiguration und verlässlichen Auswahl geeigneter Systemlösungen. Diese Vorgehensweise wird durch ein prototypisch implementiertes Informationssystem unterstützt. Im Folgenden werden die einzelnen Phasen und Abschnitte der Vorgehensweise sowie das entwickelte Informationssystem detailliert dargestellt.

5.1 Konzeptualisierung des integrierten Produkt- und Montagesystems

Da das Konzept gemäß der definierten Zielstellung (Kapitel 1.3) der vorgestellten Arbeit auf ein bestehendes Produkt- und Montagesystem angewandt wird, bildet die initiale Konzeptualisierung und modellhafte Abbildung des IPS den Anfang der Vorgehensweise. Im Rahmen dessen findet eine Modularisierung, Strukturierung und zielgerichtete Modellierung des IPM statt.

5.1.1 Modularisierung der technischen Systeme

Zur Realisierung eines akkuraten Abbilds der dynamischen Realität werden Prinzipien der Modularisierung und flexiblen Integration zur Strukturierung des IPS verwendet. Ein Modul stellt dabei auf Produkt- sowie auf Montageseite eine abgeschlossene und damit unabhängige sowie austauschbare funktionale Einheit dar. Zur Identifikation und Definition von Modulen werden folgende Richtlinien angewendet:

- Die Modularisierung folgt dem Grundsatz, so wenig Module wie möglich und so viele Module wie nötig zu bilden. Darunter wird das Streben nach möglichst wenigen und möglichst umfangreichen funktionalen Einheiten verstanden, was auf die Minimierung der Komplexität des Systems abzielt. Als gegenläufiges Ziel fordert die Steigerung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit eine möglichst feine Granularität und damit eine

möglichst hohe Anzahl an Modulen, um die Anzahl von Kombinationsmöglichkeiten zu erhöhen.

- Module können im Sinne einer hierarchischen Strukturierung wiederum Module enthalten (Subsystem) sowie Teil eines übergeordneten Moduls (Supersystem) sein.
- Die Definition eines Moduls wird vorgenommen, wenn es hinsichtlich
 - der technischen Funktion wie Montageanforderungen,
 - der durch den Kunden geforderten (Produkt-)Funktion wie funktionalen oder designtechnischen Individualisierungsmöglichkeiten,
 - des Austauschs zu Instandhaltungs-, Aufwertungs- oder Recyclingzwecken,
 - Adaptionmöglichkeiten beispielsweise zur Anpassung des Flexibilitätskorridors,
 - separater Qualitäts- oder Funktionsprüfung,
 - der Abgrenzung fixer und veränderlicher Produkt- und Montagebereiche,
 - der Organisationsstruktur oder
 - des Fremdbezugs funktionaler Einheitenals zweckmäßig und vertretbar angesehen werden kann.

Unter Verwendung dieser Modularisierungsrichtlinien wird eine individuelle Modularisierungsstrategie gemäß der spezifischen Produkt- und Montageziele abgeleitet. Um die Anwendung von Konfigurationskonzepten zu ermöglichen, werden die definierten Module hinsichtlich der Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Modulen mit einer eindeutigen Beschreibung der Schnittstellen und des individuellen, situationsabhängigen Beitrags zur Gesamtfunktion des Systems versehen. Erst damit wird eine flexible Integration einzelner Module zu einem funktionsfähigen und den angestrebten Zielen entsprechenden Gesamtsystem ermöglicht.

5.1.2 Strukturierung und Modellierung der technischen Systeme

Nach der Modularisierung werden die dadurch gebildeten Funktionseinheiten strukturiert und in ein digitales Modell überführt. Dafür werden unter Zuhilfenahme systemtechnischer Grundlagen Teilmodelle des Produkt- und des Montagesystems gebildet, die anschließend konsolidiert und vernetzt werden.

5.1.2.1 Strukturierung und Modellierung des Produktsystems

Bei der Modellierung des Produktsystems werden strukturelle, hierarchische sowie funktionale Charakteristika des Produkts berücksichtigt und miteinander in Verbindung gesetzt (Abb. 5.1).

Das Produktsystem weist im Bereich der industriellen Montage *hierarchische* Eigenschaften auf. Dabei werden Produktportfolio, Produktfamilie, Produktvariante, Baugruppe, Einzelteil und Feature unterschieden. Diese Kategorisierung lässt sich bei besonders umfangreichen Produktsystemen noch um eventuelle Zwischenschichten wie Produktsegment oder Produktserie erweitern. Allerdings wird dem vorgestellten Konzept die erwähnte hierarchische Struktur zugrunde gelegt, um einer möglichst großen Bandbreite an Anwendungsfällen zu entsprechen. Als unterste Kategorie wird das Feature eingeführt. Darunter sind besondere Merkmale (VDA 2011) von Einzelteilen zu verstehen. Diese können zur Spezifikation von Besonderheiten beispielsweise hinsichtlich spezieller Montageanforderungen verwendet werden. Wie bereits in Kapitel 2.3.1 diskutiert, ist die rein hierarchische Modellierung des Erzeugnisses für ein effizientes Variantenmanagement nicht ausreichend. Daher wird das Produktsystem durch eine *funktionale* Produktcharakteristik ergänzt. Diese entspricht der modularen Zusammenfassung von Produktkomponenten zu funktionalen Einheiten. Durch eine lückenlose und eindeutige funktionale Beschreibung dieser Module wird die Anwendung von Konfigurationsprinzipien unterstützt. Damit wird die funktionsgetriebene Auswahl und Zusammenstellung einzelner Produktvarianten verfolgt.

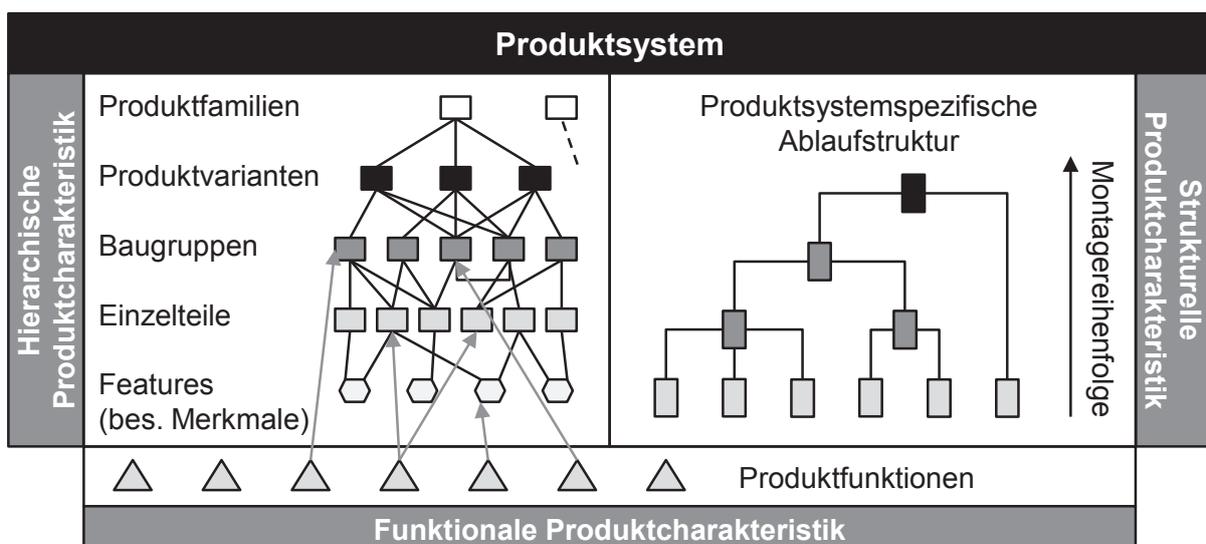


Abb. 5.1: Generische Konzeptualisierung des Produktsystems

Von besonderer Bedeutung für die Integration des Produkt- und des Montagesystems ist die *strukturelle* Charakteristik. Dabei wird die Montageablaufstruktur in den Fokus der Betrachtung gerückt, da die Abstimmung der produktseitig geforderten und der montageseitig realisierbaren Montagereihenfolge als Voraussetzung eines funktionsfähigen Gesamtsystems gilt. Produktseitig weist diese Struktur variantenspezifische Eigenheiten auf. Schon eine geringe Veränderung einzelner Produktmodule kann zur Notwendigkeit einer weitreichenden Anpassung der geforderten Ablaufstruktur führen. Um dieser Herausforderung zu begegnen, wird in vorliegender Arbeit neben einer funktionalen auch eine strukturelle Modularisierung des Produktsystems verfolgt. Dabei werden den Produktmodulen bei der Konzeptualisierung Informationen bezüglich erforderlicher, möglicher und unmöglicher Nachfolger bzw. Vorgänger im Montageablauf hinterlegt. Dies ergibt sich meist aus der hierarchischen Charakteristik des Produktsystems sowie aus zusätzlichen Randbedingungen bei der Montage spezifischer Produktvarianten. Somit wird eine weitgehend automatisierte Generierung der produktsystemspezifischen Ablaufstruktur ermöglicht, was auf die Reduzierung des Aufwands bei der Abstimmung der produkt- und montageseitigen Montagereihenfolge abzielt. Die produktsystemspezifische Ablaufstruktur ist somit die Menge aller notwendigen produktvariantenspezifischen Montageabläufe.

Anhand dieser Vorgaben können die Produktmodule beschrieben und vernetzt werden. Als Informationsquellen zur Erhebung der relevanten Daten und Informationen dienen dafür

- Zeichnungen, Stücklisten und Produktmodelle aus dem Bereich der Produktentwicklung,
- prognostizierte Stückzahlen und Variantenzahlen aus der Produktplanung sowie
- Kunden- und Montageaufträge aus dem Bereich des Auftragsmanagements.

Abb. 5.2 gibt neben diesen Informationsquellen eine Übersicht über die Daten, die einem Produktmodul hinterlegt werden. Jedes Produktmodul erhält eine eindeutige Bezeichnung (ID) zur Identifikation und wird einer hierarchischen Produktebene zugeordnet sowie mit den über- und untergeordneten Systemebenen verknüpft. Den Produktmodulen werden dann Funktionen, besondere Merkmale und prognostizierte oder nachgefragte Stückzahlen hinterlegt. Hierbei ist zu beachten, dass die Funktionen der einzelnen Module in Abhängigkeit der angestrebten Gesamtfunktion des integrierten Systems divergieren können.

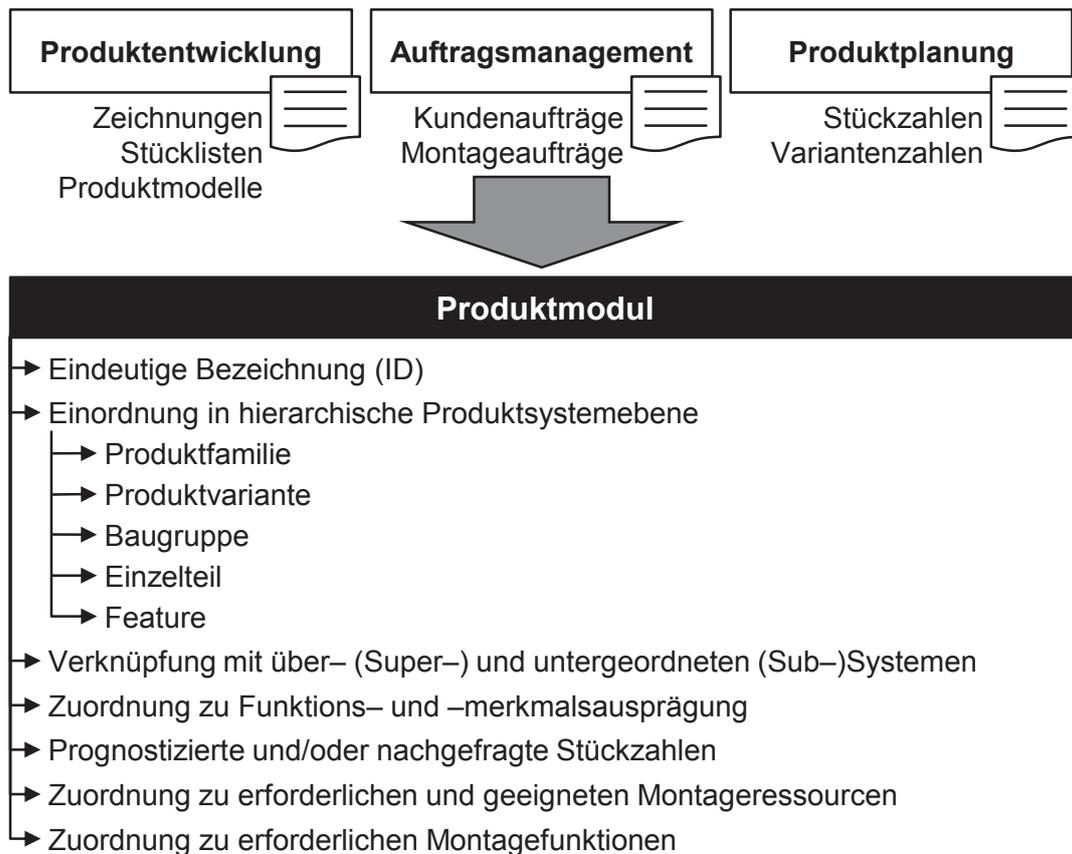


Abb. 5.2: Informationsquellen und Spezifikation eines Produktmoduls

Daher muss die Modulfunktion entweder in Abhängigkeit der jeweiligen Situation modelliert werden oder eine solch feingranulare Modularisierungsstrategie gewählt werden, in der die elementaren Funktionen bzw. deren Beitrag zur Gesamtfunktion als unabhängig angesehen werden können. Da die zweite Möglichkeit meist mit einem höheren Aufwand verbunden ist, wird eine situationsbezogene Modellierung und Bewertung der konfigurierten Systemalternativen präferiert. Abschließend werden die spezifischen Anforderungen der Produktmodule an die Montage und insbesondere an die benötigten Montageressourcen hinzugefügt. Dies stellt bereits eine erste Verknüpfung mit dem montageseitigen Teilmodell dar, worauf in Kapitel 5.1.2.3 näher eingegangen wird.

5.1.2.2 Strukturierung und Modellierung des Montagesystems

In Analogie zur Produktmodellierung werden auch bei der Konzeptualisierung des Montagesystems hierarchische, strukturelle und funktionale Charakteristika berücksichtigt (Abb. 5.3).

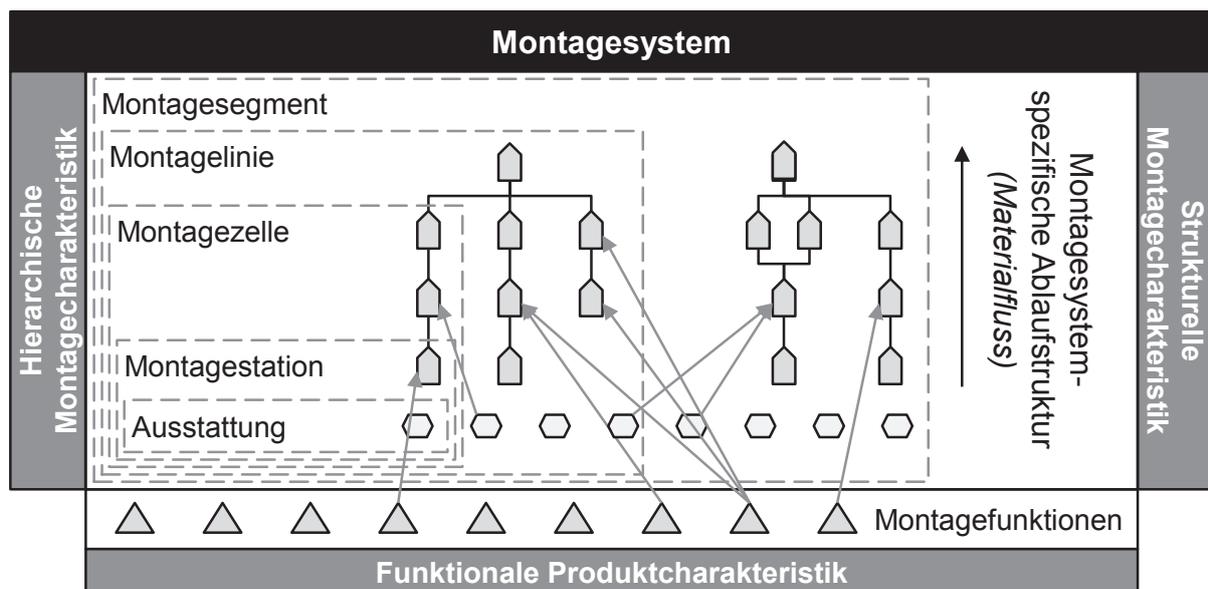


Abb. 5.3: Generische Konzeptualisierung des Montagesystems

Zur *hierarchischen* Montagecharakterisierung werden die Ebenen Montagesegment, Montagelinie, Montagezelle, Montagestation und Ausstattung verwendet, wobei der Fokus auf den vier letztgenannten Ebenen liegt. Der Grund für die Konzentration liegt in der besonderen Komplexität dieser Ebenen, da die Anzahl der Objekte und die Dynamik der Veränderungen dort höher sind. Daher lässt sich hinsichtlich der Verwendung von Konfigurationskonzepten postulieren, dass das Konzept auf übergeordneten Ebenen ebenso anwendbar ist, wenn der Beweis für die Umsetzung in untergeordneten Ebenen gelingt. Die Ebene der Ausstattung umfasst neben Werkzeugen, Vorrichtungen und Maschinen auch die Fähigkeiten, die durch die menschliche Arbeitskraft zur Verfügung gestellt werden. Diese Ausstattungen werden zu Montagestationen zusammengefasst, die manuelle und teilautomatisierte Arbeitsstationen sowie maschinelle Montageautomaten umfassen.

Die Montagestationen stellen die Montagesystemebene zur Ausführung einer oder mehrerer Arbeitsschritte dar, wobei diese Arbeitsschritte unter Verwendung der bereits eingeführten Montagefunktionen (Abb. 3.7) beschrieben werden. Die *funktionale* Charakterisierung des Montagesystems findet somit durch die Verknüpfung der Montagestationen mit Montagefunktionen in Form von Füge-, Handhabungs- und Sonderoperationen statt, wobei der Funktionsumfang durch die Ausstattung der Montagestationen festgelegt wird.

In Analogie zur bereits eingeführten produktspezifischen Montageablaufstruktur stellt auch im Rahmen der Konzeptualisierung des Montagesystems die Montagereihenfolge den Kern

der *strukturellen* Montagesystemcharakterisierung dar. Hierbei sind die realisierbaren Montageabläufe durch den Funktionsumfang einzelner Montagestationen und deren Verknüpfung durch die Materialversorgung gegeben. Es gilt zu beachten, dass die Flexibilität des Materialversorgungssystems großen Einfluss auf die ohne Rüstmaßnahmen realisierbaren Abläufe aufweist. Daher wird die Organisation der Materialversorgung bei der Konzeptualisierung des Montagesystems insofern berücksichtigt, dass den einzelnen Montagestationen geeignete, mögliche und unmögliche Nachfolger bzw. Vorgänger unter Sicherstellung eines reibungslosen Materialflusses hinterlegt werden. Dadurch lassen sich Informationen bezüglich möglicher Montageabläufe im Rahmen der Modellierung abbilden und dadurch der Aufwand für die Abstimmung produktseitig geforderter und montageseitig realisierbarer Montagereihenfolgen reduzieren. Die montagesystemspezifische Ablaufstruktur wird somit als die Menge aller durch das vorhandene Montagesystem realisierbaren Montageabläufe definiert.

Durch diese auf systemtechnischen Grundlagen basierende Charakterisierung des Montagesystems lässt sich das Montagemodul spezifizieren. Als Informationsquellen dienen

- die vorhandene Arbeitsplatzausstattung mit Werkzeugen und Vorrichtungen,
- die durch menschliche Arbeitskräfte bereitgestellten Fähigkeiten aus Mitarbeiterprofilen und Einsatzplänen sowie
- die Maschinen mit deren Datenblättern und dem in der Montage verfügbaren und beispielsweise mittels Befragungen erfassbaren Erfahrungs- und Expertenwissen.

Abb. 5.4 gibt neben diesen Informationsquellen eine Übersicht über die Daten, die einem Montagemodul hinterlegt werden. Jedes Montagemodul erhält eine eindeutige Bezeichnung (ID) zur Identifikation und wird einer hierarchischen Montagesystemebene zugeordnet sowie mit über- und untergeordneten Systemebenen verknüpft. Anschließend werden Leistungsparameter hinsichtlich Qualität, Kosten und Zeit hinterlegt. Des Weiteren ist auch eine Zuordnung der Montagemodule zu damit ausführbaren Montagefunktionen vorgesehen. Zuletzt kann dem Montagemodul noch die Empfehlung oder das Verbot einer Verwendung trotz funktionaler Eignung hinterlegt sowie erforderliche, mögliche und unmögliche Nachfolger bzw. Vorgänger zugeordnet werden.

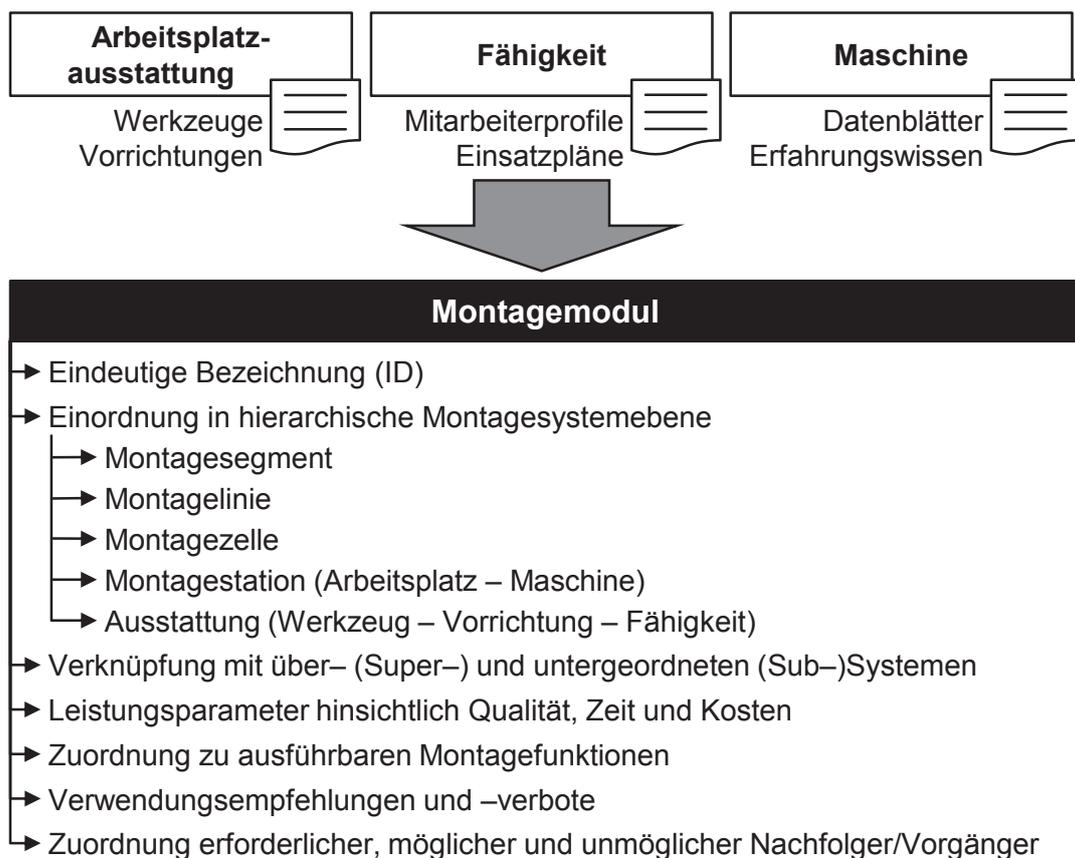


Abb. 5.4: Informationsquellen und Spezifikation eines Montagemoduls

Unter Verwendung dieser Charakteristika und der Modularisierung des Produkt- sowie des Montagesystems lassen sich die domänenspezifischen Teilmodelle entwickeln. Der nächste Schritt der Phase der initialen Konzeptualisierung ist die Konsolidierung und Integration dieser Teilmodelle.

5.1.2.3 Konsolidierung und Integration der Teilmodelle

Erste Schritte der Abstimmung des Produkt- und des Montagemodells wurden bereits angedeutet. Einerseits enthält das Produktmodul bereits Anforderungen an dessen Herstellung und auch eine Zuordnung zu geeigneten Montageressourcen kann vorgenommen werden. Andererseits enthält das Montagemodul Informationen über dessen Verwendung. Darunter fällt beispielsweise auch eine mögliche Zuordnung einer Montageressource zu speziellen Baugruppen.

Zur Kanalisierung der Integration der Teilmodelle, um die Handhabung des Gesamtmodells trotz hoher Komplexität sicherzustellen, werden die Verknüpfungsmöglichkeiten standardisiert. Generell gilt, dass nur definierte Module miteinander verknüpft werden können. Dies ist

auch insofern nachvollziehbar, da ein Modul auch hinsichtlich dessen Kombinationsmöglichkeit mit anderen Modulen eine funktionale Einheit darstellt. Unter Berücksichtigung der Montage als fokussierten Bereich der Produkterstellung werden damit Verknüpfungsmöglichkeiten zwischen folgenden hierarchischen Systemebenen unterstützt:

- *Baugruppe und Ausstattung*
Diese Beziehung ermöglicht die Modellierung des Bedarfs spezieller Ausstattungsgegenstände wie Werkzeuge, Vorrichtungen, Maschinen und Fähigkeiten für die Montage der Baugruppe.
- *Baugruppe und Montagestation*
Unter Umständen ist es nützlich die Erzeugung einer Baugruppe einer Montagestation zuzuweisen. Beispielsweise kann somit eine Prozessintegration unterstützt werden, wenn ähnliche oder aufeinander aufbauende Baugruppen ein und derselben Montagestation zugewiesen werden.
- *Baugruppe und Montagefunktionen*
Auch die Verknüpfung von Modulen der Baugruppenebene und der Montagefunktionsebene wird unterstützt. Diese Verknüpfungsmöglichkeit kann im Einzelfall zweckmäßig sein, falls die Erzeugung einer Baugruppe beispielsweise ein besonderes Montage- oder Handhabungsverfahren erfordert.
- *Produktvariante und Montagezelle*
Die Verknüpfung von Modulen aus der Ebene der Produktvarianten und Montagezellen ist auch möglich, jedoch nur zweckmäßig, wenn eine Konfiguration auf Montagezellenebene wie beispielsweise der Austausch ganzer Montagezellen für die Herstellung einer Produktvariante ermöglicht werden soll.

Diese Verknüpfungsmöglichkeiten gelten jeweils in beide Richtungen. Das bedeutet, dass die Modellierung einer Beziehung von einem Modul des Produktmodells zu einem Modul des Montagemodells ebenso möglich ist, wie auch in entgegengesetzter Richtung. Dies wird von der Modellierungsnotation durch gerichtete, das heißt richtungsabhängige Assoziationen bewerkstelligt.

Unter den genannten Voraussetzungen ist nun die strukturierte Modellierung und Integration der Produkt- und Montagemodelle möglich. Das Resultat wird in Abb. 5.5 in Form des integrierten Produkt- und Montagemodells (IPM) dargestellt.

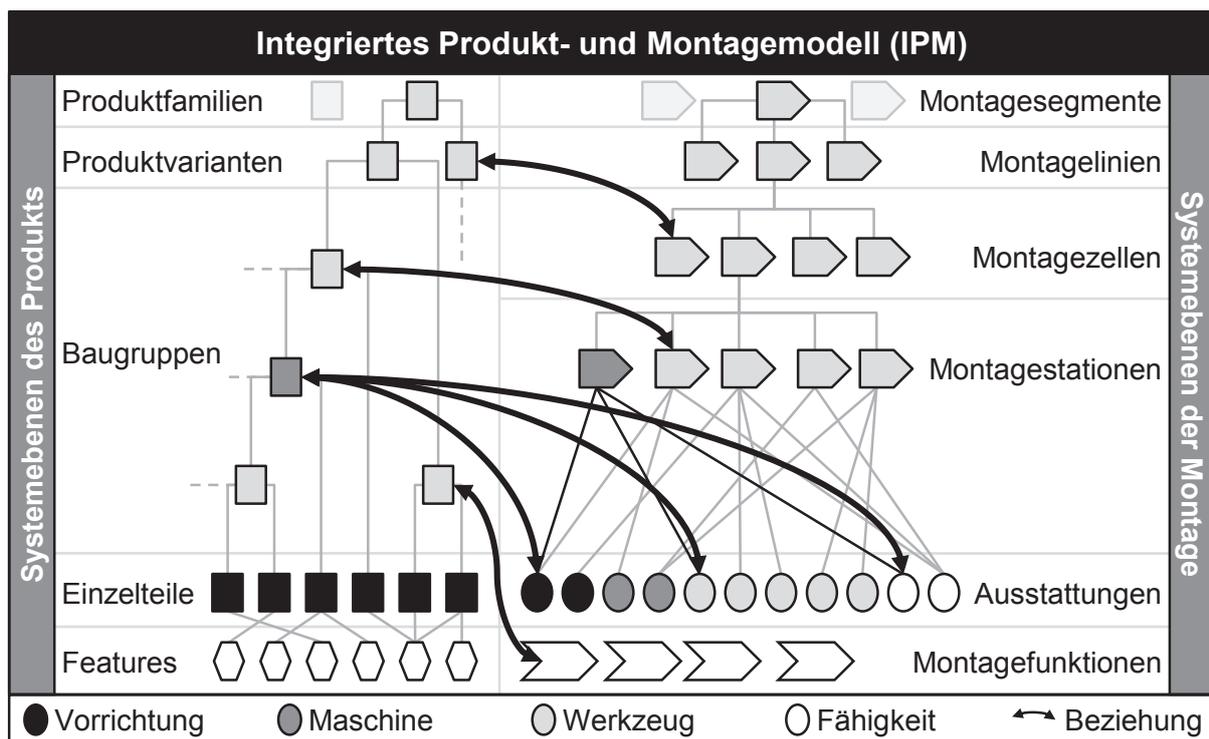


Abb. 5.5: Integration der Modelle des Produkt- und des Montagesystems

Damit ist die konzeptionelle Grundlage für die Modellierung des IPM gelegt. Im Folgenden wird die informationstechnische Umsetzung beschrieben, die den oben diskutierten Herausforderungen hinsichtlich Komplexität und Dynamik der abzubildenden Systeme begegnet.

