

# **Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung**

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

von  
**Dipl.-Ing. Carina Löffler M.Sc.**  
aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult.  
Engelbert Westkämper  
Mitberichter: Prof. Dr. rer. pol. Erich Zahn

Tag der Einreichung: 12.10.2011  
Tag der mündlichen Prüfung: 07.12.2011

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb  
der Universität Stuttgart

2011

# IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und  
Automatisierung (IPA), Stuttgart,  
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und  
Organisation (IAO), Stuttgart,  
Institut für Industrielle Fertigung und  
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart  
und Institut für Arbeitswissenschaft und  
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart


Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper  
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger  
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath

Carina Löffler



# Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serien- fertigung

Nr. 519

Dr.-Ing. Carina Löffler

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN 978-3-939890-90-4

Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost-Jetter Verlag, Heimsheim 2011.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

## Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper   Hans-Jörg Bullinger   Dieter Spath

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorandin der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart am Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) und einem Unternehmen der Automobilindustrie.

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Engelbert Westkämper, dem Direktor des IFF und Fraunhofer IPA sowie dem Initiator und Vorsitzenden der GSaME. Er hat diese Arbeit mit größter Leidenschaft an strategischen Visionen für die Produktion angeregt und betreut. Dank seiner steten Motivation und den kontinuierlichen Herausforderungen, vor die er mich immer wieder gestellt hat, durfte ich vielfältige Erfahrungen sammeln, die weit über die Ergebnisse dieser Arbeit hinausgehen. Herrn Prof. Dr. rer. pol. Erich Zahn danke ich für die engagierte Übernahme des Mitberichts, die wertvollen Hinweise und die spannenden Diskussionen in den letzten Jahren über den Tellerrand des Maschinenbaus hinaus.

Diese Arbeit war möglich, weil das Unternehmen, an dem ich meine Konzepte entwickelt und verifiziert habe, so offen mitgezogen ist. Daher gilt mein großer Dank Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Karl Unger, der mir mit seiner breiten Erfahrung der automobilen Produktion sowohl die Türen im Unternehmen geöffnet hat als auch immer zu wertvollen fachlichen Diskussionen bereit war. Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die mich während meiner Arbeit unterstützt haben, danke ich für die aufgeschlossene Art und die stete Hilfsbereitschaft. Stellvertretend geht mein Dank an Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Klaus Kraft für die vielen hilfreichen Kontakte.

Allen Kolleginnen und Kollegen am IFF, IPA und der GSaME, die meinen Weg begleitet haben, danke ich für die kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit. Herrn Dipl.-Ing. Hans Friedrich Jacobi danke ich für die kritischen Hinweise bei der Erstellung der Arbeit. Meinen Mitstreitern Herrn Dipl.-Ing. Gernot Frank, Frau Dipl.-Ing. Graziella Kreiseler, Herrn Dipl.-Ing. Markus Hartkopf und Herrn Dipl.-Ing. Torsten Stock danke ich für die Aufmunterungen der letzten Jahre. Mein Dank gilt besonders den Herren cand. tema Stefan Seybold, Dipl.-Ing. Andreas Liebl und Dipl.-Ing. Fabian Rusitschka für die große Einsatzbereitschaft.

Meinen Eltern Brigitte und Horst Löffler danke ich für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit und vor allem dafür, dass sie mir immer den Freiraum gegeben haben, meinen Weg zu gehen und diesen vorbehaltlos gefördert haben.





# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	IX
Abbildungsverzeichnis .....	XII
Abkürzungsverzeichnis .....	XV
1 Einleitung .....	1
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Problemstellung .....	4
1.3 Zielsetzung und Aufgabenstellung .....	5
1.4 Aufbau der Arbeit .....	6
2 Lösungsansätze für wandlungsfähige Fabrikstrukturen und deren Planung .....	7
2.1 Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit .....	7
2.2 Struktur der technischen Systeme in der Produktion .....	10
2.2.1 Struktur der Produkte .....	12
2.2.2 Struktur der Produktion .....	14
2.2.3 Vernetzung von Produkt- und Produktionsstruktur .....	16
2.2.4 Abgrenzung einer Fabrikstruktur .....	18
2.3 Strategische Produktionsplanung .....	21
2.4 Stand der Wissenschaft und Technik .....	27
2.4.1 Relevanz der Wandlungsfähigkeit bei der Gestaltung von Fabriken .....	27
2.4.1.1 Wandlungstreiber .....	27
2.4.1.2 Anforderungen an die Wandlungsfähigkeit .....	30
2.4.1.3 Wandlungsbefähiger .....	31
2.4.2 Strukturierungsansätze für Fabriken .....	37
2.4.3 Methoden zur Strukturplanung .....	39
2.5 Defizit der Planung und Strukturierung von vernetzten Fabriken .....	42
3 Grundlagen zur Planung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen .....	44
3.1 Charakterisierung der existierenden Fabrikstrukturen .....	44
3.1.1 Charakterisierung der Produktstruktur .....	44
3.1.2 Charakterisierung der Produktionsstruktur .....	45

3.1.3	Charakterisierung der Vernetzung von Produkt- und Produktionsstruktur	48
3.2	Klassifizierung und Priorisierung der Wandlungstreiber	50
3.2.1	Kontinuierliche Veränderungen	52
3.2.2	Diskontinuierliche Veränderungen	53
3.2.3	Entwicklung der Wandlungstreiber in der Zukunft	56
3.3	Regelkreissystem der permanenten Strukturadaption	58
3.4	Prognostizierung des Ressourceneinsatzes	60
3.5	Bewertungsgrößen wandlungsfähiger Strukturkonzepte	62
3.6	Anforderungen an eine Planungssystematik zur Gestaltung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen	63
4	Systematik zur Planung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen	65
5	Detaillierung der Planungssystematik	70
5.1	Analyse und Modellierung bestehender Fabrikstrukturen	70
5.1.1	Produktstrukturanalyse entlang der Prozesskette	70
5.1.2	Analyse der Varianz und Änderungsdynamik der Produktstrukturen	72
5.1.3	Produktionsstrukturanalyse	76
5.2	Potentialanalyse auf Basis von Lerneffekten	78
5.3	Terminierung und Synchronisation der Veränderungstreiber mit dem Technologiekalender	80
5.4	Variation der Fabrikstrukturen	83
5.4.1	Prämissen und Wirkbeziehungen zur Dynamisierung des Fabrikstrukturmodells	85
5.4.2	Konzeption eines Werkzeugs zur Variation des Fabrikstrukturmodells	87
5.4.2.1	EDV-Architektur des Planungswerkzeugs	88
5.4.2.2	Realisierung des Werkzeugs zur Variation der Fabrikstrukturen im FactoryVariationPlanner	89
5.5	Grundmodell einer idealen Fabrikstruktur	93
5.6	Konzeption alternativer Strukturkonzepte	95
5.6.1	Grundprinzipien zur Strukturbildung von Fabriken	95
5.6.2	Strategische Stoßrichtungen	98
5.6.2.1	Strategie der Flexibilisierung	99

---

5.6.2.2	Veränderung der Wertschöpfungstiefe .....	104
5.6.2.3	Vergabe von Technologien mit Wachstumspotential .....	106
5.6.2.4	Integration der Prozesskette.....	107
5.6.2.5	Strategie der Standardisierung.....	111
5.6.2.6	Strategie der Wissensintegration.....	114
5.6.3	Wirkung der strategischen Stoßrichtungen auf die strategischen Zielsetzungen und die Wandlungstreiber .....	117
5.6.4	Entwicklung von Partialmodellen für eine Fabrik.....	118
5.6.5	Entwicklung alternativer Strukturmodelle .....	126
5.7	Auswahl des optimalen Strukturkonzepts .....	130
5.7.1	Bewertungskriterien für ein optimales Strukturkonzept.....	131
5.7.2	Belastungsszenarien zur Bewertung von Strukturalternativen.....	133
5.7.3	Bewertung der Strukturalternativen.....	135
6	Validierung der Planungssystematik am Beispiel einer vernetzten Produktion der Automobilindustrie .....	137
6.1	Variation der Fabrikstrukturen und deren systematische Planung für ein Produktionsnetzwerk der Automobilindustrie .....	137
6.2	Planung technologiegetriebener Strukturveränderungen am Beispiel der Elektrifizierung des Antriebsstrangs .....	145
6.3	Fazit aus der Verifizierung der Planungsmethodik .....	146
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	147
7.1	Zusammenfassung .....	147
7.2	Ausblick.....	149
	Summary.....	150
	Anhang.....	153
	Literaturverzeichnis .....	156

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Grundlegende Trends der industriellen Fertigung .....	2
Abbildung 1.2: Methode zur permanenten Anpassung der Fabrikstrukturen .....	5
Abbildung 1.3: Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit .....	6
Abbildung 2.1: Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit .....	9
Abbildung 2.2: Struktur sozio-technischer Systeme in der Produktion in Anlehnung an [Westkämper 2008].....	12
Abbildung 2.3: Struktur der Produkte .....	13
Abbildung 2.4: Struktur der Produktion .....	15
Abbildung 2.5: Vernetzung von Produkt- und Produktionsstruktur .....	17
Abbildung 2.6: Struktur der Fabriken .....	20
Abbildung 2.7: Allgemeine Lenkungszusammenhänge eines lebensfähigen Systems und Ableitung der Handlungsspielräume für die Planung in Anlehnung an [Beer 1995; Malik 2000].....	22
Abbildung 2.8: Transfer des lebensfähigen Modells auf die Fabrikstruktur .....	24
Abbildung 2.9: Einfluss- und Zielgrößen für die strategische Planung zukunftsfähiger Strukturkonzepte.....	25
Abbildung 2.10: Wandlungstreiber auf die industrielle Produktion.....	29
Abbildung 2.11: Anforderungen aus den Wandlungstreibern an die Fabriken und deren Wandlungsfähigkeit.....	31
Abbildung 3.1: Charakterisierung der Produktstruktur entlang der Prozesskette.....	44
Abbildung 3.2: Funktionale Charakterisierung der Produktionsstruktur am Beispiel eines Standorts .....	45
Abbildung 3.3: Ressourcen eines Standortprofils .....	47
Abbildung 3.4: Vernetzung von Produkt und Produktion zur Fabrikstruktur .....	48
Abbildung 3.5: Abstrahierte Fabrikstruktur .....	49
Abbildung 3.6: Klassifizierung der Wandlungstreiber .....	51
Abbildung 3.7: Kontinuierliche Leistungsveränderungen der Fabriken.....	52
Abbildung 3.8: Grundaufbau des Technologiekalenders.....	55
Abbildung 3.9: Beschreibung zukünftiger Entwicklungen der Wandlungstreiber in Szenarien .....	57
Abbildung 3.10: Regelkreis der permanenten Strukturadaption .....	59
Abbildung 3.11: Kalkulation des Ressourceneinsatzes im zeitlichen Verlauf .....	61
Abbildung 3.12: Bewertungsgrößen für eine wandlungsfähige Fabrikstruktur.....	63
Abbildung 3.13: Anforderungen an eine Planungssystematik zur Gestaltung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen .....	64

Abbildung 4.1: Planungsphasen einer permanenten Strukturadaption.....	66
Abbildung 4.2: Aufbau und Ablauf der Planungssystematik für wandlungsfähige Fabrikstrukturen.....	67
Abbildung 5.1: Analyse der Produktstrukturen.....	71
Abbildung 5.2: Komplexitätsanalyse der Produkte.....	73
Abbildung 5.3: Zeitspreizung aufgrund von Produkt- und Ausstattungsvarianz auf einer Montagelinie.....	75
Abbildung 5.4: Analyse der Produktionsstrukturen.....	77
Abbildung 5.5: Beispiel einer Lernkurvenanalyse aus dem Automobilbau.....	78
Abbildung 5.6: Potentialableitung aus Lerneffekten.....	79
Abbildung 5.7: Aufbau des Technologiekalenders zur Synchronisation der Wandlungstreiber.....	81
Abbildung 5.8: Konzeption zur Variation der Fabrikstrukturen.....	84
Abbildung 5.9: Wirkungsmatrix zur Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen Wandlungstreibern und den Fabrikstrukturen.....	86
Abbildung 5.10: EDV-System zur Variation der Fabrikstrukturen.....	88
Abbildung 5.11: Planungswerkzeug zur Variation der Fabrikstrukturen.....	90
Abbildung 5.12: Visualisierung der Veränderungen im FactoryVariationPlanner.....	92
Abbildung 5.13: Grundmodell einer Idealstruktur für eine Fabrik.....	94
Abbildung 5.14: Grundprinzipien zur Strukturierung von Fabriken.....	96
Abbildung 5.15: Strategische Stoßrichtungen für eine wandlungsfähige Fabrikstruktur.....	98
Abbildung 5.16: Flexibilisierungsstrategien für die Produktion.....	100
Abbildung 5.17: Kapazitive Flexibilisierung und Produktorientierung.....	101
Abbildung 5.18: Technische Flexibilisierung und Technologieorientierung.....	102
Abbildung 5.19: Flexibilisierung der Standorte.....	104
Abbildung 5.20: Vergabekriterien zur Zuweisung von Fertigungsaufgaben.....	105
Abbildung 5.21: Leistungsentwicklung einer Technologie mit Wachstumspotential.....	107
Abbildung 5.22: Verkürzung der organisationalen Wege durch Integration der Prozesskette .....	108
Abbildung 5.23: Veränderung der Prozesskette mit detaillierter Standortzuweisung.....	110
Abbildung 5.24: Standardisierungsstrategien.....	112
Abbildung 5.25: Höhere Standardausrüstung der Produkte.....	114
Abbildung 5.26: Integration von Wissen in Produktionssysteme.....	115
Abbildung 5.27: Wirkungswürfel zur Bewertung der strategischen Stoßrichtungen.....	117
Abbildung 5.28: Abbildung der technologischen Segmente in Partialmodellen.....	119
Abbildung 5.29: Phasenmodell zur Charakterisierung der Partialmodelle.....	120
Abbildung 5.30: Partialmodell der Montage am Beispiel der Automobilindustrie.....	122

---

Abbildung 5.31: Charakterisierung des Montagesegments .....	123
Abbildung 5.32: Grenzen der Veränderungsfähigkeit in der Montage .....	123
Abbildung 5.33: Anforderungen und Zielobjekte der Wandlungsfähigkeit .....	124
Abbildung 5.34: Konzeptionen zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit in den Montagesegmenten .....	125
Abbildung 5.35: Entwicklung alternativer Strukturszenarien.....	126
Abbildung 5.36: Strukturalternative A – durchgängiges Drehscheibenkonzept .....	127
Abbildung 5.37: Strukturalternative B – sortenreine Standorte.....	129
Abbildung 5.38: Strukturalternative C – Rennerwerke .....	130
Abbildung 5.39: Bewertungskriterien für ein optimales Strukturkonzept.....	131
Abbildung 5.40: Bewertung der durchschnittlichen Stunden pro Produkt in hpu .....	132
Abbildung 5.41: Belastungsszenarien aus den Hauptwandlungstreibern .....	134
Abbildung 5.42: Systematische Bewertung der System-Szenarien.....	136
Abbildung 6.1: Kapazitätsstruktur der Prozesskette zum Referenzzeitpunkt.....	138
Abbildung 6.2: Variation der Mengengerüste in Gestaltungsszenario A.....	139
Abbildung 6.3: Variation der Mengengerüste in Gestaltungsszenario B.....	141
Abbildung 6.4: Variation der Mengengerüste in Gestaltungsszenario C.....	142
Abbildung 6.5: Variation des Wandlungstreibers Ausstattungsvarianten.....	142
Abbildung 6.6: Auswirkung der Lerneffekte im Gesamtressourcenbedarf .....	143
Abbildung 6.7: Integration der Segmente und deren quantitative Bewertung .....	144

## Abkürzungsverzeichnis

A	Anlauf
a	anno, Jahr
AT	Arbeitstage
aut.	automatisiert
B	Beschaffung
BMS	Bionic Manufacturing Systems
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
E	Entwicklung
epu	engineering hours per unit, Entwicklungsstunden pro Produkt
F	Finish
f	Flexibilitätskorridor
f	Funktion
F&E	Forschung und Entwicklung
h	hours, Stunden
HMS	Holonic Manufacturing Systems
hpu	production hours per unit, Produktionsstunden pro Produkt
IFF	Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb
IMS	Intelligent Manufacturing Systems
IPA	Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
JIS	Just in Sequence
JIT	Just in Time
K	Karosseriebau
k	Kosten
KF	Komponentenfertigung
L	Lackiererei
LZV	Laufzeitvolumen
M	Montage
P	Planung
ppu	planning hours per unit, Planungsstunden pro Produkt
PW	Presswerk
QFD	Quality Function Deployment
R	Regler
RMS	Reconfigurable Manufacturing Systems
R <sub>s</sub>	Regelstrecke
SFB	Sonderforschungsbereich

---

spu	supply hours per unit, Stunden der Zukaufteile pro Produkt
t	Zeit
TF	Teilefertigung
tpu	total hours per unit, Gesamtstunden pro Produkt
$T_t$	Totzeit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VSC	Vorserien- und Prototypenbau
VSM	Viable System Model, Modell des lebensfähigen Systems
$W_i$	Führungsgrößen
WZB	Werkzeugbau
$X_i$	Regelgrößen
$Y_i$	Stellgrößen
$Z_i$	Störgrößen
$\Delta$	Regeldifferenz
$\Delta a$	Aufwand



# 1 Einleitung

„Nichts ist beständiger als der Wandel“, wusste bereits Heraklit vor über 2500 Jahren und der Wandel selbst scheint in den letzten Jahren an Dynamik hinzugewonnen zu haben. Unternehmen der industriellen Fertigung operieren in einem turbulenten Umfeld [Warnecke et al. 1992; Wiendahl et al. 2005; Westkämper 2006a; Westkämper et al. 2009]. Die Herausforderung liegt darin, die Wettbewerbsfähigkeit auch unter Unsicherheiten langfristig und nachhaltig zu sichern. Sie hängt wesentlich davon ab, ob die Unternehmen in der Lage sind, die Anforderungen ihrer externen und internen Umgebung zu erkennen und sich diesen in kürzester Zeit unter wirtschaftlichen Bedingungen anzupassen. Charles R. Darwin stellte in seiner Abhandlung „On the origin of species“ folgendes fest: „It is not the strongest species that survive, nor the most intelligent, but the ones most responsive to change“, [Darwin 2003]. Im Zusammenhang mit der vorherrschenden Turbulenz der industriellen Produktion gilt dies umso mehr für die Überlebensfähigkeit global operierender [Koren 2010] und vernetzter Produktionsunternehmen. Langfristig werden nur diejenigen Strukturen überleben, die eine ausreichende Anpassungsfähigkeit besitzen [Westkämper 2006a].

## 1.1 Ausgangssituation

Die verarbeitende Industrie durchläuft seit langem einen permanenten strukturellen Wandlungsprozess [Westkämper 2007]. Die Entwicklungen in und im Umfeld der industriellen Produktion über die vergangenen Jahre hinweg zeigen branchenübergreifend vier grundlegende Trends mit erheblichen Auswirkungen auf die globalen Produktionsstrukturen (Abbildung 1.1):

- Konzentration der Firmen
- Wachstum der Mengen und der Produktivität
- Individualisierung der Produkte
- Sinkende Wertschöpfungstiefe

Seit Jahren häufen sich die Zusammenschlüsse von Unternehmen in Form von Fusionen und Akquisitionen in allen Branchen und Wirtschaftszweigen [Bauernhansl 2003], insbesondere aber im Technologiesektor [Müller-Stewens 2006]. Die Historie im Blick vollzogen sich die Konzentrationsprozesse seit Beginn der Industrialisierung in Fusionswellen, die auf veränderte wirtschaftliche Rahmenbedingungen zurückzuführen sind und stets von wettbewerbspolitischen Maßnahmen begleitet wurden [Kleinert et al. 2000; Bauernhansl 2003; Müller-Stewens 2006]. Die Automobilindustrie gilt als typisches Beispiel einer Branche, deren Anzahl eigenständiger Hersteller kontinuierlich abnimmt [KPMG 2010]. Am Beispiel Volks-

wagen ist die Integration von Seat und Skoda in den 90-er Jahren oder die Übernahme der Porsche AG 2009 zu vermerken. In den europäischen Ländern Deutschland, Frankreich, England und Italien hat sich der Konzentrationsprozess in Phasen schwacher und beschleunigter Konsolidierung von 70 Herstellern in den 50-er Jahren auf 6 Hersteller 2010 reduziert [KPMG 2010]. Das Verschmelzen der Firmen führt zum einen zu einem starken Wettbewerb untereinander, zum anderen zu wachsenden Unternehmensgrößen, deren Fabriken in einem Produktionsverbund immer stärker und komplexer vernetzt sind.

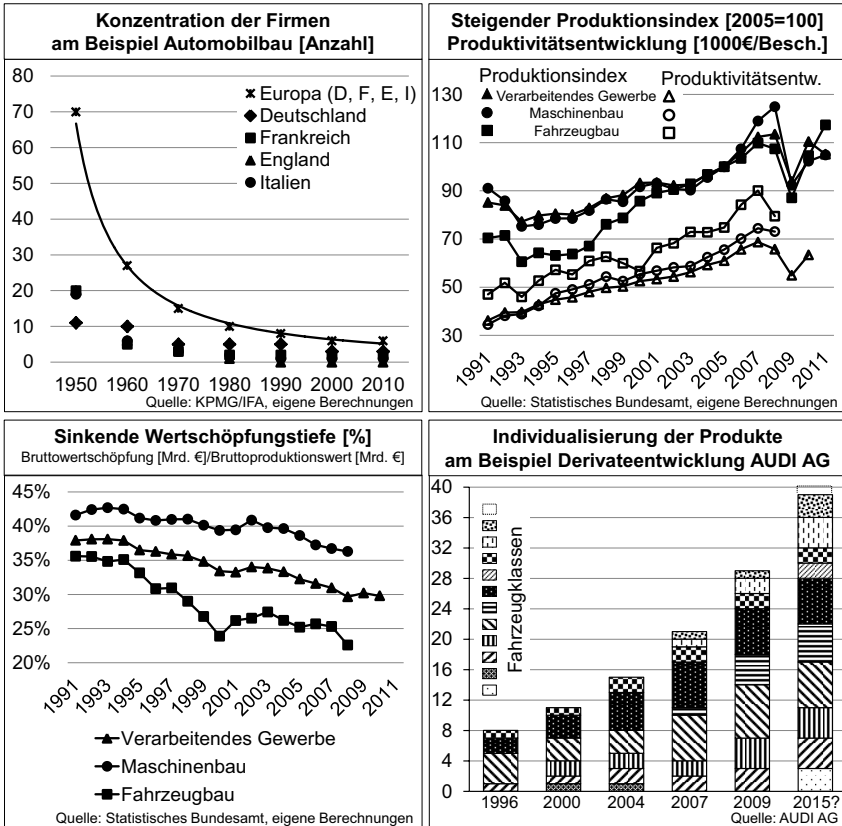


Abbildung 1.1: Grundlegende Trends der industriellen Fertigung

Neben der Konzentration der produzierenden Unternehmen ist im Verlauf der vergangenen Jahre ein Mengenwachstum im gesamten verarbeitenden Gewerbe zu verzeichnen (Abbildung 1.1). Der über die Jahre betrachtete Produktionsindex nach Angaben des statistischen Bundesamts [Destatis 2011a] zeigt zum einen ein Gesamtwachstum, veranschaulicht

aber auch die Volatilität der Märkte an den starken Auftragseinbrüchen in den 90-er Jahren und der Wirtschaftskrise 2008/2009, die alle Branchen, aber insbesondere den Maschinenbau, der seit 2006 einen überdimensionalen Aufschwung erfuhr, massiv getroffen hat. Zudem sind saisonale Schwankungen den Auswertungen auf Monatsbasis zu entnehmen. Branchenspezifisch wuchs insbesondere der Fahrzeugbau am stärksten um 67 % in den vergangenen 10 Jahren, was auf die stark expansive Auslandsnachfrage zurückzuführen ist [Hild 2005]. Im Inland sind die Wachstumsraten insgesamt bereits sinkend.

Im Vergleich zur Produktionsentwicklung ist auch in der Produktivitätsentwicklung eine tendenzielle Steigerung in den letzten Jahren zu vermerken. Allerdings wächst die Produktivität nicht in dem Maße wie die Produktionsvolumina. Die Produktivität wird gemessen an der Eigenleistung je Beschäftigten und errechnet sich demnach aus der Bruttowertschöpfung nach [Destatis 2011b] pro Erwerbstätigen nach [Destatis 2011c, Destatis 2011e; Hild 2005]. Die jeweiligen Entwicklungen sind den Angaben der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen des statistischen Bundesamts zu entnehmen. Zurückzuführen sind Leistungssteigerungen in der Produktion auf Rationalisierungsmaßnahmen im Hinblick auf die Ressourcennutzung, technologische konzeptionelle Ansätze sowie organisatorische und methodische Verbesserungen, die nicht zuletzt auch durch die Möglichkeiten der Informations- und Kommunikationstechnik verwirklicht werden konnten. Die stärkste Produktivitätssteigerung verzeichnet der Maschinenbau mit 112 % von 1991 und 2009, die schwächste der Fahrzeugbau mit 69 % in diesem Zeitraum.

Sich auf die Mengenentwicklung und den globalen Absatz insgesamt positiv auswirkend, ist die Orientierung an den Märkten und Kunden. Die Individualisierung und das Customizing der Produkte durchziehen alle Branchen. Sie führen zur Erweiterung des Produktprogramms in Form zusätzlicher Produktklassen und Varianten, was für den Automobilbau beispielhaft an der Entwicklung der Derivate und Modelle in Abbildung 1.1 dargestellt ist, und zum Angebot einer breiten Ausstattungsvielfalt. Die Modell- und Variantenpolitik fördert die Erschließung der Märkte, bedeutet jedoch für die Produktion sinkende Mengen pro Variante und eine Komplexitätssteigerung, die der Produktivität entgegenwirkt und deren Beherrschung für die kommenden Jahre eine der größten Herausforderungen [Kössler et al. 2009] sein wird.

Die Marktorientierung bedeutete auch die Erweiterung des Produktionsnetzwerks vor dem Hintergrund der Globalisierung und die starke Konzentration auf die Kernkompetenzen und Fertigungsendstufen, die für den Kunden differenzierend sind. Folglich wurde konsequentes Outsourcing betrieben und Systemkompetenzen fremdvergeben, was an der sinkenden Wertschöpfungstiefe in allen Branchen abzulesen ist: diese liegt beim verarbeitenden Gewerbe bei knapp 30 %, branchenspezifisch im Maschinenbau bei 36 % und im Fahrzeugbau gerade noch bei 23 %. Sie errechnet sich aus dem Anteil der Bruttowertschöpfung nach [Destatis 2011b] am Bruttoproduktionswert nach [Destatis 2011d; Hild 2005]. Effizienzsteige-

rungen der Produktion werden in diesem Prozess vornehmlich erreicht durch extremen Druck auf die Vorleistungspreise und Verlagerungen in Niedriglohnländer. Der Prozess der Leistungsverschiebung zu den Zulieferern führte zu einer starken logistischen Vernetzung. Vor diesem Hintergrund richteten sich Optimierungen in der Vergangenheit vornehmlich auf die Optimierung und das Management der logistischen Zulieferketten [Westkämper 1999].

## 1.2 Problemstellung

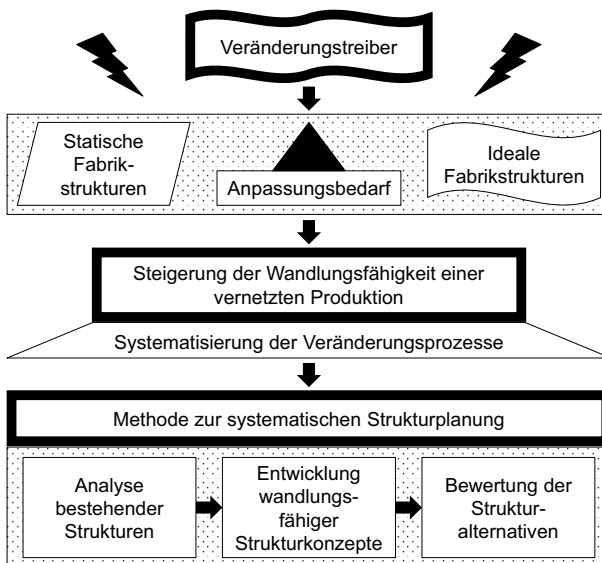
Die beschriebenen Trends zeigen den massiven Veränderungsdruck, dem Fabriken der industriellen Produktion ausgesetzt sind. Die Produktion in globalen Netzwerken ist ein hochdynamisches Gebilde, das sich ohne laufende Anpassung [Zahn 2011a] in einem Umfeld höchster Turbulenz und Instabilitäten nicht behaupten wird. Produktionsnetzwerke müssen nach signifikanten Umfeldveränderungen immer wieder rekonfiguriert werden [Zahn 2011b]. Es besteht ein permanenter Anpassungsbedarf der gesamten Fabrikstrukturen. Folglich gewinnt die Veränderungsfähigkeit immer mehr an Bedeutung [Nyhuis et al. 2009], um die Wettbewerbsfähigkeit auch in Zukunft zu sichern. Der Bedarf an Ansätzen der Wandlungsfähigkeit wird seit langem erkannt und ist zu einem entscheidenden Schlüssel- und Wettbewerbsfaktor für die Gestaltung von Fabriken geworden [Wiendahl et al. 2007; ElMaraghy et al. 2009; Westkämper et al. 2009].

Es reicht jedoch in der heutigen Dynamik und Komplexität vernetzter Fabriken nicht mehr aus, sich auf Reaktionsschnelligkeit im operativen Geschäft zu verlassen und Wandlungsfähigkeit auf kurzfristige Zeiträume zu beziehen. Vielmehr ist eine systematische langfristige Vorausschau gefragt, die Aussagen über die Handlungsspielräume zur strategischen Gestaltung zukünftiger Produktionsstrukturen liefert, mit denen Turbulenzen und Unsicherheiten beherrscht werden können. Die Bedeutung der strategischen und systematischen Entwicklung der Produktion in Abstimmung mit der Unternehmensstrategie wird jedoch von wenigen Unternehmen erkannt [Westkämper 2006a, Westkämper 2007]. Wandlungsfähigkeit muss sich auf alle Skalen der Produktion beziehen, von der langfristigen Gestaltung der Netzwerke bis zu kurzfristigen Veränderungen der Prozesse [Westkämper 2006a]. Ansätze der Wandlungsfähigkeit beziehen sich bislang vorwiegend auf abgegrenzte Bereiche der Produktionssysteme und müssen vor dem Hintergrund der zunehmenden Vernetzung auf ganze Fabriken und Netzwerke übertragen werden. Der strukturellen Wandlungsfähigkeit wird in diesem Zusammenhang besondere Bedeutung zugemessen. Zwangsläufig führen die aufgezeigten Entwicklungen und Trends zu einer langfristigen Änderung der Fabrikstrukturen. Die wachsende Turbulenz und Dynamik zwingt die industrielle Produktion, ihre Sensibilität auf Veränderungen zu schärfen und ihre Adaptions- und Wandlungsfähigkeit strategisch in den Produktionsstrukturen zu erhöhen. Aufgrund der vielseitigen Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen, die bei einer Anpassung der Produktionsstrukturen zu berücksichtigen sind, ist

eine systematische Planung erforderlich. Bislang fehlt jedoch eine Methode, mit der die strukturelle Wandlungsfähigkeit der Produktion und ihrer Vernetzung permanent und systematisch erreicht werden kann.

### 1.3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Ausgehend von dieser Problemstellung soll die Wandlungsfähigkeit der Fabrikstrukturen einer vernetzten Produktion durch eine Systematisierung der Veränderungsprozesse gesteigert werden. Daher wird in der vorliegenden Arbeit eine Methode zur systematischen Strukturplanung von Produktionsstandorten und deren Vernetzung entwickelt, um die Anpassung der Fabriken permanent durchzuführen. Die Planungsmethode muss im Wesentlichen drei Planungsabschnitte umfassen, deren Ausgangsbasis eine detaillierte Analyse der existierenden Fabriken und ihrer Vernetzung bilden soll. Zur Weiterverarbeitung der Ergebnisse ist ein Planungswerkzeug auf EDV-Basis zu konzipieren, in welches das analysierte Fabrikmodell und die Wandlungstreiber integriert werden. Darauf aufbauend sind alternative Strukturkonzepte zu entwickeln, die der Anforderung nach Wandlungsfähigkeit gerecht werden. Abschließend sind diese im Hinblick auf die Zielgrößen zu bewerten (Abbildung 1.2).

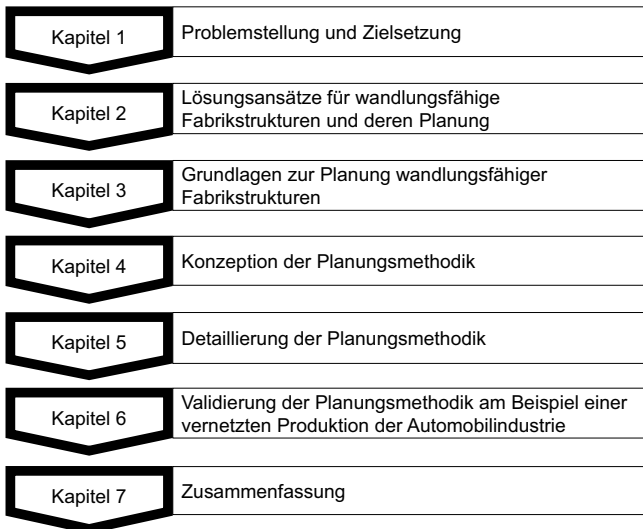


**Abbildung 1.2: Methode zur permanenten Anpassung der Fabrikstrukturen**

Die Planungsmethode wird in ihren einzelnen Planungsschritten am praktischen Beispiel aus der Automobilindustrie durchgeführt und verifiziert.

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Die Strukturierung der vorliegenden Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel, in denen die Arbeiten, die für die Entwicklung der Planungsmethode erforderlich sind, beschrieben werden. In Kapitel 1 wurde in die Thematik eingeführt und die Relevanz der Themenstellung vor dem Hintergrund der Ausgangssituation dargestellt. Aus dieser wurde die Problemstellung der Arbeit abgeleitet und die Zielsetzung definiert. In Kapitel 2 werden die grundlegenden Begrifflichkeiten zum Verständnis der Arbeit erörtert und die Einordnung der Planungsmethode in den Gesamtzusammenhang der strategischen Fabrikgestaltung vor dem Hintergrund der Wandlungsfähigkeit gegeben. Zudem wird der Stand der Forschung und Entwicklung im Hinblick auf Lösungsansätze für wandlungsfähige Fabrikstrukturen und deren Planungsmethoden aufgearbeitet sowie aus den Defiziten die vorliegende Arbeit abgegrenzt. In Kapitel 3 werden die erforderlichen Grundlagen gelegt, die zur Planung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen erforderlich sind und Anforderungen an die Planungssystematik abgeleitet.



**Abbildung 1.3: Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit**

Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 4 die Konzeption der Planungssystematik. Diese wird in Kapitel 5 in ihren einzelnen Planungsschritten detailliert und an real durchgeführten Beispielen erläutert. In Kapitel 6 erfolgt die Validierung der Planungsmethodik am praktischen Beispiel einer vernetzten Produktion der Automobilindustrie. Kapitel 7 fasst die Ergebnisse und Schlüsse der Vorgehensweise zusammen und gibt einen Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf im Rahmen der strategischen Strukturplanung.