5.2 Umsetzung des ontologiebasierten Informationssystems

Wie in Kapitel 3.5 bereits erwähnt, wird für die Umsetzung der Informationsbasis auf die Beschreibungssprache OWL zurückgegriffen, was durch einen ontologiebasierten Ansatz die semantische Abbildung hochvernetzter und vielfältiger Strukturen unterstützt. Diese Informationsbasis bildet den Kern der prototypischen Umsetzung des Informationssystems zur Unterstützung der vorgestellten Methode. In den folgenden Unterkapiteln wird zuerst die übergeordnete Architektur des Informationssystems dargelegt, bevor die ontologiebasierte Informationsbasis umfassend beschrieben wird.

5.2.1 Softwarearchitektur des Informationssystems

Die durch das Informationssystem bereitzustellenden Informationen weisen einen hohen Grad an Komplexität auf. Diese Komplexität ist nicht nur durch die zahlreichen Elemente und

deren vielfältige Wechselbeziehungen geprägt, die zur Abbildung und Prognose des Systemverhaltens berücksichtigt werden müssen, sondern wird durch eine hohe Veränderungsrate noch gesteigert. Des Weiteren sind auch die Bediener heterogen zusammengesetzt, da das entwickelte Informationssystem nicht nur für den Montage-, sondern auch für den Produktbereich und andere Fachdisziplinen im Unternehmen relevante Informationen vorhält. Daher wird bei der Entwicklung des Informationssystems besonderer Wert auf eine flexible Bereitstellung von Informationen und eine möglichst aufwandsarme Veränderungsfähigkeit in allen Bereichen gelegt.

Dies führt dazu, dass auch im Bereich des Informationssystems eine konsequente Modularisierung der unterschiedlichen Funktionsbereiche verfolgt wird, um diese unabhängig voneinander verändern und dynamisch zusammenstellen zu können (Kohlhase 2013). Die Gliederung dieser Funktionsbereiche folgt dem MVC-Muster (Model View Controller Pattern) (Balzert et al. 2011). Das Modell (*Model*) wird durch *Abfragemodule* repräsentiert, die Informationen aus dem System extrahieren und bereitstellen. Die zielgerichtete Darstellung (*View*) dieser Informationen wird durch *Visualisierungsmodule* ermöglicht, wobei die Steuerung (*Control*) in Form der Verbindung der beiden Modultypen durch *Anwendungsmodule* durchgeführt wird. Eine funktionsfähige Einheit dieser drei Module wird als App bezeichnet, was den hohen Grad an Flexibilität und Mobilität der Anwendungen verdeutlichen soll. Auch wenn der Entwicklungsaufwand durch diese Kapselung erhöht wird, so lassen sich dadurch lose gekoppelte Komponenten mit hohem Wiederverwendungspotenzial realisieren, was eine leichte Austauschbarkeit und Erweiterbarkeit der Funktionalität des Informationssystems sowie Anpassbarkeit bspw. an verschiedene Benutzeroberflächen und Anwendungszwecke ermöglicht.

Zur Verwaltung dieser Apps wird ein Webserver eingesetzt. Dadurch lassen sie sich zentral verwalten und verteilt nutzen, wodurch das Ziel verfolgt wird, die Anwendungen und damit auch die Informationen überall und jederzeit zugänglich zu machen. Durch das Informationssystem werden geringe Anforderungen an die Serverumgebung gestellt. Hierbei ist es ausreichend, wenn der Webserver lediglich statische Dateien für den Client zur Verfügung stellt. Die Wahl für die prototypische Umsetzung fällt auf die frei verfügbare Webserverlösung aus *Node.js* als Plattform in Verbindung mit *express* als Framework für Webanwendungen, wodurch die serverseitige Ausführung von JavaScript bei geringer Speicherverwendung ermöglicht wird (Cantelon et al. 2013). Damit lassen sich die gewünschten Apps in die aktive

Anwendung des Clients übertragen und ausführen. Unter Verwendung dieser Apps werden anschließend Abfragen unter Nutzung von *SPARQL* formuliert und über die Schnittstellenspezifikation *SPARQL-Endpoint* (W3C 2005) an die Informationsbasis gesendet, woraufhin die entsprechenden Informationen extrahiert und durch die entsprechende Wahl der Apps in gewünschter Form dargestellt werden. Damit ergibt sich die umfassende Softwarearchitektur des unterstützenden Informationssystems (Abb. 5.6).

Durch diese Architektur wird ein hoher Grad an Flexibilität und Veränderungsfähigkeit des Informationssystems erreicht. Unter geringen Kompatibilitätsanforderungen sind die Module einzelner Apps frei kombinierbar, wodurch bspw. Visualisierungsmodule zur tabellarischen Darstellung von Daten für unterschiedlichste Anwendungen denkbar sind. Auch die klare Trennung der Informationsbasis von den angesprochenen Apps ermöglicht nicht nur die weitestgehend unabhängige Veränderung der beiden Bereiche, sondern sogar den vollständigen Austausch oder das Hinzufügen neuer Apps oder Informationsbausteine. Der clientseitige Teil des Informationssystems ist browserbasiert umgesetzt, damit auch hier ein hoher Grad an Flexibilität erreicht wird.

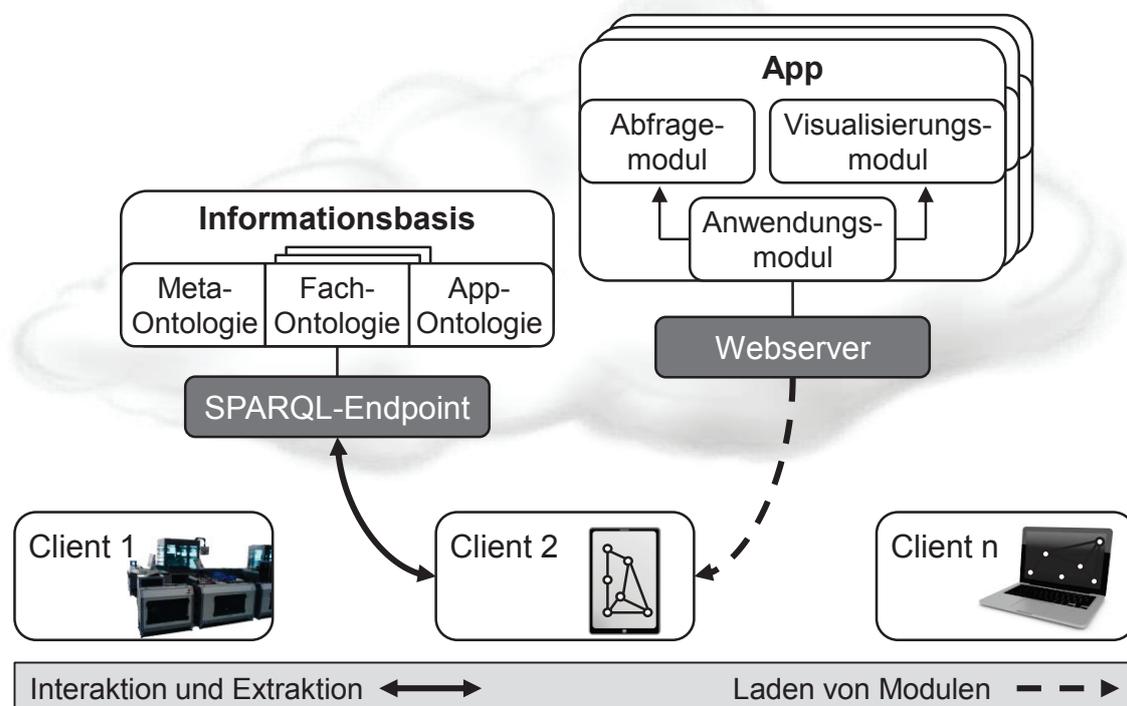


Abb. 5.6: Softwarearchitektur des prototypisch umgesetzten Informationssystems

Somit genügt ein geeigneter Browser wie Mozilla Firefox oder Google Chrome als Voraussetzung, das Informationssystem auf einer großen Bandbreite an Clients wie mobilen Smartphones oder Tablets sowie feststehenden Desktop-PCs auszuführen, was die technischen Informationen prinzipiell jederzeit und überall zugänglich macht. Im Folgenden werden die Informationsbasis als Rückgrat des Informationssystems und die durch Apps bereitgestellte Funktionalität des Informationssystems erläutert.

5.2.2 Architektur der zugrunde liegenden Informationsbasis

Die Informationsbasis setzt sich aus drei Teilen zusammen: Einem Strukturmodell, einem Anwendungsmodell und dem IPM (Abb. 5.7). Alle drei Modelle sind in Form einer Ontologie unter Verwendung von OWL umgesetzt. Das Strukturmodell enthält das zu verwendende Vokabular und gibt damit die grundlegende Struktur der Informationsbasis wieder. Dieses Vokabular stellt die Metainformationen bereit, die von anderen verwendeten Ontologien zu berücksichtigen sind, um eine Interoperabilität und damit eine flexible Zusammenstellung unterschiedlicher Ontologien zu ermöglichen. Dieses Strukturmodell wird im Folgenden als *Meta-Ontologie* bezeichnet. Sie enthält die grundlegenden Klassen und Beziehungen, die notwendig und ausreichend sind, um eine entsprechende Informationsbasis im Bereich der integrierten Produkt- und Montagemodellierung zur Unterstützung von Konfigurationsmaßnahmen umzusetzen. Im vorgestellten Informationssystem legt die Meta-Ontologie fest, dass eine Ontologie mit konfigurationsspezifischen Fachinformationen für eine reibungslose Einbindung in das Informationssystem die Klassen *Produkt* als Menge aller Produktmodule und *Ressource* als Menge aller Montagemodule aufweisen muss, die mit den Properties *isA*, *requires*, *isRequiredFor*, *contains* und *isPartOf* in Beziehung gesetzt werden können.

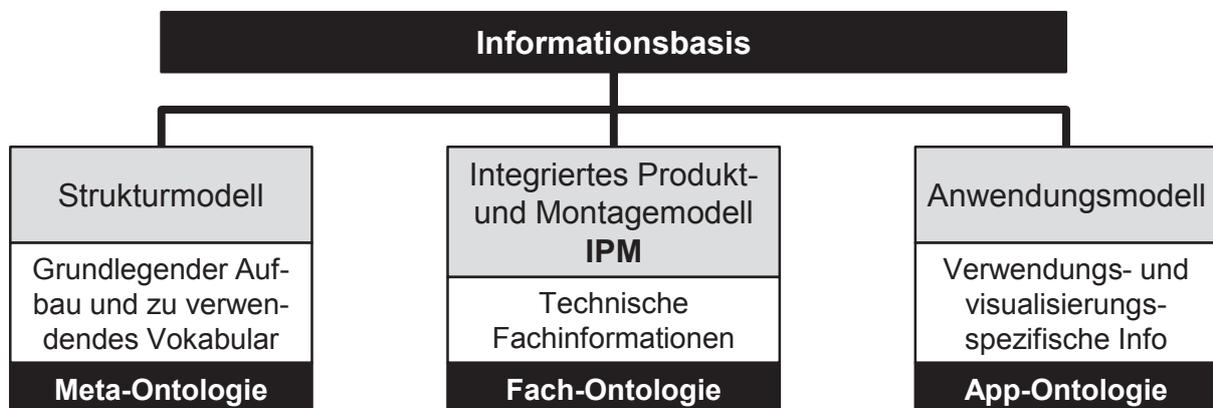


Abb. 5.7: Architektur der ontologiebasierten Informationsbasis

Die technischen Fachinformationen werden im vorliegenden Fall durch das IPM bereitgestellt. Da das IPM ebenfalls als Ontologie umgesetzt ist, wird es im Rahmen des vorgestellten Informationssystems als *Fach-Ontologie* bezeichnet. Diese Fach-Ontologie muss nicht zwingend das IPM sein. Es kann auch durch andere Ontologien mit technischen Fachinformationen erweitert oder vollständig ersetzt werden. Einzige Voraussetzung für die Lauffähigkeit des digitalen Werkzeugs ist dabei die Einhaltung des Vokabulars und der durch die Meta-Ontologie vorgegebenen Struktur. Dies ermöglicht die geforderte Anpassung der Fach-Ontologie an die individuellen Gegebenheiten eines spezifischen Anwendungsfalls durch völlige Austauschbarkeit der Fachinformationsbasis. Das führt zu einem äußerst hohen Grad an Flexibilität, da somit die technische Informationsbasis jederzeit und ohne signifikanten Aufwand ausgetauscht oder durch zusätzliche Ontologien erweitert werden kann.

Der dritte Teil der Informationsbasis stellt ein Verzeichnis der verfügbaren Anwendungs-, Abfrage- und Visualisierungsmodule sowie Informationen bezüglich deren Kombinationsmöglichkeiten zu funktionsfähigen Apps zur Verfügung. Dieser Teil wird als *App-Ontologie* bezeichnet und unterstützt die aufwandsarme Nutzung einer Vielzahl an Apps. Im Rahmen des vorgestellten Konzepts werden exemplarisch drei Apps realisiert und im folgenden Kapitel vorgestellt. Im Folgenden wird die umgesetzte Fach-Ontologie näher beleuchtet. Abb. 5.8 zeigt die obersten drei Ebenen mit der bereits angesprochenen Gliederung in Produkt- und Montagemodule. Das *Produkt* enthält dabei alle Produktmodule und folgt der bereits vorgestellten Struktur des Produktsystems (Kapitel 5.1.2.1). Die Montagemodule werden durch die Klasse *Ressource* zusammengefasst und in die zugehörigen Montagesystemebenen (Kapitel 5.1.2.2) eingeordnet. Zur Vernetzung der Module dienen neben der Zuordnung von Elementen zu Klassen durch die Property *isA* vier Typen von Properties (Kapitel 3.5).

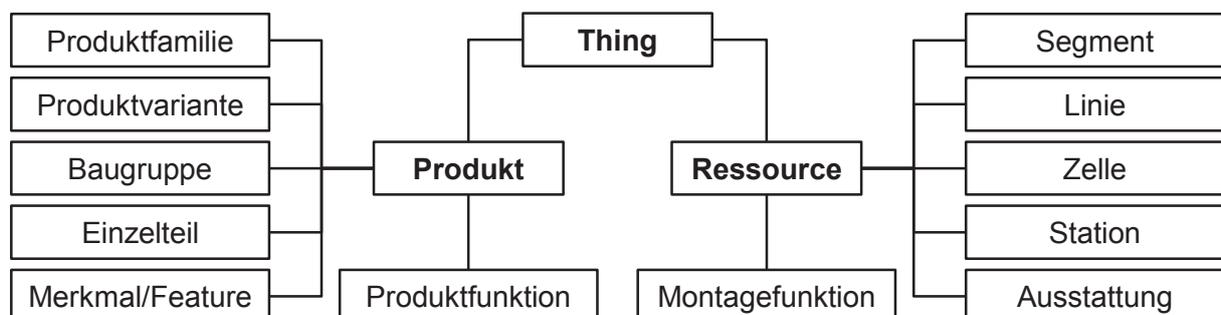


Abb. 5.8: Klassenstruktur der Fach-Ontologie

Zur vertikalen bzw. hierarchischen Vernetzung zur übergeordneten Ebene (Supersystem) wird *isPartOf* benutzt und zur untergeordneten Ebene (Subsystem) *contains*. Diese Properties weisen einen inversen Zusammenhang auf. Das heißt, bei Verknüpfung eines Moduls zu einer übergeordneten Ebene unter Verwendung der Property *isPartOf*, lässt sich das entsprechende Supersystem automatisiert durch *contains* mit dem Subsystem verknüpfen. In derselben Form sind die Properties *requires* und *isRequiredFor* miteinander verbunden. Diese werden zur horizontalen Vernetzung benutzt, die einer funktionalen Beziehung zwischen unterschiedlichen Modulen entspricht. Abb. 5.9 illustriert diese verschiedenen Vernetzungsmöglichkeiten innerhalb des IPM. Den vier Vernetzungsmöglichkeiten werden nicht nur die inversen Eigenschaften mitgegeben, sondern sie weisen auch transitive Eigenschaften auf. Damit wird die Weitergabe bei hintereinandergeschalteten Beziehungen bezeichnet. Wenn beispielsweise ein Einzelteil durch *isPartOf* einer Baugruppe zugeordnet und diese Baugruppe wiederum einer Produktvariante zugeordnet wird, so lässt sich automatisch eine direkte Zuordnung bzw. Verknüpfung des Einzelteils mit der indirekt verbundenen Produktvariante erzeugen.

Durch diese besonderen Eigenschaften der Properties wird der erforderliche Aufwand für die Modellierung deutlich verringert. So werden in dem in Abb. 5.9 dargestellten vereinfachten Beispiel sechs Assoziationen manuell gesetzt, woraus sich durch logische Schlussfolgerung (Inferriren) weitere zwölf Assoziationen automatisiert generieren lassen. Dadurch wird der Aufwand zur Konzeptualisierung eines umfangreichen Abbilds eines komplexer Systeme verringern.

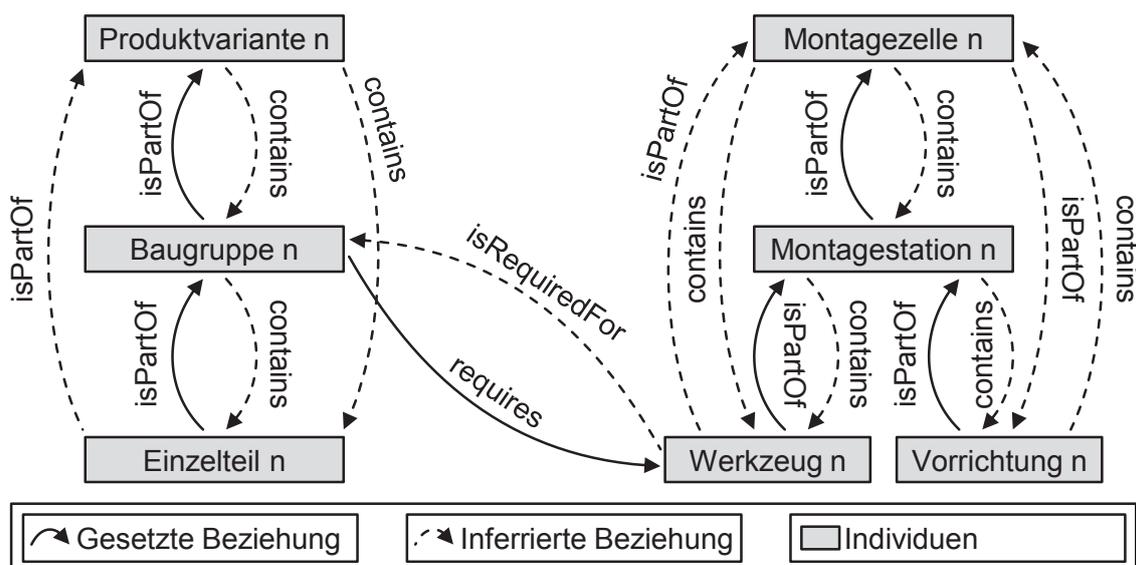


Abb. 5.9: Vertikale und horizontale Vernetzungsmöglichkeiten

5.2.3 Funktionalität des Informationssystems

Die spezifischen Funktionen des Informationssystems zur Unterstützung der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration werden softwaretechnisch durch Apps realisiert. Diese Apps setzen sich, wie bereits erwähnt, aus Abfrage-, Visualisierungs- und Anwendungsmodulen zusammen. Bevor die Funktionen des Informationssystems in Form der umgesetzten Apps erläutert werden, findet zunächst eine kurze Darstellung der einzelnen Module statt.

5.2.3.1 Module zur Informationsextraktion

Zur Formulierung von Abfragen für die Extraktion gewünschter Informationen aus der entsprechenden Fach-Ontologie steht eine Reihe von Abfragemodulen zur Verfügung:

- *Freitextsuche*
Dieses Abfragemodul ermöglicht die Extraktion eindimensionaler Daten mit dem gesuchten Namen oder ID, was die gezielte Auswahl von Elementen des IPM ermöglicht, um diese einer näheren Untersuchung zuzuführen.
- *Facettierte Suche*
Dieses Abfragemodul ermöglicht die Einschränkung der Ergebnismenge entsprechend der auszuwählenden Menge wie beispielsweise Produktvarianten. Dies ermöglicht ein gezieltes Arbeiten in abgegrenzten Bereichen des IPM.
- *Hierarchische Suche*
Dieses Abfragemodul ermöglicht die Extraktion hierarchischer Eigenschaften des gewählten Elements der Informationsbasis. Dies wird beispielsweise zur Ermittlung der Bestandteile einzelner Produktvarianten oder Montagestationen verwendet.
- *Funktionale Suche*
Dieses Abfragemodul ermöglicht die gezielte Suche nach funktionalen Beziehungen gewählter Module zu anderen Bestandteilen des IPM. Damit lassen sich beispielsweise Abfragen zur Ermittlung der benötigten Montageressourcen zur Erzeugung einzelner Baugruppen generieren.

Diese Abfrageoptionen liefern spezifische Ergebnismengen, die von unterschiedlichen Visualisierungsmodulen genutzt werden können.

5.2.3.2 Module zur Informationsvisualisierung

Die Visualisierung der vielfältigen und weitreichenden Wirkbeziehungen zwischen den Elementen des IPM stellt eine große Herausforderung dar. Der Informationsfluss zwischen den beteiligten Disziplinen von der Produktentwicklung über die Produktion bis hin zur Auslieferung und zum Service der Produkte ist trotz Unterstützung durch die digitale Technik immer noch formulargestützt (Westkämper 2013b). Auch Benutzerschnittstellen etablierter Softwaresysteme im entsprechenden Umfeld sind meist in Form gewohnter Formulare zur Ein- und Ausgabe von Daten und Informationen gestaltet, um die Kommunikation zwischen den arbeitsteilig gestalteten Organisationseinheiten zu unterstützen. Meist werden dabei tabellarische Darstellungen gewählt. Diese Visualisierungsmöglichkeit wird auch bei vorgestelltem Informationssystem unterstützt. Jedoch zeigt sich besonders bei komplexen Systemen, dass eine textuelle oder tabellarische Darstellung der vielfältigen, logisch funktionalen Beziehungen nicht ausreichend ist (Tolk und Lakhmi 2009). Zu diesem Zweck werden neben Visualisierungsmodulen zur tabellarischen Darstellung auch matrizen- und graphenbasierte Visualisierungstechniken unterstützt (Herman et al. 2000). In Abb. 5.10 werden diese Darstellungsmöglichkeiten aufgeführt und durch exemplarische Darstellungen veranschaulicht, die durch die Visualisierungsmodule des Informationssystems bereitgestellt werden.

In tabellarischer Darstellung lassen sich nicht nur Stücklisten von Produktkomponenten, sondern auch von allen modellierten Objekten des Montagesystems generieren.

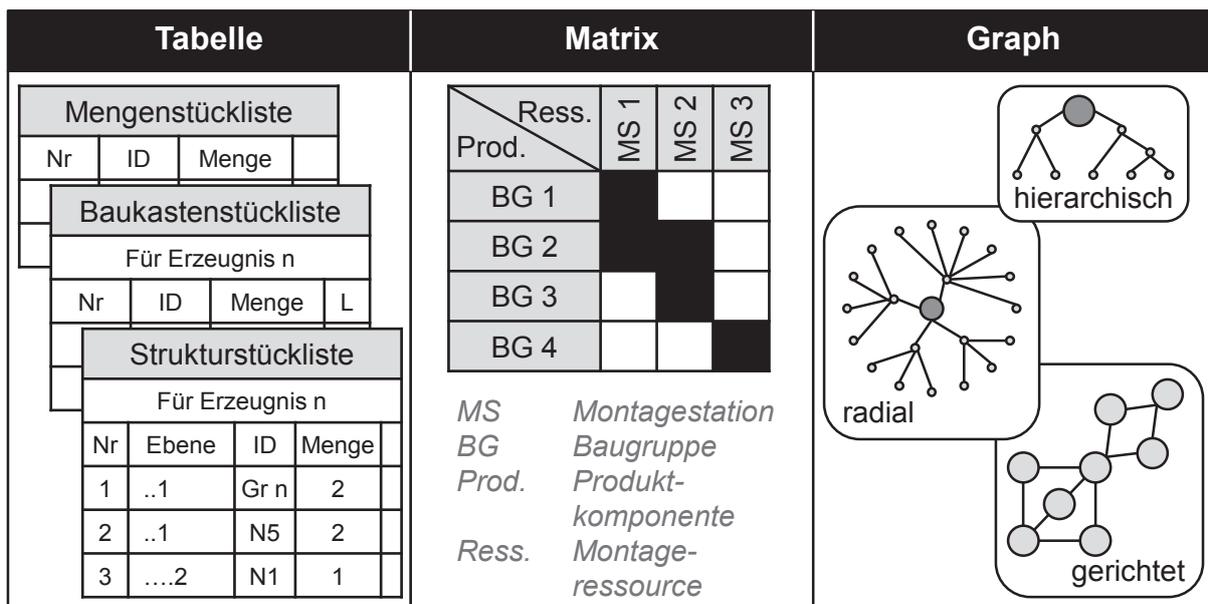


Abb. 5.10: Durch Visualisierungsmodule unterstützte Darstellungsmöglichkeiten

Matrizen können zur Visualisierung der Beziehungen zwischen dem Produkt- und dem Montagesystem benutzt werden. Dies bietet sich unter anderem zur Visualisierung der Zuordnung von Produktmodulen zu den in der Montage verwendeten und/oder geeigneten Montagestationen an. Die Graphen lassen sich je nach Visualisierungszweck hierarchisch, radial oder gerichtet darstellen und werden besonders zur Darstellung funktionaler Beziehungen zwischen einzelnen Elementen des IPM eingesetzt.

5.2.3.3 *Module zur Anwendungscoordination*

Anwendungsmodule koordinieren die Kombination von Abfrage- und Visualisierungsmodulen. Diese Kombination ist als Zusammenfassung der Module zu einer App innerhalb des Informationssystems zur Erfüllung einzelner Funktionen zu verstehen. Dadurch werden individuelle Softwareanwendungen für spezifische Fragestellungen bereitgestellt. Die Anwender werden somit in die Lage versetzt, exakt die Softwarebausteine zu benutzen, die zur Lösung der aktuellen Problemstellungen benötigt werden. Allerdings stellt jede App eine einzigartige Kombination aus zu koordinierenden Modulen dar, wobei sich die Eigenschaften und Schnittstellenspezifikationen einzelner Module unterscheiden. Daher sind die Anwendungsmodule für jede App individuell anzupassen bzw. zu entwickeln.

5.2.3.4 *Apps als flexible Funktionsbausteine*

Die anwendungsspezifischen Funktionen des Informationssystems werden durch Apps repräsentiert. Zur Unterstützung der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration werden drei Apps vorgestellt, die die Untersuchung von *Beziehungen* zwischen Elementen des IPM, die Erstellung individueller *Stücklisten* sowie die Identifikation verwendeter und *alternativer Montageressourcen* zur Erzeugung spezifischer Baugruppen ermöglichen.

Die graphenbasierte Darstellung wird durch ihren weitreichenden Einsatzbereich in der Informationsvisualisierung und ihre hohe Ausdrucksstärke bei der Veranschaulichung logischer *Beziehungen* als Basis-App des vorgestellten Informationssystems eingesetzt. Hierbei wird ein zu untersuchendes Element des IPM beispielsweise unter Verwendung der freitextbasierten sowie der facettierten Suche ausgewählt und im Ergebnisbereich dargestellt. In Abb. 5.11 ist eine solche graphenbasierte Visualisierung einer Baugruppe mit deren direkten Beziehungen zu Ausstattungen des Montagesystems (*requires*) sowie zu über- (*isPartOf*) und untergeordneten (*contains*) Ebenen des Produktsystems dargestellt, wobei die Beziehungen durch das Abfragemodul zur funktionalen Suche ermittelt werden.

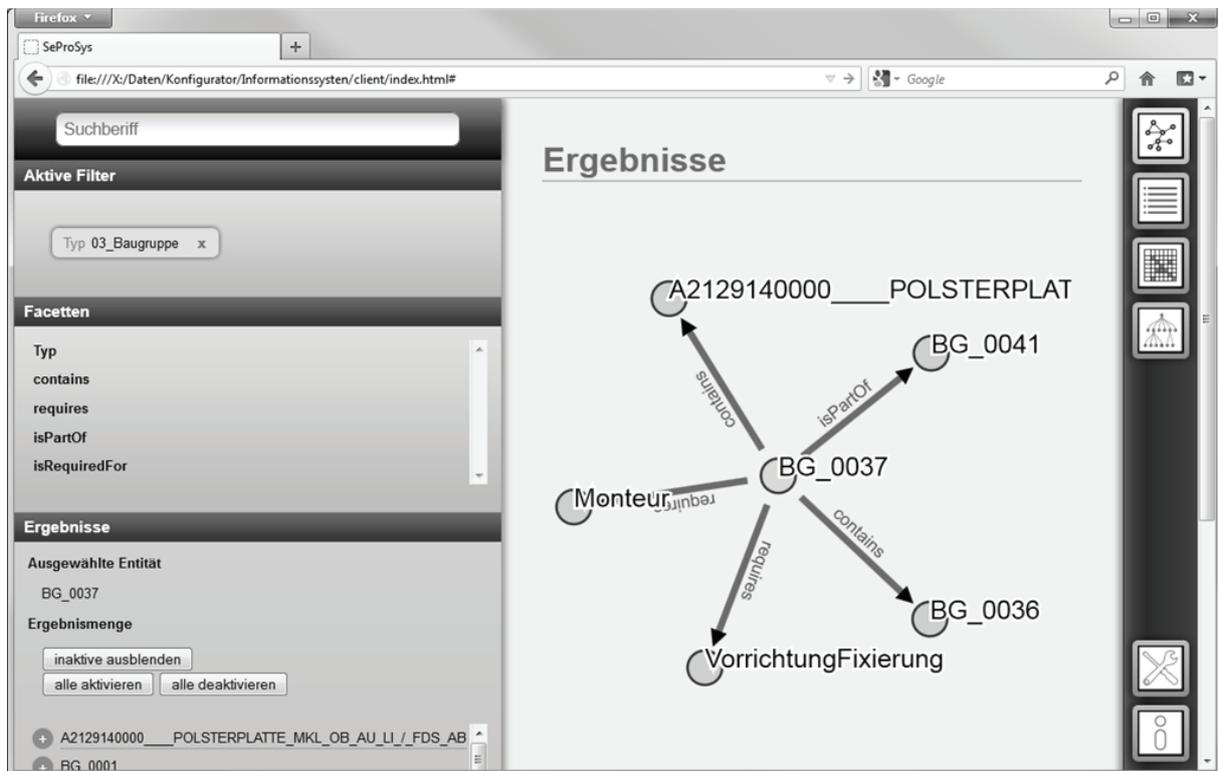


Abb. 5.11: App zur Identifikation und Analyse des Netzwerks funktionaler Beziehungen

Diese Ansicht kann für nähere Analysen dynamisch angepasst werden. Dafür lassen sich durch Klicks auf die entsprechenden Knoten wiederum deren Beziehungen aufzeigen. So können auch umfangreiche Beziehungsnetzwerke ein- und ausgeblendet werden. Dies ermöglicht dem Anwender die nachvollziehbare und intuitive Navigation durch das komplexe Geflecht hochvernetzter Strukturen des IPM, wodurch sich spezifische Wirkketten identifizieren und analysieren lassen. Dadurch lassen sich beispielsweise die funktionalen Beziehungen einzelner Produktkomponenten zu Montageressourcen aufzeigen, wodurch die Ermittlung von Konsequenzen einer Veränderung unterstützt wird.

Häufig sind neben den funktionalen Beziehungen innerhalb des betrachteten Systems besonders Stücklisten von Produktbestandteilen oder vorhandenen Montagestationen mit deren jeweiligen Ausstattungen von Interesse. Die einfache Generierung dieser *Listen* wird ebenfalls durch eine App unterstützt. Diese App stellt eine Kombination des Abfragemoduls zur hierarchischen Suche sowie des Moduls zur tabellarischen Datenvisualisierung dar (Abb. 5.12).

Stückliste

zuletzt ausgewählt: BG_0053

Stückliste für BG_0053				
lfd. Nr.	ID	Bezeichnung	Menge	Typ
0	BG_0052_geprueft	N/A	1	Baugruppe
1	BG_0052	N/A	1	Baugruppe
2	BG_0051	N/A	1	Baugruppe
3	BG_0050	N/A	1	Baugruppe
4	BG_0045	N/A	1	Baugruppe
5	BG_0044	N/A	1	Baugruppe
6	BG_0016	N/A	1	Baugruppe
7	BG_0015	N/A	1	Baugruppe

Abb. 5.12: App zur Erzeugung und Darstellung von Produkt- und Montagestücklisten

Dabei lässt sich aus jedem Element des IPM eine Liste generieren. Die Liste besteht dann aus allen Elementen die direkt oder indirekt mit dem ausgewählten Element durch die Property *contains* verbunden sind. Dabei können beispielsweise auch die Hierarchieebenen der jeweiligen Produktkomponenten berücksichtigt werden, wodurch sich auch *Varianten- oder Strukturstücklisten* erzeugen lassen. Dies stellt ein mächtiges Werkzeug dar, da durch die Verwendung des IPM als technische Informationsbasis alle denkbaren Stücklisten in einem Modell vereint sind. Somit dienen Stücklisten nicht mehr der primären Informationsspeicherung, sondern stellen lediglich eine mögliche Form der Informationsvisualisierung dar. Das Informationssystem bietet dabei die Möglichkeit, jegliche Listen von Produktkomponenten oder Montageressourcen einfach und schnell zu erzeugen und direkt darzustellen.

Die dritte App des Informationssystems zur Unterstützung der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration verwendet das Abfragemodul zur funktionalen Suche sowie das Visualisierungsmodul zur matrixbasierten Informationsdarstellung (Abb. 5.13). Dabei findet eine Gegenüberstellung des Produkt- und des Montagesystems statt, wobei die darzustellenden hierarchischen Ebenen frei gewählt werden können. Eine Möglichkeit ist die Gegenüberstellung von Baugruppen einer bestimmten Produktvariante und den zur Erstellung nötigen Ausstattungen wie Werkzeugen, Vorrichtungen, Maschinen und Fähigkeiten. Durch die automatisierte Ermittlung von Montagestationen, die über die jeweiligen Ausstattungsgegenstände verfügen, wird dem Anwender ein schneller Überblick über das IPS hinsichtlich *geeigneter Montageressourcen* zur Verfügung gestellt.

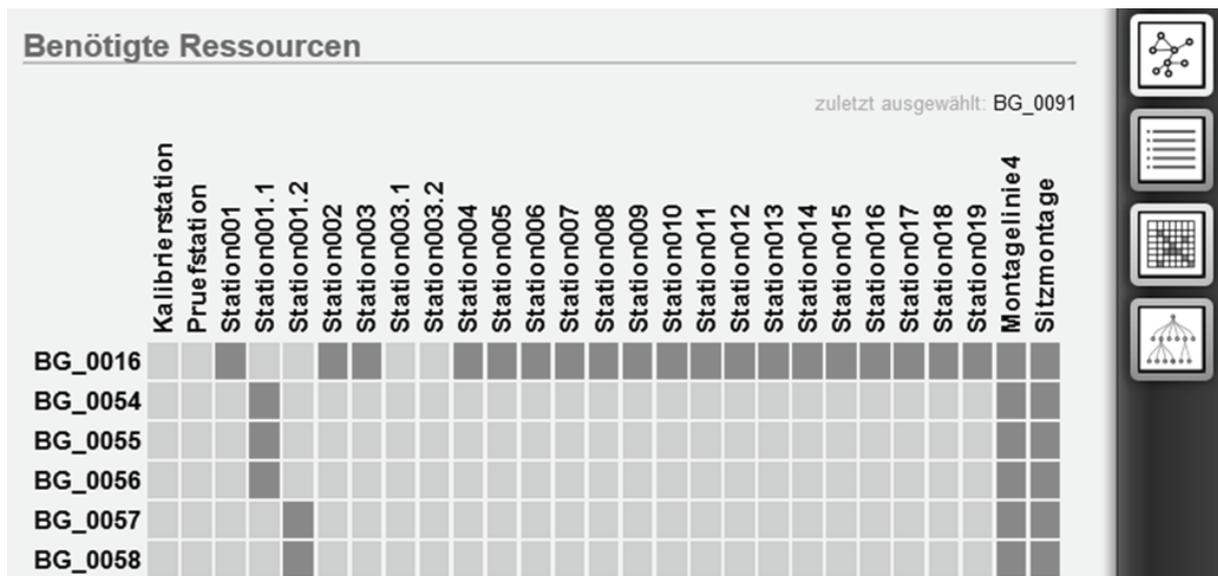


Abb. 5.13: App zur Darstellung verwendeter und geeigneter Montageressourcen

Anhand dieser Darstellung kann der Anwender direkt erkennen, auf welchen Stationen welche Baugruppen montiert werden können. Insofern die notwendigen Ausstattungen zur Erzeugung einer neuen Baugruppe bekannt sind, ist es unter Verwendung dieser App ein Leichtes zu erkennen, ob eine Montagestation vorhanden ist, die diese Ausstattungen aufweist und somit die Baugruppe erzeugen kann oder ob eine Veränderung der Montagelinie durch Rüstvorgänge an den Montagestationen notwendig ist. Somit verhilft diese App dem Anwender nicht nur zu einem schnellen Überblick über die verwendeten und geeigneten Montageressourcen zur Erzeugung des Produkts, sondern unterstützt zudem noch die Absicherung der Montagefähigkeit neuer Produktkomponenten unter Verwendung des vorhandenen Montagesystems. Durch den entsprechenden Einsatz dieser Apps, lassen sich die Beziehungen zwischen den Modulen des Systems nachvollziehen und somit die Notwendigkeit sowie die Auswirkungen partieller Veränderungen auf das System feststellen. Die Bereitstellung dieser Informationen unterstützt die Anwendung von Konfigurationsmaßnahmen zur Systemadaption (Tabelle 5), da die Konsequenzen einer Adaption, Elimination, Substitution oder Addition von Produkt- oder Montagemodulen sowie einer strukturellen oder organisatorischen Anpassung des Systems oder einzelner Teile nachvollziehbar und übersichtlich dargestellt werden können. Nachdem die Voraussetzungen für die initiale Modularisierungs- und Modellierungsphase (Phase 0) geschaffen sind, wird nun die Identifikation und Synchronisation des Änderungsbedarfs zur Absicherung der Montagefähigkeit sowie zur Optimierung des IPS bei sich ändernden Randbedingungen und Zielzuständen beschrieben.

5.3 Identifikation und Synchronisation des Änderungsbedarfs

Der Änderungsbedarf resultiert aus sogenannten Veränderungstreibern. Diese können produktseitiger, montageseitiger oder struktureller Natur sein (Kapitel 3.3). Produktseitig können Einzelteile, Baugruppen oder Produktvarianten adaptiert, substituiert, eliminiert oder addiert werden. Darunter ist der Austausch, das Hinzufügen oder das Entfernen von Produktmodulen zur Erweiterung oder Bereinigung des Produktportfolios zu verstehen, was beispielsweise durch eine Änderung der Bauweise oder die Einführung neuer Werkstoffe verursacht werden kann. Auch eine Änderung der Eigenfertigungstiefe durch Intensivierung oder Abschwächung des Fremdbezugs einzelner Module wird als produktseitige Veränderung berücksichtigt. In struktureller, das heißt in übergreifender Hinsicht sind die Auftragsentwicklung und entsprechende Prognosen, Veränderungen in Gesetzen und Richtlinien sowie das Verhalten gegenüber dem Wettbewerb als Ursachen für die Erzeugung von Änderungsbedarf einzubeziehen. Eine besondere Stellung bei strukturellen Veränderungstreibern erfahren die eingesetzten Informations- und Kommunikationssysteme. Eine Adaption der hierbei eingesetzten Systeme ist oft mit hohem Aufwand verbunden und beeinflusst mehrere Bereiche auf eine vielfältige Art und Weise. Die genannten Veränderungen haben meist direkten Einfluss auf die Montage. Die montageseitigen Veränderungstreiber können dabei in der Aufbau- oder Ablauforganisation, den eingesetzten Methoden und den benötigten Fähigkeiten in Form menschlicher Arbeitskraft sowie in den bereits definierten Ebenen des Montagesystems von den Vorrichtungen und Werkzeugen über die Montagestationen bis hin zu ganzen Montagelinien auftreten. Auch hier kann eine Substitution, Elimination sowie Addition technischer Einrichtungen und personeller Ressourcen in Form von Montagemodulen stattfinden.

Zur strukturierten Identifikation und Synchronisation der genannten Veränderungstreiber wird der *Konfigurationskalender* vorgestellt. Dieser basiert auf dem bereits diskutierten Technologiekalender (Kapitel 3.3.2). Allerdings wird er dahingehend angepasst, dass der Fokus weniger auf meist langfristigen, technologiebedingten Veränderungen als vielmehr auf kurz- bis mittelfristigen Adaptionen gelegt wird. Abb. 5.14 zeigt eine beispielhafte Änderungsaufstellung unter Berücksichtigung der definierten Veränderungstreiber. Dabei wird der aus der Analyse der Veränderungstreiber resultierende Änderungsbedarf eingetragen. Die Länge der Kästen für die Planung bzw. das Engineering sowie für die Anwendung der Adaption gibt Auskunft über die zeitliche Einordnung der Maßnahme.

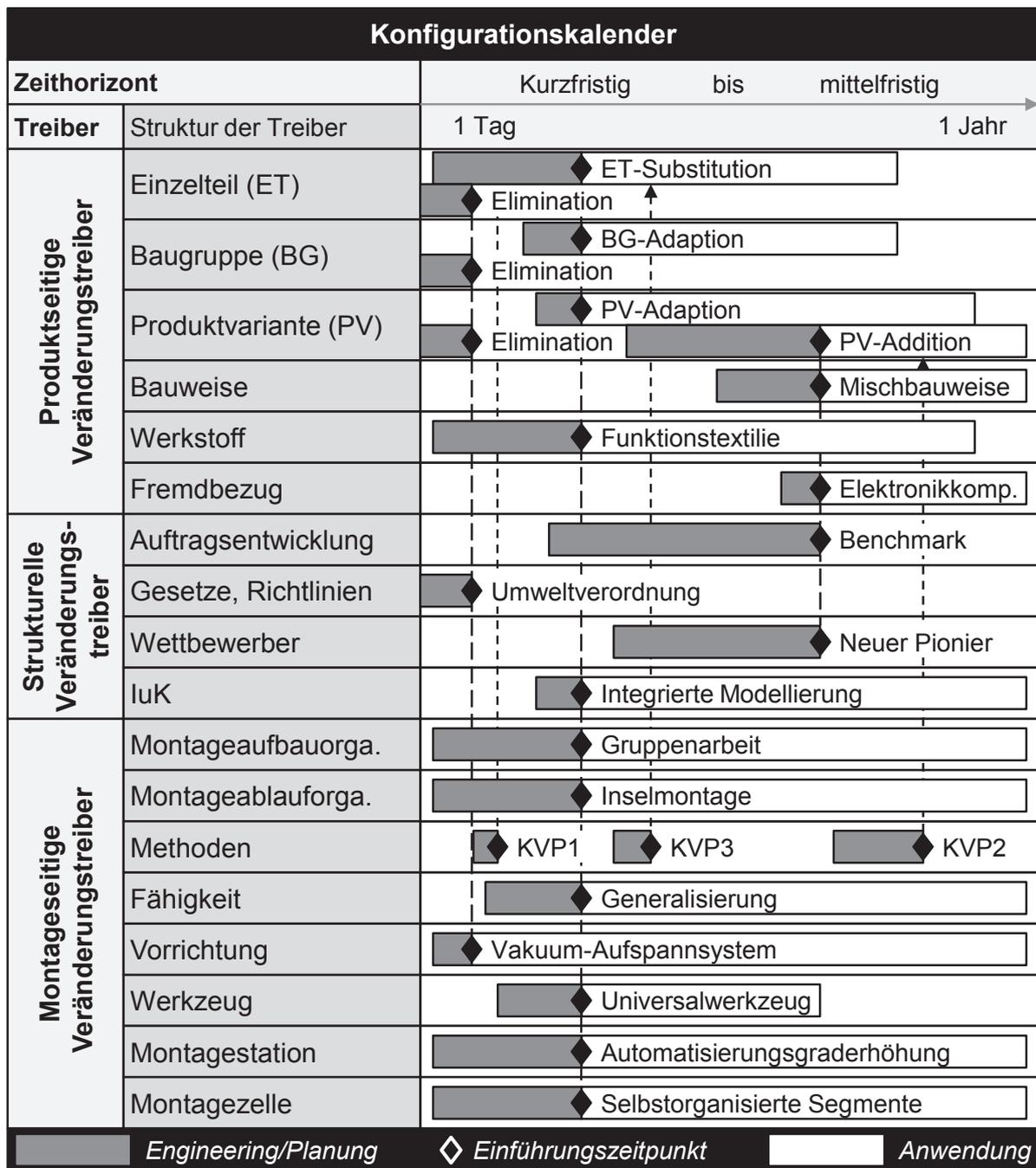


Abb. 5.14: Der Konfigurationskalender

Der Einführungszeitpunkt stellt den Start der aktiven Nutzung der Veränderung dar, wobei eine eventuelle Inbetriebnahme im Rahmen der Planung und des Engineerings berücksichtigt wird. Damit lässt sich der Änderungsbedarf, der aus unterschiedlichen Veränderungstreibern hervorgehen kann, mit dem Konfigurationskalender identifizieren und deren zeitlichen sowie funktionalen Beziehungen strukturieren und aufeinander abstimmen. Hinsichtlich der angestrebten Erhöhung der Frequenz von Adaptionen des Produkt- und des Montagesystems

dient der Konfigurationskalender als begleitendes Planungsinstrument. Anhand dieses Instruments werden alle weiteren Konfigurationsschritte durch Identifikation des Änderungsbedarfs und die zeitliche Abstimmung der entsprechenden Maßnahmen ausgelöst. Damit ist es für eine verlässliche Informationsbereitstellung von besonderer Bedeutung, den Konfigurationskalender als Taktgeber ebenso wie das IPM als konzeptualisierte Abbildung des physisch vorhandenen IPS jederzeit in einem aktuellen Zustand zu halten. Auf Basis dieser beiden Säulen baut nun die virtuelle Produkt- und Montagekonfiguration auf.

5.4 Virtuelle Produkt- und Montagekonfiguration

Unter der virtuellen Produkt- und Montagekonfiguration ist die fiktive Vorwegnahme spezifischer Maßnahmen zur Adaption des Produkt- oder des Montagesystems unter Verwendung von Konfigurationskonzepten und informationstechnischen Werkzeugen zu verstehen. Die Identifikation von Auswirkungen einzelner Adaptionenmaßnahmen auf das umfassende technische System zur Prognose des veränderten Systemverhaltens und die funktional optimierte Orchestrierung mehrerer Maßnahmen sind dabei von besonderer Bedeutung. Die virtuelle Produkt- und Montagekonfiguration ist die Phase 2 der vorgestellten Methode und umfasst drei Abschnitte, die im Folgenden erläutert werden.

5.4.1 Auswahl möglicher Maßnahmen

Im ersten Abschnitt der virtuellen integrierten Produkt- und Montagekonfiguration (Abschnitt 2.1) werden die möglichen Maßnahmenoptionen im Sinne einer Konfiguration des Systems identifiziert. Dafür werden zuerst relevante Maßnahmen zur Konfiguration vorgestellt, bevor die entsprechenden Auswirkungen auf das betrachtete System spezifiziert werden. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über konfigurationsspezifische Maßnahmen zur Systemadaption. Mit dieser Liste von Maßnahmen werden Adaptionenmöglichkeiten abgedeckt, die unter Verwendung von Konfigurationskonzepten durchgeführt werden können (Bieniek 2001; Koren 2006; Piller 2006; Dangelmaier 2009; Bellgran und Säfsten 2010). Wie bereits im vorangegangenen Kapitel dargestellt, umfassen sie auf modularer Ebene die Adaption, Addition, Elimination und Substitution einzelner Produkt- oder Montagemodule. Auf organisatorischer Ebene wird eine Restrukturierung im Sinne einer Reorganisation des Systems berücksichtigt.

Maßnahme	Erläuterung		
Adaption	Anpassung von Produktmodulen mit Funktionsveränderung		
	Anpassung von Montagemodulen mit Funktionsveränderung		
Addition	Hinzufügen von Produktkomponenten		
	Hinzufügen von Montagefunktionen oder -ressourcen		
Elimination	Bereinigung des Produktportfolios		
	Streichung von Funktionen oder Entnahme von Montageressourcen		
Integration	Bildung funktionaler Einheiten aus getrennten Produktmodulen		
	Bildung funktionaler Einheiten aus getrennten Montagemodulen		
Modularisierung	Teilung funktionaler Einheiten in untergeordnete Produktmodule		
	Teilung funktionaler Einheiten in untergeordnete Montagemodule		
Reihenfolgebildung	Veränderung der produkt- oder montagesystemspezifischen Ablaufstruktur		
Restrukturierung	Baukasten-, plattform- oder modulzentrierte Produktstrukturierung		
	Werkstatt-, Insel-, Reihen oder Fließfertigung		
Substitution	Ersetzen von Produktmodulen ohne Funktionsveränderung		
	Ersetzen von Montagemodulen ohne Funktionsveränderung		
Zuordnung	Neue oder veränderte Zuweisung von Produktkomponenten und Montageressourcen		
<i>Produktseitig</i>	<i>Montageseitig</i>	<i>Strukturell</i>	

Tabelle 5: Konfigurationsspezifische Maßnahmen zur Systemadaption

Des Weiteren kann auch der Grad der Modularisierung bzw. Integration im Sinne einer veränderten Modularisierungsstrategie angepasst werden. Im Übergangsbereich zwischen Produkt- und Montagesystem können strukturelle Konfigurationsmaßnahmen durch eine neue oder veränderte Zuordnung von Produkt- und Montagemodulen und einer Veränderung der produkt- oder montagesystemspezifischen Ablaufstruktur stattfinden. Das funktionale Ziel der Veränderung beruht auf dem zuvor identifizierten Änderungsbedarf. Dies kann beispielsweise die Bildung einer neuen Produktvariante, die Erhöhung von Stückzahlen bestimmter Produktkomponenten oder der Ausfall einer Montagestation sein. Für die Art und Weise, wie dieser Änderungsbedarf befriedigt werden kann, kommen meist mehrere Möglichkeiten in Frage. Das Erkennen dieser unterschiedlichen Möglichkeiten ist stark mit der Kreativität und der Erfahrung der verantwortlichen Fachexperten verbunden. Diese Anwender dürfen somit weder durch das methodische Vorgehen noch durch die informationstechnische Unterstützung eingeschränkt werden. Daher wird dieser erste Abschnitt der virtuellen Produkt- und Monta-

gekonfiguration unter dem Fokus der Befriedigung des Änderungsbedarfs durchgeführt werden, wobei andere Aspekte wie Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit ausgeblendet werden. Auch das Informationssystem sorgt durch dessen flexible Informationsbereitstellungsoptionen für ein möglichst freies Arbeiten der Anwender.

Diese Maßnahmen umfassen im Regelfall eine Veränderung einzelner Systemelemente, wie beispielsweise die Anpassung einer Produktkomponente an neue Anforderungen. Allerdings können diese Veränderungen weitreichende Konsequenzen auf das integrierte System des Produkts und dessen Montage haben. Im folgenden Abschnitt wird die Identifikation und Spezifikation dieser Konsequenzen vorgenommen, bevor auf Basis der generierten Informationen neue Systemalternativen konfiguriert werden.

5.4.2 Identifikation der Systembeeinflussung

Im Abschnitt 2.2 der virtuellen Produkt- und Montagekonfiguration wird die Beeinflussung des Systems durch die ausgewählte Maßnahme identifiziert und spezifiziert. Dabei werden *elementare*, *modulare* und *strukturelle Systembeeinflussungen* unterschieden, wobei die Vorgehensweise zur Spezifikation der Konsequenzen von der jeweiligen Zuordnung abhängig ist.

Unter einer *elementaren* Systembeeinflussung werden Konsequenzen zusammengefasst, die lediglich eine Anpassung von Elementen einzelner Module erfordern, ohne die Schnittstellenspezifikation des Moduls zu verändern. Diese Art der Systembeeinflussung wird oft durch gestaltungstechnische Maßnahmen zur Veränderung des äußeren Eindrucks einzelner Produktkomponenten hervorgerufen. Als Beispiel lässt sich die Anpassung der Farbgebung an veränderte Kundewünsche anführen, bei der die produktspezifischen Anforderungen an die Montage unverändert bleiben. Im Rahmen der hier vorgestellten Methode lässt sich eine solche Systembeeinflussung durch die Analyse des betroffenen Moduls identifizieren. Unter Verwendung des entwickelten Informationssystems werden die Schnittstellenspezifikationen in Form der Beziehungen des Moduls zu anderen Modulen abgelesen, wodurch festgestellt werden kann, ob die verändernde Maßnahme diese Spezifikationen beeinflusst. Diese Form der Veränderung ist mit dem geringsten Aufwand verbunden, da die durchzuführende Maßnahme keinen zu berücksichtigenden Einfluss auf andere Bereiche des Systems hat. Die Verlässlichkeit der Sicherstellung fehlender Beeinflussung anderer Systemmodule ist dabei von der Akkuranz der dem entwickelten Informationssystem zugrunde liegenden Informati-

onsbasis abhängig. Nur durch einen ausreichend hohen Detailgrad des IPM können derartige Information bereitgestellt werden. Insofern eine elementare Systembeeinflussung festgestellt wird, kann die Maßnahme ohne weitere Vorkehrungen durchgeführt werden.

Für den Fall, dass die Schnittstellenspezifikationen des Moduls durch die Maßnahme verändert werden, sind die Konsequenzen als *modular* zu bezeichnen. Dies kann beispielsweise eine zusätzliche Ausstattung einzelner Arbeitsplätze mit Werkzeugen oder Vorrichtungen sein, die zur Montage einer neuen Baugruppe erforderlich wird. Im Falle der modularen Systembeeinflussung einer Maßnahme treten somit Wechselwirkungen zwischen einzelnen Modulen auf. Durch die funktionale Verknüpfung von Modulen des Produkt- und des Montagesystems im Rahmen des IPM stehen Informationen bezüglich der gegenseitigen Beeinflussung jederzeit zur Verfügung. Damit lassen sich nicht nur die Ausstattungen einzelner Montagestationen, sondern auch die Baugruppen, die damit erstellt werden können, ermitteln. Bei einer Veränderung der direkt beeinflussten Module kann wiederum die Adaption weiterer Systembereiche erforderlich werden. Diese Kettenreaktion von direkt und indirekt beeinflussten Modulen gilt es bei Maßnahmen dieser Art zu analysieren und vollständig zu erfassen. Die manuelle Erfassung dieser situationsbezogenen Wirkketten kann zu erheblichem Aufwand führen. Allerdings kann dieser Aufwand durch den Einsatz des entwickelten Informationssystems deutlich verringert werden. Besonders durch den Einsatz der App zur graphenbasierten Abbildung logischer Verknüpfungen ist eine schnelle Analyse und übersichtliche Darstellung möglich.

Falls die Struktur des Systems in Form einer Änderung der produkt- oder montagesystemspezifischen Ablaufstruktur beeinflusst wird, sind die Konsequenzen der Maßnahme als *strukturell* einzuordnen. Diese Form der Systembeeinflussung zieht die weitreichendsten Adaptionen des Systems nach sich und tritt besonders bei der Einführung neuer Werkstoffe oder der Integration neuer Technologien in das Produkt- oder Montagesystem auf. Dabei wird analog zur zuvor durchgeführten Konzeptualisierung (Phase 0) die produkt- und die montagesystemspezifische Ablaufstruktur unterschieden. Bei einer Veränderung der produktsystemspezifischen Ablaufstruktur ist zu prüfen, ob das Produkt unter Verwendung des vorhandenen Montagesystems erstellt werden kann oder ob eine strukturelle Veränderung des Montagesystems notwendig ist. Dafür werden die unterschiedlichen Produkt- und Montagesystemstrukturen hinsichtlich der zu analysierenden Veränderung gegenübergestellt. Als strukturspezifische Schnittstelle zwischen dem Produkt und der Montage dienen die jeweiligen Montagestrukt-

ren. Einerseits werden diese durch das Produkt in Form einer logischen Montagereihenfolge und andererseits durch die Montagelinie in Form einer physischen Verknüpfung einzelner Montagestationen definiert (Bullinger 1986). Somit werden produktseitig die notwendigen und montageseitig die möglichen Montagereihenfolgen festgelegt. Nur wenn diese beiden Strukturen aufeinander abgestimmt sind, kann die Systemfunktion in Form der Montageauftragsgerechter Produkte erfüllt werden. Zum Abgleich dieser beiden wird als gemeinsame Darstellung der Vorranggraph gewählt (Abb. 5.15).

Die produktsystemspezifische Ablaufstruktur lässt sich unter Verwendung des entwickelten Informationssystems an den hierarchischen Erzeugnischarakteristika ablesen und neben der Darstellung als Vorranggraph unter Verwendung der Stücklisten-App als Montagestrukturstückliste darstellen. Montageseitig hingegen wäre die Menge aller durch die bestehende Montagelinie realisierbaren Montageabläufe von Interesse, um die Montagefähigkeit der untersuchten Produktvariante mit dem bestehenden Montagesystem automatisch zu ermitteln. Allerdings ist der Nutzen hinsichtlich des hohen Aufwands der Modellierung der zahlreichen Möglichkeiten fragwürdig. Daher wird im Rahmen der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration auf einen situationsbezogenen Abgleich der produkt- und der montagesystem-spezifischen Ablaufstruktur zurückgegriffen.