## **2 Lösungsansätze für wandlungsfähige Fabrikstrukturen und deren Planung**

Die Wettbewerbsfähigkeit marktorientierter industrieller Unternehmen wird zu einem großen Teil bestimmt durch das Leistungsvermögen und die Anpassungsfähigkeit ihrer Produktion. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Turbulenz im Umfeld der Produktion kommt der Wandlungsfähigkeit ihrer Fabrikstrukturen eine besonders hohe Bedeutung zu, da sie die Befähigung und im Wesentlichen das Tempo determiniert, in dem die Fabriken auf neue Anforderungen eingestellt werden können. Die Anpassungsprozesse sind aufgrund ihrer Wirkungsketten an eine Planung gebunden, die möglichst systematisch unter Berücksichtigung der geltenden Rahmenbedingungen durchzuführen ist.

Auf Basis einer Begriffsabgrenzung der Wandlungsfähigkeit und Flexibilität in Bezug auf die Struktur technischer Systeme soll die Bedeutung dieser Thematik für die strategische Produktionsplanung und deren Aufgaben herausgestellt werden. In diesem Zusammenhang wird der Bezugsrahmen für diese Arbeit unter dem Gesichtspunkt der Wandlungsfähigkeit gestellt. Darauf aufbauend wird auf den Forschungs- und Entwicklungsstand bestehender Lösungsansätze zur Gestaltung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen sowie der erforderlichen Planungsmethoden eingegangen. Anschließend werden aus dem dargestellten Stand der Technik die wesentlichen Probleme und Defizite in Bezug auf die Planung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen erörtert. Diese bilden die Grundlage und den Auftrag zur Erarbeitung einer Methode zur systematischen Strukturplanung von Fabriken und ihrer Vernetzung.

### **2.1 Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit**

Im Zusammenhang mit der Beschreibung der Veränderungsfähigkeit von Fabrikssystemen bietet die Literatur ein nahezu unüberschaubares Portfolio an Begrifflichkeiten und Terminologien. In diesem Abschnitt sollen deshalb die wesentlichen Aspekte der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit beschrieben sowie eine Definition und Abgrenzung der beiden Begriffe für diese Arbeit vorgenommen werden.

Mit der Definition der Flexibilität im Kontext der Produktion befasst sich seit der Erforschung flexibler Fertigungssysteme eine Vielzahl an Autoren. Die Auflistung der vielfältigen Definitionen und Ansätze zur Beschreibung der Flexibilität würde den Rahmen dieses Kapitels sprengen. Daher sei in diesem Zusammenhang auf die einschlägigen Literaturquellen verwiesen, die sich mit der Definitionsvielfalt von Flexibilität auseinandersetzen [Barad et al. 1988; Sethi et al. 1990; Taylor 1994; Chryssolouris 1996; de Toni et al. 1998; Golden et al.

2000; Narain et al. 2000]. Trotz dieser Arbeiten herrscht über den Flexibilitätsbegriff kein einheitliches Verständnis, was auch neuere Quellen bestätigen [Hernández 2003; Wemhöner 2006; Nachtwey et al. 2009]. Doch obwohl sich die Auffassungen der Flexibilität in ihren Ausprägungen unterscheiden, sind allen Definitionsversuchen in der Regel zwei Dimensionen zu entnehmen, welche sich als kennzeichnend für die Flexibilität herausstellen. Die eine Dimension ist die Fähigkeit, verschiedene Zustände situationsgerecht anzunehmen, die zweite Dimension ist, dies in einem bestimmten Zeitrahmen zu vollziehen, was aus produktionswirtschaftlicher Sicht von Bedeutung ist. Vielfalt und Zeit sind folglich maßgebende Größen der Flexibilität.

Die Flexibilität im klassischen Sinne, auch als statische Flexibilität [de Toni et al. 1998; Reinhart et al. 1999] bezeichnet, ermöglicht die Veränderung in vorgehaltenen Dimensionen innerhalb eines definierten Handlungsspielraums [Westkämper et al. 2000; Nyhuis et al. 2008], ohne den Grundaufbau des Systems substantiell in seiner Struktur zu verändern [Schmigalla 1995; Wiendahl et al. 2000; Wiendahl et al. 2005; Nachtwey et al. 2009]. Die Flexibilität ist somit eine passive Größe, deren Flexibilitätsspielraum zum Zeitpunkt der Systemspezifikation in das System hineinkonstruiert wird [Westkämper et al. 2000].

WESTKÄMPER definiert die Flexibilität eines Systems wie folgt:

„Ein System wird als flexibel bezeichnet, wenn es im Rahmen eines prinzipiell vorgedachten Umfangs von Merkmalen sowie deren Ausprägungen an veränderte Gegebenheiten reversibel anpassbar ist“ [Westkämper et al. 2000].

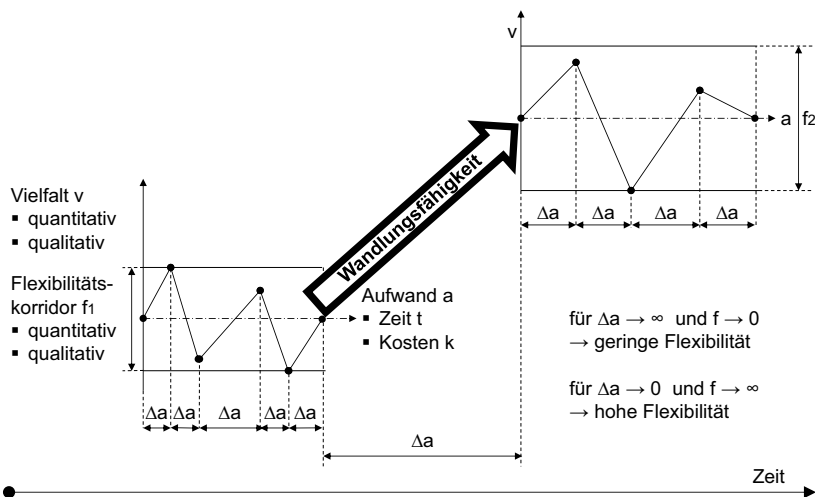
Diese Definition soll für diese Arbeit um den Aufwand ergänzt werden, der erforderlich ist, um die Anpassung innerhalb eines vordefinierten quantitativen und qualitativen Flexibilitätskorridors zu vollziehen:

Ein System wird als flexibel bezeichnet, wenn es im Rahmen eines prinzipiell vorgedachten Umfangs von Merkmalen sowie deren qualitativen und quantitativen Ausprägungen an veränderte Gegebenheiten unter geringem Aufwand, das heißt in kurzer Zeit zu geringen Kosten, reversibel anpassbar ist.

Das turbulente Umfeld der industriellen Produktion orientiert sich nicht an betrieblichen Flexibilitätskorridoren, die in vordefinierten Grenzen operieren. Folglich ist die Flexibilität eines Systems zwar eine Notwendigkeit, um sich schnell und effizient an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen, aber nicht hinreichend, um den Anforderungen gerecht zu werden. Somit besteht der Bedarf einer dynamischen Flexibilitäts- und Veränderungsgröße, die dieser Turbulenz angemessen begegnet [Hernández 2003]. In der deutschsprachigen Literatur



hat sich für diese Art der Veränderungsfähigkeit der Begriff der Wandlungsfähigkeit etabliert. Wandlungsfähigkeit ermöglicht das Potential, sich an neue Randbedingungen und Anforderungen anzupassen und einen schnellen und effizienten Strukturwandel zu vollziehen, der jenseits eines begrenzten Handlungsspielraums liegt [Wiendahl et al. 2000]. Die Wandlungsfähigkeit befähigt somit zum Überschreiten bestehender Grenzen und Sprung in neue Flexibilitätskorridore. Diese Abgrenzung ist in Abbildung 2.1 veranschaulicht.



**Abbildung 2.1: Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit**

Wichtige Impulse zur Wandlungsfähigkeit ganzer Produktionsunternehmen gibt WESTKÄMPER [Wiendahl 2002]. Vor diesem Hintergrund soll die in der Literatur weitverbreitete Definition der Wandlungsfähigkeit nach WESTKÄMPER dieser Arbeit zugrunde gelegt werden:

„Ein System wird als wandlungsfähig bezeichnet, wenn es aus sich selbst heraus über gezielt einsetzbare Prozess- und Strukturvariabilität sowie Verhaltensvariabilität verfügt. Wandlungsfähige Systeme sind in der Lage, neben reaktiven Anpassungen auch antizipative Eingriffe vorzunehmen. Diese Aktivitäten können auf Systemveränderungen wie auch auf Umfeldveränderungen hinwirken“ [Westkämper et al. 2000].

Die Wandlungsfähigkeit bezieht sich ausdrücklich auf technisch-soziale Systeme, da die menschliche Intelligenz und Kreativität erforderlich ist, um den Wandel anzustoßen und aktiv aus sich selbst heraus zu gestalten. Dieser Bezugsrahmen grenzt die Wandlungsfähigkeit

von der Wandelbarkeit ab, die sich ausschließlich auf technische Systeme bezieht und wie die Flexibilität ein passives Verhalten impliziert [Westkämper et al. 2000].

Diese Sichtweise der Wandlungsfähigkeit teilt eine Vielzahl anderer Autoren, die sich mit der Thematik auseinandersetzen. An dieser Stelle sei besonders auf die Arbeiten von [Reinhart et al. 1999; Hernández 2003; Wiendahl et al. 2005] hingewiesen. Die Wandlungsfähigkeit repräsentiert das Potential einer Fabrik, über einen vordefinierten Handlungsspielraum hinaus notwendige Veränderungen durchzuführen [Hernández 2003] und ist somit als Systemeigenschaft zu verstehen, auf geplante und ungeplante Veränderungen zu reagieren [Wiendahl et al. 2005]. REINHART sieht die Wandlungsfähigkeit als Summe von Flexibilität und Reaktionsfähigkeit. Die Reaktionsfähigkeit definiert er als Potential, durch die Kreativität und Innovationsfähigkeit der Mitarbeiter jenseits vorgedachter Dimensionen zu agieren [Reinhart et al. 1999]. Somit schließen REINHART, WESTKÄMPER und WIENDAHL die Flexibilität grundsätzlich als Teilmenge in die Wandlungsfähigkeit ein.

Dieses Verständnis von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit sowie deren Abgrenzung gilt für den Rahmen dieser Arbeit, wobei insbesondere auf die Bedeutung der Wandlungsfähigkeit im Hinblick auf einen strukturellen Wandel der Fabriken als sozio-technische Systeme für eine gesteigerte Wettbewerbsfähigkeit hingewiesen sei. Die strukturelle Wandlungsfähigkeit bezieht sich auf alle Skalen der Fabriken und ihre Vernetzung. Die Verwendung unterschiedlicher Begrifflichkeiten für die Veränderungsfähigkeit auf verschiedenen Systemebenen wie WIENDAHL sie vorschlägt [Wiendahl 2002; Wiendahl et al. 2007] erfolgt nicht.

## 2.2 Struktur der technischen Systeme in der Produktion

Die technischen und sozialen Systeme in der Produktion sind die Objekte, die sich im Zuge von Veränderungen in ihren Strukturen wandeln müssen, um den Anforderungen ihrer turbulenten Umgebung gerecht zu werden. In diesem Kontext werden im Folgenden die Grundlagen aus systemischer Sicht geschaffen, die zum Verständnis der Planungsmethode erforderlich sind.

Für die Beschreibung und Lösung komplexer Problemstellungen bietet die Systemtheorie einen hervorragenden allgemeinen Bezugs- und Gestaltungsrahmen [Hernández 2003; Westkämper et al. 2009], der auf die Herausforderungen der industriellen Produktion zu übertragen ist. Die allgemeine Systemtheorie, die in den 1930-er Jahren durch den österreichischen Biologen und Systemtheoretiker Ludwig von Bertalanffy entwickelt wurde, ist fachübergreifend anwendbar [Ropohl 2009] und bildet daher zur Beschreibung technischer Systeme die geeignete Ausgangsbasis. Nach ROPHOHL umfasst der Systembegriff drei Aspekte, die alle gleichermaßen zur Beschreibung eines technischen Systems in der Produktion von

Bedeutung sind. Der funktionale Aspekt besagt, dass Systeme bestimmte Zustände einnehmen können, die durch Eingangsgrößen ausgelöst werden und zu verschiedenen Ausgangsgrößen führen. Der strukturelle Ansatz kennzeichnet das System als Beziehungsgeflecht von Elementen und der hierarchische Ansatz berücksichtigt die Untergliederung eines Systems in Subsysteme, die wiederum ein System bilden [Ropohl 2009].

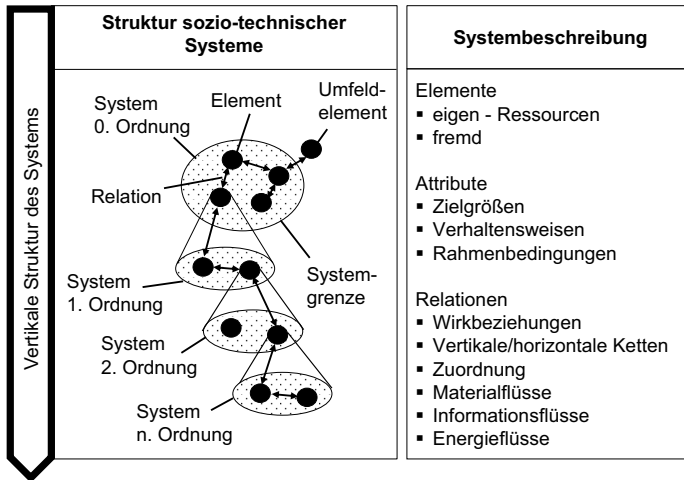
Auf Basis dieser Aspekte besteht ein System aus einer Menge von Elementen, die durch ihre Attribute bestimmte Eigenschaften aufweisen und einer Menge von Relationen zwischen den Elementen. Die Elemente des Systems handeln zweckorientiert. Die Vernetzung der Relationen der Systemelemente bildet die Struktur des Systems [Westkämper et al. 2009]. Jedes System 0. Ordnung kann in logische Subsysteme höherer Ordnung untergliedert werden, die im Vergleich zur nächst höheren Strukturstufe jeweils um eins zunimmt [DIN 6789-2]. Knüpfen die Subsysteme andere Beziehungsformen untereinander, so spricht man von Teilsystemen. Grundsätzlich ist ein System durch eine Systemgrenze gegenüber seinem Umfeld abgegrenzt [Westkämper et al. 2009; Wiendahl 2010].

Die Struktur eines sozio-technischen Systems ist in Abbildung 2.2 veranschaulicht und über eine Systembeschreibung für die Produktion erklärt. Das System besteht aus eigenen Elementen, die sich innerhalb der Systemgrenze befinden und die technischen und personellen Ressourcen innerhalb des Unternehmens repräsentieren, sowie fremden Elementen außerhalb des Systems. Besitzt das System keine Eingangs- und Ausgangsgrößen, wird von einem geschlossenen System gesprochen, bestehen zwischen den eigenen und fremden Elementen Beziehungen, handelt es sich um ein offenes System, was in der Regel für technische Systeme zutrifft.

Die Elemente, ob eigen oder fremd, sind durch Attribute charakterisiert, die bestimmte Eigenschaften haben und dementsprechend unterschiedliche Verhaltensweisen aufzeigen. Die Elemente verfolgen gekoppelt an die geltenden Rahmenbedingungen zweckorientiert und teilautonom ihre Ziele [Westkämper et al. 2009].

Die Relationen zwischen den Elementen weisen wie die Elemente selbst wiederum Eigenschaften auf. Die Relationen sind Wirkbeziehungen zwischen den Elementen sowie vertikale und horizontale Verkettungen. Die vertikale Vernetzung bildet die vertikale Struktur des Systems ab, deren hierarchische Ebenen in Abbildung 2.2 durch Systeme n-ter Ordnung dargestellt sind. Die horizontale Vernetzung erfolgt durch die Prozesse und Prozessketten auf allen Ebenen des Systems. Die Zuordnung von einem Element zum anderen ist eine weitere Beziehungsform, welche in der Systembeschreibung zu berücksichtigen ist. Die Elemente der Produktion sind durch ein komplexes Beziehungsgeflecht miteinander vernetzt, das ne-

ben den anderen dargestellten Relationen auch wesentlich durch die Flüsse des Materials, der Information und der Energie gebildet wird.



**Abbildung 2.2: Struktur sozio-technischer Systeme in der Produktion in Anlehnung an [Westkämper 2008]**

Grundsätzlich sind die Elemente als auch ihre Beziehungen in ihrer Anzahl und Ordnung veränderlich. Das System weist in seiner Gesamtheit Eigenschaften auf, die nicht auf die Eigenschaften von Einzelementen und -relationen zurückzuführen sind, sondern sich aus der Gesamtstruktur des Systems ergeben. Somit hängt die Effizienz des Systems sowohl von der Effizienz der einzelnen Elemente als auch ihrer Vernetzung im Ganzen ab [Jovane et al. 2009].

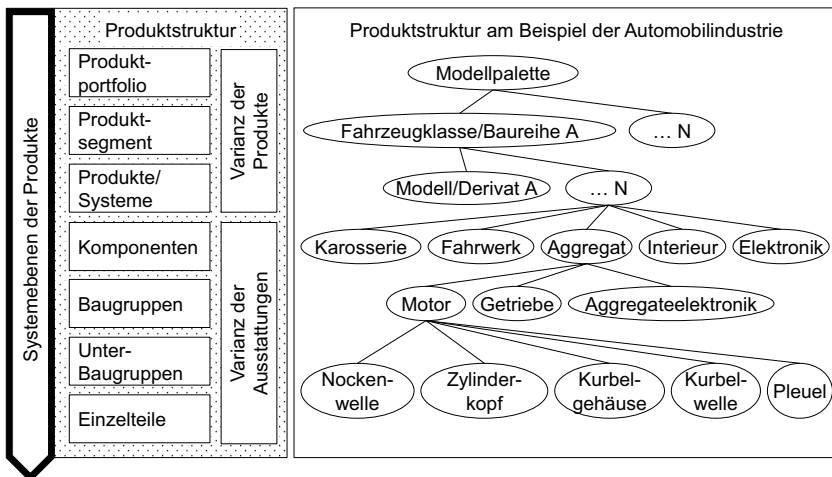
Jedes System weist durch seinen Aufbau und die Vernetzung seiner Elemente eine Struktur auf, auf die es verschiedene Sichtweisen gibt. Die für eine systematische Strukturplanung relevanten Struktursichten der Produkte und der Produktion [Löffler et al. 2010a] werden im Folgenden auf Basis der hier aufgeführten allgemeinen Systemeinführung beschrieben. Abschließend wird der Fabrikstrukturbegriff für den Kontext dieser Arbeit abgeleitet.

### 2.2.1 Struktur der Produkte

Die systematische und durchgängige Strukturierung der Produkte untergliedert die Produkte in seine Bestandteile und ist eine der Grundvoraussetzungen zur Erstellung einheitlicher Stücklisten. Sie dient der Vereinfachung der Informationsprozesse [Eversheim 1999; Schuh 2005] entlang des Produktentstehungs- und -herstellungsprozesses und bildet die Grundlage

zur Abbildung des Fertigungsablaufs. Insbesondere bei variantenreichen und kundenindividuellen Produkten ermöglicht eine einheitliche Strukturierung der Produkte die Vergleichbarkeit in Bezug auf Teilevarianten und ermöglicht deren Mehrfachverwendung. Die theoretischen Grundlagen zur systematischen Produktstrukturierung mit dem Ziel, die technischen und organisatorischen Schnittstellen im Produktentstehungsprozess zu vereinfachen, legt HANDKE [Handke 2000]. Weitere Ansätze und Methoden zur Strukturplanung und -optimierung individualisierter Produkte sind den Arbeiten von LINDEMANN zu entnehmen [Lindemann et al. 2006].

Die Produktstruktur bildet sich durch die strukturierte Zusammensetzung des Produkts durch seine Elemente in Form von Komponenten, Baugruppen und Einzelteilen sowie deren Beziehungen untereinander. Die Untergliederung des Produkts in Subsysteme führt zu Strukturstufen des Produkts [Eversheim 1999; Schuh 2005], die sich umgekehrt zur relativen Tiefe der Komponente in der Produktstruktur verhalten [Schönsleben 2011]. In Abbildung 2.3 ist die Produktstruktur in ihren sieben Systemebenen, wie sie dieser Arbeit zugrunde gelegt wird, dargestellt und an einem Beispiel der Produktpalette eines Automobilherstellers veranschaulicht.



**Abbildung 2.3: Struktur der Produkte**

Das Gesamtsystem und somit die Systemebene 0. Ordnung nach dem Stufenschema zur Strukturierung von technischen Systemen bildet das Produktportfolio eines industriellen Produktionsbetriebs, was im Automobilbau der kompletten Modellpalette entspricht. Diese setzt sich aus Fahrzeugklassen und Baureihen, den Produktsegmenten, zusammen, die auf der

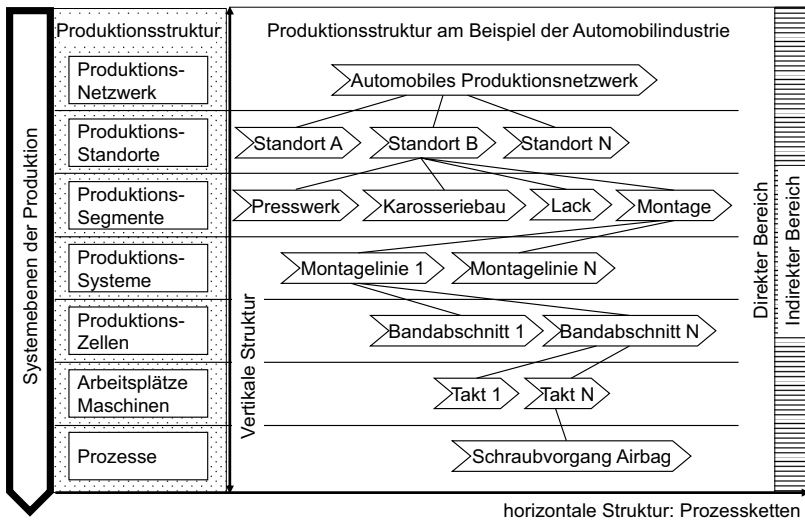
nächsten Ebene wiederum in Produkte bzw. Systeme zu untergliedern sind. Auf dieser Ebene kommt die Modell- und Derivatevielfalt im Automobilbau zum Ausdruck. Die ersten drei vertikalen Ebenen der Produktstruktur spiegeln die äußere Varianz der Systeme wider, die im Zuge der Kundenindividualisierung und Derivatisierung in der Automobilindustrie exponentiell in den vergangenen Jahren zugenommen hat (vgl. Abbildung 1.1). Die Produkte bestehen aus Komponenten, Baugruppen sowie Unterbaugruppen und können schließlich bis in ihre Einzelteile auf der untersten Systemebene zerlegt werden. Auf diesen Ebenen kommt die innere Varianz eines Systems, die sogenannte Ausrüstungs- und Ausstattungsvarianz zum Tragen, welche die Produkte den Kundenwünschen entsprechend individualisiert.

Aus der Produktstruktur werden die Stücklisten abgeleitet und mit einer korrelierenden Datenstruktur formalisiert übertragen. Nach EVERSHEIM gibt es drei Stücklistenarten, die Mengen-, die Struktur- und die Baukastenstückliste, die im Zuge der Variantenvielfalt um die Variantenstückliste zu ergänzen ist [Eversheim 1999]. Für komplexe Produkte werden Strukturstücklisten herangezogen, die neben der Zuweisung zu den Strukturstufen auch die Mengenangaben und Varianten je Teil für bestimmte Produktkonfigurationen enthalten. Im Automobilbau basieren die technischen Stücklisten auf Strukturstücklisten, die auf der Ebene der Produktsegmente mit allen Komponenten- und Teilevarianten inklusive der Teilegültigkeiten und jeweiligen Mengenangaben bestückt sind. Über eine  $\pm$  Zuweisung der Baugruppen und Teile zu bestimmten Modellen und Ausstattungslinien, welche über die in der Stückliste hinterlegten technischen und vertriebstechnischen Kombinationsrestriktionen erfolgt, können die auftragsbezogenen kundenspezifischen Stücklisten und Bauaufträge für die Fertigung erstellt werden. Aus diesen  $\pm$  Strukturstücklisten lassen sich bei einer einheitlichen Produktdatenstruktur die Varianten der Produktsegmente auf den jeweiligen Aggregationsstufen auslesen und daraus die produktinduzierte Vielfalt für den Produktentstehungs-, Änderungs- und Produktionsprozess ableiten. Somit dient die Produktstruktur auf allen Ebenen zur Vergleichbarkeit und Transparenz innerhalb des Produktportfolios.

## 2.2.2 Struktur der Produktion

Fabriken sind komplexe langlebige Produkte [Westkämper 2006b, Westkämper 2008; Jovane et al. 2009], deren Produktion sich aus der Systemtheorie abgeleitet wie die Produkte selbst systemisch strukturieren lässt. Die Produktion kann nach WESTKÄMPER in sieben Ebenen untergliedert und modelliert werden, deren strukturelle Skalen vom Produktionsnetzwerk bis hinunter in die technischen Prozesse reichen [Westkämper 2006b]. Das Systembild für die Strukturierung der Produktion in ihren vertikalen und horizontalen Skalen zeigt Abbildung 2.4. In vertikaler Strukturrichtung umfasst die Systemebene 0. Ordnung das gesamte Produktionsnetzwerk, in dem die Standorte geographisch getrennt als Knoten fungieren [Wien-dahl et al. 2007] und über logistische, informationstechnische und strukturelle Relationen

miteinander verbunden sind. Die Standorte bestehen aus funktionalen und technologischen Segmenten, die über die Prozessketten in der horizontalen Struktur miteinander verknüpft sind. Beispiele für technologische Segmente sind im Fahrzeugbau das Presswerk, der Karosseriebau, die Lackiererei und die Montage. Diese Segmente sind auf der nächst tiefer liegenden Ebene in Produktionssysteme zu unterteilen, die wiederum aus Produktionszellen, Arbeitsplätzen und Maschinen sowie auf der untersten Ebene aus Prozessen bestehen. Am Beispiel eines Montagesystems lassen sich die Montagelinien in Bandabschnitte untergliedern, welche wiederum aus verschiedenen Arbeitstakten bestehen, in denen die jeweiligen Arbeitsprozesse durchgeführt werden.



**Abbildung 2.4: Struktur der Produktion**

Die Struktur der Produktion umfasst die Ressourcen der direkten Leistungsbereiche und die indirekten Bereiche, die zur Leistungserstellung innerhalb der Produktion erforderlich sind, in ihren zeitlichen, räumlichen und hierarchischen Skalen. Die Leistungsbereiche beziehen sich im Kontext dieser Arbeit sowohl auf die direkten und indirekten Bereiche der Produktion als auch auf die der Produktion vorgelagerten Funktionen und Segmente der Entwicklung und Planung sowie auf die peripheren Bereiche. Funktionen sind dabei fachlich begrenzte Tätigkeiten, die eigenständig im Unternehmen nicht marktfähig sind, während Segmente alle die zur Leistungserstellung erforderlichen Funktionen und Tätigkeiten zusammenfassen, um autonom und selbstständig zu agieren. Segmente sind somit eigenständig in der Lage, als abgeschlossener Leistungsbereich zu handeln [Laucht 1995].

Auf Basis der vertikalen Struktur der Produktion soll nun der Betrachtungsgegenstand der Arbeit herausgestellt werden. Der Fokus der zu entwickelnden Planungsmethode zur Strukturveränderung einer vernetzten Produktion bezieht sich vorwiegend auf die ersten drei Skalierungsebenen der Produktionsstruktur, das heißt auf das Produktionsnetzwerk, die Standorte und die Segmente. Die in der Struktur tiefer gehenden Betrachtungen dieser Arbeit dienen als Grundlage für eine Aggregation in die höher gelegenen Ebenen, sind vordergründig jedoch nicht Gegenstand der Optimierung.

### **2.2.3 Vernetzung von Produkt- und Produktionsstruktur**

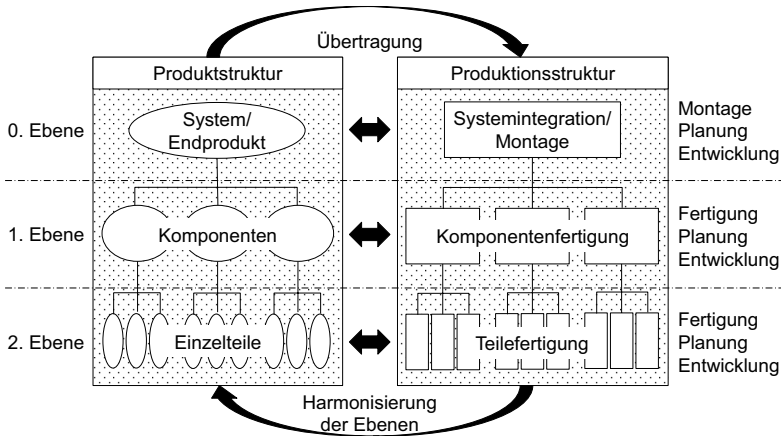
Aus der systemischen Betrachtung der Produkte und der Produktion in ihren Strukturen sind Parallelen zwischen den beiden Systemen zu ziehen, die für eine systematische Strukturplanung unter dem Gesichtspunkt der permanenten Veränderungen heranzuziehen sind. Während aus den Produktstrukturen auf den jeweiligen Ebenen Anforderungen in Bezug auf Technologien und Kapazitäten an die Produktion gestellt werden, stellt die Produktionsstruktur die zur Herstellung der Produkte erforderlichen Ressourcen zur Verfügung [Löffler et al. 2011d]. Aus jeder Änderung der Produkte folgt eine Änderung der Anforderungen an die Produktion, die sich diesen anpassen muss.

Die auf der Ressourcensicht korrespondierende Ebene des Produktportfolios ist das Produktionsnetzwerk, auf welches das zu produzierende Produktprogramm verteilt ist. Diese oberste zu vergleichende Ebene subsummiert alle Anforderungen der Produkte und stellt diesen die gesammelten Kompetenzen und Fähigkeiten des Produktionsnetzwerks gegenüber. Die Produktsegmente sind den Standorten zugewiesen, wo die jeweiligen Produktionssegmente zur Herstellung der Produkte und Systeme zur Verfügung stehen. Die korrespondierenden Systemebenen der Produkt- und der Produktionsstruktur sind in ihrer Kombination und ihren Wechselwirkungen in Abbildung 2.5 abstrahiert und allgemeingültig für alle Systeme dargestellt.

Auf Ebene 0 der Produktstruktur steht das System bzw. Endprodukt im fertigen Zustand. Dieses übernimmt die Systemführerschaft und konfiguriert sich aus den Subsystemen, den Komponenten und Einzelteilen. Der Systemführer verantwortet als letzte Instanz vor dem zu beliefernden Kunden die Qualität und die Abnahme und folglich auch die dafür erforderlichen Prüfvorgänge. Die entsprechende Ebene auf Seiten der Produktion stellt die Systemintegration bzw. die Endmontage dar, in der die Komponenten zum Gesamtsystem zusammengefügt und abschließend geprüft werden. Erfolgt nun eine Änderung des Systems auf der Produktseite, so hat dies unmittelbare Auswirkungen auf die Systemintegration, ihre Technologien, Abläufe und Prozesse. Diese Änderungen müssen folglich sowohl für die Produktstruktur als auch die Produktionsstruktur entwickelt, geplant und zum Schluss in die Montage in-



tegriert werden. Alle Systeme durchlaufen beim ersten Produktions- oder Änderungsdurchlauf auf dieser Ebene die Prozesskette der Entwicklung, Planung und Montage. Vergleichbares trifft auf die Ebene 1. Ordnung zu, welche die Komponenten der Produktseite der Komponentenfertigung auf der Produktionsseite zuordnet. Auch auf dieser Ebene ist die Produktstruktur in die Produktionsstruktur zu übertragen und auf die Ressourcenseite zu spiegeln. Für die Einzelteile gilt gleiches, diese werden für die Teilefertigung auf der Ebene 2. Ordnung entwickelt, geplant und schließlich gefertigt, um sie eine Stufe höher an die Komponentenfertigung zur Weiterverarbeitung zu übergeben. Mit der Übergabe der Komponenten an die Systemintegration erfolgt dann die Übergabe an den Gesamtsystemführer.



**Abbildung 2.5: Vernetzung von Produkt- und Produktionsstruktur**

Auf allen vertikalen Ebenen der Produkt- und Produktionsstruktur fordern und bedingen sich die Produkt- und Produktionstechnologien wechselseitig und sind aufeinander abzustimmen. Aufgrund der starken Abhängigkeiten und Interdependenzen zwischen Produkt- und Produktionsstruktur ist folglich eine systematische Vernetzung und Kombination zwischen den korrespondierenden Ebenen zu verfolgen. Diese Ebenen sind vor dem Hintergrund einer hohen Dynamik in den Produkt- und Produktionsstrukturen permanent ineinander überzuführen sowie deren Strukturebenen inhaltlich und zeitlich zu harmonisieren. Die konsequente Übertragung der Produkt- in die Produktionsstruktur und deren Harmonisierung ist ein Ansatz, um der hohen Änderungsdynamik mit einer kurzen Reaktions- und Umsetzungszeit in die Produktion zu begegnen [Löffler et al. 2010a]. In diesem Zusammenhang nehmen diese beiden strukturelevanten Sichten auf die Fabrik eine strategische Stellung für die systematische Strukturplanung ein und sind für eine Synchronisation der Entwicklungen systematisch zu vernetzen.

## 2.2.4 Abgrenzung einer Fabrikstruktur

Der Fabrikstrukturbegriff wird in der einschlägigen Fachliteratur in unterschiedlichen Zusammenhängen und Ausprägungen verwendet. Unter diesem Gesichtspunkt ist die Fabrikstruktur als Planungs- und Adaptionenobjekt für den Rahmen dieser Arbeit zu definieren.

ROCKSTROH versteht unter Struktur die technisch-technologische Kopplung von Objekten, das heißt die Beziehungen zwischen den Elementen des Produktionsprozesses auf Basis der Bearbeitungsfolgen, sowie die räumliche Anordnung von Objekten [Rockstroh 1977]. Nach KETTNER ist die Fabrik der räumliche Ort, in dem die industrielle Produktion stattfindet und die Werksstruktur die Anordnung der Gebäude, in denen die Arbeitssysteme in räumlicher (Fertigungsprinzip) und zeitlicher (Fertigungsart) Struktur angeordnet sind [Kettner et al. 1984]. Der Schwerpunkt seines Strukturverständnisses bezieht sich auf die Raumstruktur der Fabrikgebäude. Dieser Definition folgt auch die VDI-RICHTLINIE 5200, in der die Fabrik als Ort der Wertschöpfung zur Produktion industrieller Güter unter Einsatz der Produktionsfaktoren dient. Die Produktion umfasst alle zur betrieblichen Leistungserstellung erforderlichen Tätigkeiten, die sich auf die direkten, vorbereitenden und unterstützenden Tätigkeiten beziehen [VDI 5200 Blatt 1]. Nach REFA ist die Struktur die innere Gliederung eines Systems, in dem die Beziehungen zwischen den Systemelementen nach Art und Anzahl beschrieben werden. REFA unterscheidet wie KETTNER nach Aufbau- und Ablaufstruktur [REFA 1985]. FELIX legt den Schwerpunkt der Struktur auf die Grundstücks- und Gebäudegestaltung [Felix 1998]. HENN und KÜHNLE folgen bei der Beschreibung einer Fabrikstruktur den vertikalen Strukturebenen von der Anordnung der Gebäude, Betriebsbereiche, Produktionseinheiten bis zur Betriebsmittelaufstellung innerhalb eines Standorts und nutzen den Fabrikstrukturbegriff zur Unterscheidung verschiedener Materialfluss- und Gebäudeformen [Henn et al. 1999]. Daran knüpft SCHENK an, der die Fabrikstruktur als Einheit der Bereichs-, Gebäude- und Arbeitsplatzstruktur aus der vertikalen Zusammenführung der Struktur- oder Leistungseinheiten innerhalb eines Standorts sieht [Schenk et al. 2004] und unter Strukturen wie SCHMIGALLA zweistellige Relationen zwischen Elementen versteht [Schmigalla 1995; Schenk et al. 2004]. GRUNDIG folgt der räumlichen Strukturdefinition nach KETTNER, und sieht die Fabrikstruktur als Kopplung von Funktionseinheiten im Ideallayout und der anschließenden Integration in Flächen- und Raumstrukturen im Reallayout. Die Anordnungsobjekte beziehen sich auf die Gebäude, Bereiche und Arbeitsplätze [Grundig 2009]. PAWALLEK versteht unter Strukturen das gesamte Beziehungsgeflecht innerhalb eines Systems, das in Bezug auf die Fabrik die räumlichen Beziehungen zwischen Bereichen, die zeitlichen Beziehungen von Abläufen, die inhaltlich-sachlichen Beziehungen von Produkten und die inhaltlich-logischen Beziehungen von Prozessen beinhaltet. Die Fabrikstruktur ist die Anordnung von Funktionseinheiten innerhalb eines Werks unter produktionstechnischen, logistischen und organisatorischen Ge-

sichtspunkten, wobei er die wesentlichen strukturbestimmenden Funktionseinheiten in der Produktion und Logistik sieht [Pawellek 2008]. Nach HARMS formt sich die Fabrikstruktur aus den Elementen der Fabrik und ihren Beziehungen. Die Struktureinheiten folgen in seiner Definition im Wesentlichen den vertikalen Strukturebenen der Produktion, wie sie in Kapitel 2.2.2 beschrieben sind, wobei die kleinste Struktureinheit die Arbeitsplätze umfasst, die auf die jeweiligen Detaillierungsebenen der Fabriken aggregiert werden. Die Beziehungen konzentrieren sich auf den Material- und Kommunikationsfluss [Harms 2004]. SCHUH versteht unter Struktur die Hierarchisierung und Dekomposition der Produktionseinheiten von der Systemebene der Standorte bis auf die Arbeitsplätze [Schuh et al. 2007b]. In seinen Ausführungen spricht er von strukturdeterminierenden Fabrikelementen [Schuh et al. 2007a], spezifiziert diese jedoch nicht weiter.

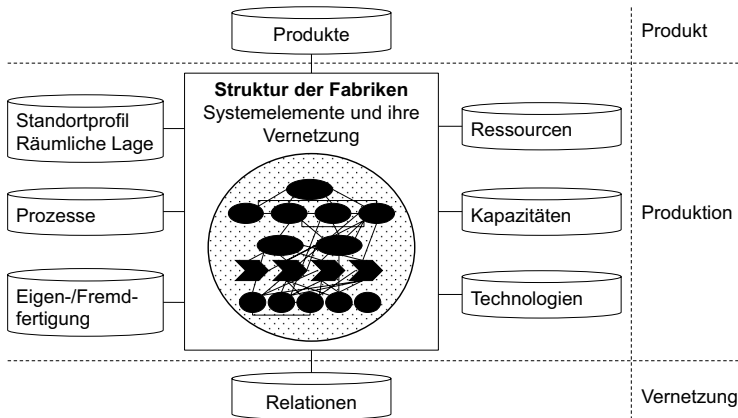
Aus der Untersuchung der verschiedenen Definitionen und Betrachtungsweisen ist zu schließen, dass sich die Fabrikstruktur vorwiegend auf die räumliche Anordnung der Gebäude innerhalb eines Standorts bezieht. Die Struktureinheiten werden in der überwiegenden Zahl den vertikalen Systemebenen der Produktion nach WESTKÄMPER zugewiesen [Westkämper 2008] und diese als Aggregationsebenen der Fabrikstruktur zugrunde gelegt. Die Fabrikstruktur umfasst in keiner der Betrachtungen die Ebene des Produktionsnetzwerks, sondern konzentriert sich weitestgehend auf die Standort-, Segment- und Arbeitsplatzebene. Betrachtungsgegenstand ist grundsätzlich eine Fabrik, jedoch nicht die Vernetzung mehrerer Fabriken. Im Rahmen der abstrakten Strukturdefinitionen im Kontext der Fabriken werden die Elemente und Beziehungen zwischen den Fabrikstrukturelementen nicht weiter spezifiziert oder bei den konkreteren Beschreibungen auf Material- und teilweise auf Informationsflüsse reduziert. Die technologischen und technischen Elemente werden außer bei der Strukturdefinition nach ROCKSTROH in keiner anderen Beschreibung betrachtet. Die Berücksichtigung der zu fertigenden Produkte sowie der kapazitiven Wechselwirkungen innerhalb einer Fabrikstruktur erfolgt nicht.

Unter dem Gesichtspunkt der Forderung nach wandlungsfähigen Fabrikstrukturen ist der Fabrikstrukturbegriff im Folgenden konkreter zu spezifizieren und unter Berücksichtigung einer ganzheitlichen Betrachtung der Fabrikelemente für die Planungssystematik dieser Arbeit zu definieren. Vor dem Hintergrund der strategischen Bedeutung einer Harmonisierung von Produkt- und Produktionsstrukturen ist das System Fabrik in der vorliegenden Arbeit grundsätzlich folgendermaßen zu betrachten:

Das System Fabrik ist in die Subsysteme der Produkte und der Produktion zu unterteilen, welche zugleich die beiden relevanten Sichten auf die Fabrikstruktur re-

präsentieren und in ihrer Vernetzung zu einem Fabrikstrukturbegriff zusammenzuführen sind.

Die Struktur der Fabriken ist folglich in abstrakter Form aus dem Systembegriff heraus über die Systemelemente und ihre Vernetzung charakterisiert (Abbildung 2.6).



**Abbildung 2.6: Struktur der Fabriken**

In Anlehnung an die Definition des Fabrikstrukturbegriffs in [Löffler et al. 2011b] gilt für diese Arbeit folgende Begriffsabgrenzung, deren Systemelemente und Zusammenhänge in Abbildung 2.6 visualisiert sind:

Eine Fabrikstruktur ist definiert über die Systemelemente der Produkte, Ressourcen, Kapazitäten, Technologien, die Standortprofile und räumliche Lage, die Prozesse, die Eigen- und Fremdfertigung sowie die zwischen diesen Elementen bestehenden Relationen.

Die Ressourcen der Produktion beziehen sich auf die personellen, technischen und räumlichen Ressourcen, welche innerhalb des Produktionsnetzwerks zur Verfügung stehen. Ihre Art schlägt sich in den Technologien nieder, deren Quantifizierung und Umfang in den Kapazitäten. In den Standortprofilen wird die Zuordnung von Kompetenzen zu Standorten sowie ihre räumliche Lage und Anordnung beschrieben. Die Prozesse umfassen den zeitlichen Ablauf der technologischen Leistungserstellung entlang der gesamten zur Herstellung der Produkte erforderlichen Prozesskette. Die Eigen- und Fremdfertigung zieht die Bilanzgrenze zwischen unternehmensinternen und -externen Standorten und Kompetenzen.

Die Begriffe der Fabrikstruktur und Struktur werden im Rahmen dieser Arbeit synonym verwendet. Liegt die Sichtweise auf die Fabrikstruktur auf den Produkten, so wird von Produktstrukturen gesprochen, steht die Perspektive der Produktion im Vordergrund, so wird der Begriff der Produktionsstrukturen verwendet.

Die Fabrikstruktur umfasst grundsätzlich die Produkt- und Produktionsstruktur sowie ihre Vernetzung auf allen dargestellten Systemebenen beginnend beim Netzwerk.

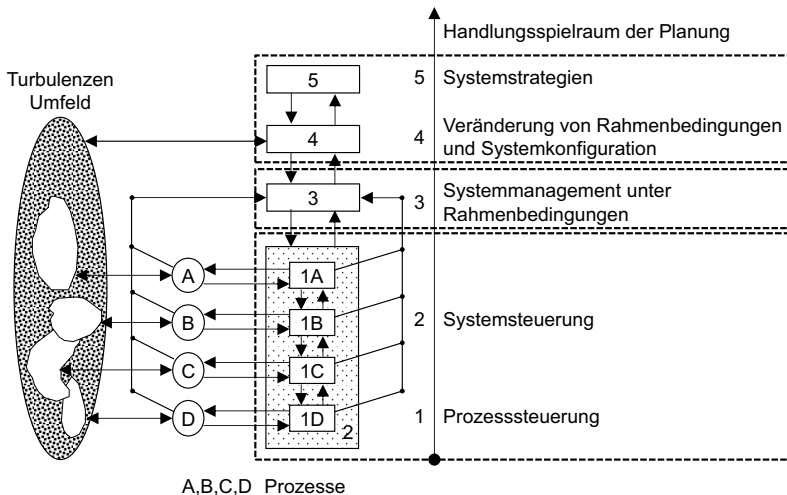
### **2.3 Strategische Produktionsplanung**

Die Optimierung und Anpassung der Strukturen erfolgt nach WESTKÄMPER im Rahmen der strategischen Planung auf der Ebene des Produktionsnetzwerks und der Standorte bis hinein in die Produktionssegmente [Westkämper 2001, Westkämper 2006b]. Die Konfiguration einer vernetzten Produktion mit der Zuweisung von Produkten und Kompetenzen zu Standorten ist eine strategische Planungsaufgabe [Wiendahl et al. 2007]. Die Strategie der Produktion wird nach ZAHN als Brücke zwischen den künftigen Anforderungen und kritischen Erfolgsfaktoren der Märkte sowie den Fähigkeitsprofilen der Unternehmen gesehen [Zahn et al. 1994]. Die Konfiguration und Rekonfiguration der vernetzten Produktion muss sich deshalb an den Umfeldentwicklungen sowie den verfügbaren Ressourcen und Kompetenzen orientieren [Zahn 2011b]. Dabei ist ein Bündel von Entscheidungen über die Elemente der Produktionsstrategie und ihre Ausprägungen zu treffen. Diese umfassen die Fertigungsaufgabe (Leistung nach Art und Menge, Fertigungstiefe), die Produktionsstruktur (Kapazitäten, Standorte, Fertigungseinrichtungen) und die Prozesse [Zahn 1988; Zahn et al. 1994]. Für die Strategieableitung sind die Bündel von Entscheidungen über die Elemente der Produktionsstrategie so zu treffen, dass, wie in Kapitel 2.2.3 dargestellt, eine Harmonisierung der Produkt- und Produktionsstruktur sowie deren Vernetzung erreicht werden kann.

Unter diesen Gesichtspunkten ist im Folgenden der Bezugsrahmen der strategischen Planung für die Wandlungsfähigkeit einer vernetzten Produktion zu ziehen. Hierzu soll das generische Grundmodell nach BEER und MALIK herangezogen werden, das die Struktur eines lebensfähigen Systems auf Basis der Systemtheorie und ihre Übertragung auf die Managementlehre abbildet. BEER [Beer 1959] formulierte das Modell des lebensfähigen Systems (VSM) erstmalig 1959 aus der Analyse des zentralen Nervensystems [Balve 2002]. Die Lebensfähigkeit ist in diesem Zusammenhang im erweiterten Sinne zu verstehen als die Fähigkeit, sich an wandelnde Umstände der jeweiligen Umgebung anzupassen und sich aufgrund von Erfahrungen und der Fähigkeit, aus diesen zu lernen, weiterzuentwickeln. Aus dem Struktur- und Systemverständnis der Kybernetik heraus, ist dieses Phänomen nicht den einzelnen Komponenten des Systems zuzuschreiben, sondern ihren spezifischen Zusammenhängen, also der Struktur des Systems [Malik 2000]. Vor dem Hintergrund der Problem- und

Zielstellung dieser Arbeit, die strukturelle Wandlungsfähigkeit vernetzter Fabriken systematisch zu erzielen, erscheint der generische Grundrahmen dieses lebensfähigen Strukturmodells nach BEER und MALIK als Bezugsrahmen der Planungsmethodik zweckmäßig und ist auf die Struktur der Fabriken und ihre strategische Planung zu übertragen.

Komplexe sozio-technische Systeme wie Fabriken haben aufgrund ihrer Komplexität die Eigenschaft, sich in einem bestimmten Maß selbst zu organisieren und zu regulieren. Die Organisation und Steuerung eines solchen intrinsischen Systems hat folglich anders zu erfolgen, als dies für extrinsische, also fremd organisierte und geregelte Systeme der Fall sein muss [Malik 2000]. Abbildung 2.7 zeigt die Zusammenhänge der Organisation und Lenkung eines sich im Grundsatz selbst organisierenden und selbst regulierenden Systems und erklärt, wie die grundlegende Lenkungsstruktur eines solchen lebensfähigen Systems, wie es die Fabriken sind, aussehen muss.



**Abbildung 2.7: Allgemeine Lenkungsbeziehungen eines lebensfähigen Systems und Ableitung der Handlungsspielräume für die Planung in Anlehnung an [Beer 1995; Malik 2000]**

BEER und MALIK modellieren dieses lebensfähige System in fünf Strukturelementen oder Subsystemen, die innerhalb der Systemgrenze liegen und dem außerhalb des Systems liegenden Umfelds mit seinen Turbulenzen. A, B, C und D sind Prozesse, welche in einem zur Ausführung dieser Prozesse relevanten Umfeld vollzogen werden. Diese Umfeldelemente stehen untereinander in Beziehung und sind Bestandteile eines größeren Umfelds, welches

für das System als Ganzes von Bedeutung ist. Das gesamte turbulente Umfeld ist mit dem Gesamtsystem über Subsystem Vier verbunden.

Die Systeme innerhalb des lebensfähigen Systems sind wiederum lebensfähige Systeme, die den Prinzipien von Selbstorganisation und -regulierung entsprechen und folglich in ihrer Grundstruktur gleich organisiert sind. Betrachtet man die Systeme Eins, so sind deren Prozesse im Prinzip in ihren Verhaltensweisen frei, bedingen sich jedoch aufgrund der Abhängigkeiten untereinander zum einen gegenseitig, zum anderen haben sie sich den Rahmenbedingung ihrer Umwelt anzupassen.

Um sich diesen Störungen anzupassen, bedarf es einer Regulierung und Steuerung der Prozesse durch System Zwei, das den Rahmen und somit das Metasystem der Systeme Eins bildet und diese in ihrem Zusammenwirken koordiniert.

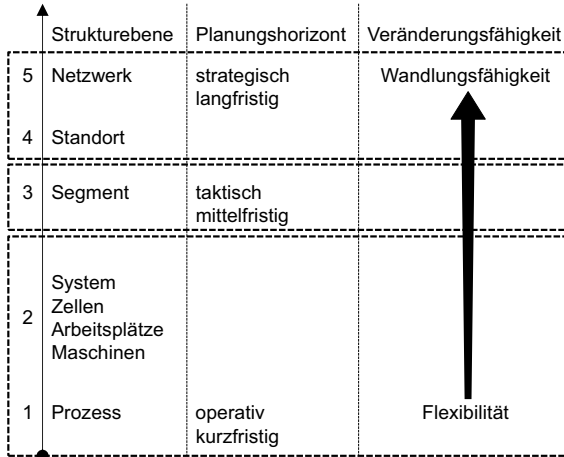
Um Synergieeffekte der Systeme Eins in ihrem Zusammenwirken zu erzielen, bedarf es der Vorgabe von Richtlinien, die das Gesamtsystem betreffen und die Verhaltensweisen der Systeme einschränken. System Drei gibt genau diesen operativen Gesamtrahmen für die Koordination der Systeme Eins vor. Dieser Gesamtrahmen wird von System Drei aus den Rückkopplungen der Systeme Eins und Zwei sowie unter den Vorgaben und Rahmenbedingungen der Systeme Vier und Fünf entwickelt. System Drei kann somit als Systemmanagement unter Rahmenbedingungen verstanden werden, das für eine optimale Ausnutzung und Überwachung der Ressourcen einer Fabrik unter den vorgegebenen Restriktionen sorgt.

Während die Systeme Eins, Zwei und Drei das interne Gleichgewicht des Systems zu erhalten versuchen, ist es Aufgabe von System Vier, die für das System aus der Umwelt relevanten Informationen aufzunehmen, zu verarbeiten und die Umweltinformationen nach innen an die Systeme Drei und Fünf weiterzugeben. System Vier verändert somit die Rahmenbedingungen in Anlehnung an die Umweltinformationen und sorgt für die Balance zwischen den internen Systembegebenheiten und den externen Umwelteinflüssen.

System Fünf ist die oberste Entscheidungs- und Vorgabeinstanz des Systems, nach der sich alle anderen Systeme in ihrer Handlungs- und Gestaltungsfreiheit zu orientieren haben. Vergleichbar ist diese Ebene mit dem Top-Management eines Unternehmens. Die Entscheidungen, die auf dieser obersten Systemebene getroffen werden, basieren auf den internen und externen Entwicklungsaussichten in enger Interaktion mit den Systemen Drei und Vier. Auf Basis dieses Austausches werden die Systemstrategien unter Berücksichtigung aller Überlegungen aus System Drei und Vier entwickelt und die Grundlinie für die weitere Entwicklung des Systems erarbeitet und vorgegeben [Malik 2000].

Diese Überlegungen aus dem Modell des lebensfähigen Systems nach BEER und MALIK sind nun auf die Struktur der Fabriken und der Forderung nach struktureller Wandlungsfähigkeit

zu übertragen. Den Rahmen für den Transfer dieses Modells in Bezug auf die Strukturebenen der Produktion, den zeitlichen Planungshorizont sowie den möglichen Freiheitsgrad der Veränderungsfähigkeit fasst Abbildung 2.8 zusammen.



**Abbildung 2.8: Transfer des lebensfähigen Modells auf die Fabrikstruktur**

Bezieht man die Systemebenen des lebensfähigen Modells auf die Strukturebenen der Fabriken, so ist System Eins den Prozessen der Produktion gleichzusetzen. Diese Prozesse werden innerhalb des Systems Zwei in den jeweiligen Fertigungszellen auf den Maschinen der entsprechenden Arbeitsplätze auf operativer Ebene durchgeführt und vorab kurzfristig unter Berücksichtigung der operativen Vorgaben geplant. Die Anpassung an veränderte Anforderungen und kurzfristige Störungen erfolgt ausschließlich innerhalb eines vorgehaltenen und installierten Flexibilitätskorridors.

System 3 entspricht der Segmentebene der Produktion, welche die Systeme Eins und Zwei aggregiert. Diese kann in einem mittelfristigen Planungshorizont unter Vorgabe der Restriktionen und Rahmenbedingungen angepasst werden.

Die Standorte entsprechen dem System Vier, welches sich unter Berücksichtigung der Vorgaben aus dem Produktionsnetzwerk und den inneren Restriktionen der Standortprofile und seiner Kapazitäten weiterentwickeln kann.

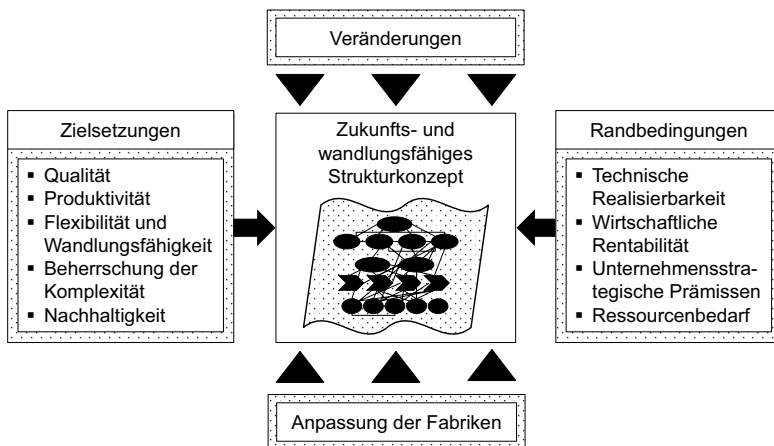
Das oberste System Fünf entspricht dem Netzwerk, das auf strategischer Ebene in Bezug auf seine Konfiguration und Zuordnung von Kompetenzen zu planen ist. Auf dieser Netzwerkebene herrscht die größte Gestaltungsfreiheit des Gesamtsystems und vor diesem Hintergrund sind auf dieser Ebene die strategischen Entwicklungslinien für die gesamte Fabrikstruktur zu entwickeln. Die strategische Planung auf Netzwerkebene ermöglicht die Über-



schreitung bestehender Grenzen und Restriktionen und lässt somit die Anpassung der Strukturen an die Veränderungen und Herausforderungen aus dem turbulenten Umfeld zu. Folglich ist auf dieser Ebene der erforderliche Veränderungsfreiraum zur Wandlungsfähigkeit gegeben, welche in der strategischen Ausrichtung des Systems Fabrik strukturell zu verankern ist.

Bezugnehmend auf das Modell des lebensfähigen Systems nach BEER und MALIK ist der Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit abzuleiten. Dieser hat sich vor dem Hintergrund der strategischen Gestaltungsfreiheit von Ebene Fünf auf die vernetzte Produktion innerhalb eines Produktionsverbunds zu beziehen und aufgrund der aufgezeigten Interdependenzen und Interaktionen des Systems Fünf mit den Systemen Drei und Vier die Standorte und Segmente der Produktionsstruktur zu berücksichtigen. Folglich umfasst der Bilanzrahmen der Planungsmethode die langfristige strategische Planung der Fabrikstrukturen auf den Produktionsstrukturebenen des Netzwerks, der Standorte und der Segmente sowie der äquivalenten Produktstrukturebenen und ihrer Vernetzung unter Berücksichtigung von Ansätzen zur Steigerung der strukturellen Wandlungsfähigkeit. Diesen Gestaltungsrahmen zu füllen ist Aufgabe der strategischen Produktionsplanung.

Daher sind im Rahmen der strategischen Planung Strukturkonzepte zu entwickeln, die zur Erfüllung und Erhaltung der langfristigen Wettbewerbsfähigkeit der industriellen Produktion zukunfts- und folglich wandlungsfähig sind. Diese Konzepte sind so zu konzipieren, dass eine Anpassung der Fabrikstrukturen bei Veränderungen aus dem Umfeld der industriellen Produktion systematisch durchführbar ist (Abbildung 2.9).



**Abbildung 2.9: Einfluss- und Zielgrößen für die strategische Planung zukunfts-fähiger Strukturkonzepte**

Diese Strukturkonzepte sind im Einklang mit den strategischen Zielen der Produktion unter Berücksichtigung der relevanten Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen durch die strategische Produktionsplanung zu konzipieren. Diese sind dann hinsichtlich der Zielsetzungen und Fähigkeit zur Adaption zu bewerten.

Die strategischen Ziele für eine zukunftsfähige Produktion der variantenreichen Serienfertigung lassen sich auf fünf relevante Faktoren fokussieren, die vor dem Hintergrund der aktuellen Entwicklungen der Produktion im Vordergrund stehen. Diese beziehen sich auf höchste Qualität der Produkte und Produktionsergebnisse nach dem Null-Fehler Prinzip sowie die Produktivität und somit die ökonomische Effizienz des Systems Fabrik. Vor dem Hintergrund des dynamischen und turbulenten Umfelds der Fabriken ist deren Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zu einem entscheidenden Faktor bei der Konzeption von Fabrikssystemen und ihrer Struktur geworden. Die Beherrschung der Komplexität ist dabei als eine der Grundvoraussetzungen einzustufen, die zum erfolgreichen Betrieb der Fabriken erforderlich sind. Komplexität umfasst dabei die beiden Dimensionen der Vielzahl und Dynamik und soll nach der allgemeinen systemtheoretischen Sichtweise in Anlehnung an BLISS und PILLER [Bliss 2000; Piller 2006] wie folgt definiert werden:

Komplexität ist das Zusammentreffen einer strukturellen Vielschichtigkeit, die aus der Anzahl und Diversität der Systemelemente sowie deren Relationen und ihrer dynamischen Veränderlichkeit resultieren.

Im Zuge der vergangenen Jahre hat sich die Nachhaltigkeit der Produktion zu einer wichtigen strategischen Zielgröße entwickelt. Der Brundtland-Report definiert 1987: „Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs“ – „Dauerhafte (nachhaltige) Entwicklung ist Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“ [WCED 1987]. Die Nachhaltigkeit bezieht sich gleichermaßen auf die Verwirklichung der ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekte, welche das Spannungsdreieck der Nachhaltigkeit aufspannen [Bergmann 2010]. Unter Berücksichtigung dieser drei Nachhaltigkeits herausforderungen sowie deren Integration [BMU et al. 2007] wird der Begriff der Nachhaltigkeit für das System Fabrik wie folgt definiert:

Die Nachhaltigkeit verfolgt die Integration und Balance der ökonomischen, ökologischen und sozialen Effizienz eines Systems.

Diese fünf beschriebenen Zielsetzungen sind im Rahmen der Entwicklung eines strategischen Strukturkonzepts für die Fabriken unter Berücksichtigung der Wandlungstreiber und

der Randbedingungen zu verfolgen, deren Einflüsse sich bei der Konzeption und Realisierung bemerkbar machen. Die Grundvoraussetzung, die bei der Entwicklung eines wettbewerbsfähigen Strukturkonzepts zu beachten ist, ist deren technische Realisierbarkeit. Daneben ist die Forderung einer hinreichenden wirtschaftlichen Rentabilität zu erfüllen. Grundsätzlich hat das Konzept den unternehmensspezifischen Prämissen zu folgen und ist auf Basis des erforderlichen Ressourcenbedarfs zu bewerten. Um die Vielzahl der Anforderungen, die Dynamik im Umfeld der Produktion und folglich die Komplexität des Planungsgegenstands in der Entwicklung wandlungsfähiger Strukturmodelle zu berücksichtigen, ist der Planungsprozess zu systematisieren.

Auf dem Gebiet der Wandlungsfähigkeit von Fabriken wurden in den vergangenen Jahren erhebliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt, die bei der Entwicklung einer Planungsmethode zur systematischen Strukturanpassung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion zu berücksichtigen sind. Unter diesem Gesichtspunkt sollen im Folgenden die relevanten Forschungsansätze aufgearbeitet sowie ein Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand gegeben werden.

## **2.4 Stand der Wissenschaft und Technik**

Die Aufarbeitung des Stands der Wissenschaft und Technik zur Planung und Strukturierung wandlungsfähiger Fabriken erfolgt unter drei Aspekten, die für die Arbeit von Bedeutung sind. Zunächst wird auf die Relevanz der Wandlungsfähigkeit für Fabriken, die Treiber und ihre Anforderungen sowie bestehende Ansätze zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit eingegangen. Darauf aufbauend werden Strukturierungsansätze für Fabriken und methodische Vorgehensweisen zur Strukturplanung aufgearbeitet.

### **2.4.1 Relevanz der Wandlungsfähigkeit bei der Gestaltung von Fabriken**

Einer Umfrage des VDI-Fachausschusses „Fabrikplanung“ zufolge, zählt die Wandlungsfähigkeit vor den Megatrends der Nachhaltigkeit und Globalisierung zu den entscheidenden Zukunftsthemen der Fabrikplanung. Aus der Studie ging hervor, dass ein erheblicher Bedarf an Konzepten der Wandlungsfähigkeit innerhalb von Fabriken und standortübergreifend im Produktionsnetzwerk besteht [Heinen et al. 2010]. Diese Arbeit soll dazu beitragen, die Forschung zur Steigerung der strukturellen Wandlungsfähigkeit auf den Ebenen der Fabriken und ihrer Vernetzung standortübergreifend voranzutreiben.

#### **2.4.1.1 Wandlungstreiber**

Unternehmen der industriellen Produktion operieren in einem turbulenten Umfeld, deren Turbulenzursachen sowohl im internen als auch im externen Umfeld zu finden sind [Kirchner et

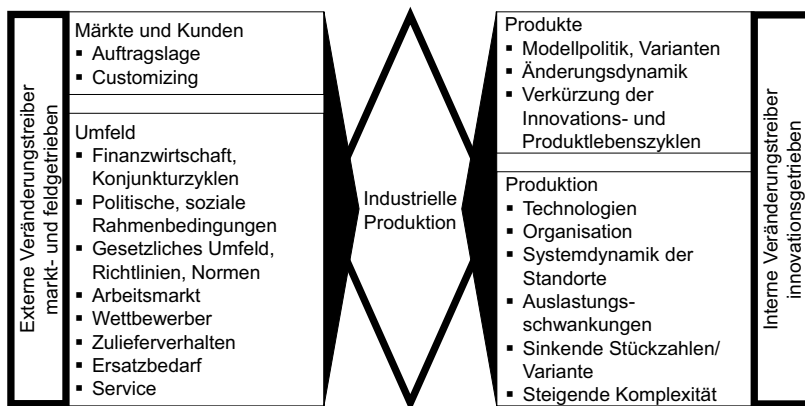
al. 2003; Westkämper et al. 2009]. Aufgrund der Vielfältigkeit der Faktoren und ihrer Wechselwirkungen auf die Produktion, werden im Folgenden die wesentlichen Wandlungstreiber der industriellen Produktion identifiziert und klassifiziert. Aus dieser Übersicht werden dann die für die Strukturplanung der Fabriken relevanten Wandlungstreiber spezifiziert und für den Betrachtungsrahmen dieser Arbeit festgelegt.

Aus einer Unternehmensstudie zur Wandlungsfähigkeit von Unternehmen im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 467 „Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion“ wurden Turbulenzursachen aus dem industriellen Umfeld identifiziert und hinsichtlich ihrer Bedeutung und zeitlichen Wirkung untersucht [Kirchner et al. 2003]. Diese Ergebnisse dienen der Identifizierung von Turbulenzkeimen, auf deren Basis die für die Unternehmen relevanten Treiber im Rahmen des SFB 467 zusammengestellt wurden. NOFEN zeigt Beispiele von Wandlungstreibern auf das Unternehmen bzw. die Fabrik auf und unterteilt diese in zwei Treiberklassen: die externen Treiber der Technologie, des Markts und der Umwelt sowie die internen Treiber, die er weiter in reaktive und proaktive Faktoren untergliedert [Nofen et al. 2005]. Eine weitergefasste Zusammenstellung der Wandlungstreiber gibt WESTKÄMPER, der diese verursachungsgerecht den für die industrielle Fertigung relevanten Themenfeldern zuordnet [Westkämper 2006b; Westkämper et al. 2009]. Den grundlegenden Treibern stimmen auch weitere Autoren zu, die auf dem Gebiet der Wandlungsfähigkeit forschen [Nyhuis et al. 2009; Gille et al. 2011].

In Ergänzung zu diesen Arbeiten fasst Abbildung 2.10 die Wandlungstreiber und Turbulenzfaktoren der industriellen Produktion zusammen. Grundsätzlich sind die Wandlungstreiber in Bezug auf die Systemgrenze der industriellen Produktion in interne und externe Veränderungstreiber zu unterteilen [Löffler et al. 2010b, Löffler et al. 2011c]. Externe Veränderungen sind markt- und feldgetrieben, die internen Veränderungen werden forciert und ausgelöst durch unternehmensinterne Innovationen.

Die Internationalisierung der Märkte, ihre Unvorhersehbarkeit einhergehend mit einer schwer prognostizierbaren Auftragslage und Volatilität zählen zu den größten Wandlungstreibern und stellen somit eine große Herausforderung für die verarbeitende Produktion dar [Wien-dahl et al. 2007; ElMaraghy et al. 2009; Westkämper et al. 2009]. Durch Kundenwünsche getrieben, vollzieht sich im Zuge des Customizing in der gesamten variantenreichen Serienfertigung der Trend zu kundenindividuellen Produkten. Auf diesen Trend reagieren die Unternehmen mit einer Modellpolitik, die auf Produktseite zu einer explodierenden Variantenvielfalt führt. Diese wird auch in Zukunft ein bestimmendes Thema bleiben [Piller 2006; Oliver Wyman 2007; Hüttenrauch et al. 2008]. Die Produkte sind einer permanenten Änderungsdy-

namik ausgesetzt, die sich in Form konstruktiver Verbesserungen und Anpassungen in laufenden Produktprogrammen sowie in Form von Neukonstruktionen aufgrund veränderter Marktnachfragen vollziehen [Westkämper et al. 2009]. Tendenziell sind immer kürzer werdende Innovations- und Produktlebenszyklen sowie „Time to Market“ Zeiten zu verzeichnen, die sich unmittelbar auf den gesamten Produktentstehungsprozess und die erforderlichen Produktionstechnologien auswirken. In der Produktion selbst sorgen technologische Neuerungen und Erweiterungen für Änderungen in der Bearbeitungsfähigkeit der Produkte sowie in der Organisation der Abläufe und Prozesse. Die Informations- und Kommunikationstechnik spielt im Zuge der produktionstechnischen Neuerungen und organisatorischen Verbesserungen eine entscheidende Rolle. Im Weiteren sei auf die Systemdynamik der Standorte hingewiesen, ihre Profiländerung und Weiterentwicklung im Zuge von Kompetenzen und Fähigkeiten. Die Produktion hat mit einer Verschärfung der Turbulenzen zu kämpfen, die auf schwankende Auslastungen, sich ändernde Auftragszusammensetzungen sowie sinkende Stückzahlen und Losgrößen pro Variante zurückzuführen sind. Insgesamt ist aufgrund dieser Ursachen eine Komplexitätssteigerung der Produktion zu verzeichnen.



**Abbildung 2.10: Wandlungstreiber auf die industrielle Produktion**

Verschärft wird diese Tendenz durch die Entwicklungen des finanzwirtschaftlichen, politischen und gesetzlichen Umfelds, dessen ökonomische und soziale Rahmenbedingungen sich unmittelbar auf die Produktion auswirken. Besonderes Augenmerk ist im Zuge der aktuellen Lage auf die finanzwirtschaftlich bedingten Konjunkturzyklen zu richten. Im Weiteren steht die industrielle Produktion in Abhängigkeit des Arbeitsmarkts und der Personalverfügbarkeit sowie den Einflussgrößen der Wettbewerber. Aufgrund der geringen Wertschöpfungstiefe ist das Zulieferverhalten inzwischen zu einem wesentlichen Einflussfaktor der Produktion geworden. Über den gesamten Produktlebenslauf ist mit einem Ersatzbedarf an Bau-

teilen und Komponenten zu rechnen, der über den Handel und entsprechenden Service abgefragt wird.

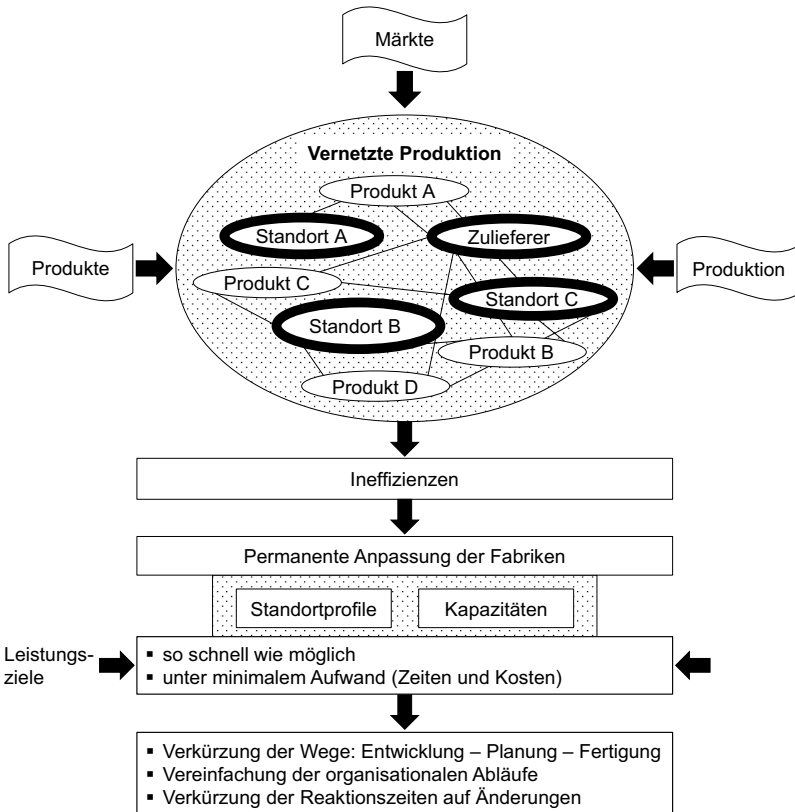
Die für eine Strukturveränderung der Fabriken relevanten Turbulenzfaktoren können auf drei Hauptwandlungstreiber reduziert werden, die in ihren Ausprägungen wie in Abbildung 2.10 dargestellt in der Planungssystematik zu berücksichtigen sind: die Märkte, die Produkte und die Produktionstechnologien. Die Treiber aus dem übrigen Umfeld wirken über die drei Haupttreiber und werden aus diesem Grund nicht weiter in der Planungsmethode vertieft und berücksichtigt.