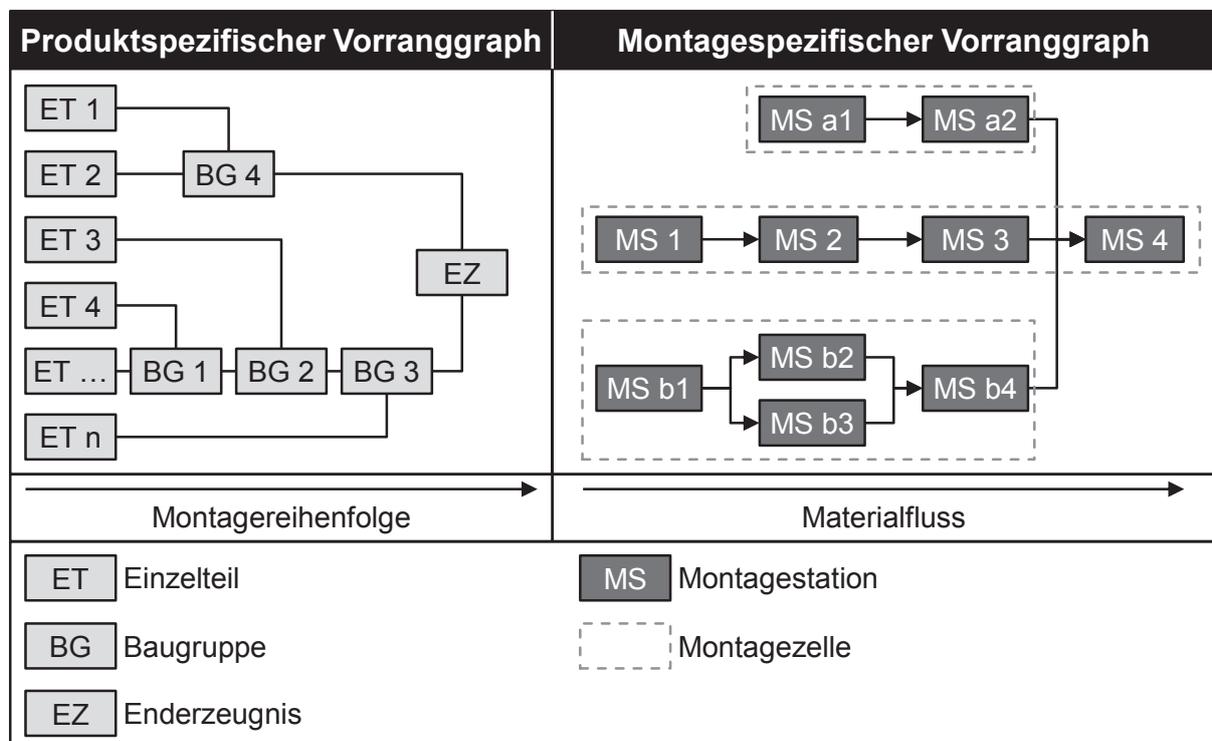


Abb. 5.15: Produkt- und montagesystemspezifische Vorranggraphen

Darunter ist die manuelle Gegenüberstellung der veränderten produktsystemspezifischen mit der vorhandenen montagesystemspezifischen Montageablaufstruktur zu verstehen. Zur Ermittlung der montagesystemspezifischen Ablaufstruktur kann ebenfalls das entwickelte Informationssystem genutzt werden, da die grundlegende Struktur hinsichtlich der physischen Verknüpfung einzelner Montagestationen im IPM hinterlegt ist. Aus diesen Informationen in Zusammenhang mit den Funktionen der einzelnen Montagestationen ist es unter geringem Aufwand möglich, die Montagefähigkeit veränderter Produktvarianten auf dem bestehenden Montagesystem trotz einer veränderten produktsystemspezifischen Ablaufstruktur abzusichern. Sollte dies nicht möglich sein, so wird eine grundlegende Restrukturierung der Montagelinie erforderlich.

Das Resultat des Abschnitts 2.2 ist somit eine verlässliche Darstellung der Konsequenzen ausgewählter Maßnahmen zur Befriedigung des in der vorangegangenen Phase identifizierten Änderungsbedarfs. Damit kann nun die Konfiguration valider Systemalternativen als umfassende Darstellung möglicher Systemzustände inklusive der entsprechenden Maßnahmen zur Adaption des bestehenden Produkt- und Montagesystems erfolgen.

5.4.3 Konfiguration valider Systemalternativen

Aufbauend auf den in den vorangegangenen Abschnitten der Maßnahmenauswahl und der Analyse der entsprechenden Systembeeinflussung erzeugten Informationen, findet in Abschnitt 2.3 die Konfiguration valider Systemalternativen statt. Wie bereits angedeutet, ist der Umfang der Konfiguration von der Art der Systembeeinflussung abhängig. Dabei ist zu beachten, dass die hierbei durchgeführte Konfigurationsmaßnahme immer von einem bestehenden und funktionierenden Produkt- und Montagesystem ausgeht, wobei Maßnahmen zur Systemadaption durchgeführt werden, um den zuvor identifizierten Änderungsbedarfs zu befriedigen.

Bei einer *elementaren* Systembeeinflussung umfasst die Konfigurationsmaßnahme lediglich die Adaption des entsprechenden Elements, das durch die ausgewählte Maßnahme verändert werden soll. Da die Schnittstellenspezifikationen des entsprechenden Moduls in diesem Fall unverändert bleiben, treten keine signifikanten Konsequenzen in anderen Bereichen des betrachteten Systems auf. Somit kann die Maßnahme zur Befriedigung des identifizierten Änderungsbedarfs ohne weitere Aktivitäten durchgeführt werden.

Maßnahmen mit einer *modularen* Systembeeinflussung gehen hingegen mit einer Veränderung der Schnittstellenspezifikationen des Moduls einher, was direkte und indirekte Auswirkungen auf andere Module hat. Im Regelfall lassen sich Tätigkeiten anhand der im vorangegangenen Abschnitt generierten Informationen unter Beachtung der vollständigen Wirkkette ableiten, die bei der Durchführung der analysierten Maßnahme vorzunehmen sind, um die Funktionsfähigkeit des Systems zu gewährleisten. Hierbei wird die organisatorische und zeitliche Abstimmung der einzelnen Tätigkeiten modularer Adaptionsmaßnahmen durch den Einsatz des Informationssystems unterstützt, was die Effizienz der Durchführung erhöht. Diese Tätigkeiten treten meist im Bereich des Montagesystems auf und werden durch Rüsten, durch entsprechende Qualifikation der Mitarbeiter oder im Rahmen der Instandsetzung durchgeführt.

Maßnahmen mit *struktureller* Systembeeinflussung erfordern nicht nur die Adaption einzelner Systemmodule, sondern auch eine Anpassung der Vernetzung in Form einer veränderten Verknüpfung unterschiedlicher Systembereiche. Im vorangegangenen Abschnitt wurde bereits die Montagefähigkeit einer veränderten Produktstruktur mit der bestehenden Montagelinie untersucht. Für den Fall, dass diese Montagefähigkeit nicht gegeben ist und die produktverändernde Maßnahme dennoch durchgeführt werden soll, gilt es nun, ein Vorgehen zur zielgerichteten Montagesystemadaption bereitzustellen. Üblichen Vorgehen der Montageplanung folgend, würde nach einer produktsystemspezifischen Montageablaufstrukturierung eine Abschnittsbildung anschließen, anhand dessen das Montagesystem entworfen wird (Konold und Reger 2003; Bullinger 1986). Diese Vorgehen können im fokussierten Anwendungsbereich und unter Verwendung des entwickelten Informationssystems entscheidend rationalisiert werden. Zum einen findet die Bildung eines funktionsfähigen Systems anhand vordefinierter Module bzw. durch die konfigurationsgestützte Strukturierung vorhandener Ressourcen statt. Damit sind die zur Verfügung stehenden Montageressourcen sowie deren Eigenschaften weitestgehend bekannt. Zum anderen unterstützt die semantische Beschreibung der Module innerhalb des IPM auch die Ableitung der produktsystemspezifischen Ablaufstruktur. Unter Verwendung des entwickelten Informationssystems stehen somit folgende Informationen als Ausgangspunkt zur Verfügung:

1. Produktfunktionen, Produktkomponenten und deren hierarchischen Zusammenhänge
2. Produktsystemspezifische Ablaufstruktur bzw. notwendige Montagereihenfolge des neuen oder veränderten Produkts

3. Montagefunktionen, vorhandene Montageressourcen und deren hierarchischen Zusammenhänge
4. Montagesystemspezifische Ablaufstruktur bzw. mögliche Montagereihenfolgen des vorhandenen Montagesystems

Damit soll nun die Frage beantwortet werden, wie das Montagesystem verändert werden muss, damit die Funktion in Form der Montage des veränderten Produkts erfüllt werden kann. Zunächst werden den zu untersuchenden Produktmodulen die zur Erstellung notwendigen Montagemodule zugeordnet. Dabei werden vornehmlich Produktkomponenten der Ebene der Baugruppen mit den notwendigen Ausstattungen verknüpft (Abb. 5.16). Im Anschluss lässt sich nachvollziehen, ob es geeignete Montagestationen zur Erstellung spezifischer Baugruppen gibt, wobei dies durch das Informationssystem weitestgehend automatisiert ermittelt werden kann. Sollte dies nicht für alle Baugruppen der Fall sein, so sind die jeweiligen Stationen mit den nötigen Montageressourcen auszustatten und in die entsprechende Reihenfolge zu bringen, wodurch eine grobe Ablaufstruktur des Montagesystems entsteht. Durch dieses Vorgehen kann der durch das Montagesystem ermöglichte Montageablauf verändert werden, ohne die grundlegende Verknüpfung der Montagestationen anpassen zu müssen.

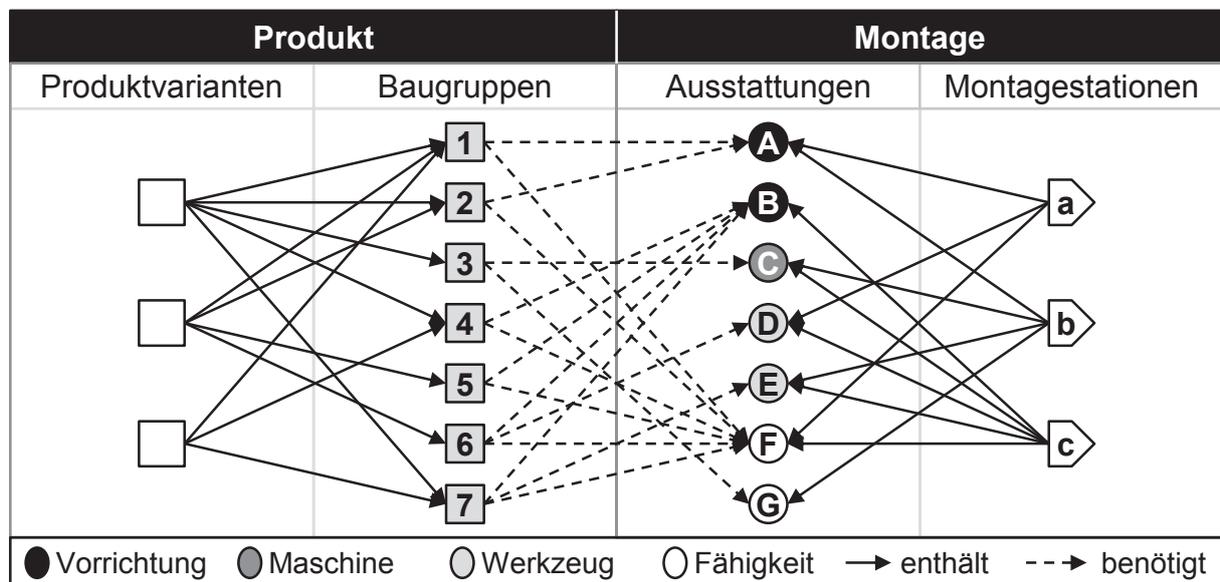


Abb. 5.16: Verknüpfung zu untersuchender Produkt- und Montagemodule

Diese Veränderung einzelner Montagestationen ist meist in Montagelinien mit hohem manuellem Anteil an der Arbeitsverrichtung möglich, da hierbei die meisten Ausstattungsgegenstände als mobil angesehen werden können und somit zwischen den Montagestationen ausgetauscht werden können. Allerdings sind bei der Bildung der veränderten Montagesystemstruktur besonders immobile Systemmodule zu beachten. Diese nicht oder nur unter großem Aufwand bewegbaren Gegenstände stellen die Randbedingungen bei der Montagesystemstrukturadaption dar. Dies ist oft in automatisierten Montagebereichen der Fall. Dabei ist die Verknüpfung der den immobilten Montagestationen mit vor- und nachgelagerten Montagestationen durch die Materialversorgung entsprechend zu gestalten.

Damit steht nun neben der produktsystemspezifischen Ablaufstruktur auch eine Reihenfolge der zum Einsatz kommenden Montagestationen zur Verfügung. Allerdings weist die Definition des Montagesystems mehrere Freiheitsgrade hinsichtlich der Organisation und des endgültigen Layouts mit der entsprechenden Materialversorgung auf. Eine Automatisierung dieser Feinplanung wird im Rahmen des vorgestellten Konzepts nicht verfolgt. Die integrierte Produkt- und Montagekonfiguration konzentriert sich auf die zuverlässige und flexible Unterstützung des Anwenders und nicht auf dessen Substitution. Die Entscheidung über die finale Zusammenstellung und Organisation des Montagesystems bleibt somit im Aufgabenbereich des Anwenders.

Durch dieses Vorgehen wird eine Steigerung der Effizienz des IPS bei häufigen Adaptionenmaßnahmen ermöglicht. Die negativen Folgen der Veränderungen wie beispielsweise Produktivitätseinbußen oder Störungen durch unvorhergesehenes Verhalten des Systems können abgeschwächt werden, da die experimentorientierte Durchführung punktueller Systemadaptionen durch eine modellgestützte umfassende Systemkonfiguration abgelöst wird. Dies ermöglicht die Absicherung der Montagefähigkeit spezifischer Produktvarianten, da das Systemverhalten bei Veränderungsmaßnahmen wie Produktänderungen mit hoher Verlässlichkeit prognostiziert werden kann. Auch die Durchführung der Systemadaption selbst kann durch die Verwendung des vorgestellten modellgestützten Vorgehens effizient gestaltet werden, da zuverlässig und exakt vorhergesagt werden kann, welche Maßnahmen wann und an welcher Stelle vorgenommen werden müssen, um eine reibungsarme Durchführung der Adaptionenmaßnahme zu gewährleisten.

5.5 Integrierte Systembewertung und Auswahlunterstützung

Die vorangegangenen Phasen des vorgestellten Konzepts zur integrierten Produkt- und Montagekonfiguration erzeugen eine Auswahl valider, das heißt möglicher Systemkonfigurationen hinsichtlich veränderter Randbedingungen. Im Folgenden wird durch eine Bewertung der konfigurierten Systemoptionen die Lösung mit der größten Zielerfüllung identifiziert und ausgewählt.

Wie bereits in Kapitel 3.6 dargestellt, ist die Zielsetzung in der industriellen Montage davon geprägt, einen individuellen Konsens zwischen den konkurrierenden Zielen der wirtschaftlichen Herstellung nachfragegerechter Produkte in einer angestrebten Qualität mit hoher Liefertreue bei gleichzeitig geringer Lieferzeit zu finden. Die Gewichtung dieser teilweise konkurrierenden Zielrichtungen ist im Einzelfall zu entscheiden und hängt stark mit der strategischen Ausrichtung des Unternehmens bzw. der Produktion zusammen. Bei einer Verfolgung kostenminimaler Strukturen und Abläufe konzentrieren sich die Ziele der Montage auf Effizienzsteigerungen sowie in der Regel auf kurzfristige Optimierungsmaßnahmen unter Zuhilfenahme von Konzepten aus dem Bereich des Lean Production und sind von einer Verlagerung der Wertschöpfung in Regionen geringer Personal- und Standortkosten geprägt. Allerdings verschieben sich diese Zielrichtungen bei einer angestrebten Technologieführerschaft mit hoher Kundennähe zu einem längerfristigen Denken unter Realisierung wandlungsfähiger Strukturen und Abläufe. Mit zunehmender Kundenorientierung und der damit im Regelfall wachsenden Anzahl von Erzeugnisvarianten rücken Aspekte der Flexibilität, der Wandlungsfähigkeit sowie der Komplexitätsbeherrschung zur schnellen und zuverlässigen Herstellung individualisierter und qualitativ hochwertiger Produkte in den Mittelpunkt der Zielsetzung industrieller Produktionen. Diese Überlegungen zeigen, dass zum Vergleich konfigurierter Systemalternativen keine singuläre Zielsetzung festgelegt werden kann, ohne den Anspruch auf Allgemeingültigkeit im einleitend spezifizierten Betrachtungsrahmen der vorgestellten Arbeit zu verlieren. Daher berücksichtigt das im Folgenden vorgestellte Bewertungsschema zum Vergleich unterschiedlicher Optionen eine individuelle und situationsbezogene Gewichtung der gesondert zu bewertenden Zielgrößen. Als Zielgrößen eines verlässlichen und aufwandsarmen Vergleichs konfigurierter Systemalternativen werden nun Bewertungskriterien definiert. Diese werden im Anschluss mittels eines paarweisen Vergleichs gewichtet und zur strukturierten Bewertung unterschiedlicher Systemkonfigurationen

herangezogen. Die damit durchzuführende Auswahl der passendsten Lösungsvariante stellt die Phase 3 der erarbeiteten Methode dar.

5.5.1 Kriterien zur Bewertung virtuell konfigurierter Systemalternativen

Gemäß des gesetzten Betrachtungsrahmens des IPS unter Konzentration auf die technisch-organisatorischen Aspekte der Montage variantenreicher Erzeugnisse werden drei Systembewertungskriterien zum umfassenden Vergleich virtuell konfigurierter Systemalternativen eingeführt: Effizienz, Zuverlässigkeit und Reaktionsfähigkeit. Diese Kriterien spannen den Bewertungsraum des Zielsystems integrierter Produkt- und Montagesysteme auf, individuelle Kundenwünsche möglichst effizient, zuverlässig und schnell in dynamischem Umfeld zu befriedigen (Fischer und Dangelmaier 2000; Jodlbauer 2007; Kletti und Schumacher 2011; Nußbaum 2011; Weber und Schäffer 2011; Spur 2012). Abb. 5.17 verdeutlicht den zu bewertenden Betrachtungsgegenstand in Form des IPS bzw. dessen virtuell konfigurierter Systemalternativen. Dabei sind die relevanten Produkt- und Montageinformationen, die Produktkomponenten und Montageressourcen sowie die Aufträge und entsprechende Auftragsprognosen als Eingangsgrößen zu beachten. Diese werden durch das IPS in Endprodukte und höherwertige Informationen gewandelt, wobei auch ungewollte Reststoffe wie Behälter, Abfälle und Emissionen auftreten. Weitere Eingangsgrößen resultieren aus individuellen Kundenwünschen, der Marktdynamik, technischen Störungen und der Mitarbeiterentwicklung in Form von Störgrößen. Das vorgestellte Bewertungsschema hat den Anspruch einer einfachen Handhabung und schnellen Durchführbarkeit.

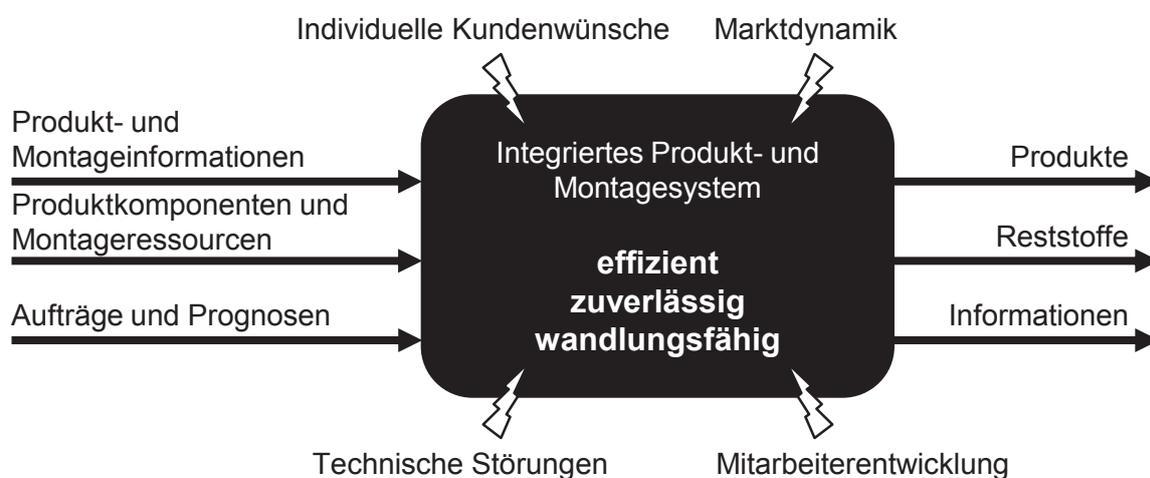


Abb. 5.17: Zielsystem in der variantenreichen Serienmontage

Dies ist hinsichtlich der Anwendung von Konfigurationskonzepten für häufige Systemadaptationen von besonderer Bedeutung, da ansonsten der Aufwand für die Bewertung den Nutzen der vorgestellten Methode übersteigt. Daher muss das Bewertungsschema einfach und schnell durchführbar sein. Abb. 5.18 veranschaulicht das aus den Schritten Bewertung, Gewichtung und Aufbereitung bestehende Bewertungsschema anhand des exemplarischen Vergleichs vier konfigurierter Systemalternativen.

Im ersten Schritt werden die verschiedenen Systemalternativen separat hinsichtlich der einzelnen Kriterien bewertet. Darauf folgend werden die einzelnen Kriterien individuell und situationsbezogen gewichtet. Diese Gewichtung geschieht unter Berücksichtigung der übergeordneten Produktions- bzw. Unternehmensziele. Im letzten Schritt werden die gewichteten Bewertungen der untersuchten Systemalternativen aufbereitet und der formalisierten Ergebnisdarstellung zugeführt.

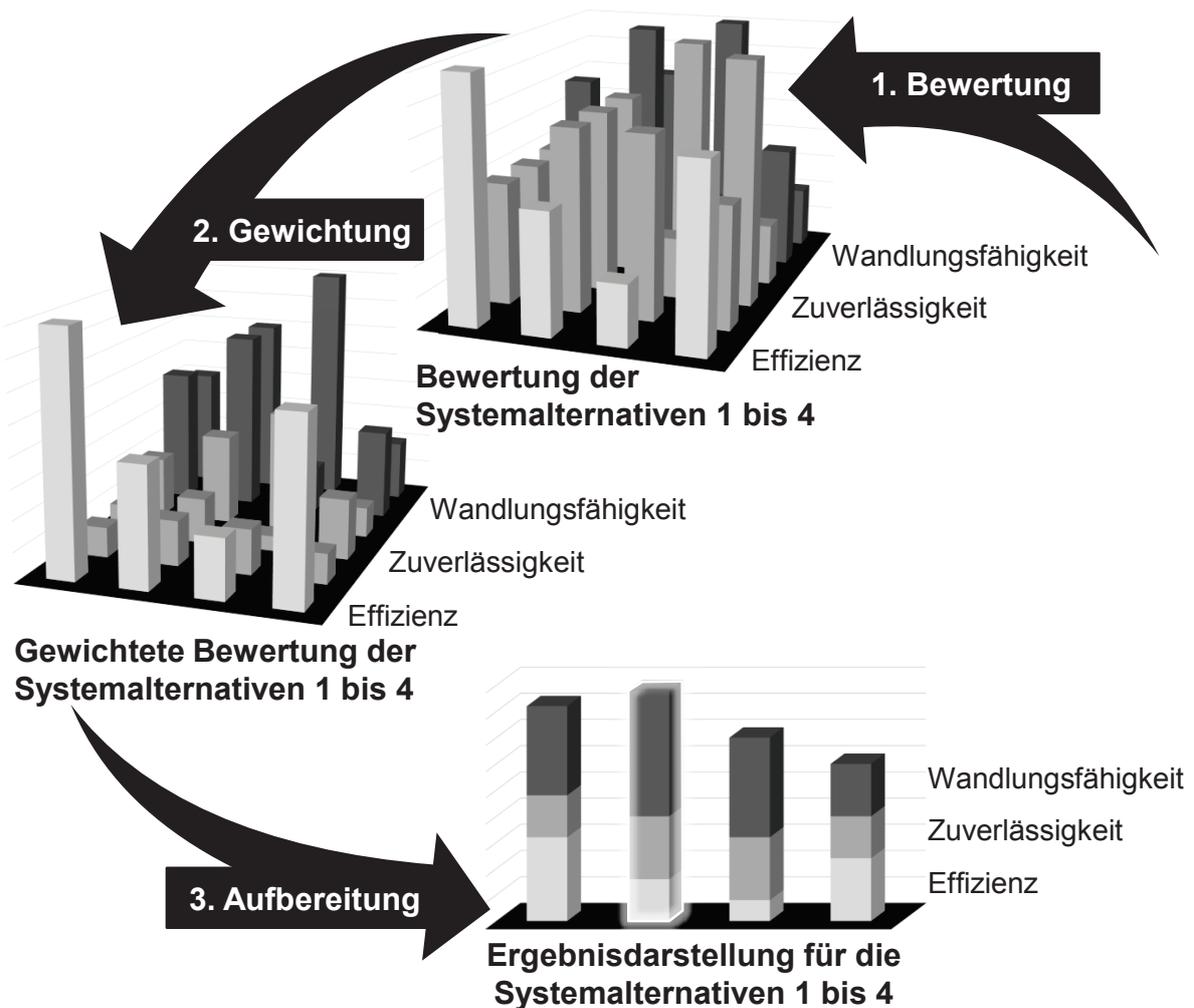


Abb. 5.18: Schema zur Bewertung konfigurierter Systemalternativen

Im Folgenden wird dieses Bewertungsschema detailliert dargestellt. Dafür werden zuerst die Systembewertungskriterien mit untergeordneten Indikatoren definiert, die einen umfassenden Vergleich der konfigurierten Systemalternativen erlauben. Anschließend wird das Vorgehen zur Erreichung einer verlässlichen Gewichtung der teilweise konkurrierenden Bewertungskriterien erläutert und eine Darstellungsmöglichkeit der Ergebnisse vorgestellt.

5.5.1.1 *Systembewertungskriterium: Effizienz*

Die *Effizienz* eines Systems wird im Allgemeinen aus dem Verhältnis von Nutzen zu Aufwand ermittelt (Patzak 1982). Die meist vom Kunden ausgehende Leistungsanforderung wird dabei als Nutzen eines IPS definiert. Diese Leistungsanforderung wird anhand der Nachfrage von Produkten in angemessener Qualität, Ausprägung und Stückzahl festgelegt. Dabei wird die Nachfrage durch Kunden- und Montageaufträge repräsentiert, die von außen auf das System einwirken. Diese Aufträge lassen sich für eine proaktive Gestaltung und Optimierung der technischen Systeme durch simulationsbasierte Abschätzungen der zukünftigen Nachfrageentwicklung erweitern. Der Aufwand wird in Form des Mitteleinsatzes zur Leistungserstellung berücksichtigt. Damit wird ein Vergleich konfigurierter Systemalternativen hinsichtlich deren Effizienz durch folgendes Systembeurteilungskriterium ermöglicht:

$$\begin{aligned} \text{Effizienz}_{\text{allg.}} &= \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \\ &:= \frac{\text{Leistungsanforderung}}{\text{Miteinsatz zur Leistungserstellung}} \end{aligned}$$

Die Leistungsanforderung wird durch die nachgefragte Gesamtmenge und den Auftragsmix des betrachteten Produkts erhoben. Zur Quantifizierung müssen die Mengen der einzelnen zu erbringenden Leistungseinheiten bekannt oder zumindest prognostizierbar sein. Davon kann auf der Ebene der Produktvarianten bei heutigen variantenreichen Erzeugnissen mit einem hohen Grad an Individualisierungsmöglichkeiten nicht mehr ausgegangen werden, da oftmals eine spezifische Variante lediglich einmal produziert wird. Daher kann auf dieser Ebene nicht auf statistische Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Als Lösung dieses Problems wird zur Quantifizierung der Leistungsanforderung die Nachfrageverteilung bzw. das Mengengerüst der Module in der Produktsystemebene der Baugruppen benutzt. Diese lässt sich aus der Häufigkeitsverteilung einzelner Module in einer Produktfamilie ermitteln. Dadurch kann die Leistungsanforderung trotz fehlender Informationen bezüglich der Nachfrage nach einzelnen Produktvarianten aus der Häufigkeitsverteilung der Module der Produktsystemebene der

Baugruppen und der nachgefragten Gesamtmenge der Produktfamilie in einem bestimmten Zeitintervall ausreichend präzise abgeschätzt und in die Zukunft projiziert werden.

Der entsprechende Mitteleinsatz zur Erstellung dieser Leistung wird anhand der vorausgewählten Systemalternativen ermittelt. Zur Quantifizierung wird hierbei der Personaleinsatz herangezogen. Entsprechend der Prämisse zur Anwendung von Konfigurationskonzepten, dass von bestehenden Systemen auszugehen ist, können die Fixkosten bei allen Systemalternativen als gleich angesehen werden. Ebenso treten keine divergierenden Investitionskosten auf. Daher kristallisieren sich die Personalkosten als bestimmende Größe bei der Quantifizierung des Mitteleinsatzes heraus. Die modulspezifischen Personalkosten ergeben sich aus dem Stundensatz des für die Erstellung eines spezifischen Baugruppenmoduls benötigten Personaltyps multipliziert mit der dafür notwendigen Zeit.

Somit lässt sich die Effizienz als quantifizierbares Systembewertungskriterium definieren:

$$Effizienz_{quant.} := \frac{\sum_1^n (M_n * i_n)}{\sum_1^n (PS_n * t_n * i_n)} \left[\frac{Stück}{Kosten} \right]$$

M: Produktmodul

i: Häufigkeit der Verwendung des Produktmoduls

PS: Personenstundensatz des zur Erstellung des Produktmoduls notwendigen Personaltyps

t: Zeit zur Erstellung des Produktmoduls

5.5.1.2 Systembewertungskriterium: Zuverlässigkeit

Das Bewertungskriterium *Zuverlässigkeit* erzeugt eine Vergleichbarkeit konfigurierter Systemalternativen hinsichtlich der Funktionsfähigkeit (VDI 3780; DIN EN 60300-1) bei Veränderungen innerhalb oder außerhalb des betrachteten IPS ohne weitere Anpassungen des Systems. Hierbei wird ebenfalls die bereits verwendete Leistungsanforderung als Funktion des IPS im Sinne der SOLL-Leistungsfähigkeit benutzt. Im Folgenden wird erläutert, wie die Zuverlässigkeit als Maß der Veränderungen definiert wird, die durch die bestehende Systemkonfiguration aufgefangen werden kann, ohne dass das Leistungsangebot unter die Leistungsanforderungen fällt und das System somit dessen Funktion nicht mehr erfüllt (Abb. 5.19).