#### **2.4.1.2 Anforderungen an die Wandlungsfähigkeit**

Die drei Wandlungstreiber Märkte, Produkte und Produktionstechnologien haben unmittelbaren Einfluss auf die Strukturen der Fabriken in einer vernetzten Produktion, die aus mehreren Standorten und Fabriken besteht und denen die entsprechenden Produkte zugewiesen sind. Auf diese Strukturen wirken sich die Turbulenzen und Veränderungsimpulse aus und führen zu einer Destabilisierung des Systems Fabrik [Westkämper et al. 2009]. Aufgrund der Wirkungsmechanismen, welche durch die Wandlungstreiber angestoßen werden, entstehen Ineffizienzen in den Strukturen der vernetzten Produktion durch Rüst- und Umstellvorgänge, Auslastungsdefizite, lange Wege sowie begrenzte Ressourcen und Kapazitäten. Resultat dieser strukturellen Ineffizienzen ist ein Wandlungsdruck (Abbildung 2.11). Sobald die ökonomische Effizienz des Gesamtsystems, welche von den Elementen und ihren Relationen abhängt, in Gefahr ist, überschreitet der Wandlungsdruck den zulässigen Grenzwert und löst einen Anpassungsbedarf aus [Löffler et al. 2011b].

Die Anpassung der Fabriken und ihrer Strukturen hat permanent zu erfolgen, sobald die Veränderungstreiber dies erfordern. Der kontinuierliche Adaptions- und Optimierungsprozess der Fabrikstrukturen bezieht sich auf der Systemebene des Produktionsnetzwerks und der Standorte auf die Anpassung der Standortprofile, ihrer Ressourcen und Kapazitäten. Folglich besteht der Bedarf an struktureller Wandlungsfähigkeit, welche die Fabriken zu dieser Adaption entsprechend der vorgegebenen Leistungsziele befähigt. Ziel ist es, die Veränderungs- und Adaptionsprozesse in kürzester Zeit so schnell wie möglich unter minimalem Aufwand mit höchster Effizienz vorzubereiten und durchzuführen. Um diese Leistungsziele zu erreichen, bedarf es einer systematischen Planung in ausreichendem Detaillierungsgrad, welche zu einer Steigerung der Wandlungsfähigkeit in den Strukturen der Fabriken führt. Die Gestaltung des Produktionsnetzwerks und der Standorte unter dem Gesichtspunkt der Wandlungsfähigkeit ist dabei die strategische Aufgabenstellung.

Anzustreben ist in diesem Zusammenhang eine Verkürzung der Wege zwischen der Entwicklung, der Planung und der Fertigung, die Vereinfachung der organisationalen Abläufe sowie die Verkürzung der Reaktions- und Umsetzungszeiten bei Änderungen.



**Abbildung 2.11: Anforderungen aus den Wandlungstreibern an die Fabriken und deren Wandlungsfähigkeit**

Unter diesen Gesichtspunkten werden im folgenden Abschnitt aus dem Stand der Wissenschaft und Technik die Wandlungsbefähiger benannt sowie die existierenden Ansätze zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit der Fabriken aufgearbeitet.

### 2.4.1.3 Wandlungsbefähiger

Die Wandlungstreiber, wie sie im vorherigen Abschnitt beschrieben wurden, führen generell zu Instabilitäten der Produktion. Aufgrund der unterschiedlichen Lebenszyklen der Subsysteme innerhalb der Fabriken, müssen sich diese permanent den veränderten Bedingungen

anpassen. Eine anschauliche Darstellung der divergierenden Lebenszyklen von Produkten, Prozessen, Fabrik(gebäuden) und Flächen gibt WIRTH und argumentiert daraus den Bedarf wandlungsfähiger Systemstrukturen sowie die Notwendigkeit einer zeitliche Harmonisierung der unterschiedlichen Lebenszyklen [Wirth 2000; Wirth et al. 2001; Schenk et al. 2004]. Konsequenterweise sind die Fabrikstrukturen mit ihren Elementen und Relationen mit Wandlungsbefähigern auszustatten, welche die Adaption an Veränderungen ermöglichen.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten am Institut für Fabrikplanung und Logistik IFA der Universität Hannover wurden fünf Wandlungsbefähiger definiert [Hernández 2003; Wiendahl et al. 2005; Wiendahl et al. 2007; Nyhuis et al. 2007; Nyhuis et al. 2008; EIMaraghy et al. 2009], die als individuelle Eigenschaft eines Fabrikelements zu betrachten sind, welche dieses zum Wandel befähigen [Hernández 2003]. Diese lauten wie folgt:

- Universalität
- Modularität
- Kompatibilität
- Mobilität
- Skalierbarkeit

Die Universalität umfasst die Dimensionierung eines Fabrikelements zur Übernahme verschiedener Aufgaben und Erfüllung unterschiedlicher Anforderungen. Sie bezieht sich auf die Betriebsmittel, Raum- und Gebäudetechnik sowie die Organisation [Wiendahl et al. 2005]. Beispielsweise sind Universalmaschinen in der Fertigung durchaus etabliert, die Übertragung auf eine ganze Fabrik ist jedoch auch aus wirtschaftlichen Gründen insbesondere im Bereich der Serienfertigungen nicht unproblematisch.

Die Modularität bedeutet die standardisierte und austauschbare Gestaltung von Fabrikelementen in der Weise, dass die Module als autonom agierende Einheiten austauschbar sind, ohne Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu haben. Die Modularität bezieht sich auf die technischen Einrichtungen der Fabrik wie Betriebsmittel und Gebäude sowie die organisationalen Strukturen [Hernández 2003]. Die technische Realisierung der Modularität bezieht sich vorwiegend auf Betriebsmittelebene und umfasst Plug and Produce Konzepte.

Die Kompatibilität ermöglicht die Vernetzungsfähigkeit der Fabrikelemente in Bezug auf die Versorgungssysteme und den Austausch von Material, Medien und Energie [Wiendahl et al. 2005; Nyhuis et al. 2008].

Die Mobilität beschreibt die örtliche Beweglichkeit von Fabrikelementen.

Die Skalierbarkeit bezieht sich auf die Erweiter- und Reduzierbarkeit der Fabrikelemente bezüglich der technischen, organisatorischen, räumlichen und personellen Atmungs-fähigkeit



und betrifft insbesondere die Fabrikflächen [Hernández 2003; Wiendahl et al. 2005; Nyhuis et al. 2008].

Die Wandlungsbefähiger werden in der einschlägigen Fachliteratur wie in den Beispielen oben aufgezeigt vorwiegend auf die Betriebsmittel, Flächen und Gebäude bezogen. WIENDAHL adaptiert die Wandlungsbefähiger auf die Systemebenen der Segmente, Systeme und Zellen [Wiendahl et al. 2007]. Der Forschungsschwerpunkt bezieht sich auf die Ebene der Systeme sowie der Maschinen- und Anlagentechnik in Bezug auf deren Steuerung und Rekonfigurierbarkeit [Wiendahl et al. 2007; ElMaraghy 2009]. Die durchgängige Übertragung der Wandlungsbefähiger auf ganze Fabrikstrukturen und das Netzwerk der Produktion erfolgt nicht. Wandlungsfähigkeit hat sich jedoch auf alle Skalen der Strukturen von den Prozessen bis hinauf zu den Netzwerken zu beziehen [Westkämper et al. 2009].

Produktionskonzepte, welche die Wandlungsfähigkeit unterstützen, beziehen sich auf verschiedene Ebenen der industriellen Produktion und können in organisatorische und technische Befähiger unterteilt werden. Zu den organisatorischen Ansätzen zählen die modulare und fraktale Fabrik sowie das Agile Manufacturing, zu den technischen Konzepten ist das Bionic, Holonic und Reconfigurable Manufacturing zu zählen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell hat einen technischen Schwerpunkt, berücksichtigt aber auch organisatorische und informationstechnische Aspekte.

Ein Sprung in der Entwicklung von Fertigungskonzepten, welche eine Abkehr reiner Funktionalisierung und Technologieorientierung hin zu den Märkten und Kunden vollzog, ist die modulare Fabrik nach WILDEMANN, welcher die Fertigung organisatorisch in autonome Einheiten untergliedert und diese zu Fertigungssegmenten zusammenfasst. Die Fertigungssegmente versorgen spezifische Markt- und Produktkombinationen und richten ihre strategische Positionierung spezifisch an deren Zielsetzungen aus. Die Fertigungssegmente orientieren sich in ihren Aufgaben und Verantwortungsbereichen an spezifischen Produkten und folgen konsequent den Prozessen hin zum internen und externen Kunden. Daraus resultiert eine geringe Fertigungsbreite und hohe Fertigungstiefe. Die Produkt- und Prozessorientierung senkt den Koordinationsaufwand und durch die Integration mehrerer logistischer Stufen in die Segmente wird der Verflechtungsgrad zu anderen Fertigungssegmenten reduziert und somit die Autonomie gesteigert. In der Konsequenz werden auch indirekte fertigungsbezogene Funktionen in die Segmente übertragen, welche zur Erhöhung des Autonomiegrads und der Verantwortung des Segments beitragen. Die Fertigungssegmente verfügen über eine eigenständige Kosten- und Ergebnisverantwortung und werden somit zu Leistungszentren. Mit

diesem Ansatz konnten in der Praxis erhebliche Optimierungen der Leistungsziele Qualität, Kosten und Zeit erzielt werden [Wildemann 1998; Wiendahl et al. 2009].

Auf diesen Ansatz aufbauend entwickelte WARNECKE den Gedanken der fraktalen Fabrik [Warnecke et al. 1992], die er dann auf die Organisation des gesamten Unternehmens übertrug [Warnecke et al. 1993]. Fraktale sind selbstständige Unternehmenseinheiten, welche sich durch Selbstähnlichkeit, Selbstorganisation, Selbstoptimierung, gemeinsamer Zielorientierung und Dynamik auszeichnen und hinsichtlich ihrer Ziele und Leistungen eindeutig beschreibbar sind. Eine Stärke der Fraktale liegt in der Selbstorganisation, welche sie zur schnellen Umsetzung von Veränderungen innerhalb des Fraktals, aber auch ihrer Beziehungen zu anderen Fraktalen befähigt. Durch die Vitalität der Fraktale überwinden diese die Statik der Segmente und unterliegen einem ständigen Optimierungs- und Verbesserungsprozess. Die Selbstähnlichkeit wird nicht nur auf die Fraktale selbst übertragen, sondern auch auf die Ziele der Fraktale. Somit wird gewährleistet, dass sich die Einzelaktivitäten der Fraktale zu einem harmonischen Gesamtbild zusammenfügen. Der Ansatz der fraktalen Fabrik war der Impuls zu einer Dezentralisierung der Strukturen und lieferte einen Beitrag zur ganzheitlichen Sicht auf die Produktion und das Unternehmen [Warnecke et al. 1993; Wiendahl et al. 2009].

In den USA wurde ein Unternehmenskonzept entwickelt, welches unter dem Begriff des Agile Manufacturing die reaktionsschnelle Erfüllung jedes Kundenwunsches hervorhebt und das Unternehmen befähigt, unter den sich unvorhersehbar ändernden Kundenwünschen gewinnbringend im Wettbewerbsumfeld zu operieren [Goldman 1996]. Um die Zeitspanne zwischen Idee und gewinnbringenden Erlösen so kurz wie möglich zu halten, liegt der Schwerpunkt des Konzepts auf der Optimierung des Entwicklungsprozesses eines Produkts [Wiendahl et al. 2009]. Der Mensch wird dabei als produktive Ressource hervorgehoben, der den Erfolg des Unternehmens durch seine Kreativität und Intelligenz hervorbringt. Um diese Ressource zu motivieren, stehen eine flache Organisation und Unternehmenskulturen im Vordergrund, welche auf Vertrauensbasis zum Mitarbeiter setzen. Kooperation mit anderen Unternehmenseinheiten und Unternehmen ist zur Erzielung eines Kundenmehrwerts wesentliche Voraussetzung für einen Wettbewerbsvorteil [Goldman 1996]. Konkrete Gestaltungshinweise für Fabriken und deren Prozesse werden von den Autoren nicht gegeben [Wiendahl et al. 2009].

Die folgenden internationalen Ansätze entstammen den Ergebnissen des internationalen Forschungsprogramms „Intelligent Manufacturing Systems“ (IMS), welches heute vorwie-

gend als Rahmen für die Industrie und Wissenschaft zur Weiterentwicklung der Produktion der nächsten Generation dient [IMS 2011].

Der Ansatz der Bionic Manufacturing Systems (BMS) entstammt der japanischen Produktionsforschung von UEDA, der eine Analogie zwischen lebenden Organismen und technischen Systemen herstellt und Erkenntnisse aus der Biologie auf die Weiterentwicklung von Produktionssystemen überträgt, mit denen ein dynamisches und adaptives Verhalten gegenüber Umweltveränderungen angestrebt wird [Ueda et al. 1997]. Das Kernelement der BMS bildet das Modelon, welches sich durch Eigenschaften wie Evolution, Adaption, Selbstorganisation und Lernen auszeichnet, um nicht vorhersehbare Änderungen in der Komplexität des Unternehmensumfelds bewältigen zu können [Ueda et al. 1997; Ueda et al. 2000]. Die Modelons unterliegen einer hierarchischen Ordnung und enthalten zwei der Biologie entnommene Informationsarten, die genetische (DNA-Type) und die wissensbasierte (BN-Type) Information. Erforderliche Informationen über den Herstellprozess, die zu verwendenden Werkzeuge und Maschinen sind vom künstlichen Produkt oder Artefakt selbst zu tragen, wohingegen Gebrauchsinformationen des Produkts während des laufenden Betriebs entstehen, aus denen über die Lebensdauer gelernt wird. Über die beiden Informationsarten ist das künstliche Produkt fähig, auf Fehlfunktionen zu reagieren und seinen Aufbau für die nächste Generation zu optimieren [Ueda et al. 1997]. In Fallstudien wurde die Funktionsfähigkeit des Konzepts für linienlose Produktionssysteme in Simulationen nachgewiesen [Ueda et al. 2001] und auch für die Layoutplanung eingesetzt [Ueda et al. 2002]. Der Modellierungsansatz ist auch in Bezug auf die Echtzeitfähigkeit der Systeme vielversprechend, wurde jedoch noch nicht in die Praxis transferiert.

In Holonic Manufacturing Systems (HMS) werden die autonomen Struktureinheiten als Holons bezeichnen, ein von Arthur Koestler geprägtes Kunstwort [Wyns 1999; Wiendahl et al. 2009]. Holons sind gleichzeitig Ganzes und Teil eines Ganzen [Tharumarajah 2003]. Übertragen auf die Produktionssysteme sind Holons vergleichbar mit Fraktalen autonome Struktureinheiten, welche innerhalb einer als Holarchie bezeichneten Systemordnung miteinander kooperieren [Wiendahl et al. 2009]. Eine Übersicht und Abgrenzung von Fraktalen, BMS und HMS gibt [Tharumarajah 2003]. Die Holarchie ist eine Ordnung komplexer Systeme, die sowohl einfach strukturierte Beziehungen als auch gleichberechtigte Subsysteme beinhaltet [Peters et al. 2005]. Durch diese Ordnung werden die Grundregeln für die Kooperationen der Holons untereinander vorgegeben und dadurch die Grenzen ihrer Autonomie festgelegt [Giret et al. 2005; Wiendahl et al. 2009]. Die Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der HMS sind bislang konzeptioneller Art [Wiendahl et al. 2009].

Konkretere Ansätze im Bereich der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit liefern die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS), welche hauptsächlich in den USA vorangetrieben werden. Schwerpunkte liegen in der Weiterentwicklung rekonfigurierbarer Maschinen- und Anlagensysteme, deren Modularisierung und Rekonfiguration in Bezug auf die Bearbeitungs- und Montagemaschinen, die Werkzeuge, Werkstückträger und Messsysteme sowie die Steuerungssysteme. Mit RMS wird die schnelle Anpassung der Kapazitäten und Funktionalitäten an kurzfristige Änderungen der Anforderungen bei gleichzeitiger Erfüllung einer hohen Produktivität verfolgt [Koren 2010]. Auf der Maschinen- und Anlagenebene ist die Rekonfigurierbarkeit ein vielversprechender Ansatz, welche die Vorteile der Flexibilität mit denen der Produktivität zu verknüpfen versucht. Die Erfüllung dieser Leistungsziele ist auch für die Strukturen der Fabrik auf der Ebene der Vernetzung erstrebenswert und somit die Rekonfigurierbarkeit auf ganze Fabrikstrukturen zu übertragen.

Das Stuttgarter Unternehmensmodell ist ein ganzheitliches Produktionssystem mit einem Modellansatz grundlegender Art für die Steigerung der strukturellen Wandlungsfähigkeit in allen Skalen der Produktion eines Unternehmens der variantenreichen Serienfertigung. Hierzu wird das Unternehmen in teilautonomen Leistungseinheiten, den Geschäftsprozessen, abgebildet, welche dezentral strukturiert sind, um eine hohe Dynamik zu erreichen. Gleichzeitig sind sie in zentrale Ziel- und Führungssysteme eingebunden, um das erforderliche Maß an Robustheit gegenüber den Turbulenzen zu erfüllen. Die Struktur des Stuttgarter Unternehmensmodells bildet sich aus der vertikalen und horizontalen Vernetzung der Leistungseinheiten. Die vertikale Struktur ergibt sich aus den Systemebenen der Produktion, wie sie in Kapitel 2.2.2 beschrieben sind, und die horizontale Struktur entsteht aus den Prozessketten. Somit umfasst der Ansatz sowohl die räumlichen als auch die zeitlichen Skalen der Produktion. Die Leistungseinheiten führen teilautonom Transformationsprozesse zur Wertsteigerung in der Produktion durch und verfügen über die Merkmale Kooperation, Selbstorganisation, Selbstkontrolle, Selbstkonfiguration und technische Intelligenz. Das Stuttgarter Unternehmensmodell wurde im SFB 467 entwickelt, die Einsetzbarkeit der Methoden und Instrumente in einer digitalen Modellfabrik nachgewiesen sowie zur Weiterentwicklung in einer Lernfabrik für advanced Industrial Engineering umgesetzt [Westkämper et al. 2009].

Die beschriebenen Ansätze verfolgen alle das Ziel, mit Modellen, Methoden und Instrumenten der Dynamik eines turbulenter werdenden Umfelds über die eigentliche Flexibilität hinaus zu begegnen und unter diesen Rahmenbedingungen die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen sicherzustellen. Die Ansätze greifen auf verschiedenen Ebenen des Systems Produktion bzw. Unternehmen.

Die organisatorischen Ansätze der modularen und fraktalen Fabrik beziehen sich zwar auf ganze Fabriken oder Fabriksegmente, aber nicht auf deren Vernetzung. Das Agile Manufacturing bezieht zwar ganze Unternehmensnetzwerke in die Überlegungen ein und fordert die Kooperation dieser zur Erzielung eines Wettbewerbsvorteils, liefert jedoch keine Ansätze zur Gestaltung agiler Fabriken. Ein weiterer Schwachpunkt liegt darin, dass die Ansätze des Agile Manufacturing in den USA nicht konsequent umgesetzt wurden.

Die technischen Ansätze des Bionic und Holonic Manufacturing bilden einen vielversprechenden theoretischen Rahmen zur Bewältigung der Turbulenz, weisen jedoch zum derzeitigen Entwicklungsstand noch keine Anwendung in der Praxis nach. Die Ansätze der Reconfigurable Manufacturing Systems beziehen sich auf die Systemebene der Maschinen und Anlagen, nicht jedoch auf die Fabriken in der Vernetzung.

Das Stuttgarter Unternehmensmodell weist grundsätzlich die Fähigkeit auf, die Wandlungsfähigkeit auf allen Ebenen der Fabriken zu steigern, die spezifische Anwendung auf die Vernetzung der Fabriken erfolgte bislang nicht.

Auf Basis der vorgestellten Konzepte wird im Folgenden der Entwicklungsstand der Strukturierungsansätze für Fabriken dargestellt.

#### **2.4.2 Strukturierungsansätze für Fabriken**

Die Strukturierung der Fabriken umfasst die Anordnung und Zuweisung der Fabrikstrukturelemente untereinander und in Bezug auf ihre Relationen zueinander nach bestimmten Prinzipien. Die Strukturierung umfasst somit die Zusammenführung der Struktureinheiten zu Systemstrukturen, welche sich auf die Ebenen der Fabrikstruktur beziehen.

Strukturierungsprinzipien, wie sie in der Literatur zu finden sind, beziehen sich vorwiegend auf den System- und Segmentbereich der Fabriken. Auf Systemebene folgt die Organisation der Fertigung den Fertigungsprinzipien zur räumlichen Anordnung der Betriebsmittel. Zu unterscheiden sind bei den klassischen Formen das Werkbank-, Baustellen-, Verrichtungs- oder Werkstättenprinzip, das Insel- oder Gruppenprinzip und das Fließprinzip, nachzulesen in WIENDAHL [Wiendahl 2010].

Die Segmentierungsstrategie der Fabriken nach WILDEMANN lässt auf Segment- und Standortebene dezentrale Strukturen durch Fertigungssegmente zu. Die Organisation und Segmentierung der Fertigung erfolgt nach Produkt und Technologie und führt zu „Fabriken in der Fabrik“ [Wildemann 1994]. Grundsätzlich kann bei der Strukturierung der Fabriken zwei unterschiedlichen Prinzipien gefolgt werden, deren zentrale Ausrichtung nach Produkt- und Technologieorientierung zu unterscheiden ist. Über den Ansatz der segmentierten Fabrik folgt WILDEMANN produkt- und kundenorientierten Prinzipien, auf deren Basis er die Segmente aufbaut.

HENN und KÜHNLE fassen für die Strukturierung auf der Ebene eines Standorts im Wirtschaftsraum bis zur Ebene der Betriebsmittel- und Maschinenaufstellung acht Strukturierungsprinzipien zusammen [Henn et al. 1999], welche sich im Grundsatz wiederum einer Produkt- und Technologieorientierung unterordnen lassen:

- Produkt-/Prozessorientierung
  - Fertigungsformorientierung innerhalb einer produktorientierten Einheit zur Unterscheidung von Produktvarianten mit hoher (Renner), mittlerer (Läufer) und geringer Stückzahl (Sondervarianten, Exoten)
  - Materialflussorientierung für eine produktorientierte Gliederung
  - Produktstrukturorientierung, das heißt die Gliederung der Fertigung nach den Integrationsstufen des Produkts
- Technologie-/Ressourcenorientierung
  - Betriebsmittelorientierung
  - Personal-/Tätigkeitsorientierung nach erforderlichen Qualifikationskriterien und durchzuführenden Tätigkeiten
  - Werkstofforientierung
  - Kommunikationsorientierung bei der Einteilung der Bereiche, welche einen starken Informationsaustausch benötigen

SCHENK bezieht diese Prinzipien auf die Segmentebene eines Standorts und ergänzt sie um die Auslegung der infrastrukturellen Anbindung an das Gebäude [Schenk et al. 2004].

Die Prinzipien konzentrieren sich weitestgehend auf die Segment- und tiefer liegende Ebenen eines Standorts. Die Anwendung auf ganze Fabriken in der Vernetzung wird im Rahmen der strukturbildenden Ansätze nicht berücksichtigt. Vernetzung in diesem Kontext bezieht sich auf die anforderungsgerechte logistische Verbindung der Struktureinheiten, nach denen die Gestaltungselemente Material- und Informationsfluss auszurichten sind [Henn et al. 1999].

Im Zuge der Produkt- und Marktdifferenzierung hat sich eine enorme Komplexität der Produkte und Produktionsprozesse herausgebildet. Mit der gleichzeitigen Forderung massiver Kosteneinsparungen, wurde diesem Phänomenen mit einer Verteilung der Komplexität und Auslagerung von Kompetenzen an die Zulieferer begegnet. Die Konsequenz war eine Umstrukturierung der gesamten Wertschöpfungskette [Wiendahl 2010]. Die Konzentration der Unternehmen auf die Kernkompetenzen und Fertigungsendstufen, in denen kundenspezifische und marktdifferenzierende Systeme montiert werden, ging einher mit der konsequenten Fremdvergabe von Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und sogar Entwicklungspro-

zessen [Hernández 2003]. Die Bildung strategischer Zuliefernetzwerke, welche insbesondere in der Automobilindustrie zu finden sind, und deren Weiterentwicklung zu hierarchielosen Netzwerken autonomer Unternehmen hat zu einer drastischen Reduktion der Eigenfertigungstiefe geführt und die außerbetriebliche Logistik stark gefördert und gefordert. Die Konsequenz dieser Vernetzung sind hohe Aufwendungen in der Organisation und Ineffizienzen im Management der Schnittstellen [Westkämper et al. 2009]. Kostenreduzierungen der Produktion wurden einerseits durch Verlagerungsaktivitäten in Regionen niedriger Lohnkosten erreicht und andererseits durch Ansätze aus dem Lean-Gedanken, nachzulesen in [Womack et al. 1990; Ohno 1993; Liker 2006], sowie logistischen Optimierungen zur Beherrschung der Supply Chain [Westkämper 1999]. Das Supply Chain Management (SCM) hat sich als Wissenschaft der Netzwerkoptimierungen unter Einbeziehung der Zulieferer und dem interorganisationalen Management der logistischen Ketten herausgebildet. Diese Arbeit hat ihren Fokus auf dem internen Produktionsnetzwerk, die Zulieferer und das daraus entstandene Netzwerk werden nicht bzw. nur am Rande berücksichtigt. Unter diesem Gesichtspunkt sei in Bezug auf Supply Chain Optimierungen auf die einschlägige Literatur verwiesen [Kuhn et al. 2002; Busch et al. 2004; Hellingrath et al. 2008].

Die dargestellten Ansätze zur Strukturierung von Fabriken beziehen sich bis auf die logistischen Optimierungsverfahren, welche im Bereich des Supply Chain Managements entwickelt wurden, auf die Strukturbildung auf den Ebenen innerhalb und unterhalb eines Standorts. Der einschlägigen Literatur ist keine Arbeit zu entnehmen, die sich auf die Optimierung und Strukturanpassung ganzer Fabriken in der Vernetzung eines Produktionsnetzwerks bezieht, dessen Aspekte über die logistischen Gesichtspunkte hinausgehen.

### **2.4.3 Methoden zur Strukturplanung**

Die Planung einer Fabrikstruktur, wie sie in Kapitel 2.2.4 definiert wurde, ist ein komplexer Prozess, in dem viele Faktoren und ihre Abhängigkeiten zueinander zu berücksichtigen sind. Die Vernetzung der Einflussgrößen untereinander und in Bezug auf das Gesamtsystem der Fabriken führt zu Wirkungsketten, welche in ihrem Ausmaß und ihrer zeitlichen Wirkung für eine Strukturanpassung zu bewerten sind. Die Vernetzung und die zeitlichen Verläufe der Ereignisse erfordern eine Planung, welche systematisch unter Einbeziehung aller für die Struktur relevanten Faktoren zu erfolgen hat.

Die methodischen Planungsvorgehensweisen, welche aus der klassischen Fabrikplanung kommen, verstehen die Strukturplanung als Grob- oder Konzeptplanung innerhalb eines Fabrikplanungsobjektes, in der die grundlegende Anordnung der Gebäude, Flächen und Produktionsmittel innerhalb eines Werks definiert wird und deren Ausprägungen dimensioniert werden. Diese Grobanordnung wird dann als Eingangsgröße an die Detail- und Layout-

planung weitergegeben. Der Fokus liegt auf der Planung neuer Fabriken oder wesentlicher Umplanungen auf Standortebene und seinen Produktionsbereichen. Die detaillierten Ausführungen zur Planung von Fabriken in ihren einzelnen Schritten sind der einschlägigen Literatur zur Fabrikplanung zu entnehmen [Rockstroh 1977; Kettner et al. 1984; REFA 1985; Aggteleky 1987, Aggteleky 1990a, Aggteleky 1990b; Wiendahl 1996; Felix 1998; Schenk et al. 2004; Pawellek 2008; Grundig 2009; VDI 5200 Blatt 1]. Die Fabrikplanungsansätze haben in ihrer grundlegenden Vorgehensweise nicht an Gültigkeit verloren, liefern jedoch keinen Handlungsleitfaden zur systematischen Strukturanpassung von vernetzten Fabriken, welche durch die Wandlungstreiber des turbulenten Fabrikumfelds ausgelöst werden.

Der Thematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung hat sich intensiv HERNANDEZ angenommen, der in seiner Systematik der Wandlungsfähigkeit ein theoretisches Erklärungsmodell zur Definition, Klassifizierung und Planbarkeit der Größe Wandlungsfähigkeit schafft. Aus Wandlungsobjekten leitet er wandlungsfördernde Maßnahmen ab, welche er zu Wandlungsbefähigern zusammenfasst. Er konzentriert sich dabei vorwiegend auf die Architektur-, Gebäude- und Logistikgestaltung unter Berücksichtigung der Wandlungsbefähiger und wendet diese für eine Fabrikneuplanung an, in der er die Szenario-Technik als Methode der strategischen Unternehmensplanung auf die Fabrikplanung überträgt. Aus der Analogieargumentation zum Qualitätsbegriff schafft er einen Bezugsrahmen zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit [Hernández 2003]. Mit Bewertungsverfahren der Wandlungsfähigkeit setzen sich folgende Arbeiten auseinander: DOHMS erarbeitet einen Controllingansatz zur Bewertung dezentraler Produktionsstrukturen [Dohms 2001], SESTERHENN konzentriert sich auf die monetäre Lebenszyklusbewertung eines Produktionssystems am Beispiel des Karosseriebaus [Sesterhenn 2003], HEGER leistet einen Beitrag zur monetären Bewertung von Wandlungsobjekten bei einer Fabrikneuplanung [Heger 2007] und MÖLLER liefert einen Bewertungsansatz zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von wandlungsfähigen Produktionssystemen [Möller 2008]. Kriterien zur Bewertung von Strukturvarianten werden in [Schulze et al. 2011] festgelegt, diese sind jedoch allgemeingültig gehalten und in Bezug auf die Wandlungsfähigkeit nicht konkreter spezifiziert. Die Bewertungsmethoden beziehen sich uneingeschränkt auf Wandlungsobjekte innerhalb des Produktionsbereichs eines Standorts, Segments oder Produktionssystems und haben einmaligen Planungscharakter.

Dem einmaligen Planungscharakter tritt HARMS entgegen, indem er aus der Agententheorie kommend ein Modell zur zyklischen Fabrikstrukturplanung entwickelt, indem die Ressourcenagenten Betriebsmittel oder Mitarbeiter repräsentieren, die über einen Koordinationsagenten koordiniert werden. Die Koordination erfolgt über Abstimmung. Das Planungsvorgehen teilt er in drei Planungsphasen ein: das Strukturmonitoring, die Strukturplanung und die



Ausplanung. Für das Strukturmonitoring definiert er zwei Strukturkennzahlen, die Transportweglänge und die Kommunikationsweglänge, die er zu einer Kennzahl der Strukturweglänge zusammenfasst. Die Strukturkennzahlen dienen der Überwachung der Struktur und lösen bei bestimmten Abweichungen eine Strukturplanung aus. Aus den strukturelevanten Ist-Daten, die aus den Betriebsdatenerfassungssystemen ausgelesen werden, werden über eine Clusteranalyse und Ähnlichkeitskennzahl Lösungsvorschläge erarbeitet, welche Produkte zu Betriebsmitteln zuordnen. Diese werden über die beiden Strukturkennzahlen bewertet und die beste Variante an die Ausplanung weitergegeben, die nicht mehr Bestandteil seiner Ausführungen ist. Die Unterstützung der Planung erfolgt mit einem prototypischen Datenverarbeitungswerkzeug [Harms 2004]. HARMS erkennt die Notwendigkeit einer zyklischen Planung, reduziert deren Auslösung jedoch auf zwei Kennzahlen zur Bewertung der Strukturgröße, welche auf dem Material- und Kommunikationsfluss beruhen. Insbesondere der Kommunikationsfluss wird nur qualitativ berücksichtigt. Die Planung soll zwar für eine Fabrikstrukturplanung angewendet werden, bezieht sich jedoch in der Ausarbeitung auf die Ebene der Arbeitssysteme und Betriebsmittel. Alternative Strukturösungen werden nicht aufgezeigt. Auch werden die strukturelevanten Daten in den Ausführungen nicht präzisiert. Weitergehende Betrachtungen in Bezug auf Technologien und Kapazitäten bleiben aus.

BERGHOLZ entwickelt eine Theorie der objektorientierten Fabrikplanung, indem er eine Analogie zwischen dem Software Engineering und der Fabrikplanung auf der Ebene der Standorte und darunter herstellt [Bergholz 2006]. Das Vorgehen umfasst die Modellierung von Fabrikobjekten, die Schaffung von Referenzarchitekturen und ein Vorgehensmodell für Fabrikplanungskonzepte. Der Ansatz versucht, die innere Komplexität der Fabrikelemente zu kapseln und die Schnittstellen nach außen zu reduzieren, um die Planung in Teilprojekte zerlegen zu können [Schuh et al. 2007a, Schuh et al. 2007b]. Der Ansatz ist bislang als konzeptionell theoretisches Rahmenwerk einzustufen, das sich für die Anwendung in der Praxis noch bewähren muss.

In keiner der Arbeiten erfolgt eine Übertragung auf vernetzte Fabriken, daher sollen im Folgenden Ansätze aus der Gestaltung von Wertschöpfungsnetzwerken aufgezeigt und hinsichtlich ihres Beitrags zur Strukturierung eines Produktionsnetzwerks analysiert werden.

Die Berücksichtigung eines Wertschöpfungsnetzwerks in der Fabrikplanung erfolgt bei STEPPING, der ein Projektmanagementwerkzeug entwickelt, um den Prozess der Fabrikplanung in die Entwicklungen des Wertschöpfungsnetzwerks einzubinden und dadurch die Bestandteile der ganzheitlichen Produktionssysteme innerhalb eines Unternehmens von Anbeginn an in neue Fabriken einzubringen [Stepping 2007]. Eine detaillierte Übersicht über Arbeiten der

strategischen Netzwerkplanung gibt FRIESE, der selbst ein Optimierungsmodell auf Basis der stochastisch dynamischen Programmierung für Flexibilitäts- und Kapazitätsstrategien für Produktionsnetzwerke der Automobilindustrie entwickelt hat. In diesem Modell werden die Kombinationen von Produkt- und Volumenflexibilität des Produktionsnetzwerks monetär bewertet und entsprechend einer kostenoptimalen Zielfunktion mit einem mathematischen Algorithmus optimiert [Friese 2008]. Ansätze zur Strukturierung des Produktionsnetzwerks erfolgen nicht. ABELE und LIEBECK entwickeln eine Systematik zur strategischen Standortwahl und Fällung von Make-or-Buy Entscheidungen unter kostenoptimalen Gesichtspunkten [Abele et al. 2007; Abele et al. 2008; Liebeck 2009]. Im Verbundprojekt „Planung und Optimierung wandlungsfähiger globaler Wertschöpfungsnetzwerke (POWER.net)“ wird seit September 2010 an Ansätzen zur Konfiguration von Wertschöpfungsnetzwerken unter dem Gesichtspunkt der Wandlungsfähigkeit gearbeitet [Lanza et al. 2011b]. Bislang wurde ein Leitfaden zur Analyse bestehender Netzwerke veröffentlicht [Lanza et al. 2011a], in dem die zu analysierenden Daten jedoch nur in grobem Rahmen beschrieben, aber nicht konkret spezifiziert sind.

Die überwiegende Anzahl der Arbeiten konzentriert sich unter dem Begriff der strategischen Netzwerkgestaltung auf die monetäre Bewertung von Outsourcing-Strategien sowie die kostenoptimale Verlagerung von Produktionsaktivitäten und den Aufbau neuer Standorte unter kostenspezifischen Gesichtspunkten. Vor dem Hintergrund, dass diese Aspekte nicht Schwerpunkt dieser Arbeit sind und keine Ansätze zur technologischen und kapazitiven Strukturierung des Produktionsnetzwerks enthalten sind, soll es bei dieser kurzen Zusammenfassung der einschlägigen Literatur bleiben.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass den aufgezeigten Arbeiten keine Systematik zur Strukturadaption ganzer Fabriken, vor allem nicht in Bezug auf deren Vernetzung zu entnehmen ist.

## **2.5 Defizit der Planung und Strukturierung von vernetzten Fabriken**

Aus der Begutachtung der wandlungsbefähigenden Ansätze, deren Strukturierungsprinzipien und der methodischen Vorgehensweisen zur Strukturplanung soll nun ein abschließendes Fazit gezogen werden, aus dem der Handlungsbedarf der vorliegenden Arbeit abgeleitet wird.

Die Wandlungsbefähiger beziehen sich in den untersuchten Arbeiten vorwiegend auf die Betriebsmittel, Gebäude und logistische Auslegung der Fabriken. Die forschungsseitigen Ansätze zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit von Fabriken wie das HMS und BMS sind bislang theoretischer Natur und zielen auf eine Optimierung der Wandlungsfähigkeit auf Arbeitssystem- und Prozessebene ab. Die Rekonfigurierbarkeit betrifft die Maschinen- und An-

lagenebene. Die organisatorischen Ansätze werden zwar auf Fabrikebene angesetzt, wurden jedoch nicht auf ganze Fabrikstrukturen und das Netzwerk der Produktion übertragen. Folglich konzentrieren sich die Prinzipien zur Strukturbildung ebenfalls auf die Segment- und tiefer liegende Ebenen eines Standorts. Die Applikation auf ganze Fabriken in der Vernetzung wird im Rahmen der strukturbildenden Kriterien nicht berücksichtigt. Über die Standortgrenzen hinweg konzentrieren sich die Optimierungen auf die logistische Beherrschung der Zulieferkette, aber nicht darüber hinaus.

Die methodischen Ansätze zur Fabrikplanung haben in Bezug auf Neu- und Umplanungen nicht an Aktualität und Gültigkeit verloren, haben jedoch alle einmaligen Planungscharakter und beziehen sich nicht auf die permanent erforderliche und systematische Strukturanpassung von vernetzten Fabriken. Die Arbeit der zyklischen Fabrikplanung nach HARMS hebt zwar den Mangel des geschlossenen Projektcharakters auf, bezieht sich aber auch nicht auf vernetzte Fabriken. Die Arbeiten aus der strategischen Netzwerkgestaltung haben einen anderen Fokus und sind daher für die Problemstellung dieser Arbeit nicht von Relevanz.

In keiner der aufgeführten Arbeiten ist ein methodischer Ansatz zu finden, welcher auf die systematische und kontinuierliche Adaption ganzer Fabrikstrukturen mit ihren relevanten Elementen und Relationen in der Vernetzung angewendet werden kann. Die strukturelle Wandlungsfähigkeit ganzer Produktionsnetze gewinnt jedoch vor dem Hintergrund der durch die Wandlungstreiber hervorgerufenen Turbulenz zunehmend an Bedeutung. Aufgrund der starken Vernetzung und Änderung der Einflussfaktoren und Wirkungslinien sowie der daraus resultierenden Komplexität des Planungsprozesses ist eine systematische Vorgehensweise zwingend erforderlich.

Im nächsten Kapitel werden deshalb die Grundlagen für eine Planungsmethodik zur systematischen Strukturadaption einer vernetzten Produktion zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit in den Fabrikstrukturen geschaffen und daraus die Anforderungen an die zu entwickelnde Planungsmethode abgeleitet.

Der Betrachtungsgegenstand umfasst produktseitig das gesamte Produktportfolio und ressourcenseitig dieser Ebene korrespondierend das zum Unternehmen gehörende Produktionsnetzwerk. Die Zulieferer werden nicht berücksichtigt. Die Methode bezieht sich auf die technologischen und kapazitiven Strukturen der Standorte und bezieht sowohl die der Produktion vorgelagerten indirekten Funktionen als auch die direkten und fertigungsbezogenen indirekten Bereiche in die Betrachtung ein. Die Abgrenzung der Arbeit erfolgt somit in den drei Dimensionen der Produktpalette, der Standorte der Eigenfertigung sowie der gesamten Prozesskette der Produktentstehung.

### 3 Grundlagen zur Planung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen

In diesem Abschnitt sollen die Grundlagen geschaffen werden, welche zur Entwicklung der Planungsmethodik vor dem Hintergrund der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren erforderlich sind. Abschließend sind daraus die Anforderungen an die Systematik abzuleiten.

#### 3.1 Charakterisierung der existierenden Fabrikstrukturen

Jede Planung beruht auf Daten aus der Vergangenheit und Erwartungswerten für die Zukunft [Junghanns 1971]. So haben auch Fabriken eine Vergangenheit, in der Erfahrungswerte entstanden sind, welche als Ausgangssituation und Basis zur Prognose in die Zukunft für eine Planung heranzuziehen sind. Aus diesem Grund sind im Folgenden die bestehenden Fabrikstrukturen aus den Sichten der Produkt- und Produktionsstrukturen sowie ihrer Vernetzung für die anstehende Strukturplanung zu charakterisieren und dann mit den relevanten Informationen in einem Modell als abstraktes Abbild der Wirklichkeit abzubilden.

##### 3.1.1 Charakterisierung der Produktstruktur

Die Charakterisierung der Produktstruktur erfolgt über die Zerlegung des Gesamtsystems der Produkte in Systeme und Teilsysteme wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, deren Bausteine Anforderungen an deren Entwicklung, Planung, Fertigung und Integration bzw. Montage stellen (Abbildung 3.1).

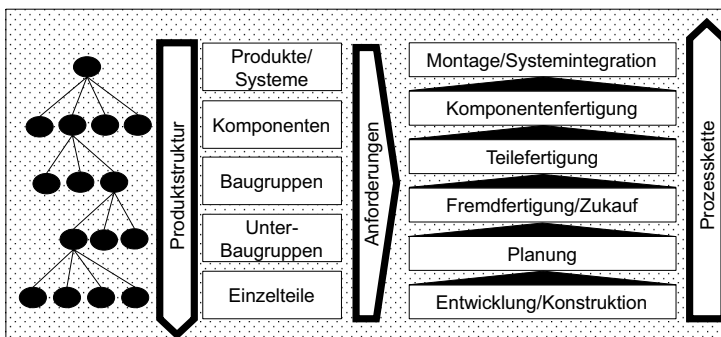


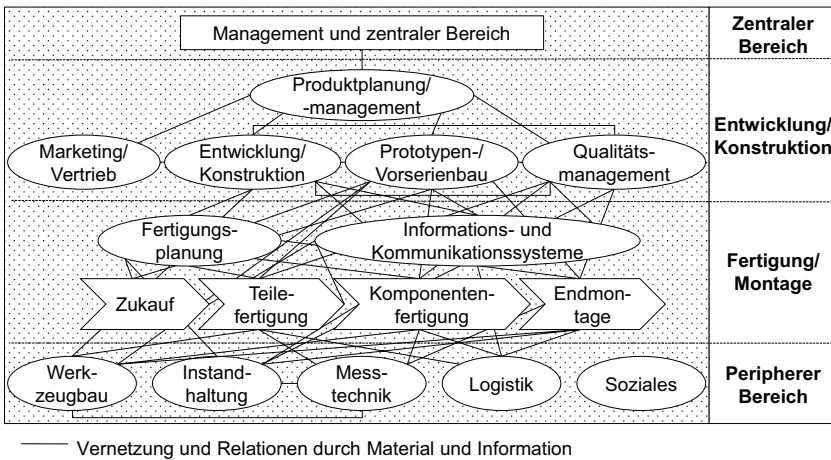
Abbildung 3.1: Charakterisierung der Produktstruktur entlang der Prozesskette

Die Produktstruktur des Produktprogramms ist in seiner Varianz mit dem Produktionsprogramm die Ausgangsbasis für die Planung der Fabriken, ihrer Strukturen und ihrer Produktionskonzepte. Dies hat vor dem Hintergrund kurzer „Time to Market“ Zeiten und der Forderung nach einer schnellen Reaktion auf Änderungen, welche auf allen Ebenen der Produkt-

strukturen vollzogen werden, unter Einbeziehung der der Produktion vorgelagerten Prozesse zu erfolgen. Aus diesem Grund ist die Produktstruktur in ihren Ebenen entlang der gesamten Prozesskette von der Entwicklung und Planung über die Fremd- und Eigenfertigung hin zu beschreiben. Durch die Aggregation der Anforderungen auf den Systemebenen der Produkte ergibt sich ein Gesamtabbild an technologischen und kapazitiven Forderungen an die funktionalen und technologischen Segmente der Prozesskette.

**3.1.2 Charakterisierung der Produktionsstruktur**

Die Charakterisierung der Produktionsstruktur erfolgt für alle Standorte des Produktionsnetzwerks anhand der zur Verfügung stehenden Ressourcen innerhalb der funktionalen Segmente eines Standorts. Ein hierarchisches Grundmodell, welches die direkten und indirekten Funktionen einer Standortstruktur darstellt, zeigt Abbildung 3.2.



**Abbildung 3.2: Funktionale Charakterisierung der Produktionsstruktur am Beispiel eines Standorts**

Die Grundstruktur eines Standorts besteht aus einem zentralen Bereich, der das Management und die Administration des Standorts verantwortet. Im Bereich der Entwicklung und Konstruktion sind die Funktionen der Produktplanung und des Produktmanagements anzusiedeln, welche in enger Kooperation mit dem Marketing und Vertrieb stehen, um die Kundenbedürfnisse und Marktentwicklungen zeitnah an die Entwicklung und Konstruktion weiterzugeben. Auf dieser Ebene ist auch das Qualitätsmanagement zu finden, welches aus der Konstruktion die Qualitätsmaße und Toleranzen erhält und für die Einhaltung und Verbesserung der Vorgaben innerhalb des Standorts zu sorgen hat. In der Regel ist das Qualitätsma-

nagement direkt der zentralen Administration unterstellt. Der Prototypenbau und die Vorseierfertigung stehen in enger Verbindung mit der Entwicklung und dem Bereich der Fertigung und Montage.

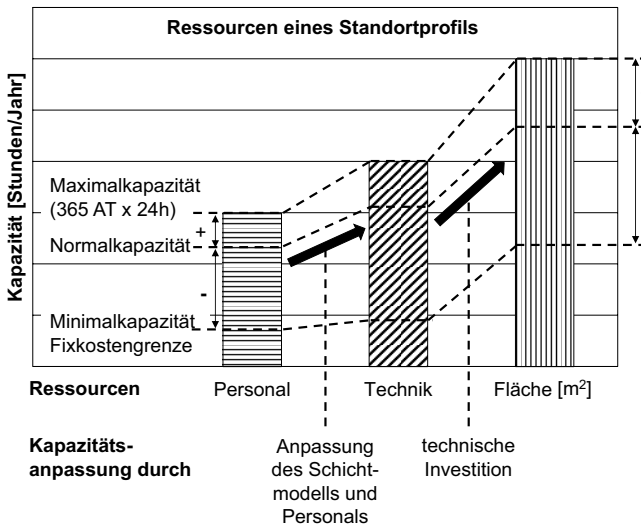
Die Fertigung und Montage umfasst die Funktionen der Fertigungsplanung sowie die Informations- und Kommunikationssysteme zur Steuerung der Produktion. In diesem Bereich findet nach dem Wareneingang durch die Zukaufteile die direkte Wertschöpfung der Teile- und Komponentenfertigung sowie der Montage statt.

Der direkte Bereich der Produktion wird unterstützt durch den peripheren Bereich mit den Funktionen des Werkzeug- und Vorrichtungsbau, der Instandhaltung, der Messtechnik, die eng mit dem Qualitätsmanagement verbunden ist, der Logistik, welche für die interne und die externe Belieferung der Produktionsbereiche zuständig ist, und eines Sozialbereichs für die Mitarbeiter des Standorts.

Die funktionalen Segmente stehen in Abhängigkeiten zueinander und sind untereinander durch Material- und Informationsflüsse, aber auch durch weitere Relationen wie technologische, kapazitive oder räumliche Wirkungszusammenhänge und Prozesse miteinander vernetzt. Die beschriebenen Funktionen bilden zusammen mit der Vernetzung die Produktionsstruktur der Standorte ab.

Den Standortprofilen stehen begrenzte Ressourcen für die Herstellung der Produkte zur Verfügung, welche den funktionalen Segmenten zugeordnet sind. Folglich unterliegen die Standortprofile bestimmten Restriktionen, welche ihre Veränderungsfähigkeit einschränken und begrenzen. Die grundsätzlichen Ressourcen eines Standorts sind das Personal und die Mitarbeiter, dann die Technik mit den technischen Einrichtungen, Betriebsmitteln und Systemen sowie die Fläche (Abbildung 3.3). Diese Ressourcen sind für das zu produzierende Produktionsprogramm mit einer Normalkapazität in Stunden pro Jahr ausgelegt. Die zur Verfügung stehende Normalkapazität eines Mitarbeiters wird durchschnittlich mit etwa 1500 Stunden pro Jahr kalkuliert, abhängig von den standortspezifischen Richtlinien. Nach oben ist die Kapazität durch die Maximalkapazität begrenzt, welche sich im Extremfall aus 365 Arbeitstagen mit jeweils 24 Stunden Betriebslaufzeit errechnet. In der Praxis ist diese Maximalkapazität aufgrund der gültigen Tarifverträge und Betriebsvereinbarungen in der Regel nicht auszuschöpfen und aus diesem Grund entsprechend der Vereinbarungen geringer anzusetzen. Nach unten hin ist die Minimalkapazität im Prinzip bis auf null herunterzufahren, aufgrund der durch die Anlagen und das Personal bedingten Fixkosten des Betriebs jedoch auf der Fixkostengrenze anzusetzen. Die Maximal- und die Minimalkapazität bei Normalbelegung grenzt den Flexibilitätskorridor ab, in dem, wie in Kapitel 2.1 definiert, kurzfristig ohne größere Anpassungen unter geringem Aufwand die Kapazitäten variiert werden können. Reicht dieser Flexibilitätskorridor für die Bewältigung des Produktionsprogramms nicht mehr

aus, so ist der erste Stellhebel die Anpassung des Schichtmodells und somit der Personalkapazitäten auf ein höheres oder auch bei schlechter Konjunktur niedrigeres Niveau. Die zweite Grenze ergibt sich aus den technischen Kapazitätsrestriktionen, welche bei voller Maschinenlaufzeit im Dreischichtbetrieb einer sieben Tage Woche erreicht ist. Abzuziehen sind von dieser oberen Grenze die für die Wartung und Instandhaltung erforderlichen Maschinenstillstandszeiten, welche dann die Maximalgrenze bestimmen. Diese Restriktionen finden sich beispielsweise aufgrund von notwendigen Reinigungsarbeiten in der Lackiererei, welche durchaus eine Schicht pro Woche in Anspruch nehmen können. Ist diese Maximalkapazität mit den bestehenden technischen Ausrüstungen erreicht, so ist die Kapazitätserweiterung ausschließlich über technische Investitionen zu erreichen, welche entweder die Bearbeitungszeiten reduzieren und somit den Durchsatz erhöhen oder durch zusätzliche Anlagen mehr Kapazität zur Verfügung stellen. Schöpfen die technischen Investitionen, welche innerhalb eines Standorts mehr Kapazitäten zur Verfügung stellen, die Fläche in [m<sup>2</sup>] innerhalb eines Standorts aus, so ist die kapazitive Atmungsfähigkeit eines Standortprofils erreicht. Folglich sind dann Kapazitätsanpassungen der im Produktionsnetzwerk befindlichen Standorte in Betracht zu ziehen oder es ist in neue Standorte zu investieren.

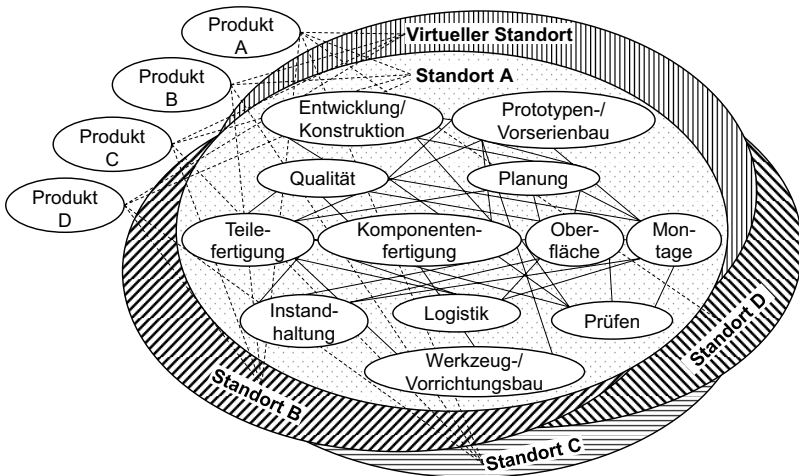


**Abbildung 3.3: Ressourcen eines Standortprofils**

Die Produktionsstruktur des Netzwerks ergibt sich somit aus der Summe der Standortprofile, welche durch ihre funktionalen Segmente, Ressourcen und Kapazitäten sowie den standort-spezifischen Restriktionen beschrieben sind.

### 3.1.3 Charakterisierung der Vernetzung von Produkt- und Produktionsstruktur

Die Zusammenführung der Produkt- und Produktionsstruktur im Kontext der Zuordnung von Produkten und Fertigungskompetenzen zu Standorten ergibt die Fabrikstruktur, wie sie in Kapitel 2.2.4 abgegrenzt und definiert ist. Abbildung 3.4 zeigt die Zuweisung der Produkte zu den Standorten und ihren Profilen. Die Standortprofile definieren die Entwicklungs-, Planungs- und Fertigungskompetenzen für eine bestimmte Auswahl von Produkten und stellen diesen ihre Ressourcen und Kapazitäten zur Verfügung. Die technologischen Fertigkeiten und Fertigungskompetenzen sowie ihre qualitativen und quantitativen Restriktionen bestimmen die Kompatibilität der Standorte für die Zuweisung und Fertigung ausgewählter Produkte und Produktsegmente. Die Kompatibilität der Standorte spiegelt ihre technische und personelle Flexibilität sowie ihren Wandlungs- und Anpassungsspielraum wider.



**Abbildung 3.4: Vernetzung von Produkt und Produktion zur Fabrikstruktur**

Grundsätzlich können die Produkte in ihrer Struktur den Standorten der Eigenfertigung zugewiesen werden oder aber es können Bestandteile an einem virtuellen Standort produziert werden. Der virtuelle Standort bildet die Kapazitäten der Zulieferer in einem Fertigungs- und Kompetenzknoten ab, dem der Fremdfertigungsanteil der Produkte zugewiesen und in diesem zusammengefasst wird. Diese Art der Modellierung bietet die Möglichkeit, den Eigen- und Fremdfertigungsanteil partiell oder gesamt im Modell zu verändern.

Vernetzungen in ihren vielfältigen Ausprägungen ergeben sich innerhalb der Produktstruktur, innerhalb der Produktionsstruktur und aus der Zusammenführung und Zuordnung der beiden Struktursichten. Deshalb wird in diesem Zusammenhang auf deren Charakteristik kurz ein-



gegangen. Die Vernetzung innerhalb der Produkte ergibt sich über Gleichteile, Module, Baukasten- und Plattformzugehörigkeiten, welche zu Abhängigkeiten innerhalb des Produktprogramms führen und sich aufgrund der organisationalen Verantwortlichkeiten auf die Produktionsstruktur auswirken. Auf Seiten der Fabriken ergeben sich organisatorische, räumliche, technologische und kapazitive Relationen, welche sich in den Produktionsstrukturen wiederfinden und dort abgebildet sind. Aus der Zusammenführung der Produkt- und Produktionsstrukturen werden die Vernetzung und ihre strategische Konfiguration zu einem wettbewerbsrelevanten Faktor. Aus der Zuordnung von Produkten oder Produktkomponenten zu Standorten ergeben sich interne und externe Kunden-Lieferantenbeziehungen zwischen den Standorten der Eigen- und Fremdfertigung sowie den technologischen und funktionalen Segmenten der direkten, indirekten und peripheren Bereiche eines Standortprofils. Die Standorte der Fremdfertigung sind in einer virtuellen Fabrik abgebildet.

Eine abstrahierte Fabrikstruktur, bestehend aus der Produktstruktur, der Produktionsstruktur, welche die Standorte der Eigenfertigung sowie eine virtuelle Fabrik für die Zukaufteile und -komponenten umfasst, der Prozesskette und der Zuweisung der Produktstruktur zu den Standorten, ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

Produktionsnetzwerk		Standort A					Standort B					Standort C					Standort D					Virtuelle Fabrik	
Prozesskette		E	P	T	K	M	E	P	T	K	M	E	P	T	K	M	E	P	T	K	M	Zukauf	
Produktstruktur	Segmente	●	●	●	●	●																	
	Gesamtsystem	●	●			●	●	●			●	●	●	●			●					●	●
	Komponenten														●					●		●	
	Baugruppen				●					●													●
	Unterbaugruppen									●													●
	Teile		●												●								●

E Entwicklung/Konstruktion, P Planung, TF Teilefertigung, KF Komponentenfertigung, M Montage/Systemintegration

**Abbildung 3.5: Abstrahierte Fabrikstruktur**

Die Elemente der Systemebenen der Produktstruktur werden entlang der Prozesskette, welche die Funktionen der Entwicklung und Konstruktion, Planung, Teilefertigung, Komponentenfertigung, Montage und Systemintegration umfassen, den zur Verfügung stehenden Standorten zugewiesen. Diese horizontale Vernetzung durch die Prozessketten, welche von allen Produkten durchlaufen werden, und die Definition der Prozessschnittstellen bei der Zuordnung der Produktstruktur zur Produktionsstruktur sind von strategischer Relevanz bei der

Strukturierung der Fabriken. Schnittstellen in den Prozessketten sind aus technologischer Sicht grundsätzlich nur dann sinnvoll, wenn durch sie die qualitativen Vorgaben für die Produkte erfüllt und garantiert werden können. Aus diesem Grund dürfen die Prozessketten ausschließlich nach folgenden Kriterien geschnitten werden:

- Vergabeschnitte erfolgen ausschließlich bei einem definierten konstruktiven Fertigungszustand.
- Das Schneiden der Prozesskette ist damit nur an definiert prüfbaren Zuständen zu vollziehen. Diese sind den technischen Zeichnungen zu entnehmen, in denen die Toleranzangaben festgelegt sind, für die eine Qualitätsprüfung durchführbar ist.
- In allen anderen Fällen ist die Prozesskette geschlossen zusammenzuhalten.

Diesem Grundprinzip haben alle Vergabeschnitte zu folgen, welche im Rahmen einer Fabrikstrukturierung gesetzt werden. Die Basis der Strukturanpassung bildet das Modell der existierenden Fabrikstruktur, welches in diesem Kapitel in seinen Grundzügen beschrieben ist.

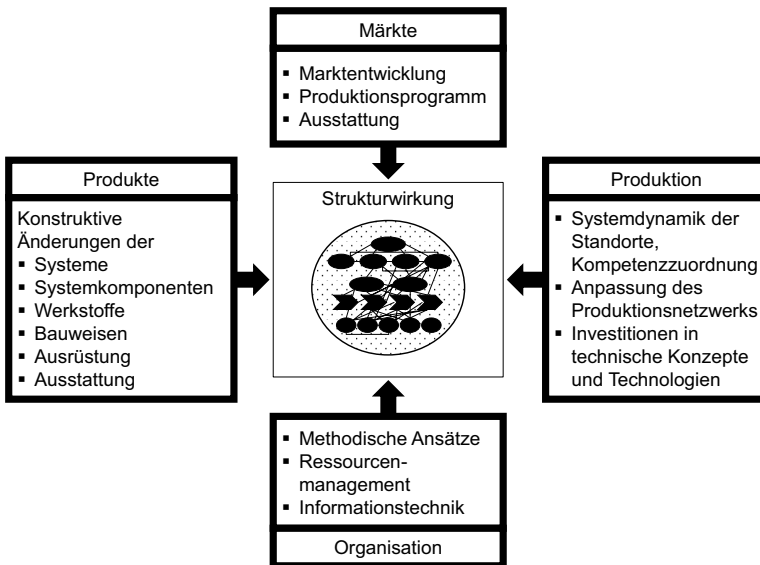
### **3.2 Klassifizierung und Priorisierung der Wandlungstreiber**

Die Wandlungstreiber sind gemäß Kapitel 2.4.1.1 in markt-, produkt-, und produktionsgetriebene Veränderungen einzuteilen, wobei die Produktion einen technologischen und einen organisatorischen Aspekt aufweist, welcher in Abbildung 3.6 explizit herausgestellt ist.

Im Bereich der Marktentwicklungen sind die für die Fabrikstrukturen relevanten Veränderungsfaktoren die Mengengerüste des Produktionsprogramms aus der Breite und Varianz des Produktprogramms sowie die in der variantenreichen Serienfertigung durch den Kunden konfigurierbaren Ausstattungsvarianten. Laut einer Studie zum Thema Wandlungsfähigkeit treten die externen Wandlungsimpulse zum einen häufiger auf und sind zum anderen in ihrer Turbulenzwirkung als weitaus stärker einzustufen, als die internen Faktoren [Kirchner et al. 2003]. Hinzu kommt, dass diese Faktoren von den Unternehmen, abgesehen von der gezielten Kundenbeeinflussung durch Marketing- und Absatzkampagnen, nicht zu steuern und schwer vorhersagbar sind. Aus diesen Gründen haben marktgetriebene Veränderungsfaktoren höchste Priorität in der Planung und im Anstoß von Strukturanpassungen.

Der zweite Wandlungstreiber ist den Produkten zuzuschreiben, welche durch konstruktive Veränderungen auf allen Strukturebenen weiterentwickelt und verbessert werden. Hierbei sind der Änderungsgrad und die damit verbundene Wirtiefe auf die Struktur zu berücksichtigen. Die von der Änderung betroffenen Systemebenen der Produkte geben darauf ein Indiz. Die Änderungen können ganze Systeme betreffen wie die Einführung eines neuen Produkts mit einem Änderungsgrad von 100 % oder sie können sich auf Systemkomponenten wie bei-

spielsweise die Antriebssysteme beziehen. Werkstoffveränderungen sind oft verbunden mit einer Änderung der konstruktiven Bauweisen der Systeme und erfordern in der Regel eine Anpassung der Fertigungstechnologien. Auf Komponenten- und Baugruppenebene beziehen sich Änderungen auf die Ausrüstung, die in der Regel sicherheitsrelevant ist, zum Beispiel Bremssysteme und Motorsteuerungen oder auch auf kundenindividuelle Ausstattungskomponenten. Die steigende Varianten- und Teileanzahl ist ein langfristiger Trend der durch das Customizing getriebenen Konstruktion in die Breite.



**Abbildung 3.6: Klassifizierung der Wandlungstreiber**

Dem Hauptwandlungstreiber Produktion ist als dritter Wandlungstreiber die Systemdynamik der Standorte zuzuschreiben, welche durch die Zuordnung von Produkt- und Fertigungskompetenzen zu den Standorten des Produktionsnetzwerks und zu dem virtuellen Standort der Zulieferer getrieben ist. In diesem Zusammenhang ist auch die Anpassung des Produktionsnetzes durch den Aufbau oder die Schließung von Standorten zu nennen. Der vierte Treiber, welcher in starker Abhängigkeit zu den Konstruktionsänderungen der Produkte steht, sind Investitionen in technische Konzepte und Technologien. Konzeptioneller Art sind auch die Veränderungen in der Organisation in Bezug auf methodische Ansätze wie den kontinuierlichen Verbesserungen der Produktion, eine Veränderung der Aufgabenteilung zwischen direkten und indirekten Bereichen, neue Arbeitszeitmodelle, eine Veränderung des Ressourcenmanagements wie die Steuerung des Personals, der Maschinen und Anlagen

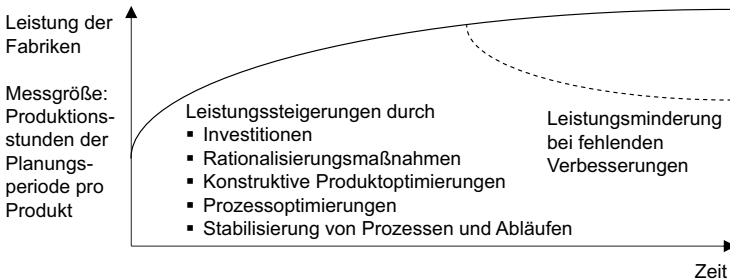
sowie eine Veränderung der betrieblichen Informations- und Kommunikationssysteme, wie beispielsweise die Engineeringssysteme und digitalen Planungswerkzeuge.

Alle dieser Wandlungstreiber lösen Strukturveränderungen der Fabriken aus, welche je nach Änderungsgrad von unterschiedlicher Wirkungstiefe sind. HARMS führt hierzu vier Veränderungstypen ein, um die Wirktiefe zu beschreiben. Die Elementveränderung ist von geringster Wirktiefe, weil sie nur das Innere einzelner Fabrikelemente betrifft und nach außen hin keine Wirkung hat. Die Strukturkopplung verändert die Beziehungen zwischen den Elementen und Systemen, die Transformation verändert Beziehungen und die Elemente, und die Verlagerung behält Elemente und Beziehungen untereinander bei, verändert aber die Umfeldbeziehungen [Harms 2004]. HARMS ordnet die Veränderungstypen den verschiedenen Ebenen der Fabriken zu, was für die vorliegende Arbeit allerdings als nicht zweckmäßig erscheint. Im Prinzip können diese Veränderungstypen auf allen Ebenen der Produktionsstruktur auftreten und in ihrer Ausprägung die Elemente, die Beziehungen und die gesamte Struktur betreffen.

Zu unterteilen sind die Wandlungstreiber und ihre Strukturwirkung grundsätzlich in kontinuierliche und diskontinuierliche Veränderungen. Diese sind hinsichtlich ihres zeitlichen Auftretens und dem damit verbundenen zeitlichen Wirkungsrahmen bei einer Strukturadaptation zu berücksichtigen.

### 3.2.1 Kontinuierliche Veränderungen

Fabriken ändern sich über die Zeit kontinuierlich in ihrer Leistung. Leistungsveränderungen sind auf permanente Maßnahmen zurückzuführen. Deren Verlauf ist in Abbildung 3.7 veranschaulicht.



**Abbildung 3.7: Kontinuierliche Leistungsveränderungen der Fabriken**

Die Leistungsveränderungen der Fabriken haben Wechselwirkungen auf die Fabrikstrukturen und sind in ihrer zeitlichen Dimension bei einer Strukturadaptation zu berücksichtigen. Die

Messgröße zur Bewertung und Vergleichbarkeit der Leistung einer Fabrik sind die über eine repräsentative Planungsperiode erfassten Produktionsstunden pro Produkt. Diese geben in ihrem Zeitbezug ein belastbares Abbild des Leistungsvermögens der Fabriken.

Leistungssteigerungen kontinuierlicher Art sind auf Verbesserungsmaßnahmen im Rahmen kontinuierlicher Verbesserungsprozesse zurückzuführen, in welchen Ersatzinvestitionen und Rationalisierungsmaßnahmen der Anlagen, der Abläufe und Prozesse durchgeführt werden. Zu den Verbesserungen permanenter Art zählen zudem konstruktive Optimierungen und der Fortschritt der Produkte, der Prozesse und aller Maßnahmen, welche zu einer Stabilisierung der Abläufe und Arbeitsvorgänge beitragen. Ein Ausbleiben dieses Strebens nach permanenter Verbesserung und Leistungssteigerung hat nicht nur einen Stillstand auf dem erreichten Leistungsniveau zur Folge, sondern führt aufgrund des sich weiter entwickelnden Umfelds der Produktion zu einer Leistungsminderung der Fabriken insgesamt. Die hier qualitativ beschriebenen Maßnahmen der kontinuierlichen Verbesserungen in Bezug auf die Leistungsentwicklung der Produktion sind quantitativ über Lern- und Erfahrungskurvenverläufe zu modellieren, worauf in Kapitel 3.4 eingegangen wird.

### **3.2.2 Diskontinuierliche Veränderungen**

Konzeptionelle Änderungen der Produkte, der Technologien und der Organisation zählen zu den diskontinuierlichen Veränderungen einer Fabrik und bedürfen einer sorgfältigen Planung, in welcher die Wechselwirkungen und Zusammenhänge in der Zeitachse terminiert und harmonisiert werden. Für diesen Zweck hat WESTKÄMPER Mitte der 80-er Jahre den Technologiekalender vorgeschlagen, um die Komponente Zeit bei der Planung neuer Technologie- und Fertigungsstrukturen besser zu berücksichtigen [Westkämper 1986; Wildemann 1987]. Zur Erfassung geplanter konzeptioneller Veränderungen der Märkte, der Produkte und der Produktion in ihrer Zeitachse werden im Technologiekalender die planmäßigen Veränderungen aufgenommen, deren Abhängigkeiten visualisiert und zeitlich synchronisiert. Der Technologiekalender verfolgt das Ziel, die Entwicklungen der Märkte, der Produkttechnologien und der Produktionstechnologien miteinander zu verknüpfen und zu synchronisieren [Westkämper 2004]. Der Technologiekalender ist somit ein Instrument, um die Produktion systematisch weiterzuentwickeln und als Teilstrategie in die Unternehmensstrategie zu verankern. Dies wird bislang jedoch nur von wenigen Unternehmen in Abstimmung mit der Unternehmensstrategie vorangetrieben [Westkämper 2004, Westkämper 2006c].

Der Technologiekalender hat sich seit langem als Instrument für die Planung und Synchronisierung technologischer Entwicklungen aus dem Produkt- und Produktionsbereich bewährt, was nicht zuletzt anhand der zahlreichen Anwendungen und Weiterentwicklungen in der einschlägigen Fachliteratur abzulesen ist. Besonders hingewiesen sei in diesem Zusammen-

hang auf die Arbeit von BURGSTAHLER, der den Aufbau des Technologiekalenders zur Synchronisation von Produkt- und Produktionsentwicklung systematisch vorangetrieben und methodisch in den strategischen Planungsprozess integriert hat [Burgstahler 1997]. Berücksichtigung findet der Technologiekalender nach WESTKÄMPER in weiteren Arbeiten wie der von SCHMITZ, welcher den Technologiekalender für die langfristige strategische Planung und Synchronisation von Produkt- und Prozessinnovationen modifiziert hat [Schmitz 1996]. FIEBIG wendet den Technologiekalender für die Synchronisation von Fabrik- und Technologieplanung an, indem er zu einer vorhandenen Technologie-Roadmap das Konzept einer Fabrik-Roadmap entwickelt und diese beiden integriert [Fiebig 2004]. ABELE erweitert den Technologiekalender für eine permanente Anwendung zur Vorbereitung, Planung, Steuerung und Kontrolle des strategischen Technologiemanagements [Abele 2006].