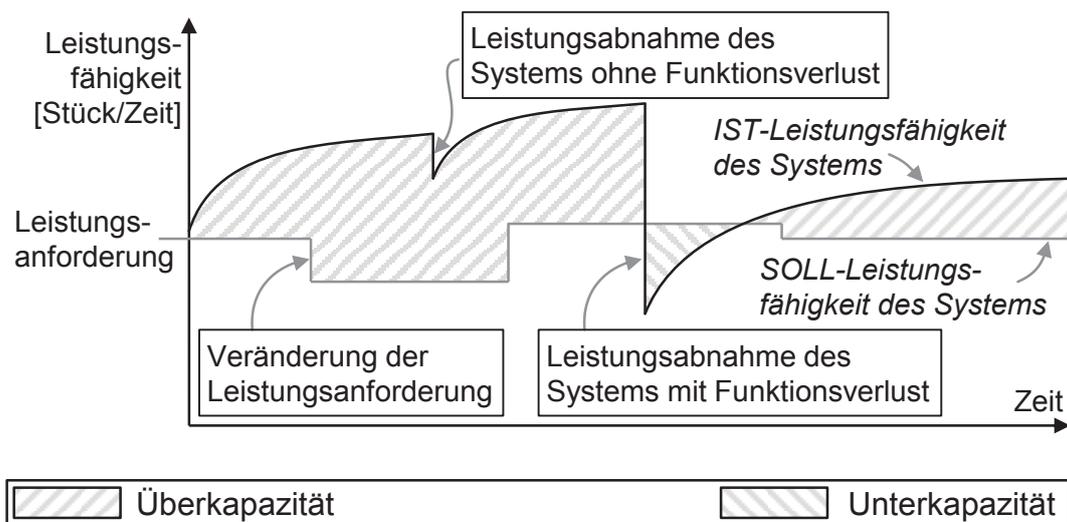


Abb. 5.19: Leistungsanforderung und Leistungsfähigkeit in der Montage

Als relevante Einflüsse auf das betrachtete IPS werden im Rahmen der Bewertung der Systemzuverlässigkeit Veränderungen in der nachgefragten Menge oder dem nachgefragten Typ an Leistungen sowie technische oder personelle Störungen betrachtet. Zur Bewertung des Zuverlässigkeitsverhaltens werden die Flexibilitätskorridore des Systems untersucht. Dabei werden in Anlehnung an (Tidd 1997) folgende montagerelevanten Arten der Flexibilität unterschieden:

- Der Umfang an möglichen Veränderungen in der Menge zu produzierender Produktmodule wird durch die *Volumenflexibilität* beschrieben.
- Die *Variantenflexibilität* umfasst die Menge an unterschiedlichen Typen von Produktmodulen, die durch das unveränderte IPS hergestellt werden können, wobei nach Möglichkeit in Abhängigkeit der jeweiligen Prognostizierbarkeit auch neue Varianten zu berücksichtigen sind.
- Die Fähigkeit des Systems, Produktmodule auf unterschiedlichen Wegen bzw. unter Verwendung unterschiedlicher Ressourcen zu montieren wird durch die *Montageflexibilität* zusammengefasst.

Zur Messung der unterschiedlichen Flexibilitätskorridore ist eine Vielzahl an meist sehr umfangreichen Methoden vorhanden, die eine tiefgehende Analyse der Flexibilität ermöglichen (Roscher 2007). Die Bewertung der Zuverlässigkeit der konfigurierten Systemalternativen im Rahmen der vorgestellten Arbeit hat jedoch den Anspruch auf eine geringe Komplexität und hohe Anwenderfreundlichkeit. Außerdem ist eine detaillierte Analyse für

den vorliegenden Zweck nicht notwendig, da lediglich ein Vergleich unterschiedlicher Systemkonfigurationen ermöglicht werden soll.

Als Orientierung für die Quantifizierung der Flexibilitätskorridore wird die Leistungsanforderung in Form von aktuellen und prognostizierten Montageaufträgen spezifischer Baugruppenmodule für ein bestimmtes Zeitintervall herangezogen. Dafür bietet sich unter anderem die Szenario-Technik an (Gausemeier et al. 2009), die allerdings nicht Gegenstand des vorgestellten Bewertungsschemas ist. Die Erhebung der Leistungsanforderung wird als gegeben betrachtet. Insofern keine Prognose vorhanden sein sollte, ist die zuverlässigkeitsspezifische Bewertung so gestaltet, dass auch die Verwendung aktueller Montageaufträge zur Identifikation der Leistungsanforderung zu einem aussagekräftigen Vergleich führen kann.

Zur *volumenspezifischen* Bewertung der Zuverlässigkeit werden die maximalen Kapazitäten der konfigurierten Systemalternativen hinsichtlich einzelner Baugruppenmodule ermittelt. Dafür werden die maximalen Stückzahlen benutzt, die die zu bewertende virtuelle Systemkonfiguration in einem bestimmten Zeitintervall herstellen kann. Die Betrachtung einer Untergrenze an Stückzahlen einer wirtschaftlichen Montage ist nicht nötig, da die damit verbundenen Aspekte im Rahmen der Effizienzbewertung abgedeckt werden. Bei der Bewertung der volumenspezifischen Zuverlässigkeit genügt somit die montagekapazitätsbezogene Anzahl in einem bestimmten Zeitintervall produzierbarer Baugruppenmodule, wobei hier ein möglichst hoher Wert anzustreben ist. Damit ist die Systemalternative mit der größten stückzahlbezogenen Leistungsfähigkeit des Montagesystems mit der höchsten *volumenflexibilitätsbezogenen Zuverlässigkeit* zu bewerten.

Die Systemzuverlässigkeit hinsichtlich der *Variantenflexibilität* wird durch die Anzahl voneinander unterscheidbarer Baugruppenmodule ausgedrückt, die durch die jeweilige Systemalternative berücksichtigt wird. Dabei wird die Differenz aus den geforderten und den durch das IPS herstellbaren Baugruppenvarianten gebildet. Die Anzahl der geforderten Varianten wird wiederum aus der bereits mehrmals verwendeten Leistungsanforderung ermittelt. Unter Verwendung der entwickelten Softwareunterstützung lässt sich die Anzahl der durch das konfigurierte Montagesystem herstellbaren Baugruppenvarianten kalkulieren. Hinsichtlich der *variantenflexibilitätsbezogenen Zuverlässigkeit* ist die Systemalternative am höchsten zu bewerten, die die meisten Baugruppenvarianten in Bezug auf die geforderte Anzahl unterscheidbarer Varianten bilden kann.

Die *Montageflexibilität* der zu vergleichenden Alternativen weist die größte Relevanz der drei betrachteten Zuverlässigkeitsformen hinsichtlich des Systemverhaltens bei personellen oder technischen Störungen auf. Deren quantitative Bewertung ist jedoch schwierig bzw. mit hohem Aufwand verbunden. Die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) bzw. deren prozessorientierte Weiterentwicklung in Form der Prozess-FMEA stellt dabei eine Methode zur differenzierten Betrachtung möglicher Fehler, deren Eintrittswahrscheinlichkeiten und Einflüsse in der Produktion zur Verfügung (VDA 2010). Diese eignet sich für eine detaillierte Auseinandersetzung mit der montagebezogenen Zuverlässigkeit. Für die vergleichende Bewertung konfigurierter Systemoptionen kann auch hier eine Abstraktion zur Sicherung der aufwandsarmen Handhabung des Bewertungsschemas stattfinden. Als Ausgangsbasis für die diesbezügliche Untersuchung werden kritische Produktmodule ermittelt. Dafür kann das im Rahmen der Effizienzbewertung benutzte Mengengerüst des Produktsystems wiederverwendet werden, um Produktmodule mit vielfacher Verwendung in unterschiedlichen Produktvarianten zu identifizieren. Anschließend werden unter Verwendung des Informationssystems die zur Herstellung eingesetzten Montagemodule in den jeweiligen Systemkonfigurationen bestimmt. Diese Montagemodule werden dann einer näheren Analyse zugeführt. Dabei werden alternative Montagemodule ermittelt, die in der Lage sind, das entsprechende Produktmodul zu bilden. Aus der jeweiligen Anzahl alternativer Montagemöglichkeiten lässt sich ein Vergleich konfigurierter Systemalternativen hinsichtlich der montage-spezifischen Zuverlässigkeit ableiten. Dabei ist einerseits eine Gewichtung der Bedeutung einzelner Baugruppenmodule für die Systemfunktion und andererseits eine Gewichtung der Montagesignifikanz vorzunehmen. Die Bedeutung einzelner Baugruppenmodule wird über die Häufigkeit deren Verwendung in unterschiedlichen Produktvarianten ausgedrückt. Die Quantifizierung der Montagesignifikanz wird hingegen durch die Anzahl der möglichen Montagealternativen zur Erzeugung der jeweiligen Baugruppenmodule vorgenommen. Damit ist die Systemkonfiguration hinsichtlich ihrer *montageflexibilitätsbezogenen Systemzuverlässigkeit* am höchsten zu bewerten, die eine möglichst geringe Mehrfachverwendung einzelner Baugruppenmodule unter Bereitstellung ausreichender Montagealternativen für kritische Baugruppenmodule aufweist.

Anhand dieser drei Flexibilitätsaspekte (Indikatoren) werden die konfigurierten Systemalternativen verglichen, deren volumen-, produkt- sowie montagebezogene Zuverlässigkeit bewertet und in einer Rangfolge angeordnet. Es fällt auf, dass die Zuverlässigkeit in der

Form, wie sie hier bewertet wird, mit Überkapazitäten verbunden ist. Diese Überkapazitäten äußern sich einerseits im Produktsystem durch die Vorhaltung möglicher Produktvarianten ohne nennenswerte Nachfrage und andererseits im Montagesystem durch die Vorhaltung redundanter und volumen- sowie produkttypenspezifisch überdimensionierter Montageresourcen. Dadurch steht sie in direkter Konkurrenz zur zuvor bewerteten Effizienz, bei der die möglichst exakte Entsprechung der Leistungsanforderung und der Leistungsbereitstellung angestrebt wird, um möglichst geringen Mitteleinsatz bei der Leistungserstellung zu erreichen. Damit weisen diese ersten beiden Systembewertungskriterien einen komplementären Charakter auf und decken bereits ein weites Feld der Bewertung produktionsnaher Systeme auf. Im Folgenden wird dieser Bereich durch die Bewertung der konfigurierten Systemalternativen hinsichtlich deren Anpassungsfähigkeit an veränderte Randbedingungen und Zielzustände erweitert, um ein umfassendes Bewertungsschema zu realisieren.

5.5.1.3 *Systembewertungskriterium: Wandlungsfähigkeit*

Das Bewertungskriterium *Wandlungsfähigkeit* erzeugt eine Vergleichbarkeit konfigurierter Alternativen hinsichtlich der Fähigkeit des Systems sich unter möglichst geringem Aufwand an veränderte Randbedingungen und Zielzustände anzupassen, die außerhalb des vorgeplanten Handlungsspielraums (Vgl. Flexibilitätskorridore) liegen (Westkämper et al. 2000; Wiendahl und Hernández Morales 2000). Dabei gilt die Systemalternative als besonders wandlungsfähig, die den geringsten Aufwand für Adaptionen des Produkt- oder des Montagesystems aufweisen. Dieser Aufwand lässt sich montageseitig durch den sogenannten Rüstgrad messen, wobei die Rüstzeit ins Verhältnis zur Summe aus Rüstzeit und Maschinenlaufzeit gesetzt wird (Kletti und Schumacher 2011). Es ist jedoch meist nicht möglich, diese Werte im Rahmen der virtuellen Produkt- und Montagekonfiguration durch den häufigen Mangel an historischen Werten und verlässlichen Prognosen in der variantenreichen Serienmontage hinreichend präzise zu bestimmen. Daher muss eine tiefere Analyse der Wandlungsfähigkeit stattfinden, um messbare Faktoren zu identifizieren, unter deren Verwendung ein Vergleich konfigurierter Systemalternativen hinsichtlich deren Wandlungsfähigkeit möglich ist. Abb. 5.20 veranschaulicht relevante Aspekte zur Erzeugung wandlungsfähiger Strukturen.

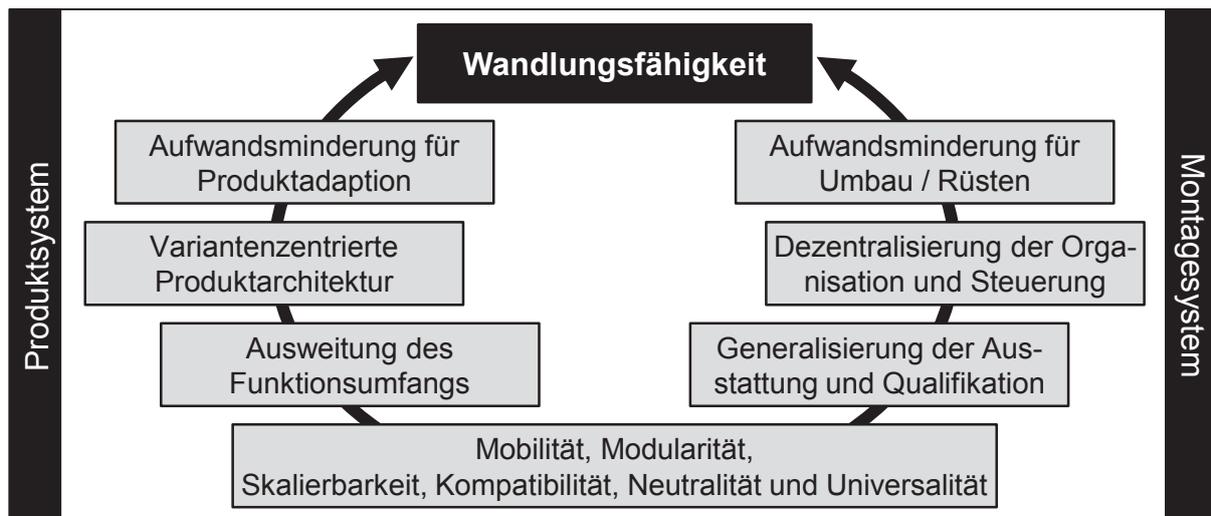


Abb. 5.20: Aspekte technischer Wandlungsfähigkeit

Als Fundament gilt hierbei die Anwendung der als Wandlungsbefähiger bezeichneten Prinzipien Mobilität, Modularität, Skalierbarkeit, Kompatibilität, Neutralität und Universalität nicht nur in den technischen Produktkomponenten und Montageeinrichtungen, sondern auch in Entwicklungs- und Planungsphasen sowie in den eingesetzten Informations- und Kommunikationssystemen (Denkena und Drabow 2005). Dadurch wird der Aufwand für situationorientierte Veränderungen des Produktsystems durch Produktadaptionen oder -einführungen sowie für die Veränderung des Montagesystems durch Umbau- oder Rüstmaßnahmen verringert. Die Aspekte der Skalierbarkeit, Kompatibilität, Neutralität und Universalität werden im Rahmen des vorgestellten Konzepts durch die konfigurationsgestützten Adaptionsmaßnahmen eines *bestehenden* Systems nicht signifikant beeinflusst. Daher werden diese Aspekte zur vergleichenden Bewertung konfigurierter Systemalternativen nicht berücksichtigt, um den Aufwand bei der Anwendung des Bewertungsschemas zu reduzieren. Somit findet eine Konzentration auf die beiden Prinzipien Mobilität und Modularität statt, die im Folgenden als Indikatoren für eine multikriterielle Bewertung der technischen Wandlungsfähigkeit des betrachteten IPS verwendet werden. Für eine tiefgreifende Analyse der Messung der Wandlungsfähigkeit wird an dieser Stelle auf (Heger 2007) verwiesen.

Bei der Bewertung der *Mobilität* findet eine Konzentration auf die technischen Module des Montagesystems statt. Es werden Montagemodule unterster Ebene – meist der Ebene der Ausstattungen – bewertet, die in der jeweiligen Systemkonfiguration zum Einsatz kommen. Diese sind in vier Mobilitätskategorien einzuordnen:

- Vollständige Mobilität: Uneingeschränkte Beweglichkeit des Moduls ohne Hilfsmittel.
Diese Mobilitätsform wird mit dem Wert 0 klassifiziert.
- Eingeschränkte Mobilität: Beweglichkeit des Moduls nur unter Verwendung mechanischer Hilfsmittel wie mechanische Hebezeuge oder Hubwagen.
Diese Mobilitätsform wird mit dem Wert 1 klassifiziert.
- Stark eingeschränkte Mobilität: Beweglichkeit des Moduls nur unter Verwendung maschineller Hilfsmittel wie Gabelstapler oder elektrische Laufkatzen.
Diese Mobilitätsform wird mit dem Wert 2 klassifiziert.
- Immobilität: Unbeweglichkeit des Moduls beispielsweise aufgrund der Notwendigkeit eines Fundaments.
Diese Mobilitätsform wird mit dem Wert 3 klassifiziert.

Damit lassen sich die einzelnen Montagemodule hinsichtlich ihrer Mobilität bewerten und zu einem Mobilitätsindex der einzelnen Systemkonfigurationen aufsummieren. Zu beachten gilt hierbei, dass vollkommen mobile Module mit dem Wert 0 klassifiziert werden und damit auch von vornherein bei der Beurteilung der Mobilität vernachlässigt werden können. Dies unterstützt die schnelle Durchführbarkeit des vorgestellten Bewertungsschemas. Dabei ist die Konfiguration mit dem geringsten Wert hinsichtlich ihrer systemimmanenten *Mobilität* zu bevorzugen.

Die *Modularität* kann durch den Modularisierungsgrad quantifiziert werden. Der Modularisierungsgrad wird als das Verhältnis zwischen der Anzahl der Interaktionen innerhalb und zwischen den Modulen definiert (Weber 1998). Allerdings ist die Ermittlung dieses Verhältnisses mit hohem Aufwand verbunden, was dazu führt, dass der Modularisierungsgrad lediglich als Grundlage benutzt wird. Zur Unterstützung einer aufwandsarmen Durchführung des Bewertungsschemas kann für den Vergleich der Modularität konfigurierter Systemlösungen ebenso die Gesamtanzahl der Module benutzt werden. Diese Abstraktion ist zulässig, da das Ziel der verschiedenen Systemalternativen gleich ist und somit das gleiche Optimum verfolgt wird. Damit ist die Systemalternative hinsichtlich der Modularität am besten zu bewerten, die die meisten Module aufweist, da generell davon auszugehen ist, dass eine höhere Modularität die Veränderbarkeit und damit die Wandlungsfähigkeit steigert. Allerdings werden durch die Erhöhung der Anzahl an Modulen auch der Entwicklungsaufwand und die Schnittstellenanforderungen aufgrund vermehrter Kombinationsmöglichkeiten erhöht.

Dieser Mehraufwand weist keinen direkten Beitrag zur Systemfunktion auf. Daher ist die Erhöhung der Modularität im Allgemeinen mit Effizienzeinbußen verbunden. Da diese Einbußen bereits in die Bewertung der Effizienz einfließen, können sie im Rahmen der Bewertung der Wandlungsfähigkeit unberücksichtigt bleiben. Damit wird eine separate Bewertung der konkurrierenden Aspekte sichergestellt, woraus im Anschluss durch die gewichtete Gesamtbewertung im Rahmen der strukturierten Auswahlunterstützung das situationsbezogene Systemoptimum identifiziert wird.

5.5.2 Strukturierte Auswahlunterstützung

Nach der spezifischen Bewertung des betrachteten IPS und dessen Module werden die konfigurierten Systemalternativen anhand der parametrisierten Systembewertungskriterien verglichen. Dazu werden die entsprechenden Systembewertungskriterien mit den untergeordneten Indikatoren gewichtet. Zur strukturierten Durchführung dieser Gewichtung wird ein paarweiser Vergleich benutzt. Tabelle 6 zeigt eine solche Aufstellung.

Gewichtung der Systembewertungskriterien und untergeordneter Indikatoren	Effizienz	Zuverlässigkeit	Volumenflexibilität	Variantenflexibilität	Montageflexibilität	Wandlungsfähigkeit	Mobilität	Modularität	Summe	Ausgleichsfaktor	Gewichtungsfaktor
Effizienz			2	1	0		1	0	4	1	4
Zuverlässigkeit											(4)
Volumenflexibilität	0			1	0		1	1	3	1/3	1
Variantenflexibilität	1		1		1		0	0	3	1/3	1
Montageflexibilität	2		2	1			1	0	6	1/3	2
Wandlungsfähigkeit											(7)
Mobilität	1		1	2	1			1	6	1/2	3
Modularität	2		1	2	2		1		8	1/2	4
Summe											15
0: Geringere Bedeutung		1: Gleiche Bedeutung				2: Höhere Bedeutung					

Tabelle 6: Gewichtung der Systembewertungskriterien und Indikatoren

Dabei werden die einzelnen Kriterien und Indikatoren gegenübergestellt und deren Bedeutung gegenseitig abgewogen. Die dazu benutzte Matrix wird zeilenweise ausgefüllt, wobei in die Zelle eine 0 eingetragen wird, in der sich die betrachtete Zeile mit der Spalte eines wichtigeren Kriteriums kreuzt. Eine 1 wird zur Kennzeichnung einer Gleichwertigkeit der beiden Kriterien benutzt und eine 2 wird in dem Fall eingetragen, dass das Kriterium in der Zeile als wichtiger angesehen wird, als das Kriterium in der entsprechenden Spalte. In der ausgefüllten Matrix werden anschließend die Zahlenwerte zeilenweise aufsummiert und in einen Gewichtungsfaktor übersetzt. Zur Übersetzung werden Ausgleichfaktoren benutzt, die die Aufgabe haben, eine initiale Gleichwertigkeit der drei Kriterien Effizienz, Zuverlässigkeit und Wandlungsfähigkeit zu erzeugen.

Nun folgt die Bewertung der konfigurierten Systemalternativen ebenfalls als paarweiser Vergleich mit anschließender Gewichtung der einzelnen Systembewertungskriterien und Indikatoren (Tabelle 7).

Kriterien	Systemalternative (SV)			Summe	Gewichtung	Gew. Wert	
		SV1	SV2				
Effizienz	SV1	-	2	2	4	8	
	SV2	0	-	0		0	
Zuverlässigkeit							
Volumenflexibilität	SV1	-	2	2	1	2	
	SV2	0	-	0		0	
Variantenflexibilität	SV1	-	1	1	1	1	
	SV2	1	-	1		1	
Montageflexibilität	SV1	-	0	0	2	0	
	SV2	2	-	2		4	
Wandlungsfähigkeit							
Mobilität	SV1	-	2	2	3	6	
	SV2	0	-	0		0	
Modularität	SV1	-	0	0	4	0	
	SV2	2	-	2		8	
Summe (gewichtet)	SV1						17
	SV2						13
0: Geringere Bedeutung		1: Gleiche Bedeutung		2: Höhere Bedeutung			

Tabelle 7: Bewertung konfigurierter Systemalternativen

In der exemplarischen Bewertungstabelle werden zwei konfigurierte Systemalternativen (SV1 und SV2) verglichen. Dabei wird die zuvor getroffene Gewichtung angewendet, die in Tabelle 6 exemplarisch dargestellt ist. Dabei wird zur Auswahlunterstützung SV1 als umzusetzende Systemkonfiguration empfohlen.

Damit wird die ganzheitliche Bewertung konfigurierter Lösungsalternativen eines betrachteten IPS umgesetzt. Durch anwendungsspezifische Abstraktionen bekannter Methoden und Kennwerte wird der Durchführungsaufwand verringert. Dies erhöht ebenso wie die intuitive Bedienung und die flexible Informationsbereitstellung durch das entwickelte Informationssystem die Akzeptanz der vorgestellten integrierten Produkt- und Montagekonfiguration und forciert somit eine industrielle Anwendung. Die favorisierte Systemalternative sollte damit mit der am besten bewerteten Systemalternative korrelieren. Das muss nicht zwingend der Fall sein, da die durch ein IPS verfolgten Ziele sehr vielfältig sein können und eventuell auch von weichen Faktoren wie persönlichen Vorlieben oder politischen Beweggründen geprägt sein können. Dies ist durch den weiten Bereich an Fachdisziplinen und organisatorischen Domänen im Unternehmen, der durch solch ein System abgedeckt wird, nicht auszuschließen.

Damit ist das dreiphasige Vorgehen der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration abgeschlossen. Als Zusatz wurde bereits dargelegt, dass die Dynamik und Volatilität der betrachteten Systeme große Herausforderungen für die Konzeptualisierung hinsichtlich Aktualität und Akkuranz der modellierten Informationen darstellen. Wie diesen Herausforderungen im Rahmen des vorgestellten Konzepts begegnet wird, wird im Folgenden erläutert.

5.6 Regelkreisbasierte Dynamisierung

Zur integrierten Konfiguration des Produkts und dessen Montage ist ein hoher Detailgrad bei der Konzeptualisierung notwendig, da es vielfältige Wechselwirkungen zwischen den Modulen innerhalb des betrachteten IPS gibt. Auch geringfügige Veränderungen des Systems auf der Ebene einzelner Bauteile oder der Ausstattung von Montagestationen können weitreichende Konsequenzen für das technische System, dessen Struktur und dessen Organisation haben. In der Konzeptualisierung in Form des IPM wird dieser Umstand dadurch berücksichtigt, dass die Beziehungen zwischen Modulen auch über die Grenzen einzelner strukturierender Kategorien und Ebenen hinweg zugelassen werden. Die Verwendung dieses Modells zur bereits vorgestellten modellbasierten Problemlösungsunterstützung ist von der Zuverlässigkeit

der durch das IPM bereitgestellten Informationen abhängig. Allerdings ist das System nicht nur sich permanent ändernden äußeren Einflüssen wie Randbedingungen und Zielzuständen ausgesetzt, sondern ist selbst auch in allen Modulen einem ständigen Wandel unterworfen. Daher muss eine enge Verbindung zwischen dem realen System und dessen digitalem Modell vorhanden sein, um diese Zuverlässigkeit im Sinne der Akkuranz und Aktualität modellierter Informationen zu erzeugen und langfristig zu sichern. Dafür wird ein Vorgehen aus zwei sich ergänzenden Kreisläufen vorgestellt: Die Erzeugung des Systemverständnisses und dessen Anwendung. Abb. 5.21 veranschaulicht das Zusammenspiel der komplementären Kreisläufe. Zur *Erzeugung des Systemverständnisses* wird das zukünftige System in einer virtuellen Umgebung erzeugt. Dazu werden unter Verwendung eines digitalen Systemmodells Experimente, Analysen und Auswertungen durchgeführt, deren Ergebnisse formuliert und zur Adaption des Modells eingesetzt.

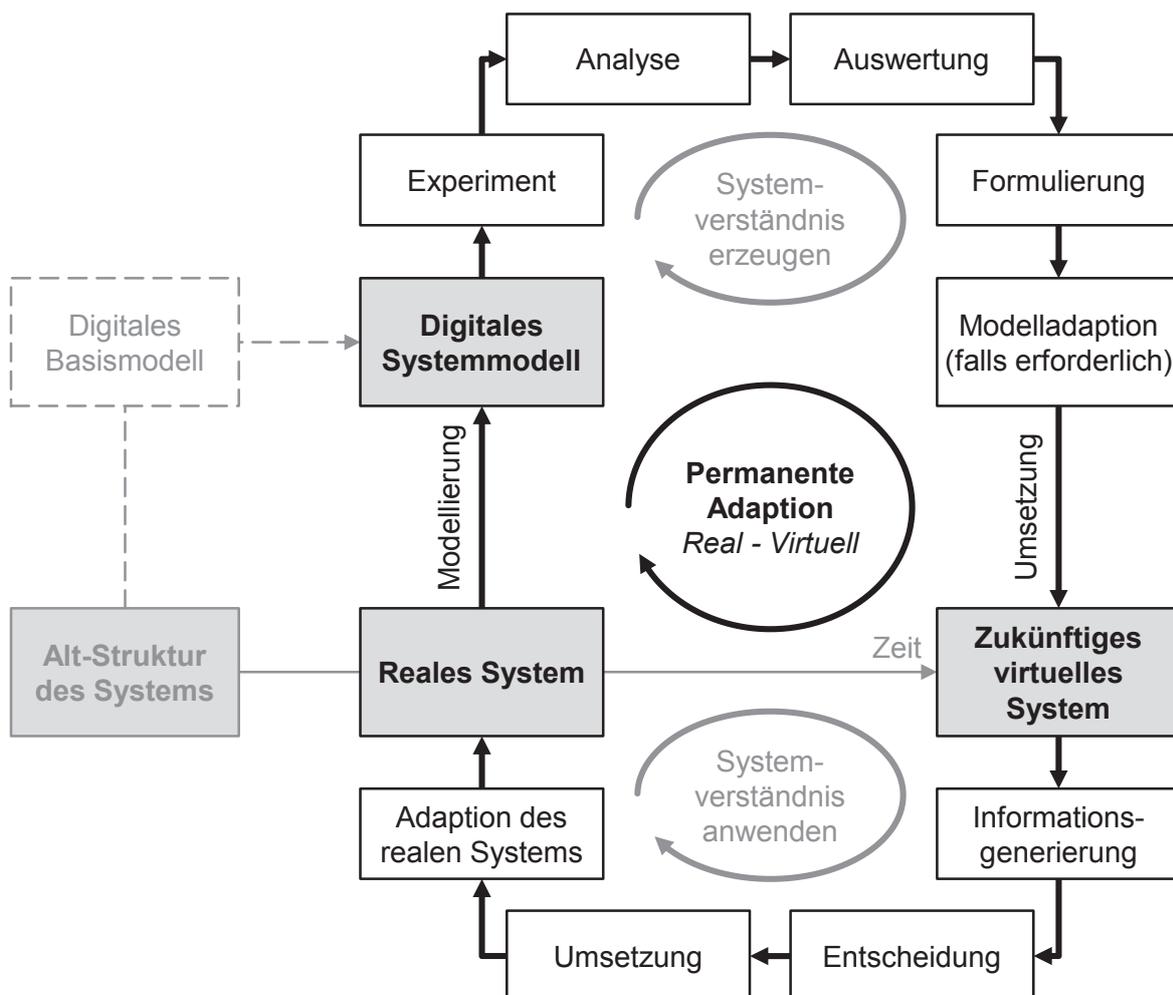


Abb. 5.21: Regelkreisbasierte Dynamisierung des konzeptualisierten IPS

Dieses Prinzip wird im Rahmen der zweiten Phase der vorgestellten Methode, der virtuellen Produkt- und Montagekonfiguration, angewandt. Dabei stellen die konfigurierten Systemalternativen virtuelle Modelle des zukünftigen Systems dar, was den ersten Kreislauf mit dem Ziel der Förderung und Erzeugung des Systemverständnisses komplettiert. Dieser Kreislauf geht somit von einem digitalen Abbild des realen Systems aus und leitet daraus mögliche zukünftige Zustände des Systems ab. Das entspricht einer Erweiterung des statischen Abbilds des betrachteten IPS um eine zeitliche Komponente. Diese Projektion zukünftiger Optionen wird in Anlehnung an (Westkämper 2006a) als Unterscheidung zwischen digitalem und virtuellem Modell benutzt. Auch hier wird bereits ein iteratives Vorgehen empfohlen, das eine Wiederholung der einzelnen Schritte vorsieht, um mehrere potenzielle Systemalternativen zu erzeugen. Die Erkenntnisse vorangegangener Iterationen werden dabei bereits zur Anpassung und Optimierung des ursprünglichen digitalen Modells benutzt.