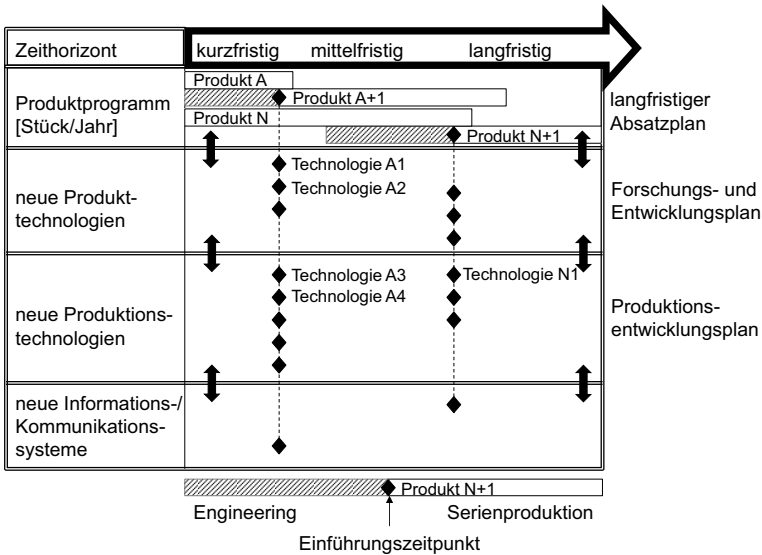
Der Technologiekalender dient als Grundlage und Eingangsgröße für Planungen innerhalb von Strukturanpassungen. Aus dem Technologiekalender lassen sich die aus den Entwicklungen erforderlichen Änderungen der Ressourcen [Westkämper 2006c] genauso ableiten wie die für die Umsetzung notwendigen Investitionspläne. Unter diesem Gesichtspunkt wird der Technologiekalender als methodischer Baustein zur zeitlichen Harmonisierung und Synchronisation der konzeptionellen Entwicklungen in die strategische Strukturplanung integriert. Der Grundaufbau des Technologiekalenders richtet sich dabei nach der Darstellung in Abbildung 3.8.

Der Technologiekalender besteht aus einer Zeitachse des kurz-, mittel-, und langfristigen Planungshorizonts sowie den Hauptwandlungstreibern, welche im Rahmen einer strategischen Planung zeitlich miteinander zu synchronisieren sind.

Aus der Unternehmensstrategie sowie der Produkt- und Marketingplanung wird das Produktprogramm mit seinen Varianten aus der Beobachtung und Analyse der Märkte und der Entwicklungen im Umfeld des Unternehmens für die zukünftigen zu bedienenden Märkte definiert und zusammengestellt. Dem langfristigen Absatzplan sind die für das Produktprogramm vorgesehenen Volumina zu entnehmen. Die Produkte werden im Bereich des Produktprogramms zu ihrem definierten Einführungszeitpunkt in der Produktion mit den Mengenangaben pro Jahr im Technologiekalender eingetragen. Neben dem Einführungszeitpunkt sind zudem die geplante Laufzeit des Produkts in der Serienfertigung sowie der Zeitraum zum Engineering vor „Start of Production“ zu markieren.

Die technologischen Veränderungen der Produkte werden dem Forschungs- und Entwicklungsplan der Unternehmen entnommen und mit dem Einführungszeitpunkt der neuen Produkttechnologien im Technologiekalender ergänzt. In diesem Bereich sind die konstruktiven

Veränderungen der Produkte entsprechend der beschriebenen Wandlungstreiber zuzuordnen.



**Abbildung 3.8: Grundaufbau des Technologiekalenders**

Gleiches geschieht für die neuen technischen und technologischen Konzepte der Produktion, die dem Produktionsentwicklungsplan zu entnehmen sind, sofern dieser im Unternehmen existiert. Falls dies nicht der Fall ist, sind diese Informationen für den Technologiekalender zusammenzutragen. Unter dem Hauptwandlungstreiber der Produktion sind alle Veränderungen aufzuführen, welche in Kapitel 3.2 für die Produktion sowohl auf technologischer als auch auf organisatorischer Seite identifiziert wurden.

Insbesondere die Entwicklungen der Informations- und Kommunikationstechnik haben sich in den vergangenen Jahren zu einem entscheidenden Treiber technischer Innovationen und Möglichkeiten entwickelt. Vor diesem Hintergrund sind im Technologiekalender neben den klassischen Bereichen der Markt, Produkt- und Produktionsentwicklungen auch die Veränderungen der Informations- und Kommunikationssysteme zu integrieren.

Durch die Visualisierung ergibt sich eine Transparenz der jeweiligen Entwicklungen und ihrer Abhängigkeiten zueinander, auf deren Basis eine zeitliche Synchronisierung durchgeführt werden kann und aus denen die Zeitpunkte für Strukturanpassungen abgeleitet werden müssen. Somit stellt der Technologiekalender mit seinen Informationen über die technisch konzeptionellen Veränderungen eine entscheidende Eingangsgröße zur Anpassung der Fa-

brikstrukturen und zur Harmonisierung der in diesem Zusammenhang durchzuführenden Veränderungsprozesse dar.

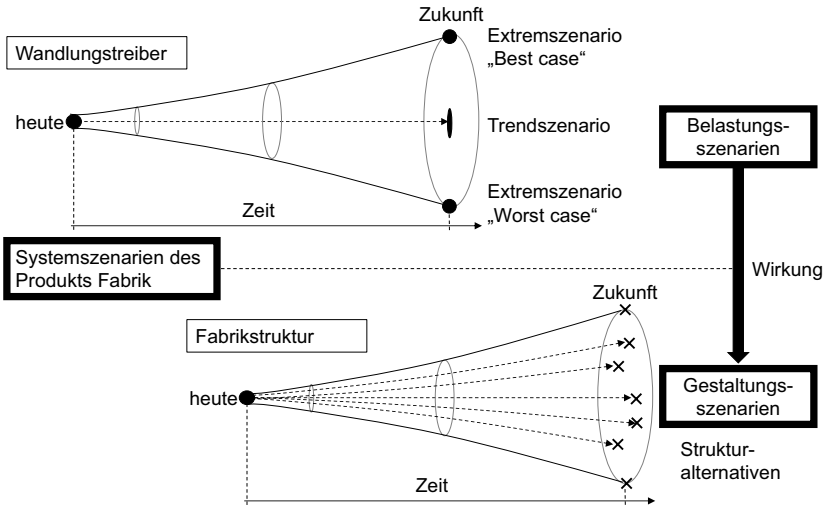
### **3.2.3 Entwicklung der Wandlungstreiber in der Zukunft**

Da eine Planung der Vorbereitung und Gestaltung der Zukunft unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren und ihrer Vernetzung dient, müssen folglich die Planungsobjekte und die zu erwartende Entwicklung ihres Umfelds in die Zukunft prognostiziert werden. Zum einen können die Werte der Vergangenheit in ihrer Entwicklung für die Zukunft fortgeschrieben und aus der Erfahrung extrapoliert werden, um einen Trend in der Zukunft vorherzusagen. Zum anderen ist aber auch zu berücksichtigen, dass die Zukunft von nicht vorhersehbaren Störgrößen beeinflusst wird und somit mit Unsicherheiten verbunden ist, so dass die Planungsgenauigkeit und Zuverlässigkeit der Prognose mit steigendem Planungshorizont abnimmt. Zur Prognose von Veränderungen, welche mit Unsicherheiten verbunden sind, bietet sich die Erstellung von Szenarien an, in denen mögliche Entwicklungen der Zukunft durchdacht werden. Ein Szenario beschreibt in allgemeiner Form eine mögliche Situation der Zukunft, welche auf einem komplexen Netz von Einflussfaktoren beruht. Darüber hinaus kann ein Szenario den Weg beschreiben, der aus der Gegenwart in die Situation der Zukunft führt [Gausemeier et al. 1999]. Der systematische Aufbau von Szenarien erfolgt nach der Szenario-Technik, einem Planungswerkzeug, welches sich als Methode zur strategischen Planung unter Unsicherheiten etabliert hat und sich auch als Hilfsmittel zur strategischen Gestaltung und Planung der mittel- und langfristigen Wandlungsfähigkeit von Fabriken eignet [Wiendahl et al. 2002]. Die Szenario-Technik fordert vernetztes, strategisches und zukunftsoffenes Denken und Handeln [Fink et al. 2000], mit dem multiple Zukunftsszenarien entwickelt werden [Gausemeier et al. 2009].

In der Szenario-Technik beschreibt das Szenariofeld den Betrachtungsgegenstand, in dem Fragestellungen der Zukunft und ihre möglichen Entwicklungen beantwortet werden sollen. Bezieht sich das Szenariofeld auf die Entwicklung externer, nicht-lenkbarer Einflussgrößen, handelt es sich um Umfeldszenarien. Werden ausschließlich interne und lenkbare Größen berücksichtigt, so handelt es sich um Gestaltungsszenarien. Enthalten die Szenarien sowohl externe als auch interne Faktoren, so ist von Systemszenarien zu sprechen [Gausemeier et al. 2009].

Im Rahmen einer Strukturanpassung sind sowohl die externen Wandlungstreiber, also die Märkte, als nicht lenkbare Umfeldgrößen wie auch die internen Wandlungstreiber der Produkte und der Produktion als Lenkungsgrößen bei der Generierung von Szenarien zu berücksichtigen. Folglich handelt es sich bei den zu erstellenden Szenarien um Systemszenarien der Fabrikstrukturen unter Berücksichtigung der Wandlungstreiber (Abbildung 3.9).





**Abbildung 3.9: Beschreibung zukünftiger Entwicklungen der Wandlungstreiber in Szenarien**

Das grundsätzliche Vorgehen der Szenario-Technik nach GAUSEMEIER gliedert sich in fünf Phasen [Gausemeier et al. 1999; Gausemeier et al. 2009], welche auf die Strukturplanung der Fabriken zu modifizieren sind. Phase Eins dient der Szenariovorbereitung, in der die Zielsetzung und das zu berücksichtigende Betrachtungsfeld abgesteckt werden, welches im Kontext der Problemstellung den Fabrikstrukturen im dynamischen Umfeld der Wandlungstreiber entspricht. In Phase Zwei werden dann die Einflussfaktoren des Szenariofelds identifiziert und über eine Gewichtung die relevanten Einflussfaktoren als Schlüsselfaktoren abgeleitet [Gausemeier et al. 2009]. Dieser Schritt entspricht der Identifikation der relevanten Wandlungstreiber Märkte, Produkte und Produktion sowie deren Priorisierung, welche in Kapitel 3.2 bereits vorgenommen wurde. Durch die Szenarioprognostik in Schritt Drei werden die Schlüsselfaktoren mit ihren denkbaren Entwicklungsmöglichkeiten in die Zukunft projiziert. Diese Projektionen werden dann zu konsistenten Szenarien gebündelt, welche abschließend einer Bewertung unterzogen werden [Gausemeier et al. 2009].

Szenarien dienen der Beantwortung von Wirkfragestellungen, welche sich im Rahmen der Strukturplanung auf die folgenden konzentrieren:

- Wie wirken sich die Wandlungstreiber auf die bestehenden Fabrikstrukturen aus?
- Wie könnten alternative Strukturkonzepte aussehen, welche der Forderung nach struktureller Wandlungsfähigkeit gerecht werden?

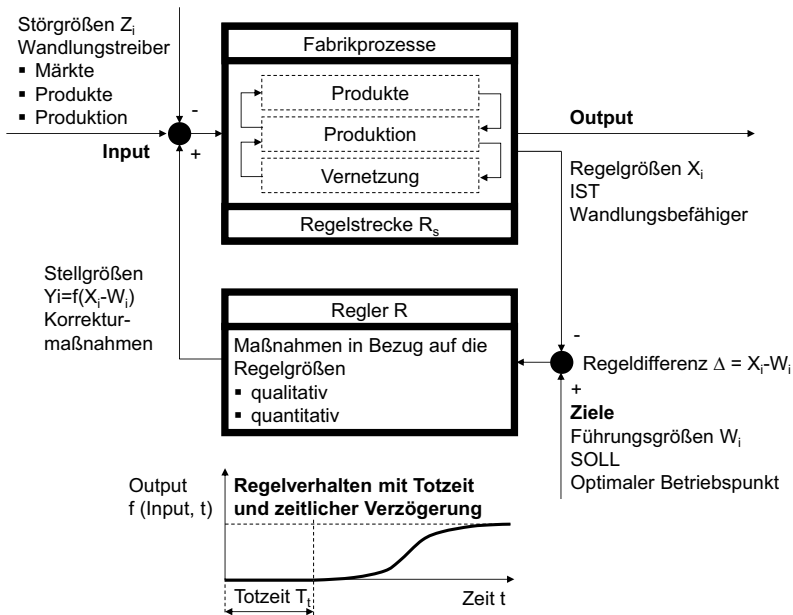
- Wie wirken sich die Wandlungstreiber auf die alternativen Strukturkonzepte aus?

Zur Untersuchung und Beantwortung dieser Wirkfragestellungen sind die Wandlungstreiber in ihrer Entwicklung in die Zukunft zu projizieren und daraus Belastungsszenarien aus den Veränderungstreibern zu generieren. Diese Belastungsszenarien haben sich in den Grenzen der Extremszenarien „best case“ und „worst case“ zu bewegen. Auf Seiten der Fabrikstruktur sind in Form von Gestaltungsszenarien alternative Strukturmodelle zu entwickeln, welche dann in Systemszenarien den Belastungen der Wandlungstreiber ausgesetzt und hinsichtlich ihrer Wirkung bewertet werden (Abbildung 3.9).

### 3.3 Regelkreissystem der permanenten Strukturadaption

Durch den Einfluss der Wandlungstreiber auf die Fabriken sind Strukturanpassungen erforderlich, welche aus der systemischen Betrachtung der Fabriken heraus eine Analogie zum Wirkungsmechanismus eines Regelkreises zulassen, die auf den Planungsansatz der Strukturadaption zu übertragen ist. Die Regelungstechnik beschäftigt sich mit Regelungsvorgängen dynamischer Systeme, bei denen dem Regler die Aufgabe zukommt, die Elemente und Beziehungen des technischen Systems, der Regelstrecke, trotz der Einwirkungen durch die Störgrößen konstant zu halten oder nach einem vorgegebenen Plan zu ändern [Grote et al. 2005; Lunze 2010]. In Abbildung 3.10 sind die Zusammenhänge eines Regelkreissystems, bestehend aus Regelstrecke  $R_S$  und Regler  $R$ , auf das System der Fabriken und ihrer Strukturen in einem durch die Wandlungstreiber geprägten turbulenten Umfeld zu übertragen.

Die Regelstrecke des Regelkreises besteht aus den Fabrikprozessen, in denen in Form eines Transformationsprozesses aus den Eingangsgrößen eine Wertsteigerung erzielt wird, welche den Ausgangsgrößen der Wertschöpfung zu Gute kommt. Die in den Fabrikprozessen zu regelnden Größen  $X_i$  beziehen sich auf die Produkte, die Produktion und ihre Vernetzung. Diese Fabrikprozesse werden neben den bewusst zugeführten Eingangsgrößen von den Störgrößen  $Z_i$  begleitet, welche den drei Hauptwandlungstreibern der Märkte, der Produkte und der Produktion gleichzusetzen sind. Nach dem Durchlauf der Regelstrecke spiegeln die Regelgrößen  $X_i$  die Fabrikstruktur im Ist-Zustand wieder, welche sich aufgrund ihrer zu regelnden Eigenschaften gleichzeitig als Wandlungsbefähiger des Systems erweisen. Aus dem Vergleich der Regelgrößen  $X_i$  mit den Zielvorgaben des optimalen Fabrikbetriebspunkts, den Führungsgrößen  $W_i$ , ergibt sich die Regeldifferenz  $\Delta$ . Über die Regeleinrichtung  $R$  werden qualitative und quantitative Maßnahmen zum Ausgleich der Regeldifferenz und damit zur Erfüllung der Ziele in Bezug auf die Regelgrößen eingeleitet. Aus den Korrekturmaßnahmen ergeben sich die Stellgrößen  $Y_i$  als Funktion  $f$  der Regeldifferenz, welche mit den Eingangs- und Störgrößen  $Z_i$  in einen erneuten Durchlauf des Regelkreises eingehen.



**Abbildung 3.10: Regelkreis der permanenten Strukturadaption**

Für den Planungsansatz sind aus dieser Analogie im Wesentlichen drei Aspekte abzuleiten. Zum einen ist der Planungsdurchlauf dann anzustoßen, wenn sich aus dem Einfluss der Wandlungstreiber eine Regeldifferenz zum Sollwert des optimalen Betriebspunkts ergibt. Zum zweiten ist daraus die Notwendigkeit des permanenten Planungscharakters einer Strukturanpassung zu schließen, welche jeweils durch die Veränderungstreiber auszulösen ist. Zum dritten ist aus dem Regelverhalten des Regelsystems der zeitliche Planungshorizont der Strukturplanung herzuleiten. Ideale Regler würden die Korrekturmaßnahmen unmittelbar in die Regelstrecke einbringen und die Regelgrößen in Echtzeit korrigieren. Da es ideale Regler in der technischen Praxis nicht gibt, ist für die industrielle Anwendung von einem realen Regelverhalten auszugehen. Dies ist zum einen dadurch geprägt, dass sich die Maßnahmen nur mit zeitlicher Verzögerung einleiten lassen, was mit ihrer Vorbereitung und Planung zusammenhängt. Zum anderen besteht zwischen dem Eingang und dem Ausgang der Regelstrecke ein prozessbedingtes zeitliches Delta, welches regelungstechnisch als Totzeit  $T_t$  bezeichnet wird, und dafür sorgt, dass sich die eingeleiteten Maßnahmen nicht mit sofortiger Wirkung entfalten können. Folglich ist für den Regelkreis der Strukturadaption von einem Regelverhalten mit Totzeit und zeitlicher Verzögerung auszugehen (Abbildung 3.10). Anpassungsmaßnahmen für strukturelle Veränderungen lassen sich ausschließlich mit der Einführung neuer Produkte realisieren, um tatsächlich Strukturwirkungen zu erzielen. Geht man

von einem Produktlebenszyklus von etwa sieben Jahren aus und berücksichtigt, dass die Planungsprozesse technischer Konzepte und deren Anlauf ein bis drei Jahre in Anspruch nehmen, ist sinnvollerweise von einem Zeitrahmen von zehn Jahren für die strategische Planung der Strukturen auszugehen und dieser als Planungshorizont dieser Arbeit anzusetzen. Durch eine Systematisierung der Planung und die Steigerung der strukturellen Wandlungsfähigkeit der Fabriken sind die zeitlichen Verzögerungen und Totzeiten des Regelkreissystems Fabrik unter dem Einfluss des Wandels zu reduzieren.

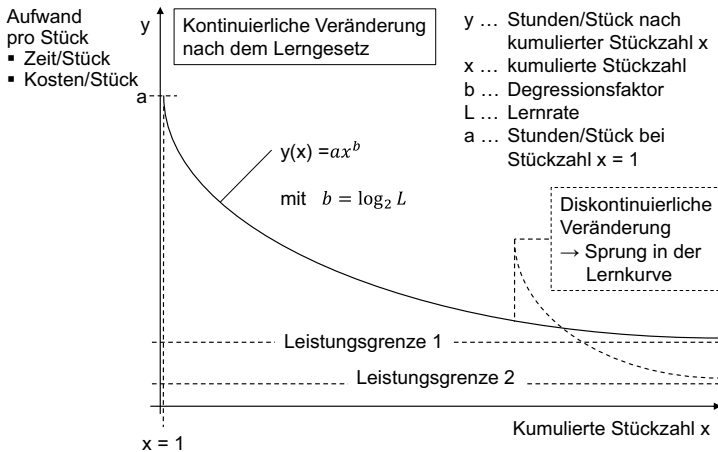
### 3.4 Prognostizierung des Ressourceneinsatzes

Zur quantitativen Prognose des zur Herstellung des Produktprogramms und seinen Varianten erforderlichen Ressourcen, sind die Bedarfskapazitäten aus dem Ressourcenverbrauch eines Produkts, der sich aus der Summe der Vorgabezeiten ergibt, und den dazugehörigen Mengengerüsten pro Produktvariante zu berechnen. Die Kalkulation erfolgt für die strategische Planung auf Jahresbasis, so dass sich die erforderlichen Kapazitäten in Stunden pro Jahr aus der Multiplikation der Produktionsstunden pro Produkt und den Mengen ergeben.

Für die Kalkulation des Ressourceneinsatzes pro Produkt im zeitlichen Verlauf, ist dieser unter Berücksichtigung der Veränderungen zu betrachten. Zu unterscheiden ist dabei zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Veränderungen. Die Kalkulation des Ressourceneinsatzes pro Produkt unter dem Einfluss kontinuierlicher Verbesserungen und den damit verbundenen Leistungssteigerungen der Produktion, deren Ursachen und Wirkungen in Kapitel 3.2.1 beschrieben sind, erfolgt nach den Zusammenhängen des Lerngesetzes [Wright 1936], welche in Abbildung 3.11 veranschaulicht sind. Dieses besagt, dass der Aufwand pro Stück, der gemessen werden kann in Zeit oder Kosten pro Stück, mit zunehmender Anzahl hergestellter Produkte abnimmt.

Die Formulierung des Lerngesetzes geht auf Beobachtungen des Amerikaners WRIGHT zurück, der stückzahlbezogene Degressionseffekte in der Flugzeugindustrie der 30-er Jahre beobachtet hat und diese als erster mathematisch in der Linearhypothese formulierte. Das Lerngesetz nach WRIGHT besagt, dass aufgrund von Lerneffekten die Kosten pro Stück mit einer Verdopplung der hergestellten Stückzahl um einen bestimmten Faktor abnehmen [Wright 1936; Argote et al. 1990]. Der Prozentsatz, um den der Aufwand abnimmt, wird als Lernrate bezeichnet. Inzwischen wurden neben der Linearhypothese weitere Beschreibungsmodelle wie beispielsweise die Stanford-Kurve, das Plateau-Modell nach BALOFF, die S-förmige Lernkurve oder das Adaptionmodell nach LEVY entwickelt [Henfling 1978; Hieber 1991; Kunow 2006; Dudic 2010], die jedoch für jeweils sehr spezifische Anwendungsfälle abgeleitet wurden [Westkämper et al. 1997]. Daher gilt der Einsatz der Linearhypothese als

Planungsinstrument zur Planung und Steuerung der Herstellkosten in der praktischen Anwendung als zweckmäßig [Eversheim 1997; Westkämper et al. 1997]. Während die Lernkurve im ursprünglichen Sinne lediglich die Reduzierung des direkten Fertigungsaufwands durch Tätigkeitsausführung beinhaltet, wurde sie von HENDERSON zur Erfahrungskurve weiterentwickelt, deren Effekte auch auf technischen Fortschritt und Rationalisierung zurückzuführen sind [Henderson 1984]. Eine Unterscheidung nach Lern- und Erfahrungskurven wird im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen. Beide Begriffe beinhalten synonym alle auf kontinuierliche Verbesserungsmaßnahmen zurückzuführende Aufwandsreduzierungen.



**Abbildung 3.11: Kalkulation des Ressourceneinsatzes im zeitlichen Verlauf**

Auf Basis der Linearhypothese nach WRIGHT berechnet sich der Stundenaufwand in Abhängigkeit der kumulierten Stückzahl in seinem zeitlichen Verlauf nach folgender Formel:

$$y = a \times x^b \tag{3.1}$$

wobei

$$b = \log_2 L \tag{3.2}$$

- y = Stunden pro Stück
- x = Stückzahl kumuliert
- a = Stunden bei x = 1
- b = Degressionsfaktor
- L = Lernrate

Die Gültigkeit der Lernkurvenzusammenhänge bezieht sich auf größere Bereiche wie Produkt- und Technologiesegmente, ist jedoch nicht zur Feinkalkulation von Prozessen geeignet. Somit ist die Wirkung aus der Summe aller kontinuierlichen Verbesserungsmaßnahmen über das Lerngesetz abgedeckt und durch die Lernkurve modelliert. Folglich ist diese für die strategische Kalkulation des Ressourceneinsatzes über der Zeit für das Produktspektrum heranzuziehen. Diskontinuierliche Veränderungen hingegen führen zu einem Sprung in der Lernkurve, dessen Ausmaß in tiefergreifenderen Studien zu untersuchen ist.

Die Kalkulation und Vorhersage der erforderlichen Kapazitäten im zeitlichen Verlauf erfolgt demnach aus der Multiplikation der Ressourcenaufwands pro Produkt, welcher sich über der kumulierten Stückzahl aus dem Lerngesetz ergibt, und dem Produktionsprogramm mit seiner Varianz, welches auf den Markt- und Absatzprognosen beruht.

### **3.5 Bewertungsgrößen wandlungsfähiger Strukturkonzepte**

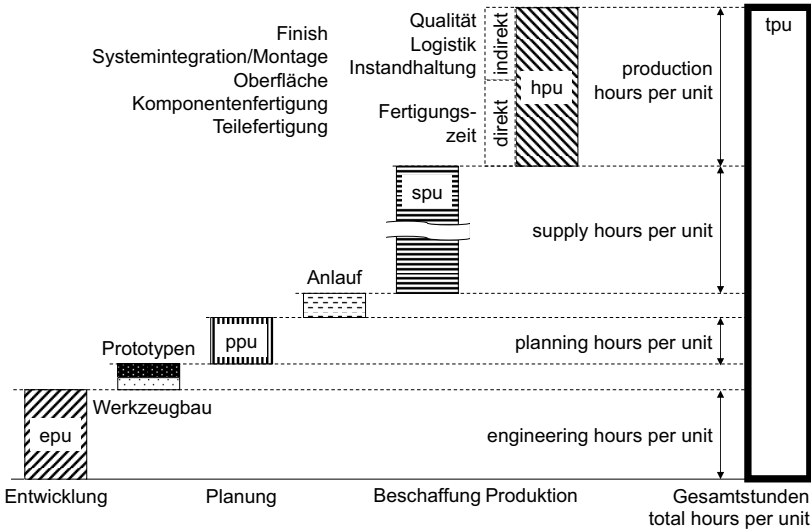
Zur Planung und Bewertung wandlungsfähiger Strukturkonzepte sind Bewertungsgrößen heranzuziehen, welche zuverlässig im Unternehmen verankert und für eine Bewertungsaussage belastbar sind.

Die qualitativen Kriterien, welche den strategischen Zielstellungen des Unternehmens entsprechen, sowie die Bewertung hinsichtlich der Reaktionszeit auf Änderungen sind quantitativ schwierig zu fassen. Aus diesem Grund ist als Bewertungsgröße einer wandlungsfähigen Fabrikstruktur der Gesamtaufwand in Stunden pro Produkt entlang der gesamten Prozesskette heranzuziehen, der ein Maß darüber abgibt, in welcher Zeit und mit welchem Aufwand die Prozesskette durchlaufen und das Produkt hergestellt wird. Die Maßgröße der Personalstunden pro Produkt ist die verlässlichste verfügbare Größe, welche in einem Unternehmen erfasst wird und ist daher der Bewertung zugrunde zu legen. Die mit den Veränderungen verbundenen Investitionskosten wären zwar in Ergänzung zu den Personalkosten für die Bewertung korrekt, allerdings stehen diese nicht in dem präzisen Maß zur Verfügung und werden deshalb in der Bewertung vernachlässigt.

Unter diesen Gesichtspunkten wird für eine ganzheitliche Bewertung der Strukturen die Summe aller direkten und indirekten Stunden pro Produkt in [tpu] herangezogen, welche zur Entwicklung, Planung und Produktion eines Produktes entlang der Prozesskette anfallen.

Die Zusammensetzung der Gesamtstunden pro Produkt, die total hours per unit in [tpu], entlang der Prozesskette erfolgt nach der Darstellung in Abbildung 3.12. Die tpu ergeben sich aus der Summe der Entwicklungsstunden, den engineering hours per unit in [epu], dem Aufwand im Werkzeug- und Prototypenbau, den Planungsstunden, planning hours per unit in

[ppu], den Anlaufstunden, dem Beschaffungsaufwand, den supply hours per unit in [spu] sowie den Produktionsstunden, den production hours per unit in [hpu]. Die hpu setzen sich aus der Fertigungszeit der Teile- und Komponentenfertigung, der Oberflächenbehandlung, Systemintegration bzw. Montage sowie dem Finish zusammen und den in diesen Segmenten anfallenden indirekten Stunden der Qualitätssicherung, der Logistik und der Instandhaltung.



**Abbildung 3.12: Bewertungsgrößen für eine wandlungsfähige Fabrikstruktur**

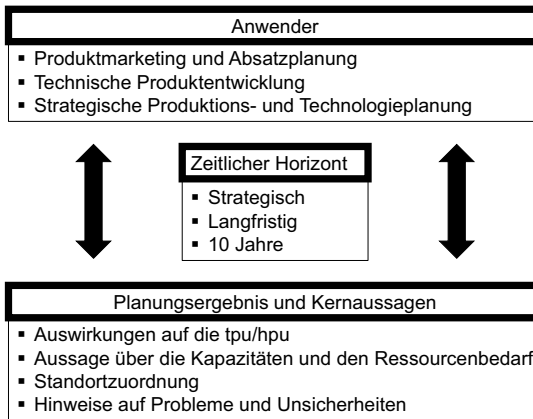
Die tpu sind die Bewertungsgröße, welche die Wechselwirkungen durch die Wandlungstreiber aus Entwicklungs-, Planungs-, Produktions- und damit Prozesskettensicht repräsentativ widerspiegeln und daher im Rahmen der zu entwickelnden Planungsmethodik zur systematischen Strukturplanung herangezogen wird. Aus dieser Größe werden dann der Ressourceneinsatz und der gesamtkapazitive Aufwand für eine Strukturanpassung kalkuliert und der Bewertung unterzogen.

### 3.6 Anforderungen an eine Planungssystematik zur Gestaltung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen

Auf Basis der Grundlagen, welche im Rahmen dieses Kapitels für die Entwicklung der Planungsmethode geschaffen wurden, werden nun abschließend die Anforderungen an die Planungssystematik zur Strukturanpassung der Fabriken unter Berücksichtigung der Ansätze zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit formuliert (Abbildung 3.13).

Die Planungsmethode ist so zu konzipieren, dass sie sich für den Anwenderkreis, der zwingend bei einer umfassenden Strukturplanung einzubeziehen ist, als praktikabel erweist. Folglich ist die Planungsmethode für das Produktmarketing und die Absatzplanung, die technische Produktentwicklung sowie die strategische Produktions- und Technologieplanung zu entwickeln.

Der zeitliche Horizont bezieht sich auf eine langfristige strategische Planung, deren Zeiträumen auf Basis des Regelverhaltens, welches in Kapitel 3.3 beschrieben ist, auf zehn Jahre festzulegen ist.



**Abbildung 3.13: Anforderungen an eine Planungssystematik zur Gestaltung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen**

Als Planungsergebnis soll die Methode die Wirkungszusammenhänge und Auswirkungen der Wandlungstreiber auf die tpu und hpu beschreiben sowie eine Aussage über die Kapazitäten und den Ressourcenbedarf unter dem Einfluss der Veränderungen liefern. Die Planungsmethode soll systematisch zu möglichen Standortszenarien und -zuordnungen führen und für alternative Strukturkonzepte Hinweise auf Probleme und Unsicherheiten geben. Auf dieser Grundlage ist im Folgenden die Planungssystematik zu konzipieren.



## 4 Systematik zur Planung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen

Die Systematik zur permanenten Planung und Anpassung von Fabrikstrukturen ist so zu gestalten, dass sie im Rahmen einer langfristigen und strategischen Planung unter Einbeziehung aller erforderlichen Unternehmensbereiche kontinuierlich angewendet werden kann, um systematisch ganze Fabriken in ihrer Struktur zu verändern. Der Gegenstandsbereich der Betrachtung umfasst somit das gesamte Produktprogramm und alle Funktionen der Prozesskette einer vernetzten Produktion, die zur Entwicklung und Herstellung der Produkte erforderlich sind.

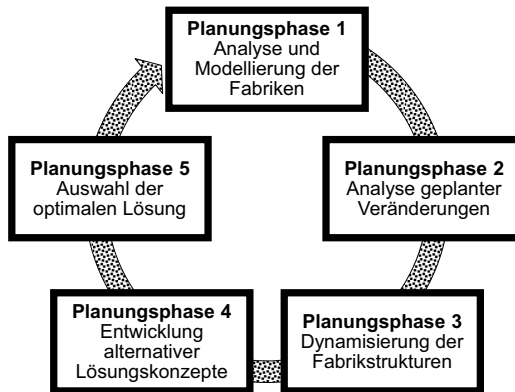
Die Methode muss in der Lage sein, ihren Bilanzrahmen den jeweiligen Randbedingungen und Voraussetzungen der Unternehmen einer variantenreichen Serienfertigung anzupassen. Sie muss die Vergangenheit und Gegenwart der Fabriken einbeziehen und darauf aufbauend systematisch zu Maßnahmen führen, welche die Produktion und ihre Vernetzung für die Zukunft rüsten. Folglich sind die Wandlungstreiber im Grundaufbau der Vorgehensweise zu verankern. Ihre Auswirkungen auf die existierenden Fabrikstrukturen müssen prognostiziert und zuverlässig abgeschätzt werden können, um frühzeitig geeignete Maßnahmen zur Adaption einzuleiten. Der Planungsprozess ist im Sinne eines Regelkreises immer dann anzustoßen, wenn die Wandlungstreiber und ihre Wirkungen wesentlich von den Planwerten abweichen und neue Gegenstandsbereiche in die Fabriken integriert oder desintegriert werden müssen. Aufgabe der Planungssystematik ist somit, die strategische Planung zu stützen, um unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen strategische Alternativen und daraus geeignete Konzeptionen für Fabrikstrukturen zu ermitteln, die der Anforderung der Wandlungsfähigkeit gerecht werden und mit denen das Potential zur schnellen Anpassung erhöht werden kann.

Vor diesem Hintergrund wird eine Systematik zur permanenten Strukturadaption entwickelt, die als kontinuierlicher Planungsprozess zu verstehen ist und alle erforderlichen Schritte von der Analyse der Ausgangssituation bis zur Auswahl einer optimalen Strukturlösung umfasst. Die Systematik wird grundsätzlich in fünf Planungsphasen unterteilt (Abbildung 4.1).

Der systematische Planungsablauf lässt sich dabei in zwei Planungsabschnitte gliedern, die auf der einen Seite die Analyse der Vergangenheit, Gegenwart und der planmäßigen Zukunft einschließen und auf der anderen Seite basierend auf Szenarien die Zukunft der Fabriken gestalten.

Im ersten Planungsabschnitt erfolgt die Analyse in Planungsphase 1 und 2. Planungsphase 1 umfasst die Analyse und Modellierung der bestehenden Fabrikstrukturen, die in einem Produktionsverbund miteinander vernetzt sind. Sie bildet die Ausgangsbasis für alle weiteren Planungsschritte, die unter dem Gesichtspunkt eines dynamischen Umfelds abzuwickeln sind. In Planungsphase 2 werden alle Veränderungen analysiert, die für die Zukunft im Rahmen eines strategischen Planungshorizonts in der Unternehmensstrategie und ihren Teilstrategien vorgesehen sind.

Im zweiten Planungsabschnitt erfolgt die Gestaltung der Fabriken unter Berücksichtigung der Wandlungsfähigkeit. Auf Basis der Veränderungstreiber aus Phase 2 erfolgt in Planungsphase 3 die Dynamisierung der Fabrikstrukturen, welche in Phase 1 charakterisiert wurden. Darauf aufbauend werden in Planungsphase 4 alternative Lösungskonzepte entwickelt, die der Forderung nach Wandlungsfähigkeit gerecht werden. Abschließend wird in Planungsphase 5 die - zu einem bestimmten Zeitpunkt unter den gegebenen Bedingungen - optimale Lösung ausgewählt.

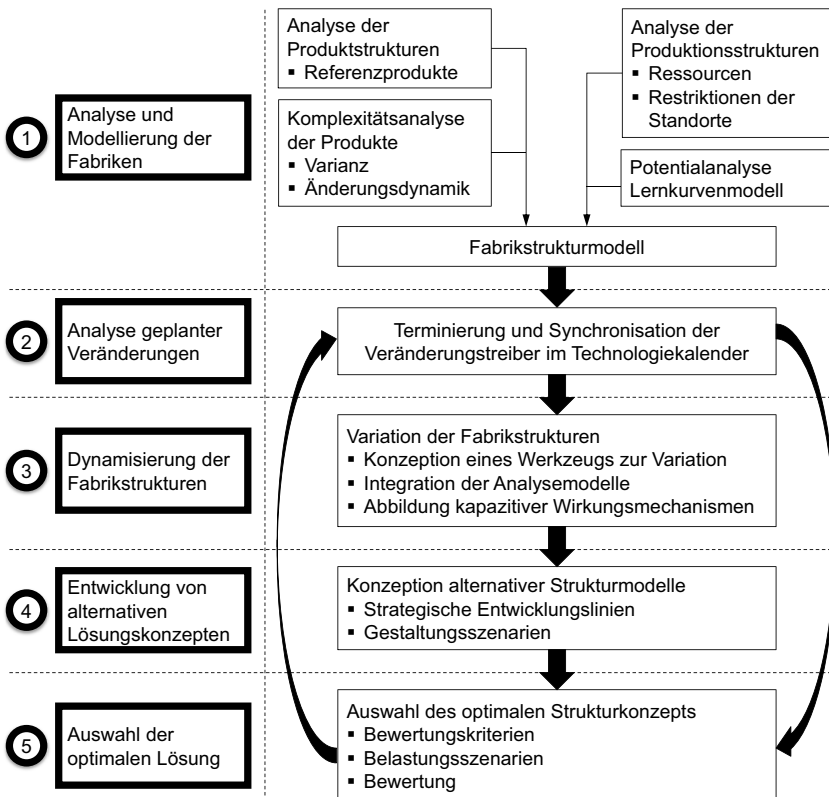


**Abbildung 4.1: Planungsphasen einer permanenten Strukturadaption**

Die umfangreichen Aufgaben der einzelnen Planungsphasen werden in überschaubare Teilaufgaben untergliedert und mit entsprechenden Planungsmethoden unterstützt. Dabei können die einzelnen Planungselemente teilweise in ihrem Ablauf parallelisiert und abschließend in ein Gesamtergebnis des Planungsschritts überführt werden. Der Aufbau und Ablauf der Planungssystematik ist in Abbildung 4.2 veranschaulicht.

Im ersten Schritt erfolgt die Analyse der bestehenden Fabrikstrukturen, die über Jahre hinweg gewachsen sind, aus den beiden Sichten der Produkte und der Produktion.

Die Analyse der Produktstrukturen erfolgt für alle Produktsegmente in Form repräsentativer Referenzprodukte. Diese werden gemäß ihrer Struktur in tpu entlang der gesamten Prozesskette analysiert und stellen die Durchschnittsanforderungen des Produktprogramms an die Produktion dar. Die Produktstrukturanalyse bildet somit die äußere Varianz auf Basis aller Produktsegmente ab. In einem zweiten Teilschritt erfolgt die Analyse der Komplexität innerhalb der Produkte getrieben durch verschiedene Ausstattungsvarianten. Vor diesem Hintergrund wird zum einen die innere Varianz der Produkte gemessen, zum anderen die Änderungsdynamik innerhalb eines Produktlebenszyklus. Zur Berücksichtigung der Ausstattungsvarianten innerhalb der Produkte, schließt die Komplexitätsanalyse mit einem Modell ab, das die maximal und minimal ausgestatteten Produkte in tpu charakterisiert.



**Abbildung 4.2: Aufbau und Ablauf der Planungssystematik für wandlungsfähige Fabrikstrukturen**

Im Rahmen der Produktionsstrukturanalyse werden die Ressourcen und Standortprofile sowohl in den direkten als auch in den indirekten Bereichen der Produktion analysiert. Unter Berücksichtigung der Standortrestriktionen wird das gesamte Produktionsnetzwerk in seiner Struktur auf der Ebene der Produktionssegmente in tpu beschrieben. Die Produktionsstrukturanalyse schließt die Zuweisung von Produkten, Technologien und Ressourcen zu den Standorten mit ein und bildet somit die Ausgangskonfiguration des Produktionsnetzwerks ab. Auf Basis der Leistungsentwicklung der Produktion wird auf der Ebene der Produkt- und Produktionssegmente der Standorte eine Potentialanalyse in Form einer Lernkurvenanalyse durchgeführt und auf Basis dieser Verbesserungspotential quantitativ messbar in Stunden abgeleitet.

Die Zusammenführung der einzelnen Teilanalysen ergibt ein umfassendes Fabrikstrukturmodell des betrachteten Produktionsnetzwerks, das als Ergebnis der Analysephase die Ausgangsbasis für die weiteren Planungsschritte bildet.

In Planungsphase 2 werden alle für die Struktur relevanten geplanten Veränderungstreiber aus Markt, Produkt und Produktion analysiert und in ihrer zeitlichen Abfolge der Einführung terminiert. Unter Verwendung des Technologiekalenders werden in diesem Zusammenhang die Entwicklungen der Märkte, der Produkte, der Produktion sowie der Informations- und Kommunikationstechnik zeitlich synchronisiert. Zur quantitativen Beschreibung der Marktentwicklung wird das langfristige Produktionsprogramm hinterlegt.

Basierend auf den Ergebnissen des Planungsabschnitts der Analyse werden in Planungsphase 3 die Fabrikstrukturen im Modell dynamisiert. Vor dem Hintergrund der Komplexität dieses Planungsschritts wird für diesen Zweck ein EDV-Werkzeug konzipiert, in das die Analysemodelle der Fabrikstruktur und der Veränderungen integriert werden. Mit diesem Werkzeug wird die Fabrikstruktur durch die Veränderungstreiber variiert und deren kapazitive Auswirkungen auf die Strukturen automatisiert berechnet und abgebildet. Somit können szenarienbasiert Grenzbetrachtungen der Standorte durchgeführt werden.

Darauf aufbauend werden in Planungsphase 4 alternative Konzepte entwickelt, um die Fabriken in ihren Strukturen anzupassen. Hierzu werden ausgehend von einem Idealkonzept für eine Fabrikstruktur Grundprinzipien zur Strukturbildung von Fabriken erarbeitet und strategische Stoßrichtungen für die langfristige Entwicklung der Produktion entwickelt. Zur Betrachtung der spezifischen Charakteristika der technologischen Segmente und der Ableitung konzeptioneller Ansätze zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit, werden Partialmodelle der Fabrikstruktur erstellt. Diese werden entsprechend der aufgestellten Strukturierungskriterien

in Form von Gestaltungsszenarien in alternativen Strukturmodellen für die vernetzte Produktion zusammengeführt.

Im letzten Schritt in Planungsphase 5 wird das optimale Strukturkonzept ausgewählt. Hierfür werden Bewertungskriterien erarbeitet und Belastungsszenarien aus dem Markt heraus entwickelt, mit denen die alternativen Konzepte belastet werden. Die Kombinationen aus Belastungsszenarien und alternativen Strukturkonzepten werden systematisch als Systemszenarien mit dem entwickelten EDV-Werkzeug simuliert und die Ergebnisse zur Bewertung der Konzepte herangezogen.

Die Planungsmethode führt unter Berücksichtigung der Veränderungstreiber systematisch zu alternativen Ansätzen, mit denen die strukturelle Wandlungsfähigkeit der Fabriken und ihrer Vernetzung im Rahmen einer strategischen Planung erhöht werden kann. Die systematische Strukturplanungsmethode, deren Planungsphasen in ihren Grundzügen beschrieben wurden, wird im Folgenden auf Basis einer bereits praktisch durchgeführten Planung detailliert erläutert und dargestellt.

## **5 Detaillierung der Planungssystematik**

Basierend auf der Konzeption der Planungsmethode werden nun die einzelnen Planungsschritte beschrieben, die vollzogen werden müssen, um zu strategische Entwicklungslinien und Konzepten einer wandlungsfähigen Fabrikstruktur zu gelangen.

### **5.1 Analyse und Modellierung bestehender Fabrikstrukturen**

Planungen setzen grundsätzlich die Kenntnis der zu planenden Objekte voraus. Für eine strategische Planung gilt dies umso mehr, da sie aufgrund ihres langfristigen zeitlichen Horizonts mit sehr vielen Unsicherheiten verbunden ist. Unter diesem Gesichtspunkt erfolgt als Grundlage zur systematischen Veränderung und Anpassung der Strukturen eine hinreichende Analyse und Charakterisierung der existierenden Fabrikstrukturen aus Sicht der Produkte und der Produktion [Löffler et al. 2010a].

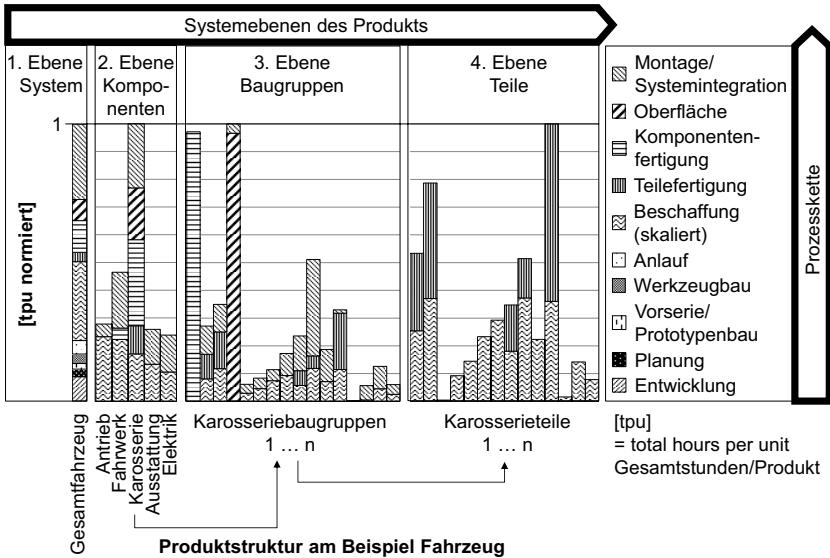
#### **5.1.1 Produktstrukturanalyse entlang der Prozesskette**

Die Struktur der Produkte ist die Basis der Analyse aus Produktsicht. Ausgehend von der Systemebene werden alle Referenzprodukte in ihre Komponenten, Baugruppen und Teile untergliedert. Die standardisierte Strukturierung der Produkte ist entscheidend für die Vergleichbarkeit der Systeme untereinander und der Möglichkeit, die Daten zu Produktsegmenten und abschließend zum Abbild des gesamten Produktportfolios zu aggregieren.

Exemplarisch ist ein Ausschnitt dieser Analyse am Beispiel einer Fahrzeugstruktur dargestellt, wie sie für alle Produkte und Systeme durchzuführen ist (Abbildung 5.1). Systemebene 1 entspricht dem Gesamtfahrzeug, das in seine Komponenten, Antrieb, Fahrwerk, Karosserie, Ausstattung und Elektronik zu unterteilen ist. Beispielhaft dargestellt ist weiter die Untergliederung der Karosserie auf der Ebene 3. Ordnung in ihre Karosseriebaugruppen und auf Ebene 4 in ihre Karosserieteile.

Entsprechend dieser Struktur werden die Produkte in Bezug auf ihre kapazitiven Anforderungen entlang ihrer Prozesskette analysiert. Unter dem Gesichtspunkt der quantitativen Bewertbarkeit erfolgt die Analyse standardisiert in tpu (Gesamtstunden pro Produkt), eingeführt in Kapitel 3.5. Die Prozesskette schließt die funktionalen Segmente der Entwicklung, Planung, des Vorserien- und Prototypenbaus, den Werkzeug- und Vorrichtungsbau, die Anlaufphasen, die Beschaffung und die Produktion mit der Teile- und Komponentenfertigung sowie der Montage und Systemintegration ein. Somit werden die Schwerpunkte des technischen Leistungsbedarfs für die Systemebenen der Produkte transparent. Auf dieser Basis kann bei einer späteren Kopplung mit den Mengengerüsten der Ressourcenbedarf kapazitiv

und technologisch für die gesamte Produktion und ihre vorgelagerten Prozesse aus Perspektive der Produktstruktur kalkuliert werden.



**Abbildung 5.1: Analyse der Produktstrukturen**

Grundsätzlich ist bei der Analyse der Produktstrukturen zwischen leistungsmengenabhängigen und leistungsmengenunabhängigen Aufwendungen in den funktionalen Segmenten der Prozesskette zu unterscheiden.

Zu den leistungsmengenunabhängigen Größen zählen die der Serienproduktion vorgelagerten Prozesse des Engineerings, spezifisch die Entwicklung, Planung, Prototypenfertigung, der Werkzeugbau und der Anlauf. Diese werden in Form von Projektbudgetierungen dokumentiert und auf das Laufzeitvolumen der Produkte verrechnet, um auf die Messgröße der tpu zu kommen. Die Daten sind je nach Verfügbarkeit den Systemen der Controllingabteilungen oder den Kapazitätsplanungen und -erfassungen der einzelnen Bereiche zu entnehmen. Diese sind dann entsprechend der Produktstruktur zuzuweisen.

Zur Berücksichtigung der Zukaufteile werden die Einkaufslisten der Beschaffung herangezogen, in denen die Einkaufspreise der Referenzprodukte detailliert auf Teileebene aufgeführt sind. Diese Preise enthalten in der Gesamtsumme sowohl die Material- als auch die Fertigungs- und Gemeinkosten des Zulieferers. Vor dem Hintergrund, dass die Kosten des Rohmaterials auf dem Weltmarkt in vergleichbaren Dimensionen liegen, erscheint eine Untergliederung der Kosten für den Zweck einer Strukturanalyse als nicht zweckmäßig. Unter diesem Gesichtspunkt werden die Kosten durchgängig für alle Produkte auf Basis des mittleren

Stundensatzes eines repräsentativen eigenen Fertigungsstandorts in spu umgerechnet und damit konservativ abgeschätzt. Damit ist der gesamte Systemeingang der Fabriken aus Sicht der Produkte in Stunden modelliert.

Die kapazitiven Anforderungen in den technologischen Segmenten der Produktion werden je Produkt für die Teile-, Komponentenfertigung, Oberfläche sowie die Montage und Systemintegration auf Basis der Arbeitspläne analysiert. In den Arbeitsplänen ist die Produktstruktur der Referenzprodukte hinterlegt, auf Basis derer die Fertigungszeiten je Arbeitsschritt erfasst werden.

Durch die Analyse der Produktstruktur wird die äußere Varianz und Breite des Produktprogramms hinsichtlich ihrer qualitativen Anforderungen und quantitativen Dimensionen in den technologischen Segmenten beschrieben. Somit sind sowohl die der Produktion vorgelagerten Bereiche als auch die direkten Fertigungsbereiche in tpu modelliert.

### **5.1.2 Analyse der Varianz und Änderungsdynamik der Produktstrukturen**

Neben der Breite des Produktprogramms ist die Ausstattungsvarianz und Änderungsdynamik innerhalb der Produktstrukturen ein entscheidender Veränderungs- und Komplexitätstreiber der industriellen Produktion, insbesondere in der variantenreichen Serienfertigung. Ihre Transparenz eröffnet Potential zu einer ganzheitlichen Variantenoptimierung und bildet das maßgebliche Fundament im Zusammenhang mit einer Strukturanpassung der Fabriken. Unter diesem Gesichtspunkt ist zur weiteren umfassenden Charakterisierung der Produktstrukturen eine durchgängige Analyse der Ausstattungsvarianz und ihrer konstruktiven Änderungsdynamik innerhalb eines Produktlebenszyklus über die gesamte Produktpalette hinweg durchzuführen.

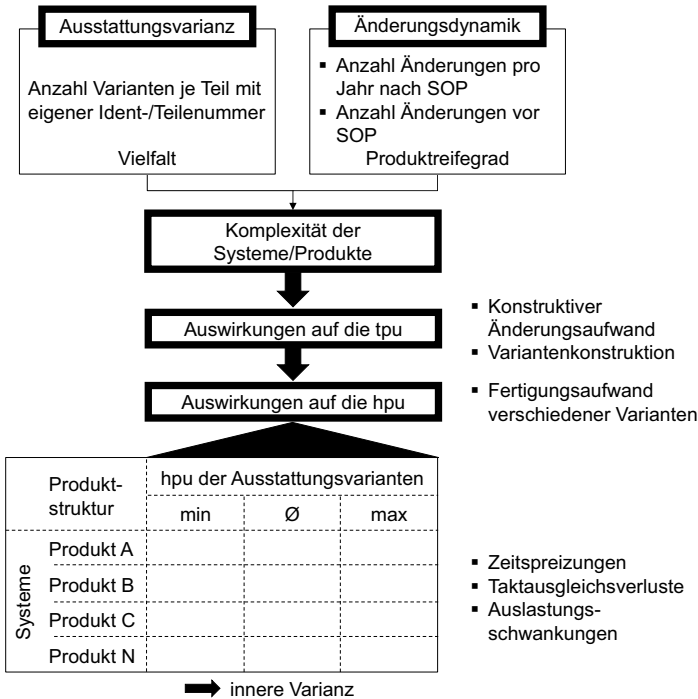
Ausgehend von einer einheitlichen Produktstruktur zur Vergleichbarkeit der Produkte untereinander sind zur Analyse der Ausstattungsvarianz die unteren Systemebenen der Produkte zu betrachten. Sie spiegeln die sogenannte innere Varianz der Systeme wider (Kapitel 2.2.1). Die Analyse der Varianz innerhalb eines Produktlebenszyklus erfolgt auf Basis von zwei Aspekten, der Analyse der Ausstattungsvarianz und der Änderungsdynamik nach Abbildung 5.2.

Die Ausstattungsvarianz der Produkte wird gemessen anhand der Anzahl an Varianten je Teil bzw. Komponente mit eigener Ident- oder Teilenummer und gibt Aufschluss über die Vielfalt an Teilen innerhalb eines Produkts.

Als Ausgangsbasis für eine Analyse der Ausstattungs- und Teilevarianz dienen die technischen Stücklisten mit einheitlicher und durchgängiger Strukturierung der Produkte. Für die Analyse der Teilevarianz sind insbesondere die Varianten von Interesse, die als eigenständi-



ges Teil in der Produktion auftreten. Vor diesem Hintergrund wird für die Zählung der Teilevarianz die Aggregationsstufe in der Stückliste gewählt, deren Zusammenbauten mit eigener Teilenummer in der Stückliste aufgeführt sind und die als Zusammenbauten in die Produktion geliefert werden. Dabei kann es sich sowohl um Eigenfertigungs- als auch um Kaufteile handeln, die beide in die Betrachtung eingeschlossen werden.



**Abbildung 5.2: Komplexitätsanalyse der Produkte**

Die technischen und vertriebstechnischen Restriktionen und Ausschlussbedingungen werden über Kombinationskriterien gesteuert, die in der Stückliste enthalten sind. Um zu garantieren, dass nur mögliche Kombinationen bei der Variantenzählung berücksichtigt werden, werden die Restriktionsbedingungen mit in die Auswertung der Stücklisten aufgenommen. Unter diesen Gesichtspunkten erfolgt die Zählung der Varianten automatisiert über einen Algorithmus aus den Stücklisten unter Einbeziehung der Teilebenennungen, Teilenummern und Restriktionskriterien.

Um die verschiedenen Produktsegmente und Systeme bezüglich ihrer Varianz zu vergleichen, wird die durchschnittliche Varianz pro Komponente je Produkt berechnet, wobei der Zähler die Anzahl der Teile mit eigener Identnummer angibt.

$$v_{\emptyset} = \frac{\sum_1^n K_i \times V_i}{\sum K} \quad (5.1)$$

$v_{\emptyset}$  = durchschnittliche Varianz pro Komponente je Produkt

$K_i$  = Häufigkeit der Komponenten mit Variantenanzahl i

$V_i$  = Variantenanzahl i

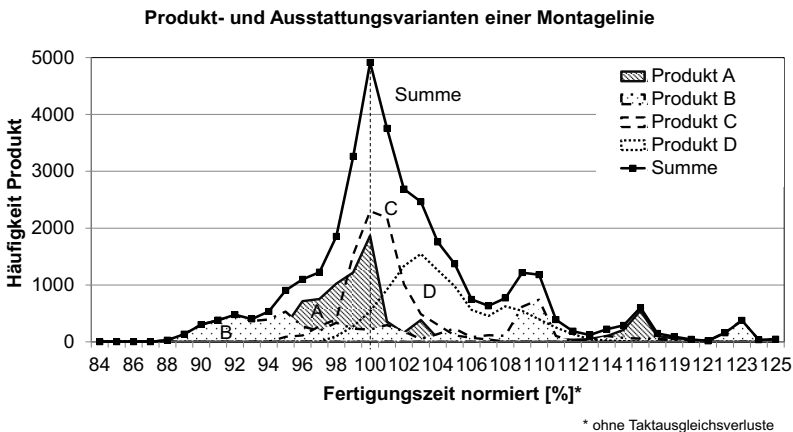
Zur Berücksichtigung der dynamischen Effekte, die in Form konstruktiver Bauteiländerungen innerhalb eines Produktlebenszyklus durchgeführt werden, wird als zweiter Aspekt die Änderungsdynamik der Produkte untersucht. Diese wird gemessen in Anzahl der konstruktiven Änderungen pro Jahr. Die Analyse der Änderungsdynamik identifiziert änderungsintensive Bauteile und spiegelt die Dynamik innerhalb eines Produktlebenszyklus wider. Die Anzahl konstruktiver Änderungen gibt insbesondere vor Serienbeginn ein Indiz auf den jeweiligen Produktreifegrad. Änderungen während der Produktion sind zudem auf konstruktive Verbesserungsmaßnahmen oder Produktaufwertungen zurückzuführen. Jede Änderung ist mit einem enormen Änderungsaufwand entlang der gesamte Prozesskette verbunden und bindet enorme Kapazitäten im Unternehmen.

Komplexität enthält die beiden Dimensionen Vielfalt und zeitliche Dynamik (Kapitel 2.3). Vor diesem Hintergrund sind die beiden Aspekte ein Maß für die Komplexität der Produkte, die durch die Varianz der Ausstattungen und Individualisierungsumfänge getrieben wird. Sie hat massive Auswirkungen auf die tpu durch den konstruktiven Änderungsaufwand und die Variantenkonstruktionen bis in den Bereich der Entwicklung hinein. In der Produktion verursacht die Ausstattungsvarianz massive Zeitspreizungen insbesondere in der Montage, die verbunden sind mit Taktausgleichsverlusten und starken Auslastungsschwankungen innerhalb der Takte.

Um die Spannbreite der zu produzierenden Produkte in der Planungssystematik zu charakterisieren, wird die Auswirkung der Ausstattungsvarianz auf die Produktion durch jeweils ein maximal und ein minimal ausgestattetes Produkt modelliert. Hierzu ist der erste Schritt, die minimal und maximal ausgestatteten Produkte zu identifizieren. Vor dem Hintergrund, dass die jeweiligen Produkte aus unendlich vielen Kombinationsmöglichkeiten bestehen können, gibt es im Unternehmen keine eindeutigen Aussagen darüber, wie ein minimal bzw. maximal ausgestattetes Produkt konfiguriert sein muss, um die maximale Spannbreite an Fertigungszeiten abzudecken. Deshalb sind die Produkte aus dem realen Produktionsprogramm zu identifizieren. Unter der Annahme, dass sich Ausstattungen vornehmlich in den Montagelinien kapazitiv auswirken, werden für einen repräsentativen Zeitraum die real produzierten Produktprogramme der Montage ausgewertet und daraus das Minimal- und Maximalprodukt

erfasst. Zur Erfassung des zur Auswertung erforderlichen Zeitraums, in dem möglichst die ganze Breite der Produkt- und Ausstattungsvarianten produziert wird, ist das Produktionsprogramm über verschiedene Zeiträume in Bezug auf die abgedeckten Fertigungszeiten zu vergleichen. Bei einem Zeitraum von vier Monaten, sind die Ergebnisse im Fall eines praktisch durchgeführten Beispiels stabil. Um die Datenmenge in Grenzen zu halten, erscheinen zwei Monate mit einer Abweichung von unter 0,1 % zum Grenzwert zweckmäßig.

Ein Beispiel für die Häufigkeitsverteilung verschiedener Produkt- und Ausstattungsvarianten auf einer Montagelinie mit vier Produktvarianten zeigt Abbildung 5.3. Die Differenz aus Maximal- und Minimalprodukt ergibt die Zeitspreizung, die ein Maß für die Flexibilitätsanforderungen an die Produktion ist. Unter Berücksichtigung aller zu fertigenden Produkte und Ausstattungsvarianten im aufgezeigten Beispiel ergibt sich eine Zeitspreizung für die Montagelinie von +25 % und -16 %.



**Abbildung 5.3: Zeitspreizung aufgrund von Produkt- und Ausstattungsvarianz auf einer Montagelinie**

Entsprechend dieser Vorgehensweise werden die minimal und maximal ausgestatteten Produkte aus den Produktionsprogrammen der Montagelinien erfasst. Diese Produkte sind in ihrer Konfiguration über Nummernkombinationen im Bauauftrag eindeutig bestimmt. Mit dieser Identifikation werden Arbeitspläne erstellt und deren Zeiten für die Beschreibung der maximal und minimal erforderlichen Fertigungszeiten für die Teilefertigung, Komponentenfertigung, Oberfläche und Montage bestimmt, um die Produkte entsprechend ihrer Produktstruktur in allen technologischen Segmenten zu bewerten. Die Zeitspreizungen treten wie angenommen vorwiegend in der Montage auf. Die Zeitspreizungen aufgrund von Ausstattungsvarianten

rianten sind in den übrigen Fertigungsbereichen zu vernachlässigen und werden dort vielmehr durch die Produktvarianten verursacht, die mit der Analyse der Referenzprodukte bereits im Modell abgedeckt sind.

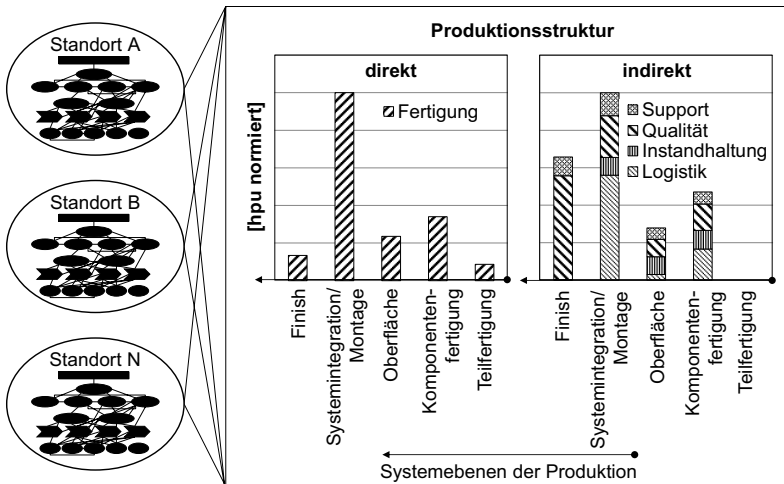
Zwischen den Messgrößen der durchschnittlichen Varianz je Produkt und der Zeitspreizung ist im praktischen Beispiel über Linien und Werke hinweg für alle Produktklassen ein linearer Zusammenhang festzustellen. Je größer die durchschnittliche Varianz der Fahrzeuge, desto größer ist die Zeitspreizung. Zudem nimmt die mittlere Varianz mit dem Reifegrad des Produkts entlang des Produktlebenszyklus zu. Durch die Aufstellung einer Komplexitätsmatrix mit den Dimensionen der Variantenanzahl und Änderungsdynamik wird die Ist-Komplexität visualisiert, die dem Variantenmanagement Hinweise gibt, welche Bauteile im Fokus weiterer Studien liegen können. Die Kombination der Varianzgrößen und Abhängigkeiten ist in Beispielen [Löffler et al. 2011a] zu entnehmen.

Zusammen mit der Produktstrukturanalyse deckt die Komplexitätsanalyse die Anforderungen an die Produktion in der gesamten Spannweite aus Sicht der Produkte ab und bestimmt somit den erforderlichen Raum an Wandlungsfähigkeit. Die Analysen dienen folglich als Basis für die weiteren Schritte der Planungsmethode zur langfristigen Strukturplanung vor dem Hintergrund der Veränderungsfähigkeit.

### **5.1.3 Produktionsstrukturanalyse**

Die Analyse der Produktionsstrukturen bringt die Sicht der Ressourcen, Standorte und ihrer Profile in das Gesamtmodell der Fabrikstrukturen ein. Korrelierend mit den Strukturen der Produkte werden die Produktionsstrukturen entsprechend ihrer Systemebenen analysiert (Abbildung 5.4.). Die Analyse umfasst den Prüf- und Nacharbeitsbereich, die Ebene der Systemintegration und Montage, die Oberfläche sowie die Ebene der Komponenten- und Teilefertigung an den jeweiligen Standorten. Die technologischen Segmente werden für alle Standorte des Produktionsnetzwerks sowohl in den direkten als auch in den zugehörigen indirekten Bereichen in hpu aus Ressourcensicht analysiert. Die direkten Bereiche der Fertigung werden den Produkten direkt zugerechnet und enthalten neben den Fertigungszeiten, die im Rahmen der Produktstrukturanalyse untersucht wurden, zudem noch Fertigungsmehrzeiten wie Wartezeiten, Qualifizierung, Ausschuss und Nacharbeit etc., sowie Restanwesenheiten, Inventuraufgaben und Produktklassenzuschläge. Tendenziell weisen erhebliche Abweichungen von der Fertigungszeit nach oben auf Überkapazitäten hin, Abweichungen nach unten auf Unterkapazitäten in der Ressourcenverfügbarkeit. Die indirekten Bereiche umfassen die Logistik, Instandhaltung, Qualität und allgemeine Dienstleitungen für die Produktion. Diese Bereiche werden über Schlüssel auf die jeweils gefertigten Produkte ver-

rechnet. Die der Produktion vorgelagerten indirekten Bereiche werden bereits in der Produktstrukturanalyse erfasst.



**Abbildung 5.4: Analyse der Produktionsstrukturen**

Standortspezifisch werden die kapazitiven Restriktionen untersucht und die zur Verfügung stehenden Flächen der technologischen Segmente in m<sup>2</sup> erfasst. In diesem Zusammenhang wird zudem auf Basis der Werkspläne die räumliche Lage der Bereiche zueinander lokalisiert, die als technologische Knoten Ausgangs- und Endpunkte für Material- und Informationsflüsse innerhalb der Fabriken sind.

Die Analyse der Produktionsstrukturen umfasst sämtliche Eigenfertigungsanteile und Technologien, die zusammen mit den Produkten den jeweiligen Standorten zugeordnet sind. Zur Berücksichtigung der Fremdfertigung werden die Zukaufteile, die im Rahmen der Produktstrukturanalyse erfasst wurden, einem virtuellen Standort zugewiesen, der als Knoten im Produktionsnetzwerk fungiert und bei Bedarf noch detaillierter untersucht werden kann.

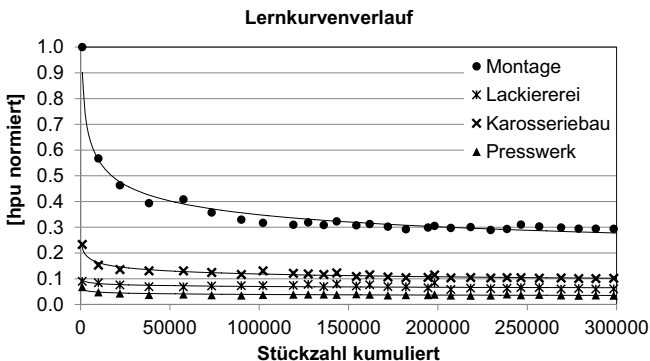
Die Produktionsstrukturanalyse rundet das Abbild der bestehenden Fabrikstrukturen dahingehend ab, dass die zur Verfügung stehenden Ressourcen und technologischen Kompetenzen aus den Standorten heraus im Ist als Ergebnis der Handlungen aus der Vergangenheit erfasst werden. Sie steht somit für das gesamte Fähigkeitsprofil und Leistungspotential der Standorte und seinen vorhandenen Redundanzen. Damit weist die Analyse die strukturellen Handlungsfelder zur Veränderung der Ressourcen auf. In Zusammenführung mit der Produktionsstrukturanalyse und der damit verbundenen Zuweisung der Produkte ergibt sich das Fabrikstrukturmodell im Ist, das die Grundlage für Strukturanpassungen bildet.

## 5.2 Potentialanalyse auf Basis von Lerneffekten

Zum umfassenden Abbild der Fabrikstruktur steht nach der Charakterisierung der Ist-Situation die Analyse des Leistungsverlaufs aus der Vergangenheit an. Daraus ist die Entwicklung der Produktion bis hinein in die Gegenwart nachzuvollziehen. Auf Basis der Leistungsentwicklung aus der Vergangenheit bis zum heutigen Ist-Zustand werden dann durch Trendextrapolationen Prognosen für die Zukunft gestellt und Potential für Effizienzsteigerungen abgeleitet.

Hierzu ist der Entwicklungsverlauf der Stunden pro Produkt in hpu über die vergangenen Jahre heranzuziehen, um die Leistungsentwicklung der Produktion zu quantifizieren. Dies erfolgt unter Ausnutzung der Lern- und Erfahrungseffekte, die in der Produktion nachzuweisen sind. Die Lernkurvenanalyse ist vor diesem Hintergrund über große Bereiche hinweg auf der Ebene der technologischen Segmente für die Produktsegmente durchzuführen.

In Abbildung 5.5 sind exemplarisch die Ergebnisse einer Lernkurvenanalyse für ein Produktsegment dargestellt, welche für die direkten Bereiche der Technologiesegmente Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei und Montage am praktischen Beispiel in der Automobilindustrie durchgeführt wurde. Aufgetragen sind die Ergebnisse in hpu inklusive der Anlaufstunden über der kumulierten Stückzahl wie in Kapitel 3.4 beschrieben. Die Wertepaare basieren jeweils auf monatlichen Erhebungen. Unter Ausnutzung der logarithmischen Eigenschaften des Verlaufs werden jeweils die Anfangsstunden bei Stückzahl eins wie auch die Lernraten berechnet. Die Analyse wurde in dieser Form für alle Produktsegmente durchgeführt.



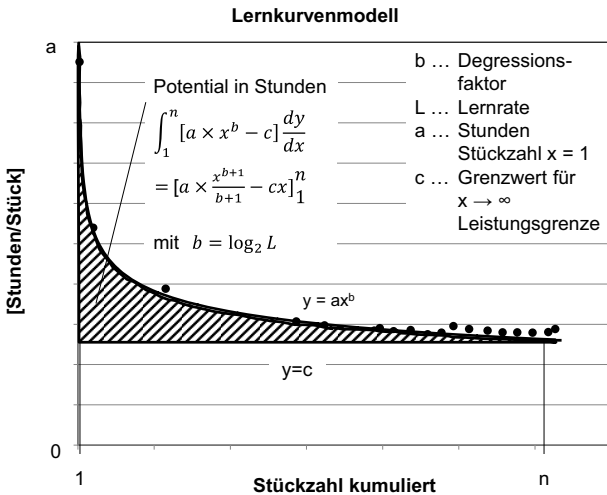
**Abbildung 5.5: Beispiel einer Lernkurvenanalyse aus dem Automobilbau**

Die größten Lerneffekte sind grundsätzlich für alle Produktsegmente in der Montage nachzuweisen und liegen im praktischen Beispiel zwischen 81 % und 88 %. Für das Produktseg-

ment in Abbildung 5.5 sind in der Montage Lerneffekte von 87 % aufgetreten, in den hochautomatisierten Bereichen wie dem Presswerk belaufen sich die Lernraten auf 94 %, im Karosseriebau auf 91 % und in der Lackiererei auf 96 %.