Der zweite Kreislauf verwendet diese virtuellen Systemkonfigurationen und leitet daraus Erkenntnisse zur Anpassung des realen Systems ab. Das wird als *Anwendung des Systemverständnisses* verstanden. Hierbei werden zuerst Informationen in Form der Systemalternativen generiert und formalisiert, so dass sie einer Bewertung zugeführt werden können. Anhand dieser Bewertung unter Berücksichtigung der verfolgten Ziele wird die favorisierte Systemkonfiguration ausgewählt und umgesetzt. Diese Umsetzung stellt eine Adaption des realen Systems dar. Die Adaption muss dabei direkt in eine Adaption des digitalen Systemmodells übersetzt werden. So kann die Aktualität des IPM sichergestellt werden. Während der Umsetzung bzw. der diesbezüglichen Planung ist ein ständiger Abgleich der virtuellen Systemalternative mit dem realen System vorgesehen. Auf diese Weise können die relevanten Informationen zielführend eingesetzt werden. Auch das Modell der Systemalternative wird anhand der während dessen Umsetzung entstehenden Informationen aktualisiert.

Durch dieses regelkreisbasierte Verständnis lässt sich erkennen, wie das reale System in ein digitales Modell übersetzt wird und anschließend der erste Kreislauf zwischen dem digitalen und dem virtuellen Systemmodell wirkt. Der zweite Kreislauf verknüpft dieses virtuelle Abbild zukünftiger Konfigurationen wiederum mit dem realen System. Durch die Kombination dieser beiden Kreisläufe kann eine permanente Adaption des digitalen Systemmodells sowie dessen virtueller Projektionen realisiert werden. Damit ergibt sich ein geschlossener Regelkreis, in dem ein ständig aktuelles digitales Modell des realen Systems umsetzbar ist.

Gerade die Aufnahme von geplanten und besonders ungeplanten Veränderungen des Systems stellt eine große Herausforderung bei der Umsetzung dieser regelkreisbasierten Dynamisierung des IPM dar, die in der kritischen Diskussion der Zielerreichung der vorgestellten Methode weiter ausgeführt wird (Kapitel 6.3). Das vorgestellte Vorgehen zur Dynamisierung von Modellen volatiler Systeme stellt dafür eine konzeptuelle Basis zur Verfügung. Diese Basis wird in der folgenden Validierung in Form einer praktischen Anwendung in industriellem Umfeld benutzt, wobei die Aufnahme von Veränderungen manuell stattfindet.

6 Validierung des Konzepts im industriellen Einsatz

Die integrierte Produkt- und Montagekonfiguration wurde in einem Unternehmen der Automobilindustrie umgesetzt, um die Durchführbarkeit im industriellen Umfeld zu verifizieren und den Nutzen zu evaluieren. Dafür wird gemäß der Ausgangssituation (Kapitel 1.1) die Montage variantenreicher Erzeugnisse in Form eines Fahrersitzes ausgewählt. Die entsprechenden Realdaten des Produkts wurden in Verbindung mit dem vorhandenen Montagesystem vollständig konzeptualisiert und als IPM modelliert sowie unter Verwendung von Konfigurationskonzepten auf dessen Verhalten bei Variation der äußeren Einflüsse und inneren Systemkomponenten überprüft. Abschließend erfolgte der Vergleich konfigurierter Systemalternativen unter Verwendung des vorgestellten Bewertungsschemas im Rahmen des zielgerichteten Auswahlprozesses. Diese Validierung wird im Folgenden erläutert, bevor das Kapitel mit einer kritischen Würdigung der Forschungs- und Validierungsergebnisse schließt.

6.1 Konzeptualisierung eines IPS in der Automobilindustrie

Das betrachtete Produktsystem umfasst eine Autositzfamilie mit unterschiedlichen Farb- und Materialkombinationen, Sitztypen, Ausstattungsmerkmalen und länderspezifischen Unterschieden. Dieses wird auf der Montagelinie hergestellt, die in Abb. 6.1 dargestellt ist.



Abb. 6.1: Montagelinie der zur Validierung verwendeten Autositzfertigung

Die Montagelinie umfasst zwei Vormontagebereiche (1 und 3), 19 Montagestationen (2) mit individueller Ausstattung sowie eine Kalibrier- und eine Prüfstation (4). Die Materialbereitstellung findet an den jeweiligen Stationen durch ein Kanban-System statt und die materialflussspezifische Verknüpfung der Montagestationen wird durch ein umlaufendes Transportsystem realisiert. Nach der Kalibrierung und Prüfung werden die montierten Autositze über einen Aufzug zum Kommissionierbereich abtransportiert (5). Erster Schritt der Konzeptualisierung der Montagelinie ist die Aufnahme der Elemente und Funktionen. Tabelle 8 gibt eine gekürzte Übersicht über die Aufstellung der Montagestationen, deren Reihenfolge, Ausstattungen, Automaten und Montagefunktionen.

Montagestation	Ausstattung			Automat	Montagefunktion
	Werkzeug	Vorrichtung	Fähigkeit		
1.1	Einhängewerkzeug Industrieschrauber 1	Fixierschiene Lehne	Monteur		Einhängen Einlegen/Einsetzen
1.2		Fixierarme	Monteur, Maschinenbed.	Schraub-anlage	Schrauben
1	Industrieschrauber 2 und 3	Fixier-vorrichtung	Monteur		Schrauben
2	Industrieschrauber 4	Fixier-vorrichtung	Monteur		Schrauben
...

Tabelle 8: Aufstellung der Elemente und Funktionen der Montagelinie

Die Klasse der Ausstattungen umfasst 42 Fähigkeiten, Werkzeuge, Vorrichtungen und Prüfgerätschaften die den 19 Montagestationen, der Kalibrier- und der Prüfstation sowie den zwei Vormontagebereichen zugeordnet werden. Die Stationen werden wiederum zu 4 Montagezellen zusammengefasst, die die Montagelinie bilden, deren konzeptualisierte Ablaufstruktur in Abb. 6.2 dargestellt ist. Bei dieser Darstellung wird erkennbar, dass die Montagestationen 17, 18 und 19 ausgegraut sind. Dies soll die Inaktivität dieser Stationen ausdrücken, die im Bedarfsfall schnell aktiviert werden können. Damit können diese Stationen als Überkapazitäten identifiziert werden. Durch die Zuordnung der Ausstattungen und der ausführbaren Montagefunktionen gemäß der Aufstellung in Abb. 3.7, wird ein umfassendes Modell der funktionalen Kapazitäten und Strukturen der Montagelinie erzeugt.

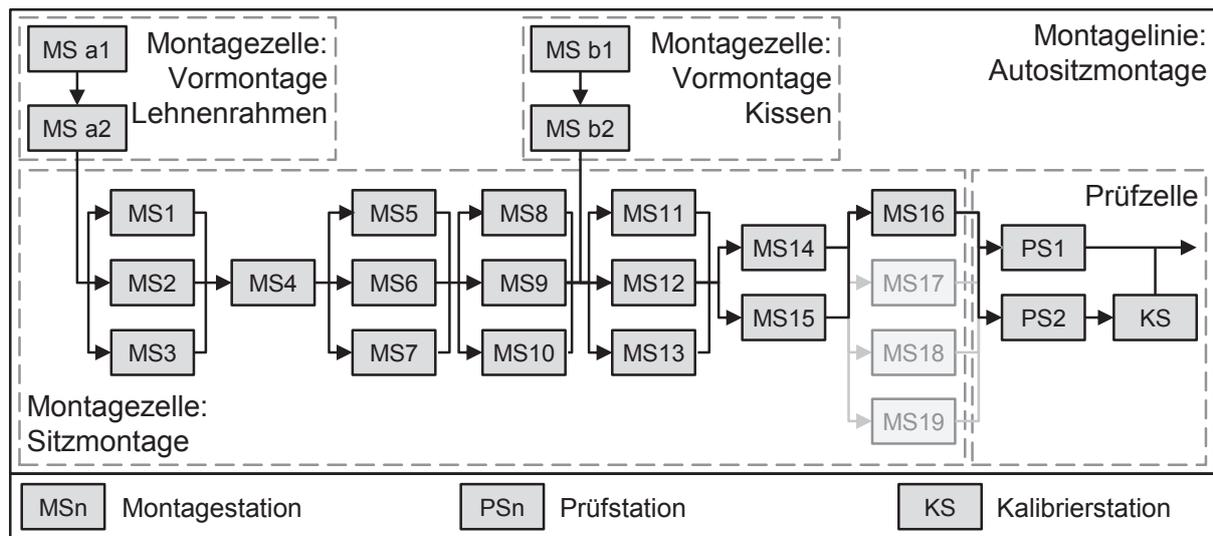


Abb. 6.2: Ablaufstruktur der konzeptualisierten Montagelinie

Das Montagesystem weist einen niedrigen Automatisierungsgrad auf, was zu einer hohen Flexibilität der Anlage durch den umfassenden Einsatz der menschlichen Arbeitskraft als hochflexible Leistungseinheit führt. Durch die Steigerung des Automatisierungsgrads wird der Aufwand für Anpassungen des Montagesystems an veränderte Randbedingungen wie neue Produktvarianten erhöht, was bisher vermieden wird. Allerdings können durch automatisierte Lösungen im Allgemeinen höhere Qualitätsstandards angesetzt und Effizienzsteigerungen erreicht werden. Diese dichotomen Aspekte bilden unter Berücksichtigung einer Just-in-time-Anlieferung des fertigen Erzeugnisses an nachfolgende Montageschritte das Grundgerüst für die Definition der Montageziele.

Das Produktsystem umfasst 68 Einzelteilmodule unterschiedlicher Ausprägung, die aus einer Gesamtmenge von ca. 500 Einzelteilen gebildet werden. Dabei werden lediglich die variantenbildenden Teile berücksichtigt und Verbrauchsmaterialien wie Verbindungselemente vernachlässigt, da sie keine konfigurationsspezifischen Funktionen erfüllen. Diese Einzelteilmodule treten in unterschiedlichen Ausprägungen auf, entsprechen dabei jedoch immer den jeweils selben Schnittstellenbestimmungen und können somit im Sinne abgeschlossener Funktionseinheiten zur Variantenbildung ausgetauscht werden. Der Klasse der Baugruppen werden 97 unterschiedliche Baugruppenmodule zugeordnet, welche die Produktvarianten bilden. Tabelle 9 gibt eine gekürzte Übersicht über die Einzelteile und deren Verwendung in verschiedenen Baugruppen und Produktvarianten.

Einzelteil		Verwendung		Funktion
ID	Bezeichnung	Baugruppe	Variante	
A0009108000	Einlage verstellbar	0001, 0054	1	Verstellung manu1 und Verst. auto
A0009105102	Einlage verstellbar VST/4WP	0029	2	Verstellung auto
A0009107600	Einlage verstellbar VO/Dämpfer	0054	3	Verstellung auto
A0009700026	Verstellung Elektr. Kopfstz.	0036. 0066	2	Verstellung auto
...

Tabelle 9: Aufstellung der Elemente und Funktionen des Produktsystems

Zur Validierung des vorgestellten Konzepts werden aus der Menge möglicher Produktvarianten drei repräsentative Produktkonfigurationen ausgewählt. Um eine möglichst große Diversität zu erreichen, werden eine *Minimalkonfiguration*, eine *Standardkonfiguration* und eine *Maximalkonfiguration* benutzt (Abb. 6.3).

Die *Minimalkonfiguration* stellt das Produkt in dessen grundlegender Zusammenstellung dar und weist keine zusätzlichen Funktionen auf, die nicht den Grundfunktionen des Fahrersitzes entsprechen. Dabei wird ein Textilbezug gewählt und alle Einstellungsmöglichkeiten des Sitzes und der Kopfstütze funktionieren rein mechanisch. Damit entspricht die Minimalkonfiguration einem Ecktyp mit Mindestausstattung. Unter der *Standardkonfiguration* ist eine der meistkonfigurierten Produktvarianten im Sinne eines Rennerprodukts zu verstehen.



Abb. 6.3: Ausgewählte Produktvarianten

Hierbei handelt es sich um eine Ausführung mit Lederbezug und elektrischen Einstellungsmöglichkeiten der Lehne, der Sitzhöhe und der Kopfstütze. Die *Maximalkonfiguration* repräsentiert wiederum einen Ecktyp einer Produktvariante, in der ein Maximum an Produktfunktionen integriert wird. Neben der Lederausstattung und einer speziellen Polsterung und Form des Sitzes sowie der elektrischen Einstellungsmöglichkeiten werden hierbei eine Sitzheizung, eine Massagefunktion und pneumatisch regulierbare Lordosenstützen integriert.

Diese drei Produktvarianten unterscheiden sich nicht nur durch die Verwendung zusätzlicher, sondern auch unterschiedlicher Produktkomponenten, wodurch die betrachtete Struktur in Form des produktspezifischen Montageablaufs für jede Variante verschieden ist. Dadurch wird ein weites Spektrum der angebotenen Produktvarianten abgedeckt.

Auf Basis dieser Struktur werden anschließend die Komponenten des IPS zu Modulen zusammengefasst und vernetzt. Um eine möglichst große Repräsentanz des durchgeführten Validierungsszenarios zu erreichen, wird eine feine Granularität der Module bzw. ein hoher Modularisierungsgrad gewählt. Dadurch werden zwar der Entwicklungsaufwand und die Schnittstellenanforderungen erhöht, ohne die Funktionalität des Systems zu steigern. Jedoch werden auch die Konfigurationsmöglichkeiten und damit die Aussagekraft der Validierung angehoben. Da produktseitig nur variantenbildende Einzelteile bzw. Einzelteilmodule berücksichtigt werden, stellt jede Baugruppen ein konfigurationsrelevantes Modul dar. Montageseitig repräsentieren die Ausstattungen der einzelnen Stationen die Montagemodule auf unterster Ebene. Dies hat den Hintergrund, dass die meisten Ausstattungskomponenten als mobil zu deklarieren sind und somit zwischen den Montagestationen ausgetauscht werden können. Damit stellen sie die kleinste Einheit austauschbarer und damit konfigurationsrelevanter Montagemodule dar.

Die Vernetzung wird nun zuerst innerhalb der beiden Domänen und anschließend zwischen den Produkt- und Montagemodulen vorgenommen. Dazu kommen die bereits eingeführten Beziehungen *isPartOf* und *contains* für die hierarchische Vernetzung innerhalb der Domänen des Produkts bzw. der Montage zum Einsatz. Zwischen den beiden Teilsystemen werden die Beziehungen *isRequiredFor* und *requires* verwendet, wobei hinsichtlich der Komplexitätsreduktion im abgebildeten Modell eine Beschränkung der Applikation dieser Beziehungen stattfindet. Es werden lediglich Verbindungen zwischen den Baugruppenmodulen und den zur Herstellung notwendigen Ausstattungsmodule modelliert. Dadurch werden einerseits die

individuellen Montageanforderungen einzelner Baugruppenmodule abgebildet und andererseits kann dadurch eine flexible Zuordnung von Baugruppen zu Montagestationen im Sinne einer funktionalen Qualifikation einzelner Montagestationen zur Herstellung der Baugruppe vorgenommen werden. Diese flexible Zuordnung wird unter Verwendung des entwickelten Informationssystems durch eine automatisierte Ermittlung von Montagestationen realisiert, die über die Ausstattungen verfügen, die zur Montage der jeweiligen Baugruppen erforderlich sind.

Zur Datenbeschaffung werden Expertenbefragungen und Begehungen der Montageanlagen sowie Analysen verschiedener Datenquellen durchgeführt. Dabei ist hervorzuheben, dass gerade durch den interdisziplinären Charakter der notwendigen Informationen eine Vielzahl an Datenquellen aus unterschiedlichen Organisationseinheiten benutzt wird. Diese umfassen mehrere, zum Teil eigenentwickelte Datenbanken aus den Bereichen der Produktentwicklung, Arbeitsplanung, Produktionsplanung und -steuerung sowie Prozessplanung. Es werden Dokumente und Informationsmodelle in Form von Stücklisten, CAD-Modellen, MTM-Analysen und Arbeitsanweisungen sowie Tabellen aus dem ERP-System genutzt.

Damit ist die Phase der initialen Konzeptualisierung abgeschlossen. Anhand des entwickelten IPM als Basis des Informationssystems wird nun ein repräsentatives Validierungsszenario durchgeführt.

6.2 Durchführung der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration

Zur Validierung der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration wird ein umfassendes Validierungsszenario durchgeführt. Dabei dient eine veränderte Marktsituation in Form der Nachfrage nach einer neuen Produktvariante als Ausgangssituation. Begründet durch diesen produktseitigen Veränderungstreiber wird der Änderungsbedarf durch den Konfigurationskalendar analysiert und strukturiert. Anschließend werden alternative Systemlösungen konfiguriert, die durch das vorgestellte Bewertungsschema verglichen werden, bevor eine umfassende Handlungsempfehlung zur Konfiguration des Produkt- und des Montagesystems gemäß der zu untersuchenden Veränderung der betrachteten Produktfamilie formuliert wird.

6.2.1 Identifikation des Änderungsbedarfs bei veränderter Nachfrage

Eine Veränderung der Nachfragestruktur kann vielfältige Effekte auf das Produktsystem aufweisen. Zur Identifikation und Strukturierung des Änderungsbedarfs wird der Konfigurationskalender benutzt. Dabei findet zu Anschauungszwecken eine Beschränkung auf produktseitige Veränderungstreiber statt (Abb. 6.4).

Um der veränderten Nachfrage zu begegnen, wird die Addition einer neuen Produktvariante zum bestehenden Produktsystem untersucht. Diese Erweiterung der Produktfamilie soll durch die Adaption einer bestehenden Baugruppe mittels Substitution eines Einzelteils umgesetzt werden. Begleitend soll die mögliche Elimination einer Produktvariante mit verringerter Nachfrage im Rahmen einer Bereinigung des Produktportfolios analysiert werden. Im konkreten Validierungsfall soll die Einführung eines neuen Autositzes mit vergrößertem Stauraum durch Veränderung der Ablagebox unter der Sitzfläche untersucht werden, wobei gleichfalls das Entfernen der ursprünglichen Sitzvariante mit kleinerer Ablagebox vorgesehen ist.

Ziel des Validierungsszenarios ist die Absicherung der Montagefähigkeit der neuen Produktvariante durch das bestehende Montagesystem mit Identifikation und Beschreibung notwendiger Adaptionen zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des IPS. Bei einer notwendigen Veränderung des Montagesystems sollen mehrere Systemalternativen konfiguriert und verglichen werden. Zusätzlich soll der funktionale Nutzen der Elimination der ursprünglichen Produktvariante analysiert werden.

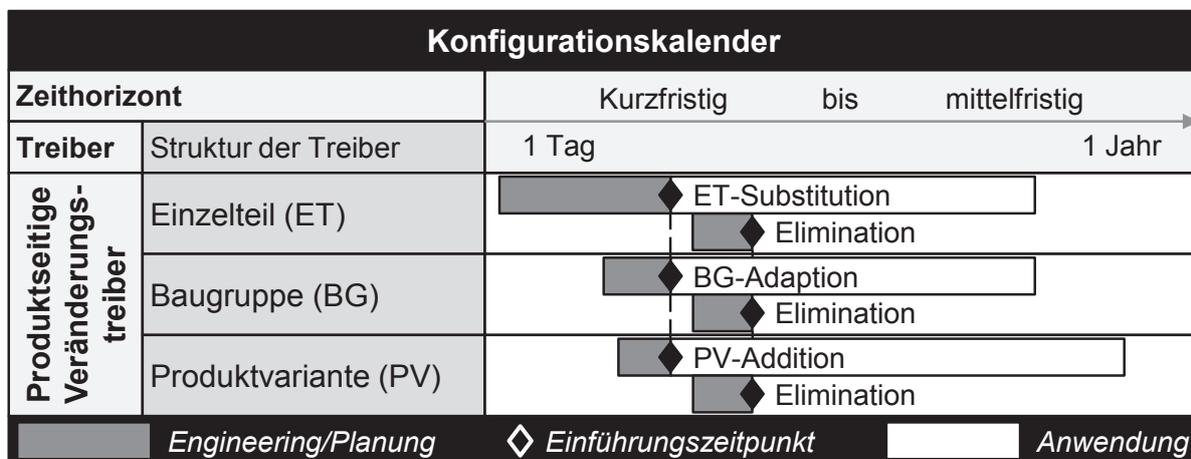


Abb. 6.4: Identifikation des produktseitigen Änderungsbedarfs

6.2.2 Virtuelle Systemkonfiguration bei verändertem Produktsystem

Eine neue Produktvariante kann durch Modifikation von Modulen in unterschiedlichen Ebenen eingeführt werden. Eine neue oder veränderte Baugruppe sowie ein neues oder verändertes Einzelteil können zu einer neuen Produktvariante führen. Allerdings ist dies im Sinne der Konfiguration von untergeordneter Bedeutung. Wichtiger ist die Unterscheidung, ob die Veränderung des Moduls unter Einhaltung bestehender Schnittstellenspezifikationen oder unter Veränderung dieser durchgeführt wird. Insofern bestehende Schnittstellenbestimmungen eines Moduls bei der Veränderung oder Neueinführung eingehalten werden, ist die Einführung der neuen Produktvariante mit keiner signifikanten Aufwandssteigerung in Form der Erhöhung der inneren Varianz verbunden. Eine solche Veränderung kann aus funktionaler Sicht wie das bestehende Modul behandelt und in die laufende Montage eingeführt werden.

Bei vorliegendem Szenario werden allerdings die Schnittstellenbestimmungen der relevanten Produktmodule verändert. In diesem Fall wird ein neues Produktmodul in das Produktsystem integriert, in die jeweilige Hierarchieebene eingeordnet, hinsichtlich der logischen Montage-reihenfolge strukturiert und zum Ausdruck der Montageanforderungen mit den erforderlichen Ausstattungsmodulen verknüpft. Durch dieses Vorgehen, wird eine virtuelle Veränderung des Systems vorgenommen, um die Konsequenzen im Sinne einer verlässlichen Abschätzung des Aufwands der Veränderung zu identifizieren. Der produktspezifische Montageablauf wird durch das veränderte Produktmodul in Form der vergrößerten Ablagebox nicht verändert. Daher wird die vorliegende Systembeeinflussung als modular identifiziert.

Dementsprechend wird anschließend die Beeinflussung des Systems durch die Adaptionenmaßnahme untersucht. Unter Verwendung der App zur graphenbasierten Informationsdarstellung werden die Beziehungen des entsprechenden Produktmoduls zu anderen Systembereichen identifiziert und analysiert. Zur Erhöhung der Aussagekraft wird die Veränderung für alle drei betrachteten Produktvarianten durchgeführt. Es zeigt sich, dass zur Herstellung der neuen Baugruppe mit der vergrößerten Ablagebox ein neues Werkzeug sowie eine weitere Montagefunktion in Form eines zusätzlichen Verschraubens benötigt werden. Durch eine teilautomatisierte Abfrage des IPM unter Verwendung der App zur matrixbasierten Visualisierung kann keine Montagestation identifiziert werden, die über die notwendige Ausstattungskombination verfügt (Abb. 6.5).

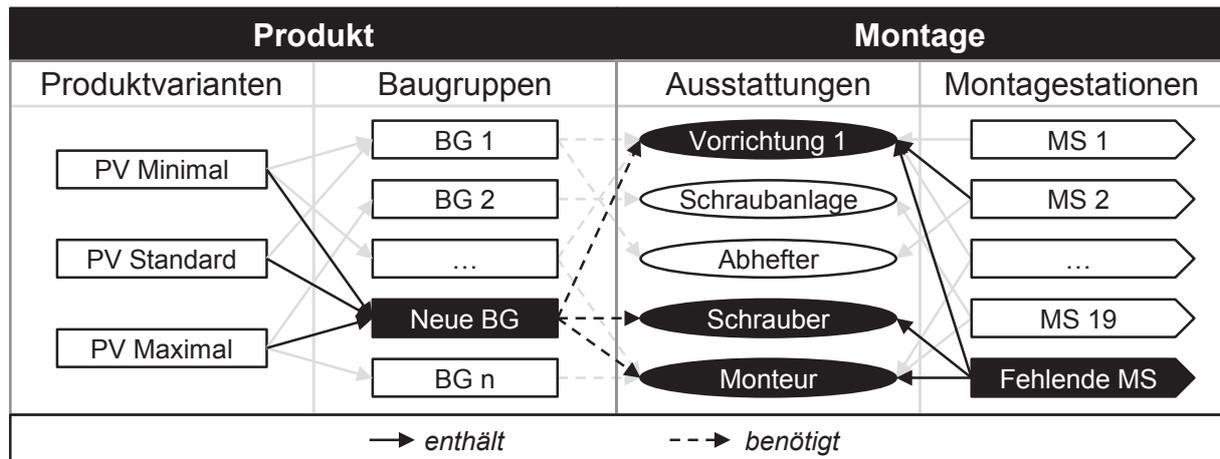


Abb. 6.5: Integration einer neuen Baugruppe in bestehendes IPM

Ansonsten können keine Wechselwirkungen des Produktmoduls mit anderen Elementen des IPS identifiziert werden. Die bisherige Ablagebox dient als Orientierungshilfe zur Steigerung der Zuverlässigkeit der generierten Information, da sie ein ähnliches Produktmodul darstellt, deren Beziehungsnetz im IPS bekannt und bereits konzeptualisiert ist.

Auf Grundlage dieser Informationen können nun verschiedene Systemalternativen konfiguriert werden, die die Herstellung des veränderten Produktsystems ermöglichen. Dabei werden zwei Möglichkeiten zur Integration des erforderlichen Werkzeugs und der zusätzlichen Montagefunktion identifiziert und der weiteren Analyse zugeführt. Einerseits kann die Ausstattung der Montagestation 16, die bisher die Aufgabe der Montage der Ablagebox übernimmt, durch eine erweiterte Ausstattung angepasst werden, wodurch ein weiterer Montageschritt auf dieser Station ausgeführt werden kann. Andererseits ist die Integration einer neuen Montagestation möglich. Dafür bietet sich die Aktivierung der ungenutzten Montagestation 17 (Abb. 6.2) an. Der Aufwand für die Montagesystemadaption weist keine signifikanten Unterschiede auf, da in beiden Fällen bestehende Montagestationen mit zusätzlichen Ausstattungen versehen werden müssen. Im Folgenden werden die beiden Systemalternativen durch Benutzung des entwickelten Bewertungsschemas verglichen.

6.2.3 Vergleichende Bewertung der konfigurierten Systemalternativen

Im Rahmen des durchgeführten Validierungsszenarios werden zwei Systemalternativen verglichen. Diese unterscheiden sich darin, dass bei einer Alternative (SV1) eine zusätzliche Montagestation genutzt wird und bei der zweiten Alternative (SV2) der zusätzlich benötigte Montageschritt auf einer bestehenden Montagestation ausgeführt wird. Dadurch ist die

Effizienz der ersten Möglichkeit geringer anzusetzen, wobei die Wandlungsfähigkeit mit der höheren Modularität durch die Nutzung einer weiteren Montagestation höher ist. Die Typen- und Volumenflexibilität weist keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Systemalternativen auf. Lediglich die Montageflexibilität ist bei der ersten Alternative höher anzunehmen, da hierbei eine flexiblere montagesystemspezifische Ablaufstruktur umsetzbar ist. Dadurch ergibt sich folgende Bewertung (Tabelle 10). Somit wird unter Verwendung der situationsbezogenen Gewichtung (Tabelle 6) der einzelnen Systembewertungskriterien die Umsetzung der ersten Systemalternative mit der Verwendung einer zusätzlichen Montagestation (SV1) empfohlen. Daran anschließend findet die Analyse des funktionalen Nutzens der Bereinigung des Produktportfolios durch die Elimination der Produktvarianten mit der zu ersetzenden Ablagebox statt. Durch die modellbasierte Problemlösungsunterstützung unter Verwendung des Informationssystems lassen sich im Rahmen der virtuellen Systemkonfiguration direkt die Beziehungen des zu eliminierenden Produktmoduls darstellen.

Kriterien	Systemalternative (SV)			Summe	Gewichtung	Gew. Wert
		SV1	SV2			
Effizienz	SV1	-	0	0	4	0
	SV2	2	-	2		8
Zuverlässigkeit						
Volumenflexibilität	SV1	-	1	1	1	1
	SV2	1	-	1		1
Variantenflexibilität	SV1	-	1	1	1	1
	SV2	1	-	1		1
Montageflexibilität	SV1	-	2	2	2	4
	SV2	0	-	0		0
Wandlungsfähigkeit						
Mobilität	SV1	-	1	1	3	3
	SV2	1	-	1		3
Modularität	SV1	-	2	2	4	8
	SV2	0	-	0		0
Summe (gewichtet)	SV1					17
	SV2					13
0: Geringere Bedeutung		1: Gleiche Bedeutung		2: Höhere Bedeutung		

Tabelle 10: Exemplarische Bewertung der konfigurierten Systemalternativen

Dafür eignet sich die Visualisierung durch eine Matrix, in der die Produktkomponenten den benötigten Montageressourcen gegenübergestellt werden (Abb. 5.13). Dadurch ist schnell ersichtlich, dass alle Montageressourcen, die zur Herstellung des Baugruppenmoduls erforderlich sind, zur Herstellung anderer Produktkomponenten verwendet werden. Daher wird aus technischer Sicht empfohlen, die ursprüngliche Produktvariante weiterhin anzubieten, da durch deren Elimination kein funktionaler Nutzen im Sinne einer Reduktion der inneren Varianz innerhalb des IPS generiert wird.

Damit wird die integrierte Produkt- und Montagekonfiguration durch Bereitstellung von Informationen bezüglich einer funktionsfähigen Systemalternative unter Berücksichtigung eines veränderten Produktsystems abgeschlossen. Zusätzlich werden Informationen bezüglich abgestimmter Maßnahmen zur Adaption des integrierten Produkt- und Montagesystems zur Verfügung gestellt.

6.3 Kritische Würdigung der Forschungs- und Validierungsergebnisse

Eine industrielle Produktion stellt ein komplexes sozio-technisches System dar. Die integrierte Produkt- und Montagekonfiguration zeigt eine Möglichkeit auf, dieses System in einem bisher unerreichten Detailgrad auf funktionaler Ebene zu erfassen und unter Verwendung konfigurationsgestützter Informationssysteme jederzeit und überall die aktuell geforderte Leistung zu erbringen. Unter anderem konnten nicht nur Informationen über den geeigneten und möglichen Einsatz spezifischer Produkt- und Montagemodule, sondern auch über deren individuellen und situationsbezogenen Beitrag zur Gesamtfunktion des IPS bereitgestellt werden. Allerdings muss der Aufwand bei der prototypischen Durchführung der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration als hoch eingestuft werden.

Der größte Teil dieses Aufwands trat während der Konzeptualisierung und Modellierung des IPS auf. Zwar unterstützte die Verwendung von Ontologien die aufwandsarme Abbildung komplexer Wirkzusammenhänge. Jedoch stellte die initiale Konzeptualisierung des Systems mit ständiger Anpassung des Modells an das einem permanenten Wandel unterworfenen IPS einen hohen Aufwand dar. Ein kritischer Aspekt bei der Benutzung von Ontologien zur Modellierung technischer Systeme ist, dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass die

Fachexperten in den Bereichen der Entwicklung und Montage variantenreicher Erzeugnisse über die notwendigen informationstechnischen Fähigkeiten verfügen, um die Fachinformationbasis selbst aufzubauen oder zu bearbeiten. Jedoch sind es diese Fachexperten, die über das notwendige Hintergrund- und Erfahrungswissen für eine integrierte Produkt- und Montagekonfiguration verfügen. Dadurch werden Mitarbeiter benötigt, die als Schnittstelle zwischen den Fachexperten und der informationstechnischen Umsetzung fungieren. Dadurch werden potentielle Fehlerquellen und zusätzlicher Aufwand erzeugt.

Abschließend kann allerdings festgestellt werden, dass die eingangs formulierte Aufgabenstellung zur Realisierung effizienter, zuverlässiger und wandlungsfähiger Produkt- und Montagesysteme erfüllt wurde. Durch funktionale Modularisierung des Produkt- sowie des Montagesystems ist eine Integration dieser beiden Bereiche ermöglicht worden. Die Anwendung von Konfigurationskonzepten zur virtuellen Generierung valider Systemalternativen konnte realisiert werden. Ebenfalls konnte ein Bewertungsschema zum verlässlichen und aufwandsarmen Vergleich konfigurierter Systemalternativen erarbeitet und umgesetzt werden. Im Rahmen des praktischen Einsatzes der entwickelten Methode in industriellem Umfeld konnte die Durchführbarkeit der vorgestellten Lösung bestätigt werden. Besonders durch das prototypisch implementierte Informationssystem konnte ein direkter Nutzen in Form der flexiblen Bereitstellung systemischer Informationen belegt werden. Das Validierungsszenario konnte mit Generierung und Bereitstellung aller zur zielführenden Konfiguration des IPS notwendigen Informationen mit einem zeitlichen Aufwand von unter einem Personentag durchgeführt werden. Dies zeigt, dass die Effizienz von Adaptionenmaßnahmen durch die integrierte Produkt- und Montagekonfiguration deutlich gesteigert werden konnte.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden nun die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftiges Forschungs- und Entwicklungspotential gegeben.

7.1 Zusammenfassung

Der anhaltende Trend zu individualisierten Produkten bei hohem Wettbewerbsdruck durch die Globalisierung der Betriebe und der Märkte zwingt die Unternehmen dazu, in kurzer Zeit auf unvorhergesehene Veränderungen zu reagieren. Daher gilt die Umsetzung intelligenter Strukturen zur hocheffizienten und gleichzeitig wandlungsfähigen Produktion variantenreicher Erzeugnisse als bedeutender Wettbewerbsfaktor. Diese Arbeit zeigt eine Möglichkeit auf, die Effizienz und besonders die Wandlungsfähigkeit in der Montage variantenreicher Erzeugnisse durch die Bereitstellung systemischer Informationen zu erhöhen. Es soll eine verbesserte Abstimmung der Maßnahmen zur zielgerichteten Adaption des Produkt- und des Montagesystems erreicht sowie die Montagefähigkeit spezifischer Produktvarianten abgesichert werden. Dazu wurde die integrierte Produkt- und Montagekonfiguration in Form einer modellbasierten Problemlösungsunterstützung entwickelt. Diese umfasst ein Vorgehen zur situationsorientierten Systemkonfiguration sowie ein Informationssystem, das ein ontologiebasiertes Modell des integrierten Produkt- und Montagesystems nutzt.

Das Fundament der Konfiguration bildet ein integriertes Verständnis des Produkts und dessen Montage. Zu diesem Zweck werden die Elemente und Wirkbeziehungen innerhalb des Systems auf Grundlage der allgemeinen Systemtheorie konzeptualisiert. Dabei findet eine Modularisierung der Elemente zu unabhängigen, geschlossenen Funktionseinheiten statt, durch deren Zusammenspiel die Funktion des Gesamtsystems erfüllt wird. Bei der Konzeptualisierung und Überwachung des integrierten Produkt- und Montagesystems wurde der permanente Wandel der betrachteten Systeme und des Umfelds als große Herausforderung identifiziert. Durch eine Analyse sowie eine produkt-, system- und montagespezifische Kategorisierung der auf die betrachteten Systeme einwirkenden Veränderungstreiber wurde dieser Wandel greifbar gemacht. Diskrete Veränderungen des Umfelds, des Systems oder einzelner Module werden unter Konzentration auf einen kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont

anhand des Konfigurationskalenders identifiziert, analysiert und synchronisiert. Bei kontinuierlichen Veränderungen hingegen werden die Leistungsänderungen des Systems anhand von Lernkurven berücksichtigt. Diese Veränderungen werden als Störgrößen in einem regelkreisbasierten Zusammenschluss des physisch vorhandenen Systems und dessen konzeptualisiertem Modell verstanden, um die Lücke zwischen realer und digitaler Welt zu verkleinern und eine höhere Informationsqualität zu erreichen.

Die anschließende virtuelle Produkt- und Montagekonfiguration umfasst drei Abschnitte. Einleitend werden mögliche Adaptionmaßnahmen zur Begegnung des zuvor identifizierten Änderungsbedarfs bestimmt. Dann werden die Konsequenzen einzelner Adaptionmaßnahmen auf das Verhalten des integrierten Produkt- und Montagesystems untersucht, was durch ein eigenentwickeltes Informationssystem unterstützt wird. Dieses Informationssystem nutzt eine ontologiebasierte Abbildung des konzeptualisierten Produkt- und Montagesystems. Zur situationsbezogenen Extraktion und flexiblen Darstellung gewünschter Informationen werden drei Apps umgesetzt, die tabellarische, graphen- und matrixbasierte Visualisierungsmöglichkeiten bereitstellen. Durch die zielgerichtete Bereitstellung verlässlicher Informationen bezüglich der Konsequenzen spezifischer Adaptionmaßnahmen lassen sich im dritten Abschnitt valide Systemalternativen konfigurieren. Dabei werden nicht nur Informationen über funktionsfähige Zustände des integrierten Produkt- und Montagesystems bereitgestellt, sondern auch über die notwendigen Maßnahmen zur Überführung des vorhandenen Systems in das Zielsystem.

Für einen situationsbezogenen Vergleich der verschiedenen Systemoptionen wurde ein Bewertungsschema entwickelt, das die umfassende Bewertung konfigurierter Systemalternativen hinsichtlich deren Effizienz, Zuverlässigkeit und Wandlungsfähigkeit ermöglicht, wobei eine fallspezifische Gewichtung dieser Kriterien vorgesehen ist, um einen an die aktuellen Randbedingungen und Zielzustände angepassten Vergleich zu ermöglichen. Damit wird eine aufwandsarme und verlässliche Auswahl der zweckmäßigsten Konfiguration des integrierten Produkt- und Montagesystems ermöglicht.

Der Nachweis industrieller Einsatzfähigkeit konnte durch die praktische Durchführung bei einem Unternehmen, das Autositze in variantenreicher Serienmontage herstellt, erbracht werden. Dabei konnte die Durchführbarkeit der integrierten Produkt- und Montagekonfiguration in industrieller Umgebung und der geringe Aufwand zur situationsbezogenen Generie-

nung und flexiblen Bereitstellung relevanter Informationen zur Prognose des Systemverhaltens bei konfigurationsgestützten Veränderungen verifiziert werden. Somit konnte die Montagefähigkeit einer neuen Produktvariante abgesichert und eine abgestimmte Durchführung von Adaptionsmaßnahmen realisiert werden.

7.2 Ausblick auf zukünftiges Forschungs- und Entwicklungspotential

Das vorgestellte Konzept einer integrierten Produkt- und Montagekonfiguration liefert einen Beitrag zu einem ganzheitlichen Verständnis eines Unternehmens. Dieser Beitrag wird durch konzeptuelle Grundlagen gekennzeichnet, die eine funktionale Integration sozio-technischer Systeme auf der Ebene der Produkte und Montagesysteme ermöglichen. Dieses Konzept kann als Baustein eines wandlungsfähigen Unternehmens angesehen werden. Dafür sind jedoch weitere Bausteine notwendig, die diese überwiegend funktionale, technisch-organisatorische Betrachtung durch finanzielle und strukturelle Aspekte über die Grenzen einzelner Produktionssysteme hinweg ergänzen. Unter Verwendung des Stuttgarter Unternehmensmodells lässt sich das diesbezügliche Forschungspotential als Erweiterung der Integration auf weitere Aspekte und Skalen wie den Standort und das Unternehmensnetzwerk verstehen.

Aus entwicklungstechnischer Sicht wird erhebliches Potential in der Schnittstelle zwischen dem vorhandenen System und dessen konzeptualisiertem Abbild gesehen. Erst wenn es gelingt, diese Lücke durch automatisierte Lösungen zu verkleinern oder gar zu schließen, kann ein paralleles Modell des Unternehmens realisiert werden. Nur dadurch kann der manuelle Aufwand für die Instandhaltung der Modelle sowie für das Wiederauffinden und die Wiederverwendung von Informationen so weit verringert werden, dass der Nutzen diesen übersteigt. Vielversprechende Konzepte lassen sich unter dem Begriff cyber-physischer Systeme (CPS) zusammenfassen. Darunter ist eine nahtlose Verknüpfung physischer Komponenten mit informationstechnischen Anwendungen zu verstehen, was ein Zusammenwachsen der realen und der digitalen Welt in der Produktion unterstützt. Dadurch könnte ein ständig aktuelles und akkurates Abbild des realen Systems unter geringem manuellem Einsatz gelingen.

Allerdings gilt es auch hier, das Potential des betrachteten Systems zu identifizieren. Dieses Potential liegt, wie die vorliegende Arbeit zeigt, nicht nur in der Summe der einzelnen Komponenten, sondern ergibt sich viel mehr aus den situationsabhängigen Beziehungen zwischen den Subsystemen. Diese Synergieeffekte zwischen physischen Komponenten, Prozessbausteinen und Informationen gilt es aufzudecken und auszuschöpfen. Dazu liefert die vorliegende Arbeit einen Beitrag und kann als Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Bereich des ganzheitlichen und systematischen Verständnisses industrieller Unternehmen zur Realisierung wandlungsfähiger Fabriken dienen.

Summary

The ongoing trend to individualized products under a high competitive pressure by the globalization of the enterprises and the markets, forces the companies to respond to unforeseen changes in a short period of time. Due to this trend, the realization of intelligent structures for highly efficient and changeable manufacturing is an important competitive factor. This thesis introduces a possibility to increase efficiency and especially changeability in the volume assembly of customized products, by the provision of systemic information. It aims at the information provision to improve the coordination of measures to adapt the product and the assembly system and to guarantee the mounting capability of complex products in an available assembly environment. Therefore the integrated product and assembly configuration was developed as a model based decision support. It contains a procedure for a situation-based system configuration and an information system which uses an ontology-based model of the integrated product and assembly system.

The configuration is based on an integrated comprehension of the product and its assembly. Therefore the elements and their relations in the system are conceptualized by the means of common system theory. The elements get modularized to independent, self-contained functional units. Through the interaction of these modules, the function of the overall system gets fulfilled. The permanent change of the considered systems and their environment is identified as a great challenge for the conceptualization and monitoring of the integrated product and assembly system. To increase the tangibility of these changes, they get analyzed and categorized into product, system and assembly specific change drivers. Discrete changes of the system, its environment or single modules get identified, analyzed and synchronized with a focus on a short to mid-term interval using the configuration calendar. Continuous changes are considered through the monitoring of the development of the performance of the system using learning curves. These changes are understood as disturbance values in a control circuit between the physical system and its conceptualized model, to reduce the gap between the real and the digital world to increase the information quality.

The following virtual product and assembly configuration has three stages. Firstly, possible adaptation measures are determined to respond to the identified needs for change. Secondly, the consequences of specific adaptation measures on the behavior of the integrated product

and assembly system is analyzed. This stage is supported by a proprietary developed information system. The information system is predicated on an ontology-based model of the conceptualized product and assembly system. Three apps are realized for a situational extraction and flexible representation of the desired information. These apps allow the visualization of information in a tabular, graph-based and matrix-based form. Thirdly, valid system alternatives can be configured by this target-oriented provision of reliable information about the consequences of specific adaptation measures. Therefore, not only information about executable states of the system are provided, but also information about the necessary measures to convert the present system into the targeted system.

The configured system alternatives have to be compared to select the best option. Therefore, an evaluation scheme was developed to realize a comprehensive assessment in consideration of the efficiency, the reliability and the changeability of the respective system configurations. These criteria are subject to a case-based weighting, to realize a situation-oriented comparison of the system alternatives taking into account the present conditions and targets. This evaluation scheme enables a reliable selection of the optimal configuration of the integrated product and assembly system at low effort.

The industrial usability could be verified by a practical execution in a company that assembles car seats. Thus, the feasibility of the integrated product and assembly configuration in an industrial environment could be demonstrated and the low effort for the situation-based creation and flexible provision of relevant information for the reliable prediction of the system behavior which gets adapted by configuration-based measures could be verified. The mounting capability of a new product variant could be assured and the coordinated operation of adaptation measures could be realized.

Literaturverzeichnis

Abele und Reinhart 2011

Abele, Eberhard und Gunther Reinhart, 2011. *Zukunft der Produktion - Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München, Wien: Hanser.

acatech 2013

Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech), Hrsg., 2013. *Technikwissenschaften - Erkennen - Gestalten - Verantworten*. München.

Aggteleky 1990

Aggteleky, Béla, 1990. *Fabrikplanung*. München, Wien: Hanser.

Aldinger 2009

Aldinger, Lars A., 2009. *Methode zur strategischen Leistungsplanung in wandlungsfähigen Produktionsstrukturen des Mittelstandes*. Stuttgart, Universität, Dissertation.

Ammar-Khodja und Bernard 2008

Ammar-Khodja, Samar und Alain Bernard, 2008. An Overview on Knowledge Management. In: Bernard, Alain und Serge Tichkiewitch, Hrsg. *Methods and tools for effective knowledge life-cycle-management*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 3-22.

Arnold et al. 2011

Arnold, Volker, Dettmering, Hendrik, Engel, Torsten und Andreas Karcher, 2011. *Product Lifecycle Management beherrschen - Ein Anwenderhandbuch für den Mittelstand*. 2., neu bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Arnoscht 2011

Arnoscht, Jonas, 2011. *Beherrschung von Komplexität bei der Gestaltung von Baukastensystemen*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation.

Ashby 1957

Ashby, William R., 1957. *An Introduction to Cybernetics*. 2. Aufl. London: Chapman & Hall Ltd.

Avgoustinov 2007

Avgoustinov, Nikolay, 2007. *Modelling in Mechanical Engineering and Mechatronics - Towards Autonomous Intelligent Software Models*. London: Springer.

Balzert 2009

Balzert, Helmut, 2009. *Lehrbuch der Softwaretechnik - Basiskonzepte und Requirements Engineering*. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum.

Balzert et al. 2011

Balzert, Helmut, Liggesmeyer, Peter und Holger Schwichtenberg, 2011. *Lehrbuch der*

Softwaretechnik - Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum.

Bandow und Holzmüller 2010

Bandow, Gerhard und Holzmüller Hartmut H., Hrsg., 2010. *"Das ist gar kein Modell!" - Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften*. Wiesbaden: Gabler.

Bartuschat 1994

Bartuschat, Martin, 1994. *Beitrag zur Beherrschung der Variantenvielfalt in der Serienfertigung*. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Dissertation.

Bauernhansl 2012

Bauernhansl, Thomas, 2012. Fraktal, wandlungsfähig, nachhaltig. In: Fraunhofer IPA, Hrsg. *Die Fabrik der Zukunft - wandlungsfähig, digital, lernfähig - Engelbert Westkämpers Beitrag zu einem neuen europäischen Produktionssystem*. Stuttgart: Fraunhofer IPA, S. 74-82.

Baumberger 2007

Baumberger, Georg C., 2007. *Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten*. München, Technische Universität, Dissertation.

BDI et al. 2005

Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI), Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. (FhG) und Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), Hrsg., 2005. *Intelligenter produzieren - 32 Thesen zur Forschung für die Zukunft der industriellen Produktion*. Berlin.

Becker et al. 2012

Becker, Jörg, Probandt, Wolfgang und Oliver Vering, 2012. *Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung - Konzeption und Praxisbeispiel für ein effizientes Prozessmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Beer 1979

Beer, Stafford, 1979. *The Heart of Enterprise*. Chichester: Wiley.

Beierle und Kern-Isberner 2006

Beierle, Christoph und Gabriele Kern-Isberner, 2006. *Methoden wissensbasierter Systeme - Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*. 3., erweiterte Aufl. Wiesbaden: Vieweg.

Bell 1985

Bell, Michael Z., 1985. Why Expert Systems Fail. In: *The Journal of the Operational Research Society* **36** (7), S. 613-619.

Bellgran und Säfsten 2010

Bellgran, Monica und Kristina Säfsten, 2010. *Production Development - Design and Operation of Production Systems*. London: Springer.

Bergmann und Herrmann 2009

Bergmann, Lars und Christoph Herrmann, 2009. Betrachtung von KMU als Modell lebensfähiger Systeme. In: Dombrowski, Uwe, Herrmann, Christoph, Lacker, Thomas und Sabine Sonntag, Hrsg. *Modernisierung kleiner und mittlerer Unternehmen - Ein ganzheitliches Konzept*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 72-78.

Bertalanffy 1971

Bertalanffy, Ludwig v., 1971. *General System Theory - Foundations, Development, Applications*. London: The Penguin Press.

Bieniek 2001

Bieniek, Christian, 2001. *Prozeßorientierte Produktkonfiguration zur integrierten Auftragsabwicklung bei Variantenfertigern*. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Dissertation.

Birkhofer 1980

Birkhofer, Herbert, 1980. *Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte*. Düsseldorf: VDI.

Blessing und Chakrabarti 2009

Blessing, Lucienne T. M. und Amaresh Chakrabarti, 2009. *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer.

Bochtler und Laufenberg 1995

Bochtler, Wolfgang und Ludger Laufenberg, 1995. Simultaneous Engineering. In: Eversheim, Walter, Hrsg. *Simultaneous Engineering - Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1-18.

Bodendorf 2006

Bodendorf, Freimut, 2006. *Daten- und Wissensmanagement*. 2., aktualisierte und erweiterte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Bogaschewsky und Rollberg 1998

Bogaschewsky, Ronald und Roland Rollberg, 1998. *Prozessorientiertes Management*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Bongulielmi 2002

Bongulielmi, Luca, 2002. *Die Konfigurations- und Verträglichkeitsmatrix als Beitrag zur Darstellung konfigurationsrelevanter Aspekte im Produktentstehungsprozess*. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation.

Bosch Rexroth 2008

Bosch Rexroth, 2008. *Produktions- und Handlingsysteme - Alte Tugenden im neuen Gewand*. Verfügbar:

http://www.boschrexroth.com/country_units/europe/germany/de/unternehmen/presse/themen_u

- nd_statementservice/produktinformationen/corporate_de/2008/themenservice_production_handlingsysteme. Zugriff: 11.02.2014.
- Boyer und Freyssenet 2003
Boyer, Robert und Michel Freyssenet, 2003. *Produktionsmodelle - Eine Typologie am Beispiel der Automobilindustrie*. Berlin: edition sigma.
- Brecher et al. 2011
Brecher, Christian, Jescke, Sabine, Schuh, Günther, Aghassi, Susanne, Arnoscht, Jonas, Bauhoff, Fabian, Fuchs, Sascha, Jooß, Claudia, Karmann, Oliver, Kozielski, Stefan, Orilski, Simon, Richert, Anja, Roderburg, Andreas, Schiffer, Michael, Schubert, Johannes, Stiller, Sebastian, Tönissen, Stefan und Florian Welter, 2011. Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. In: Brecher, Christian, Hrsg. *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 17-81.
- Brecher et al. 2013
Brecher, Christian, Özdemir, Denis, Ecker, Christian, Eilers, Jan und Wolfram Lohse, 2013. Modellbasierte Rekonfigurierbarkeit. In: *wt Werkstattstechnik online* **103** (2), S. 157-161.
- Broy 2010
Broy, Manfred, Hrsg., 2010. *Cyber-Physical Systems - Innovation durch intensive eingebettete Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Buchholz und Clausen 2009
Buchholz, Peter und Uwe Clausen, 2009. *Große Netze der Logistik - Die Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs 559*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bullinger 1986
Bullinger, Hans-Jörg, 1986. *Systematische Montageplanung - Handbuch für die Praxis*. München, Wien: Hanser.
- Bullinger und Warschat 1996
Bullinger, Hans-Jörg und Warschat Joachim, Hrsg., 1996. *Concurrent Simultaneous Engineering Systems - The Way to Successful Product Development*. London: Springer.
- Burgstahler 1996
Burgstahler, Bernd, 1996. *Synchronisation von Produkt- und Produktionsentwicklung mit Hilfe eines Technologiekalenders*. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Dissertation.
- Cantelon et al. 2013
Cantelon, Mike, Harter, Marc, Holowaychuk, T. J. und Nathan Rajlich, 2013. *Node.js in Action*. Shelter Island: Manning Publications.
- Churchill 1974
Churchill, Winston S., 1974. House of Commons - 1925. In: James, Robert R., Hrsg. *Winston S. Churchill: His Complete Speeches, 1897-1963*. New York: Chelsea House Publishers, S. 3706.

Dangelmaier 2003

Dangelmaier, Wilhelm, 2003. *Produktion und Information - System und Modell*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Dangelmaier 2009

Dangelmaier, Wilhelm, 2009. *Theorie der Produktionsplanung und -Steuerung: Im Sommer Keine Kirschpralinen?* Berlin, Heidelberg: Springer.

Denkena und Drabow 2005

Denkena, Berend und Gregor Drabow, 2005. Gestaltung und Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Betriebsmitteln. In: Wiendahl, Hans-Peter, Nofen, Dirk, Klußmann, Jan H. und Frank Breitenbach, Hrsg. *Planung modularer Fabriken - Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*. München, Wien: Hanser, S. 68-92.

DIN 8580

DIN 8580 2003-09 *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*.

DIN 8593-0

DIN 8593-0 2003-09 *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines Einordnung, Unterteilung, Begriffe*.

DIN EN 60300-1

DIN EN 60300-1 2010-10 *Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 1: Leitfaden für Management und Anwendung (IEC 56/1368/CD:2010) (Entwurf)*.

Dombrowski et al. 2009

Dombrowski, Uwe, Herrmann, Christoph, Lacker, Thomas und Sonnentag Sabine, Hrsg., 2009. *Modernisierung kleiner und mittlerer Unternehmen - Ein ganzheitliches Konzept*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Duden 2011

Duden, 2011. *Deutsches Universalwörterbuch - Das umfassende Bedeutungswörterbuch der deutschen Gegenwartssprache*. 7., überarbeitete und erweiterte Aufl. Mannheim: Bibliographisches Institut.

Ehrlenspiel 2009

Ehrlenspiel, Klaus, 2009. *Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 4., aktualisierte Aufl. München, Wien: Hanser.

Eichhorn 1979

Eichhorn, Wolfgang, 1979. Modelle und Theorien in den Wirtschaftswissenschaften. In: Raffée, Hans und Bodo Abel, Hrsg. *Wissenschaftstheoretische Grundfragen der Wirtschaftswissenschaften*. München: Vahlen, S. 60-104.

Eigner und Stelzer 2009

Eigner, Martin und Ralph Stelzer, 2009. *Product Lifecycle Management - Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

ElMaraghy et al. 2005

ElMaraghy, Hoda A., Kuzgunkaya, Onur und R. J. Urbanic, 2005. Manufacturing Systems Configuration Complexity. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **54** (1), S. 445-450.

ElMaraghy und Wiendahl 2009

ElMaraghy, Hoda A. und Hans-Peter Wiendahl, 2009. Changeability. In: ElMaraghy, Hoda A., Hrsg. *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. London: Springer, S. 3-24.

Ericsson und Erixon 1999

Ericsson, Anna und Gunnar Erixon, 1999. *Controlling Design Variants - Modular Product Platforms*. Dearborn: Modular Management AB and Society of Manufacturing Engineers.

Erlach 2010

Erlach, Klaus, 2010. *Wertstromdesign - Der Weg zur schlanken Fabrik*. 2., bearbeitete und erweiterte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Eversheim und Krause 1996

Eversheim, Walter und Frank-Lothar Krause, 1996. Produktgestaltung. In: Eversheim, Walter und Günther Schuh, Hrsg. *Produktion und Management - Betriebshütte*. 7., völlig neu bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 7/26 – 7/72.

Eversheim und Schuh 2005

Eversheim, Walter und Schuh Günther, Hrsg., 2005. *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Fallböhrer 2000

Fallböhrer, Markus, 2000. *Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation.

Feldhusen und Gebhardt 2008

Feldhusen, Jörg und Boris Gebhardt, 2008. *Product Lifecycle Management für die Praxis - Ein Leitfaden zur modularen Einführung, Umsetzung und Anwendung*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Felix 1998

Felix, Herbert, 1998. *Unternehmens- und Fabrikplanung - Planungsprozesse, Leistungen und Beziehungen*. München: Hanser.

Fischer und Dangelmaier 2000

Fischer, Wolfram und Wilhelm Dangelmaier, 2000. *Produkt- und Anlagenoptimierung - Effiziente Produktentwicklung und Systemauslegung*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Flörchinger et al. 2013

Flörchinger, Marie-Louise, Landherr, Martin und Yiwen Xu, 2013. Fabrik-Stand-by. In: *wt Werkstattstechnik online* **103** (3), S. 212-215.

Gabler 2013

Gabler, 2013. Produktion. In: *Gabler Wirtschaftslexikon - Das Wissen der Experten*. Wiesbaden: Springer Gabler.

Gausemeier et al. 2009

Gausemeier, Jürgen, Plass, Christoph und Christoph Wenzelmann, 2009. *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung - Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. München: Hanser.

Gausemeier et al. 2012a

Gausemeier, Jürgen, Brandis, Rinje, Dorociak, Rafal, Mülder, Andreas, Nyßen, Alexander und Axel Terfloth, 2012. Integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem. In: Gausemeier, Jürgen, Lanza, Gisela und Udo Lindemann, Hrsg. *Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren - Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung*. München: Hanser, S. 88-125.

Gausemeier et al. 2012b

Gausemeier, Jürgen, Lanza, Gisela und Lindemann Udo, Hrsg., 2012. *Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren - Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung*. München: Hanser.

Gennari et al. 2003

Gennari, John H., Musen, Mark A., Ferguson, Ray W., Grosso, William E., Crubézy, Monica, Eriksson, Henrik, Noy, Natalya F. und Samson W. Tu, 2003. The evolution of Protégé: an environment for knowledge-based systems development. In: *International Journal of Human-Computer Studies* **58** (1), S. 89-123.

Göpfert 1998

Göpfert, Jan, 1998. *Modulare Produktentwicklung - Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.

Grabowski et al. 1993

Grabowski, Hans, Anderl, Reiner, Polly, Adam und Hans-Jürgen Warnecke, 1993. *Integriertes Produktmodell*. Berlin: Beuth.

Grosse et al. 1997

Grosse, Arnd G., Hartroth, Jörn, Hillebrand, Gerd, Kottmann, Dietmar A., Krüger, Gerhard und Peter C. Lockemann, 1997. SFB 346. In: Jarke, Matthias, Pasedach, Klaus und Klaus Pohl, Hrsg. *Informatik '97 Informatik als Innovationsmotor - 27. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik Aachen*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 185-194.

Gruber 1993

Gruber, Thomas R., 1993. A Translation Approach to Portable Ontology Specification. In: *Knowledge Acquisition* **5** (2), S. 199-220.

Hahn und Hungenberg 2001

Hahn, Dietger und Harald Hungenberg, 2001. *PuK - Planung und Kontrolle, Planungs- und Kontrollsysteme, Planungs- und Kontrollrechnung - Wertorientierte Controllingkonzepte*. 6., vollständig überarbeitete und erweiterte Aufl. Wiesbaden: Gabler.

Heger 2007

Heger, Christoph, 2007. *Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten*. Hannover, Leibniz Universität, Dissertation.

Heidereich und Schotten 1999

Heidereich, Thorsten und Martin Schotten, 1999. Prozesse. In: Luczak, Holger und Walter Eversheim, Hrsg. *Produktionsplanung und -steuerung - Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 2., korrigierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 75-143.

Heisel und Meitzner 2006

Heisel, Uwe und Martin Meitzner, 2006. Progress in Reconfigurable Manufacturing Systems. In: Dashchenko, Anatoli I., Hrsg. *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 47-62.

Heisel und Stehle 2009

Heisel, Uwe und Thomas Stehle, 2009. Konfiguration und Rekonfiguration von Produktionssystemen. In: Bullinger, Hans-Jörg, Spath, Dieter, Warnecke, Hans-Jürgen und Engelbert Westkämper, Hrsg. *Handbuch Unternehmensorganisation - Strategien, Planung, Umsetzung*. 3., neu bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 448-472.

Henderson 1984

Henderson, Bruce D., 1984. *Die Erfahrungskurve in der Unternehmensstrategie*. 2., überarbeitete Aufl. Frankfurt am Main: Campus.

Henseler 2003

Henseler, Patrick, 2003. *Die Konfigurations- und Verträglichkeitsmatrix als Beitrag für eine differenzierte Betrachtung von Konfigurationsproblemen*. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation.

Herman et al. 2000

Herman, Ivan, Melancon, Guy und Scott M. Marshall, 2000. Graph Visualization and Navigation in Information Visualization. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 6 (1), S. 24-43.

Herrmann 2010

Herrmann, Christoph, 2010. *Ganzheitliches Life Cycle Management - Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Hesse 2012

Hesse, Stefan, 2012. Montagegerechte Produktgestaltung. In: Lotter, Bruno und Hans-Peter

- Wiendahl, Hrsg. *Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 11-58.
- Hitzler et al. 2008
Hitzler, Pascal, Krötzsch, Markus, Rudolph, Sebastian und York Sure, 2008. *Semantic Web - Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Horridge 2011
Horridge, Matthew, 2011. *A Practical Guide To Building OWL Ontologies Using Protégé 4 and CO-ODE Tools*. Edition 1.3. Manchester: The University of Manchester.
- Jacobi 2013
Jacobi, Hans-Friedrich, 2013. Computer Integrated Manufacturing (CIM). In: Westkämper, Engelbert, Spath, Dieter, Constantinescu, Carmen und Joachim Lentjes, Hrsg. *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 51-92.
- Jockisch und Rosendahl 2010
Jockisch, Maike und Jens Rosendahl, 2010. Klassifikation von Modellen. In: Bandow, Gerhard und Hartmut H. Holzmüller, Hrsg. *"Das ist gar kein Modell!" - Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften*. Wiesbaden: Gabler, S. 23-52.
- Jodlbauer 2007
Jodlbauer, Herbert, 2007. *Produktionsoptimierung - Wertschaffende sowie kundenorientierte Planung und Steuerung*. Wien: Springer.
- Kagermann et al. 2012
Kagermann, Henning, Wahlster, Wolfgang und Helbig Johannes, Hrsg., 2012. *Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern - Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Berlin: Forschungsunion im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V.
- Kletti und Schumacher 2011
Kletti, Jürgen und Jochen Schumacher, 2011. *Die perfekte Produktion - Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT)*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Klocke et al. 2005
Klocke, Fritz, Brecher, Christian, Weck, Manfred, Meidlinger, Rouven und Hagen Wegner, 2005. Bewertung von Fertigungsfolgen. In: Eversheim, Walter und Günther Schuh, Hrsg. *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 208-225.
- Kluge et al. 2009
Kluge, Stefan, Pflüger, Thorsten, Westkämper, Engelbert und Burkhard Pedell, 2009. Modulare Montagesysteme. In: *wt Werkstattstechnik online* 99 (9), S. 592-597.

Kluge 2011

Kluge, Stefan, 2011. *Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme*. Stuttgart, Universität, Dissertation.

Kohlhase 2013

Kohlhase, Markus, 2013. *Konzeption und Implementierung einer webbasierten Applikation zur zielgerichteten Informationsbeschaffung aus einer integrierten Produkt- und Montageontologie in der variantenreichen Serienfertigung*. Stuttgart, Universität, Diplomarbeit.

Konold und Reger 2003

Konold, Peter und Herbert Reger, 2003. *Praxis der Montagetechnik - Produktdesign, Planung, Systemgestaltung*. 2., überarbeitete und erweiterte Aufl. Wiesbaden: Vieweg.

Koren 2006

Koren, Yoram, 2006. General RMS Characteristics. In: Dashchenko, Anatoli I., Hrsg. *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 27-45.

Koren 2010

Koren, Yoram, 2010. *The Global Manufacturing Revolution - Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*. Hoboken: Wiley.

Koren und Ulsoy 2002

Koren, Yoram und Galip Ulsoy, 2002. Vision, Principles and Impact of Reconfigurable Manufacturing Systems. In: *Powertrain International* **5** (3), S. 14-21.

Kornmeier 2007

Kornmeier, Martin, 2007. *Wissenschaftstheorie und wissenschaftliches Arbeiten - Eine Einführung für Wirtschaftswissenschaftler*. Heidelberg: Physica.

Landherr et al. 2012

Landherr, Martin, Neumann, Michael, Volkmann, Johannes W., Westkämper, Engelbert und Bauernhansl Thomas, 2012. Individuelle Softwareunterstützung für jeden Ingenieur. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **107** (9), S. 628-631.

Landherr et al. 2013

Landherr, Martin, Neumann, Michael, Volkmann, Johannes und Carmen Constantinescu, 2013. Digitale Fabrik. In: Westkämper, Engelbert, Spath, Dieter, Constantinescu, Carmen und Joachim Lentjes, Hrsg. *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 107-132.

Landherr und Constantinescu 2011

Landherr, Martin und Carmen Constantinescu, 2011. Configuration of Factories and Technical Processes: Which Role Plays Knowledge Modelling? In: *Proceedings of the 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems*. Madison: Omnipress, S. 1-4.

Landherr und Constantinescu 2012

Landherr, Martin und Carmen Constantinescu, 2012. Intelligent Management of Manufacturing Knowledge. In: *Procedia CIRP* **3**, S. 269-274.

Liao 2005

Liao, Shu-Hsien, 2005. Expert system methodologies and applications. In: *Expert Systems with Applications* **25**, S. 93-103.

Lindemann 2007

Lindemann, Udo, 2007. *Methodische Entwicklung technischer Produkte - Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Lindemann und Baumberger 2006

Lindemann, Udo und Georg C. Baumberger, 2006. Individualisierte Produkte. In: Lindemann, Udo, Reichwald, Ralf und Michael F. Zäh, Hrsg. *Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 7-16.

Lindemann und Maurer 2006

Lindemann, Udo und M. Maurer, 2006. Entwicklung und Strukturplanung individualisierter Produkte. In: Lindemann, Udo, Reichwald, Ralf und Michael F. Zäh, Hrsg. *Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 40-62.

Löffler 2011

Löffler, Carina, 2011. *Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung*. Stuttgart, Universität, Dissertation.

Lotter 2012

Lotter, Bruno, 2012. Einführung. In: Lotter, Bruno und Hans-Peter Wiendahl, Hrsg. *Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1-8.

Marshall et al. 1998

Marshall, Russel, Leaney, P. G. und P. Botterell, 1998. Enhanced product realisation through modular design: an example of product/process integration. In: *Proceedings of 3rd Biennial World Conference on Integrated Design and Process Technology*. Loughborough: Society for Design and Process Sciences.

Mateika 2005

Mateika, M., 2005. *Unterstützung der lebenszyklusorientierten Produktplanung am Beispiel des Maschinen- und Anlagenbaus*. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Dissertation.

Matt et al. 2013

Matt, Dominik T., Spath, Dieter, Braun, Steffen, Schlund, Sebastian und Daniel Krause, 2013.

- Morgenstadt - Urban Production in the City of the Future. In: Zäh, Michael F., Hrsg. *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer, S. 13-16.
- Meier et al. 2012
Meier, Horst, Schröder, Stefan, Velkova, Julia und Annika Schneider, 2012. Modularisierung als Gestaltungswerkzeug für wandlungsfähige Produktionssysteme. In: *wt Werkstattstechnik online* **102** (4), S. 181-185.
- Mittal und Frayman 1989
Mittal, Sanjay und Felix Frayman, 1989. Towards a generic model of configuration tasks. In: *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence - IJCAI*. San Francisco: Morgan Kaufmann, S. 1395-1401.
- Müller 2007
Müller, Stefan, 2007. *Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen*. München, Technische Universität, Dissertation.
- Nilles 2001
Nilles, Volker, 2001. *Effiziente Gestaltung von Produktordnungssystemen*. München, Technische Universität, Dissertation.
- Nofen et al. 2005a
Nofen, Dirk, Klußmann, Jan H. und Frederik Löllmann, 2005. Bedeutung der Wandlungsfähigkeit für die Zukunftsrobustheit von Fabriken. In: Wiendahl, Hans-Peter, Nofen, Dirk, Klußmann, Jan H. und Frank Breitenbach, Hrsg. *Planung modularer Fabriken - Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*. München, Wien: Hanser, S. 8-15.
- Nofen et al. 2005b
Nofen, Dirk, Klußmann, Jan H. und Frederik Löllmann, 2005. Nutzung wandlungsfähiger modularer Fabriken. In: Wiendahl, Hans-Peter, Nofen, Dirk, Klußmann, Jan H. und Frank Breitenbach, Hrsg. *Planung modularer Fabriken - Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*. München, Wien: Hanser, S. 51-67.
- Nußbaum 2011
Nußbaum, Christopher Lee, 2011. *Modell zur Bewertung des Wirkungsgrads von Produktkomplexität*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation.
- Nyhuis et al. 2008
Nyhuis, Peter, Nickel, Rouven und Tullius Knut, Hrsg., 2008. *Globales Varianten-Produktionssystem - Globalisierung mit System*. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum.
- Nyhuis und Wiendahl 2012
Nyhuis, Peter und Hans-Peter Wiendahl, 2012. *Logistische Kennlinien - Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Oedekoven et al. 2012

Oedekoven, Dirk, Bauhoff, Fabian und Stefan Kompa, 2012. Harmonisierung von ERP-/PPS-Prozessen und -Systemen. In: Schuh, Günther und Volker Stich, Hrsg. *Produktionsplanung und -steuerung I - Grundlagen der PPS*. 4., überarbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Ohno 1993

Ohno, Taiichi, 1993. *Das Toyota-Produktionssystem*. Frankfurt am Main, New York: Campus.

Pahl et al. 2007

Pahl, Gerhard, Beitz, Wolfgang, Feldhusen, Jörg und Karl-Heinrich Grote, 2007. *Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Parsaei und Sullivan 1993

Parsaei, Hamid R. und Sullivan William G., Hrsg., 1993. *Concurrent Engineering - Contemporary Issues and Modern Design Tools*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Patzak 1982

Patzak, Gerold, 1982. *Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme - Grundlagen, Methoden, Techniken*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Phaal et al. 2004

Phaal, Rober, Farrukh, Clare J. P. und David R. Propert, 2004. Technology Roadmapping. In: *Technological Forecasting and Social Change* **71** (1-2), S. 5-26.

Piller 2006

Piller, Frank T., 2006. *Mass Customization - Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter*. 4., überarbeitete und erweiterte Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.

Polanyi 1985

Polanyi, Michael, 1985. *Implizites Wissen*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Ponn und Lindemann 2011

Ponn, Josef und Udo Lindemann, 2011. *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte - Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Porter 2013

Porter, Michael E., 2013. *Wettbewerbsstrategie - Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten*. 12., aktualisierte und erweiterte Aufl. Frankfurt am Main: Campus.

Prenting und Battaglin 1964

Prenting, T. O. und R. M. Battaglin, 1964. The Precedence Diagram. In: *Journal of Industrial Engineering* **15** (4), S. 208-213.

Puls 2002

Puls, Christoph, 2002. *Die Konfigurations- und Verträglichkeitsmatrix als Beitrag zum Management von Konfigurationswissen in KMU*. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation.

REFA 1993

REFA, Hrsg., 1993. *Ausgewählte Methoden der Planung und Steuerung*. München: Hanser.

Reinhart et al. 1999

Reinhart, Gunther, Dürrschmidt, S., Hirschberg, A. und C. Selke, 1999. Reaktionsfähigkeit für Unternehmen. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **94** (1-2), S. 21-24.

Rezaei 2010

Rezaei, Majid, 2010. *Konstruktion eines Fabrikinformationsmanagements auf Basis von postrelationalen Datenbanken*. Darmstadt, Technische Universität, Dissertation.

Rhoades 2005

Rhoades, Lawrence J., 2005. The Transformation of Manufacturing in the 21st Century. In: National Academy of Engineering, Hrsg. *The Bridge - Linking Engineering and Society*. Washington, D.C: National Academies Press, S. 13-20.

Ropohl 2009

Ropohl, Günter, 2009. *Allgemeine Technologie - Eine Systemtheorie der Technik*. 3., überarbeitete Aufl. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.

Ropohl 2012

Ropohl, Günter, 2012. *Allgemeine Systemtheorie - Einführung in transdisziplinäres Denken*. Berlin: edition sigma.

Roscher 2007

Roscher, Jörg, 2007. *Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie*. Stuttgart, Universität, Dissertation.

Rother 2009

Rother, Mike, 2009. *Die Kata des Weltmarktführers - Toyotas Erfolgsmethoden*. Frankfurt am Main: Campus.

Rother und Shook 2004

Rother, Mike und John Shook, 2004. *Sehen lernen - Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen*. Aachen: The Lean Management Institute.

Rude 1998

Rude, Stefan, 1998. *Wissensbasiertes Konstruieren*. Aachen: Shaker.

Schaller 1980

Schaller, Ulrich, 1980. *Ein Beitrag zur vorteilhaften Erzeugnisgliederung bei variantenreicher*

Serienfertigung im Maschinenbau. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation.

Scheer 1990

Scheer, August-Wilhelm, 1990. *CIM Computer Integrated Manufacturing - Der computergesteuerte Industriebetrieb*. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Schenk et al. 2010

Schenk, Michael, Wirth, Siegfried und Egon Müller, 2010. *Factory Planning Manual - Situation-Driven Production Facility Planning*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Schenk und Wirth 2004

Schenk, Michael und Siegfried Wirth, 2004. *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb - Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Scholl 2008

Scholl, Armin, 2008. Grundlagen der modellgestützten Planung. In: Arnold, Dieter, Isermann, Heinz, Kuhn, Axel, Tempelmeier, Horst und Kai Furmans, Hrsg. *Handbuch Logistik*. 3., neu bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 35-43.

Schuh 2005

Schuh, Günther, 2005. *Produktkomplexität managen - Strategien, Methoden, Tools*. 2., überarbeitete und erweiterte Aufl. München, Wien: Hanser.

Schuh et al. 2007a

Schuh, Günther, Gottschalk, Sebastian, Schöning, Sebastian, Gulden, Alexander, Rauhut, Marcus und Eduardo Zancul, 2007. *Effizient, schnell und erfolgreich - Strategien im Maschinen- und Anlagenbau*. Frankfurt am Main: VDMA.

Schuh et al. 2007b

Schuh, Günther, Klocke, Fritz, Brecher, Christian und Schmitt Robert, Hrsg., 2007. *Excellence in Production - Festschrift für Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Dr. techn. h.c. Dr. oec. h.c. Walter Eversheim*. Aachen: Apprimus.

Schuh et al. 2011a

Schuh, Günther, Schmitt, Robert, Arnoscht, Jonas, Bohl, Arne, Kupke, Daniel, Lenders, Michael, Nußbaum, Christopher Lee, Quick, Jerome und Michael Vorspel-Rüter, 2011. Integrative Konfigurationslogik für Produkt-Produktionssysteme. In: Brecher, Christian, Hrsg. *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 86-143.

Schuh et al. 2011b

Schuh, Günther, Kampker, Achim und Robin Huesmann, 2011. Unternehmensentwicklung. In: Schuh, Günther und Achim Kampker, Hrsg. *Strategie und Management produzierender Unternehmen - Handbuch Produktion und Management I*. 2., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 231-326.

Schuh und Jonas 1997

Schuh, Günther und I. Jonas, 1997. *Variante nreduzierung im Verbund - Praktikable Methode zum Variantenmanagement, Ein Leitfaden zur Beherrschung der Variantenvielfalt*. Düsseldorf: ViA Verbundinitiative Automobil Nordrhein-Westfalen.

Skinner 1986

Skinner, Wickham, 1986. The productivity paradox. In: *Harvard Business Review* 75 (9), S. 41-45.

Som et al. 2011

Som, Oliver, Kinkel, Steffen und Angela Jäger, 2011. Innovationsstrategien jenseits von Forschung und Entwicklung. In: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Hrsg. *Modernisierung der Produktion*. Karlsruhe, S. 1-12.

Spath et al. 2011

Spath, Dieter, Linder, Christian und Sven Seidenstricker, 2011. *Technologiemanagement - Grundlagen, Konzepte, Methoden*. Stuttgart: Fraunhofer IRB.

Spur et al. 1994

Spur, Günter, Schröder, Sascha und Frank Zurlino, 1994. System Fabrikbetrieb. In: Spur, Günter und Theodor Stöferle, Hrsg. *Handbuch der Fertigungstechnik - Band 6: Fabrikbetrieb*. München: Hanser, S. 18-29.

Spur 2012

Spur, Günter, 2012. Produktion. In: Czichos, Horst, Hennecke, Manfred und Akademischer Verein Hütte e.V., Hrsg. *Hütte - Das Ingenieurwissen*. 34., aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, S. L1-L57.

Stachowiak 1973

Stachowiak, Herbert, 1973. *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.

Staehle 1973

Staehle, Wolfgang H., 1973. *Organisation und Führung sozio-technischer Systeme - Grundlagen einer Situationstheorie*. Stuttgart: Enke.

Stokes 1997

Stokes, Donald E., 1997. *Pasteur's Quadrant - Basic Science and Technological Innovation*. Washington, D.C: Brookings Institution.

Suh 2001

Suh, Nam P., 2001. *Axiomatic Design - Advances and Applications*. New York: Oxford University Press.

Taylor 2004

Taylor, Rebecca, 2004. Collaborating to Meet Manufacturing Challenges. In: National Research Council, Hrsg. *New Directions in Manufacturing*. Washington, D.C: National Academies Press, S. 100-104.

Tempelmeier und Kuhn 1993

Tempelmeier, Horst und Heinrich Kuhn, 1993. *Flexible Fertigungssysteme - Entscheidungsunterstützung für Konfiguration und Betrieb*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Tidd 1997

Tidd, J., 1997. Key Characteristics of Assembly Automation Systems. In: Shimokawa, Koichi, Jürgens, Ulrich und Takahiro Fujimoto, Hrsg. *Transforming Automobile Assembly - Experience in Automation and Work Organization*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 46-60.

Tolk und Lakhmi 2009

Tolk, Andreas und Jain C. Lakhmi, 2009. An Introduction to Complex Systems in the Knowledge-Based Environment. In: Tolk, Andreas und Jain C. Lakhmi, Hrsg. *Complex Systems in Knowledge-based Environments - Theory, Models and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1-6.

Töllner et al. 2010

Töllner, Alke, Jungmann, Thorsten, Bücken, Matthias und Tobias Brutscheck, 2010. Modelle und Modellierung. In: Bandow, Gerhard und Hartmut H. Holzmüller, Hrsg. *"Das ist gar kein Modell!" - Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften*. Wiesbaden: Gabler, S. 3-21.

Ulrich 1981

Ulrich, Hans, 1981. Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: Geist, Manfred N. und Richard Köhler, Hrsg. *Die Führung des Betriebes*. Stuttgart: Poeschel, S. 1-26.

Ulrich und Probst 1995

Ulrich, Hans und Gilbert J. B. Probst, 1995. *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln - Ein Brevier für Führungskräfte*. 4., unveränderte Aufl. Bern: Paul Haupt.

Unbehauen 2008

Unbehauen, Heinz, 2008. *Regelungstechnik I - Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme*. 15., überarbeitete und erweiterte Aufl. Wiesbaden: Vieweg.

Upitz 2013

Upitz, Alexander, 2013. *Ländermarktspezifische Timingstrategien und internationale Wettbewerbsstrategien*. Duisburg-Essen, Universität, Dissertation.

VDA 2010

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Hrsg., 2010. *Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft - Allgemeines, Risikoanalysen, Methoden, Vorgehensmodelle*. Frankfurt am Main.

VDA 2011

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), 2011. *Produktentstehung - Prozessbeschreibung Besondere Merkmale (BM)*. Berlin.

VDI 2860

VDI 2860 1990-05 *Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe, Definitionen, Symbole*.

VDI 3780

VDI 3780 2000-09 *Technikbewertung - Begriffe und Grundlagen*.

VDI 2206

VDI 2206 2004-06 *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*.

Vogel-Heuser et al. 2012

Vogel-Heuser, Birgit, Bayrak, Gülden und Ursula Frank, 2012. *Forschungsfragen in "Produktionsautomatisierung der Zukunft" - acatech Materialien: Diskussionspapier für die acatech Projektgruppe "ProCPS - Production CPS"*. München: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.

Voigt 2013

Voigt, Kai-Ingo, 2013. Montage. In: *Gabler Wirtschaftslexikon - Das Wissen der Experten*. Wiesbaden: Springer Gabler.

Volling 2008

Volling, Thomas, 2008. *Auftragsbezogene Planung bei variantenreicher Serienproduktion*. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Dissertation.

W3C 2005

W3C, 2005. *Web Services Addressing 1.0 - Core*. Verfügbar: <http://www.w3.org/TR/2005/WD-ws-addr-core-20050215/>. Zugriff: 26.03.2014.

W3C 2012

W3C, 2012. *OWL 2 Web Ontology Language - Document Overview*. Verfügbar: <http://www.w3.org/TR/2012/REC-owl2-overview-20121211/>. Zugriff: 26.03.2014.

Warnecke und Hüser 1996

Warnecke, Hans-Jürgen und Manfred Hüser, 1996. *Die Fraktale Fabrik - Revolution der Unternehmenskultur*. Reinbek: Rowohlt.

Weber 1998

Weber, Hanno, 1998. *Konzept eines Modells zur Produktentwicklung*. Berlin, Technische Universität, Dissertation.

Weber und Schäffer 2011

Weber, Jürgen und Utz Schäffer, 2011. *Einführung in das Controlling*. 13., überarbeitete und aktualisierte Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

Weerth 2013

Weerth, Carsten, 2013. Integration. In: *Gabler Wirtschaftslexikon - Das Wissen der Experten*. Wiesbaden: Springer Gabler.

Westkämper et al. 2000

Westkämper, Engelbert, Zahn, Erich, Balve, Patrick und Meike Tilebein, 2000. Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. In: *wt Werkstattstechnik online* **90** (1/2), S. 22-26.

Westkämper 2001

Westkämper, Engelbert, 2001. Modulare Produkte - Modulare Montage. In: *wt Werkstattstechnik online* **91** (8), S. 479-482.

Westkämper 2006a

Westkämper, Engelbert, 2006. Digitale Produktion. In: Bullinger, Hans-Jörg, Hrsg. *Technologieführer - Grundlagen-Anwendungen-Trends*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 434-439.

Westkämper 2006b

Westkämper, Engelbert, 2006. Innovationsmanagement mit dem Technologiokalender. In: Gleich, Ronald, Russo, Peter, Rauen, Hartmut und Manfred Wittenstein, Hrsg. *Innovationsmanagement in der Investitionsgüterindustrie treffsicher voranbringen - Konzepte und Lösungen*. Frankfurt am Main: VDMA, S. 104-113.

Westkämper 2006c

Westkämper, Engelbert, 2006. Research for Adaptive Assembly. In: Westkämper, Engelbert, Hrsg. *1st CIRP International Seminar on Assembly Systems*. Stuttgart: Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, S. 9-15.

Westkämper 2007

Westkämper, Engelbert, 2007. Nachhaltige Strategien der Produktion am Standort Deutschland. In: Zahn, Erich, Hrsg. *Erfolgreich produzieren am Standort Deutschland - Eine strategische Herausforderung*. Bonn: Lemmens, S. 25-47.

Westkämper 2008

Westkämper, Engelbert, 2008. Fabrikplanung vom Standort bis zum Prozess. In: *8. Deutscher Fachkongress Fabrikplanung*. Ludwigsburg: Management Information Center (MIC), S. 1-26.

Westkämper 2009a

Westkämper, Engelbert, 2009. Einführung. In: Westkämper, Engelbert und Erich Zahn, Hrsg. *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen - Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1-6.

Westkämper 2009b

Westkämper, Engelbert, 2009. Grundlagen des Stuttgarter Unternehmensmodells. In:

- Westkämper, Engelbert und Erich Zahn, Hrsg. *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen - Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 47-66.
- Westkämper 2013a
Westkämper, Engelbert, 2013. Definition und Entwicklung der digitalen Produktion. In: Westkämper, Engelbert, Spath, Dieter, Constantinescu, Carmen und Joachim Lentes, Hrsg. *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 47-50.
- Westkämper 2013b
Westkämper, Engelbert, 2013. Integration in der digitalen Produktion. In: Westkämper, Engelbert, Spath, Dieter, Constantinescu, Carmen und Joachim Lentes, Hrsg. *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 133-144.
- Westkämper 2013c
Westkämper, Engelbert, 2013. *Towards the Re-Industrialization of Europe - A Concept for Manufacturing 2030*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Westkämper und Zahn 2009a
Westkämper, Engelbert und Erich Zahn, 2009. Vorwort. In: Westkämper, Engelbert und Erich Zahn, Hrsg. *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen - Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. V.
- Westkämper und Zahn 2009b
Westkämper, Engelbert und Zahn Erich, Hrsg., 2009. *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen - Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Wiendahl et al. 2004
Wiendahl, Hans-Peter, Gerst, Detlef und Keunecke Lars, Hrsg., 2004. *Variantenbeherrschung in der Montage - Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Wiendahl et al. 2007
Wiendahl, Hans-Peter, ElMaraghy, Hoda A., Nyhuis, Peter, Zäh, Michael F., Wiendahl, Hans-Hermann, Duffie, Neil und Michael Brieke, 2007. Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **56** (2), S. 783-809.
- Wiendahl et al. 2009
Wiendahl, Hans-Peter, Reichardt, Jürgen und Peter Nyhuis, 2009. *Handbuch Fabrikplanung - Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. München: Hanser.
- Wiendahl und Hernández Morales 2000
Wiendahl, Hans-Peter und Roberto Hernández Morales, 2000. Wandlungsfähigkeit. In: *Industrie Management* **16** (5), S. 37-41.
- Wildemann 2009
Wildemann, Horst, 2009. Visualisierung als Controlling-Instrument. In: Bullinger, Hans-Jörg, Spath, Dieter, Warnecke, Hans-Jürgen und Engelbert Westkämper, Hrsg. *Handbuch*

Unternehmensorganisation - Strategien, Planung, Umsetzung. 3., neu bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 956-964.

Wörn 2008

Wörn, Arno, 2008. Wandlungsfähigkeit in der unternehmensnahen Fachliteratur. In: Nyhuis, Peter, Reinhart, Gunther und Eberhard Abele, Hrsg. *Wandlungsfähige Produktionssysteme - Heute die Industrie von morgen gestalten*. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum, S. 41-47.

Wright 1936

Wright, T. P., 1936. Factors Affecting the Cost of Airplanes. In: *Journal of the Aeronautical Sciences* **3** (4), S. 122-128.

Zangemeister 1976

Zangemeister, Christof, 1976. *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik - Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. 4. Aufl. München: Wittemannsche Buchhandlung.

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag, die Effizienz und die Wandlungsfähigkeit in der variantenreichen Serienmontage durch die aufwandsarme Anpassung der technischen Systeme zu erhöhen. Dafür wird die integrierte Produkt- und Montagekonfiguration, bestehend aus einer Konzeptualisierung der sozio-technischen Systeme, einer situationsorientierten Vorgehensweise sowie einem Softwaresystem zur flexiblen Informationsbereitstellung vorgestellt.

ISBN 978-3-8396-0809-8



FRAUNHOFER VERLAG