Die Grenzwertbetrachtung logarithmischer Kurvenverläufe nach dem Lerngesetz nach Gleichung (3.1) in Kapitel 3.4 kommt zu folgenden Ergebnissen:

- Für  $x \rightarrow 0$ ,  $y \rightarrow \infty$
- Für  $x \rightarrow \infty$ ,  $y \rightarrow \text{Grenzwert } c$



**Abbildung 5.6: Potentialableitung aus Lerneffekten**

Übertragen auf die Lernkurvenmodelle erreichen die Kurven wie am praktischen Beispiel zu sehen, bei einer bestimmten kumulierten Stückzahl ihren Grenzwert, ab dem keine Lerneffekte mehr zu verzeichnen sind.

In Abbildung 5.6 liegt dieser Grenzwert bei

$$y = c \tag{5.2}$$

Dieses Phänomen wird nun genutzt, um das Potential aus den Lernkurvenverläufen der Vergangenheit abzuleiten. Das Potential errechnet sich aus dem Integral zwischen den beiden Kurven (3.1) und (5.2):

$$\int_1^n [a \times x^b - c] \frac{dy}{dx} = \left[ a \times \frac{x^{b+1}}{b+1} - cx \right]_1^n \tag{5.3}$$

Für die Strategieableitung im Rahmen einer Strukturplanung zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit ist das Ziel, Konzepte zu entwickeln, mit denen das Leistungspotential von Beginn an, das heißt beim Start der Serienproduktion auf einem höheren Niveau beginnt. Folglich sind die Zielsetzungen übertragen auf das Lernkurvenphänomen niedrigere Startwerte in hpu sowie ein flacherer Lernkurvenverlauf im Gesamten.

Neben der beschriebenen Potentialableitung aus der Vergangenheit dienen die analysierten Lernkurven aus Vergangenheitswerten auch der Trendextrapolation der Leistungsentwicklung in die Zukunft. Die Leistungssteigerungen sind auf kontinuierliche Verbesserungsmaßnahmen im Bereich der Produkte, Technologie und Organisation zurückzuführen und bilden sich in der Entwicklung der Lernkurven ab. Vor diesem Hintergrund dienen die Lernkurven in der Systematik auch als Modell zur Abbildung kontinuierlicher Veränderungen und werden zur Prognose und Kalkulation des zeitabhängigen Ressourcenbedarfs in die Zukunft herangezogen.

### **5.3 Terminierung und Synchronisation der Veränderungstreiber mit dem Technologiekalender**

Während die kontinuierlichen Veränderungen über die Lernkurvenmodelle bereits abgebildet sind, sind nun die diskontinuierlichen Veränderungen in die Methode einzuführen. Diskontinuierliche Veränderungen haben tiefgreifende strukturelle Auswirkungen auf die Fabriken und bedürfen unter diesem Gesichtspunkt einer langfristigen Planung und Koordination. In der Regel substituieren oder erweitern sie bestehende Strukturen und müssen vor diesem Hintergrund hinsichtlich ihrer Wirkungen und Abhängigkeiten über die Skalen der Fabriken hinweg untersucht werden.

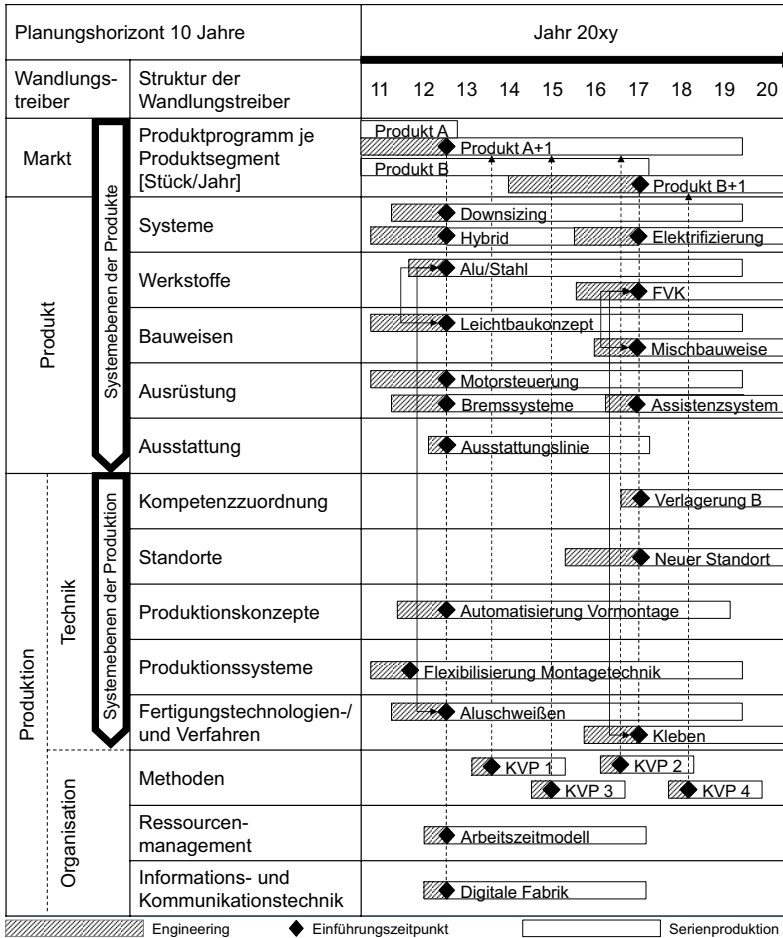
Ihre zeitliche Terminierung und Synchronisation erfolgt mit dem Technologiekalender wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben. Der Aufbau des Technologiekalenders enthält die beiden Dimensionen der Wandlungstreiber und der zeitlichen Skalen wie in Abbildung 5.7 dargestellt.

Der Technologiekalender dient der zeitlichen Synchronisation und Harmonisierung der Hauptwandlungstreiber Markt, Produkt und Produktion. Diese sind in ihrer systemischen Struktur produkt- und produktionsseitig weiter untergliedert und werden in ihrer Ausprägung im Technologiekalender spezifiziert.

Auf Grundlage des in Kapitel 3.3 beschriebenen Regelkreisverhaltens der Strukturadaption ist der Planungshorizont im Technologiekalender auf zehn Jahre Reichweite anzusetzen. Diese setzen sich entsprechend des dargestellten Regelverhaltens aus den in der jeweiligen Branche vorherrschenden Produktlebenszyklen - von beispielsweise im Automobilbau sieben



Jahren - und dem Verlauf von Planungs- und Anlaufprozessen neuer technischer Konzepte von ein bis drei Jahren zusammen. Daher werden im Technologiekalender die geplanten konzeptionellen Veränderungen in einem zeitlichen Verlauf von zehn Jahren erfasst.



**Abbildung 5.7: Aufbau des Technologiekalenders zur Synchronisation der Wandlungstreiber**

Zur Terminierung ist der jeweilige Einführungszeitpunkt der Technologien in der Serienproduktion ausschlaggebend und zeitlich aufgrund der Abhängigkeiten nicht zu verschieben. Folglich wird im Technologiekalender der Zeitpunkt der Implementierung als unveränderlich eingetragen sowie die vorgelagerte Phase des Engineerings und die Lebensdauer des

Technologieeinsatzes in der Serienproduktion dargestellt. Zusätzlich werden die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Wandlungsbereichen der Markt-, Produkt- und Produktionsentwicklung visualisiert.

Von Seiten des Marktes wird das Produktprogramm sowohl qualitativ als auch quantitativ mit seinen Mengengerüsten zeitlich in den Technologiekalender integriert. Im Bereich der Marktentwicklung werden sowohl die Restlaufzeiten bereits eingeführter Produkte, als auch die Einführung der jeweiligen Nachfolgeprodukte sowie völlig neue Produktvarianten dargestellt.

Mit der Einführung neuer Produkte werden zeitgleich neue Produkttechnologien eingeführt. Diese können sich auf die in den Produkten eingesetzten Systeme beziehen, auf die Werkstoffe und Bauweisen sowie die Ausrüstung und Ausstattung.

In der Regel sind für neue Produkttechnologien auch neue Produktionstechnologien erforderlich, die technisch und organisatorisch in der Produktion zu realisieren sind. Daher wird der Bereich der Produktionsentwicklung in eine technische und organisatorische Einheit unterteilt.

Auf Seiten der Technik ist die Zuordnung von Kompetenzen zu Standorten innerhalb des Produktionsnetzwerks ein maßgeblicher Wandlungstreiber. Aufgrund der Modellierung des Produktionsnetzwerks unter Berücksichtigung der Eigenfertigungs- als auch der Fremdfertigungsstandorte in Form einer virtuellen Fabrik, ist sowohl die Verlagerung von Kompetenzen innerhalb der eigenen Produktionsstandorte als auch der strategische Stellhebel der Fremdvergabe im Technologiekalender über den Veränderungstreiber der Kompetenzzuordnung abgedeckt. Des Weiteren ist bei Standortveränderungen sowohl die Erweiterung als auch die Reduktion der Anzahl an Produktionsstandorten enthalten. In den jeweiligen technologischen Segmenten der Fabriken ist zudem eine Veränderung der Produktionskonzepte sowie ihrer korrelierenden Produktionssysteme zu berücksichtigen. Auf Prozessebene ist die Einführung neuer Fertigungstechnologien und -verfahren vorzusehen.

Im Bereich der Produktionsorganisation sind Veränderungen der Methoden in Form von kontinuierlichen Verbesserungen und Rationalisierungsansätzen zu berücksichtigen. Ihre Wirkung auf die Struktur der Produktion ist bereits über die Lernkurven modelliert, ihre zeitliche Terminierung hiermit über den Technologiekalender. Abschließend werden Veränderungen des Ressourcenmanagements sowie der Informations- und Kommunikationssysteme in die Betrachtung der Strukturanpassung im Technologiekalender einbezogen.

In Abbildung 5.7 sind an einem fiktiven Beispiel aus der Automobilindustrie exemplarisch einige Zusammenhänge visualisiert dargestellt. Dieses Beispiel soll zur Erläuterung der Zu-

sammenhänge und Wirkbeziehungen zwischen den jeweiligen Entwicklungen beitragen. Mit der Einführung des Nachfolgeprodukts A+1 im Jahr 2012 werden Downsizingkonzepte sowie hybride Antriebe in den Systemen eingesetzt. Vor diesem Hintergrund sind neue Materialkonzepte aus der Kombination Aluminium und Stahl zur Gewichtsreduzierung einzusetzen, was eine neue konstruktive Leichtbauweise erfordert. Zur technischen Realisierung ist ein neues Aluminiumschweißverfahren im Karosseriebau einzusetzen, dessen Prozess über die Digitale Fabrik abgesichert wird. Aufgrund eines veränderten Ressourcenbedarfs ist zudem das Arbeitszeitmodell anzupassen.

Aufgrund der Komplexität wird der Technologiekalender jeweils separat für die einzelnen Produktsegmente aufgebaut und in seinen Abhängigkeiten visualisiert. Die Wandlungstreiber aus dem Markt, der Produkte und der Produktion werden hinsichtlich ihrer Einführungszeitpunkte terminiert sowie in ihren Wirkungen und Abhängigkeiten über die Skalen der gesamten Fabriken und ihrer Vernetzung zeitlich synchronisiert. Der Technologiekalender dient als maßgebliche Eingangsgröße für die strukturellen Veränderungen der Fabriken und ist somit ein entscheidender Baustein für die strategische Strukturplanungssystematik. Für die technischen Konzepte sind die kapazitiven Auswirkungen auf die tpu und hpu in weiterführenderen Studien zu untersuchen, auf deren Basis der zukünftige Ressourcenbedarf kalkuliert werden kann.

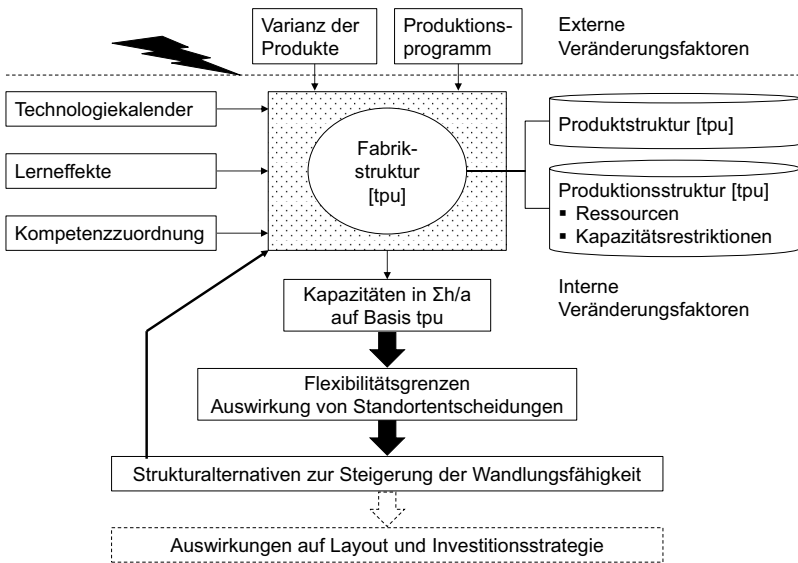
#### **5.4 Variation der Fabrikstrukturen**

Im nächsten Planungsschritt sind die Fabrikstrukturen durch die identifizierten Wandlungstreiber zu dynamisieren. Hierzu sind Planungsphase 1, in der die bestehenden Strukturen charakterisiert wurden, mit Planungsphase 2, in der die Veränderungstreiber in ihrem zeitlichen Horizont terminiert wurden, zu verknüpfen. Das Konzept zur Variation der Fabrikstrukturen umfasst somit die externen und internen Veränderungsfaktoren, welche auf die existierende Fabrikstruktur einwirken und die Veränderungen in der kapazitiven und technologischen Struktur der vernetzten Produktion verursachen (Abbildung 5.8).

Die relevanten externen Veränderungen sind im Wesentlichen auf die Entwicklung der Märkte zurückzuführen und spiegeln sich quantitativ in Form der Mengengerüste im Produktionsprogramm wieder, das sich aus der Varianz des zu produzierenden Produktprogramms zusammensetzt. Zu berücksichtigen ist somit von Seiten der Auftragsentwicklung und -zusammensetzung der zu produzierende Produktmix in Bezug auf die am Markt angebotene Produkt- und Ausstattungsvarianz.

Interne Veränderungsfaktoren beziehen sich auf die Stellhebel der produzierenden Unternehmen, die zwar von ihnen mit zu gestalten sind, aber dennoch tiefgreifende Auswirkungen

auf die innerbetrieblichen Strukturen haben. Die diskontinuierlichen Veränderungen in Form neuer technischer und organisatorischer Konzepte sind in ihrer zeitlichen Terminierung im Technologiekalender enthalten, der eine essentielle Eingangsgröße zur Dynamisierung der Fabrikstrukturen ist. Hierzu sind die enthaltenen konzeptionellen Veränderungen hinsichtlich ihrer kapazitiven Auswirkungen auf die tpu zu untersuchen. Des Weiteren führen Lerneffekte zu Veränderungen im Leistungspotential der Fabriken und sind folglich als Veränderungstreiber in das Konzept mit einzubeziehen. Von wesentlicher struktureller Bedeutung ist die Zuordnung von Kompetenzen zu Standorten. Dies bezieht sich sowohl auf die Zuweisung von Produkten und Fertigungsaufgaben zu Standorten als auch auf die Zuweisung von Technologien und funktionalen Segmenten entlang der Prozesskette. Alle beschriebenen Wandlungstreiber sind als Eingangsgröße zur Variation der Fabrikstrukturen zu berücksichtigen und hinsichtlich ihrer kapazitiven technologischen Strukturwirkung zu untersuchen.



**Abbildung 5.8: Konzeption zur Variation der Fabrikstrukturen**

Die Fabrikstruktur selbst besteht aus den Anforderungen der Produktstruktur in tpu und der verfügbaren Ressourcen der Produktionsstruktur in tpu, in welcher die Standortprofile und Restriktionen enthalten sind. Die Fabrikstruktur bildet somit die Ist-Konfiguration des Produktionsnetzwerks mit allen Produkten und Ressourcen ab, die nun durch den Einfluss der Veränderungen dynamisiert wird.

Strukturveränderungen wie sie durch die beschriebenen Wandlungstreiber erforderlich sind, haben technologische und kapazitive Wirkungen. Sowohl die Varianz der Produkte, die technischen Konzepte im Technologiekalender als auch die Lerneffekte sind in ihrer Wirkung wie die Fabrikstruktur selbst in tpu modelliert. Durch die Kopplung mit den Mengengerüsten und der Zuordnung der Kompetenzen wird die Wirkungskette quantitativ in den kapazitiven Verschiebungen der jeweiligen Standorte gemessen. Die Kapazitätswirkung steht in Stunden pro Jahr auf Basis der tpu, also der Summe der direkten und indirekten Stunden entlang der Prozesskette, und der Mengengerüste für den Leistungsbedarf der Fabriken vor dem Hintergrund der Veränderungen.

Aufgrund der quantitativen Wirkungsbeschreibung in Kapazitätsstunden pro Jahr werden die Flexibilitätsgrenzen der Standorte durch die Variation erfassbar und die Auswirkung von Standortentscheidungen quantifiziert. Durch die Dynamisierung entsprechend dieser Konzeption ist aus den Ergebnissen abzuleiten, wann eine Strukturanpassung zu erfolgen hat, welche Bereiche und Standorte davon betroffen sind und in welchem Maß diese quantitativ durchzuführen ist.

Auf dieser Basis sind dann Standortalternativen zur Steigerung des Flexibilitäts- und Wandlungspotentials zu entwickeln, deren Umsetzung wiederum eine Veränderung der Fabrikstrukturen auslöst. Für diese sind dann abschließend die Auswirkungen auf die Investitionsstrategie zu untersuchen und die Layoutgestaltung im Rahmen einer Feinplanung anzupassen. Dies ist allerdings nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit.

Für die Automatisierung dieses Planungsschritts sprechen im Wesentlichen zwei Gründe. Zum einen erleichtert ein Planungstool die Handhabung der Datenkomplexität und Zusammenhänge, zum anderen ermöglicht eine automatisierte Planungsunterstützung die schnelle und reproduzierbare Bewertung von alternativen Konzepten. Ein Planungswerkzeug dient somit als Versuchslabor für eine szenarienbasierte strategische Strukturplanung. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden ein Planungswerkzeug konzipiert, mit dem die Dynamisierung der Fabrikstrukturen automatisiert durchgeführt und bewertet werden kann. Hierzu werden zuerst die Prämissen und Wirkungszusammenhänge zwischen den Wandlungstreibern und der Fabrikstruktur beschrieben. In einem zweiten Schritt erfolgt dann die Konzeption des Planungstools, das anschließend in eine Softwareumgebung eingebunden wird.

#### **5.4.1 Prämissen und Wirkbeziehungen zur Dynamisierung des Fabrikstrukturmodells**

Zur Variation des Fabrikstrukturmodells sind zunächst die Zusammenhänge und Wirkungsketten zu beschreiben, welche die Wandlungstreiber in den Fabrikstrukturen auslösen. Die zeitliche Dimension ist bereits mit dem Technologiekalender abgedeckt, nun muss die kapazitive Wirkung auf die Fabrikstruktur und ihr Leistungspotential in Betracht gezogen werden.

Wirkungslinien auf die Fabrikstruktur		Prozesskette													
		Engineering			Serienproduktion					Indirekt					
Wandlungs- treiber	Struktur der Wandlungstreiber	Entwicklung	Planung	Vorseite/ Prototypenbau	Werkzeugbau	Beschaffung	Teilefertigung	Komponenten- fertigung	Oberfläche	Systemintegration/ Montage	Finish	Qualität	Logistik	Instandhaltung	
		Markt	Mengengerüst/ Produktionsprogramm					●	○	●	●	●	●	○	●
Ausstattungsvarianz						●		○		●			●		
Produkt	Systemebenen der Produkte	Neue Produkte	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	○
		Systeme	●	●	●		●		●		●	●	●	●	○
		Werkstoffe			●	●	●	●	●	●			●		
		Bauweisen	●	●	●				●		○		●		
		Ausrüstung	●	●	●		●				●		●	●	○
		Ausstattung	●	●	○		●				●		●	●	○
Produktion	Systemebenen der Produktion	Kompetenzzuordnung	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Standorte	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Produktionskonzepte		●	●			●	●	●	●		●		
		Produktionssysteme		●	●			●	●	●	●		●		
		Fertigungstechnologien-/ und verfahren		●	●			●	●	●	●		●		
Organisation		Methoden		○				●	●	●	●				
		Ressourcen- management						●	●	●	●	●		○	
		Informations- und Kommunikationstechnik	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

● Starke Wirkung      ○ Schwache Wirkung

**Abbildung 5.9: Wirkungsmatrix zur Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen Wandlungstreibern und den Fabrikstrukturen**

Zwei Grundannahmen gelten dazu für alle Wandlungstreiber und alle technologischen Segmente:

- Erstens werden für die Verschiebung von Fertigungsaufgaben, Technologien und Produkten keine Leistungsunterschiede zwischen Standorten angenommen. Dies gilt sowohl für die Standorte der Eigenfertigung als auch für die virtuelle Fabrik der Fremdfertigung.
- Zweitens gilt für die technischen Konzepte, die im Technologiekalender enthalten sind, folgendes: Veränderungen konzeptioneller Art müssen zur detaillierten Beschreibung ihrer Wirkung auf die tpu im Rahmen weiterer Studien (Feasibility) untersucht werden. Für die weitere Vorgehensweise wird daher in erster Näherung angenommen, dass die Substitution einer reifen Technologie durch eine neue aus Gründen der Wirtschaftlichkeit in ihrem Gesamtaufwand nicht teurer wird. Dies gilt sowohl für Veränderungen im Bereich der Produkte als auch für Veränderungen in der Produktion.

Zur Beschreibung der weiteren Wirkungslinien ist eine Wirkungsmatrix zu erstellen, in der die Wandlungstreiber auf der einen Seite und die Prozesskette mit ihren technologisch funktionalen Segmenten auf der anderen Seite aufgetragen sind (Abbildung 5.9).

Die Zusammenhänge sind in der Matrix für die identifizierten Wandlungstreiber qualitativ beschrieben. Veränderungen aus dem Markt heraus wirken sich in der gesamten Kette der Serienproduktion aus. Die Mengengerüste zeigen ihre Wirkung von der Teilefertigung über die Komponentenfertigung bis in die Systemintegration und Montage hinein, während sich die Ausstattungsvarianz, wie im Rahmen der Varianzanalyse bestätigt, vornehmlich in den Montagebereichen kapazitiv auswirkt. Diese Zusammenhänge werden in der Form der Konzeption des Planungswerkzeugs zugrunde gelegt.

Die Bewertung konzeptioneller Änderungen der Produkt- und Produktionstechnologien sowie der Organisation ist in groben Zusammenhängen dargestellt, muss jedoch für den konkreten Fall in der Praxis in weiteren Studien untersucht werden.

Die Grundannahmen sowie die Wirkungsmatrix zur Verkettung der Veränderungstreiber mit den funktionalen Segmenten der Prozesskette ist eine Voraussetzung für die Konzeption des Planungswerkzeugs zur Variation der Fabrikstrukturen.

#### **5.4.2 Konzeption eines Werkzeugs zur Variation des Fabrikstrukturmodells**

Die Konzeption des Planungswerkzeugs wird im Folgenden in drei Schritten beschrieben. Zuerst wird die EDV-Architektur des Tools dargestellt, dann werden die wesentlichen Ele-

mente in Bezug auf die Eingangsgrößen, die Datenbasis und die Ausgangsgrößen beschrieben sowie abschließend die Umsetzung des Planungstools im FactoryVariationPlanner aufgezeigt.

### 5.4.2.1 EDV-Architektur des Planungswerkzeugs

Der grundlegende Aufbau des EDV-Systems umfasst drei wesentliche Bausteine, erstens die Datenbasis, zweitens die Benutzeroberfläche und drittens die Schnittstelle zwischen den beiden, über die die Daten verarbeitet und die Operationen ausgeführt werden (Abbildung 5.10).

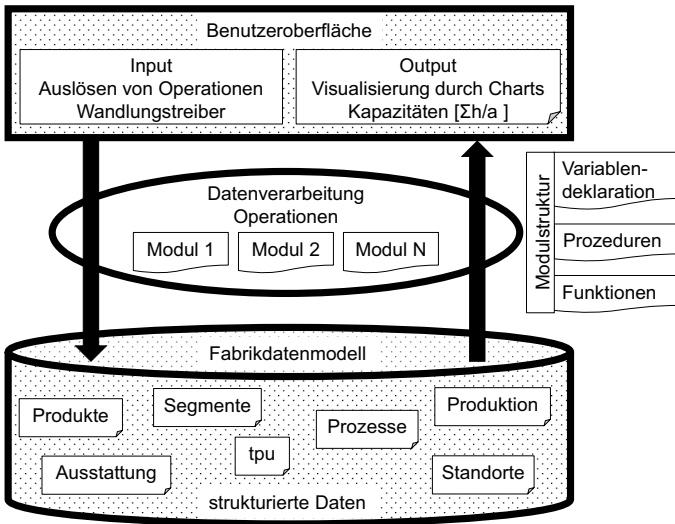


Abbildung 5.10: EDV-System zur Variation der Fabrikstrukturen

Der zentrale Baustein des EDV-Systems bildet die Datenbasis, in der die Daten des Fabrikstrukturmodells gespeichert und verwaltet werden. Die Daten umfassen die Produkt- und Produktionsstruktur, die für die jeweiligen Standorte, Segmente, Prozesse, Produkt- und Ausstattungsvarianten in tpu modelliert sind und in Form einer strukturierten Datenbasis tabellarisch in der EDV-Architektur des Planungswerkzeugs gespeichert werden. Veränderungen in Bezug auf eine Aktualisierung, Erweiterung oder Reduktion des Fabrikmodells um neue Standorte, Produkte oder Technologien erfolgen über eine Anpassung der Datenbasis in den jeweiligen Tabellen.

Der zweite Baustein des Planungstools ist die Benutzeroberfläche, über die der Bediener des Planungstools die Modifikation und Verarbeitung der Daten auslösen kann. Auf der Be-



nutzeroberfläche sind die Inputgrößen in Form der Wandlungstreiber hinterlegt, die für einen Simulationsdurchlauf durch den Benutzer in ihrer Ausprägung zu variieren sind. Neben der Konfiguration durch die Wandlungstreiber sind im Rahmen der Eingangsgrößen zudem die zu berücksichtigenden Parameter und Sichten für die Simulation festzulegen.

Die Schnittstelle zwischen den Inputgrößen und der Datenbasis erfolgt über eine VBA-Programmierung, in der die jeweiligen Operationen ausgelöst und die Daten automatisiert verarbeitet werden. Die VBA-Programmierung ist modular aufgebaut, so dass eine Erweiterung um weitere Bestandteile problemlos möglich ist. Die Module sind in ihrer Grundstruktur jeweils unabhängig voneinander und enthalten die zur Ausführung ihrer Operation erforderlichen Variablen, Prozeduren und Funktionen. Folglich können jeweils einzelne Bestandteile der Simulation durch den Benutzer ausgeführt werden.

Die Ausgabe der Simulationsergebnisse erfolgt auf der Benutzeroberfläche in Form von Kapazitätsstunden pro Jahr auf Basis der tpu. Die Ausgabe erfolgt tabellarisch und visualisiert in verschiedenen Charts, die über eine VBA-Programmierung erstellt werden.

Das EDV-System wird mit seinen Bestandteilen in eine MICROSOFT Excel® Umgebung integriert und in Form eines anwenderfreundlichen Softwarewerkzeugs als FactoryVariation-Planner zur Dynamisierung des Fabrikstrukturmodells im Rahmen der Planungssystematik herangezogen.

#### **5.4.2.2 Realisierung des Werkzeugs zur Variation der Fabrikstrukturen im FactoryVariationPlanner**

Auf Basis der Beschreibung der Grundarchitektur des Softwaretools erfolgt im Weiteren die Detaillierung der einzelnen Bausteine, durch welche die Variation der Strukturen quantitativ durchgeführt wird und deren Wirkungszusammenhänge berechnet werden.

Die Grundlage des Planungswerkzeugs bildet nach Abbildung 5.11 die Datenbasis, die im Rahmen der Analyse der Produktstrukturen und ihrer Varianz sowie der Produktionsstrukturen in tpu erstellt wurde. In einem ersten Schritt werden die beiden Teilmodelle mit ihren jeweiligen Datenbestandteilen zu einem Fabrikmodell in tpu zusammengeführt. Mit diesem Schritt werden die Aufwendungen, die zur Herstellung der Produkte in seiner Produkt- und Ausstattungsvarianz erforderlich sind, entlang der gesamten Prozesskette inklusive ihrer indirekten Bereiche beschrieben. Das Fabrikmodell bildet in seiner Ausgangslage die bestehende Konfiguration des Produktionsnetzwerks ab und weist die Restriktionen der Standorte in Form kapazitiver Grenzen auf. Durch diesen Integrationsschritt der Teilmodelle zu einem Gesamtmodell ist es möglich, einzelne Datenbestandteile aus der Perspektive der Produkte und der Produktion in den Teilmodellen anzupassen und automatisiert im Fabrikmodell zu

aktualisieren. Somit wird die Erweiterbarkeit und Fähigkeit zur Aktualisierung der Datenbasis im Planungswerkzeug sichergestellt.

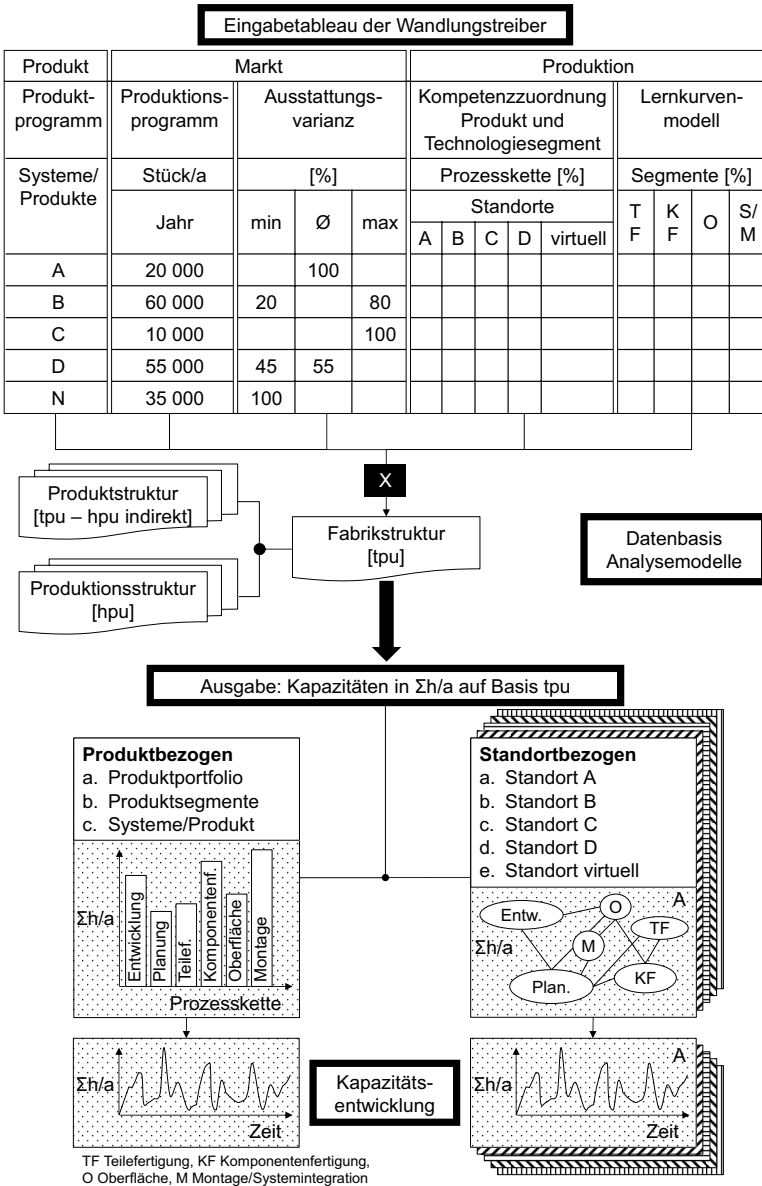


Abbildung 5.11: Planungswerkzeug zur Variation der Fabrikstrukturen

Die Variation des Fabrikmodells erfolgt über ein Eingabetableau, in dem die Hauptwandlungstreiber Markt, Produkt und Produktion vorgesehen sind. In diesem Tableau kann die Konfiguration und der Betrachtungsgegenstand für die Dynamisierung durch den Benutzer festgelegt werden.

Von Seiten des Wandlungstreibers der Produkte ist das aktuelle und geplante Produktprogramm in einem Planungszeitraum von zehn Jahren im Voraus hinterlegt. Dieses kann entweder durch die Integration neuer Produkte in die Datenbasis oder näherungsweise auf Grundlage bereits enthaltener Vergleichsprodukte erweitert werden.

Auf Basis des vorgesehenen Produktprogramms in seiner Varianz ist auf Seiten des Marktes das aus der langfristigen Markt- und Absatzplanung geplante Produktionsprogramm integriert, das hinsichtlich seiner Mengengerüste durch den Benutzer manipuliert werden kann. Optional kann im Rahmen eines Simulationsdurchlaufs entweder auf die Planzahlen zurückgegriffen oder neue Mengengerüste zusammengestellt werden. Die marktseitige Wahl verschiedener Ausstattungsvarianten erfolgt durch eine prozentuale Aufteilung des Produktionsprogramms in Minimal-, Durchschnitts- und Maximalausstattung der Produkte.

Von Seiten der Produktion sind die beiden wesentlichen Wandlungstreiber der Kompetenzzuordnung und der Lerneffekte in der Eingabemaske zur Variation enthalten. Die Zuordnung von Kompetenzen erfolgt sowohl für die Produkte als auch für die funktionalen und technologischen Segmente der Prozesskette. Für jedes Produkt werden die funktionalen Segmente der Fabriken auf prozentualer Basis den vorgesehenen Standorten A bis D der Eigenfertigung oder dem virtuellen Standort der Fremdfertigung zugewiesen. Mit diesem Stellhebel kann somit das gesamte Produktionsnetzwerk rekonfiguriert und in seiner Wirkung quantitativ bewertet werden. Die Plankonfiguration ist nach derzeitigem Planungsstand hinterlegt und kann optional verändert werden.

Des Weiteren sind zur Berücksichtigung kontinuierlicher Veränderungen in den Fabriken Lernkurvenmodelle für die jeweiligen Produktsegmente für den direkten Bereich der Produktion auf Basis der Lernkurvenanalyse hinterlegt. Durch den Benutzer kann gewählt werden, ob diese in die Simulation einbezogen werden sollen. Die Lernraten sind aus den Ergebnissen der Analyse prozentual hinterlegt, sind jedoch für den Benutzer variabel einstellbar und an veränderte Bedingungen anzupassen.

Für die Variation der Fabrikstrukturen gelten die Prämissen, die in der Wirkungsmatrix und den Grundannahmen festgelegt sind. Vor diesem Hintergrund wirken sich die Veränderung der Mengengerüste in den volumenabhängigen technologischen Segmenten der Produktion aus, also der Teilefertigung, Komponentenfertigung, Oberfläche, Systemintegration und dem Finish. Die der Produktion vorgelagerten Funktionsbereiche des Engineerings hängen vom

jeweiligen Laufzeitvolumen ab und werden über die Produktlebensdauer auf Jahresbasis umgerechnet. Diese Zahlen sind im Stückzahlprogramm für den Planungshorizont von zehn Jahren hinterlegt. Die Variation der Ausstattung betrifft vornehmlich die Montagen, alle anderen Wandlungstreiber betreffen die gesamte Prozesskette der Fabrikstruktur. Diese Zusammenhänge sind über die Variablendeklaration in Bezug auf fixe und variable Größen in Abhängigkeit der Wandlungstreiber in den Modulen der VBA-Programmierung umgesetzt.

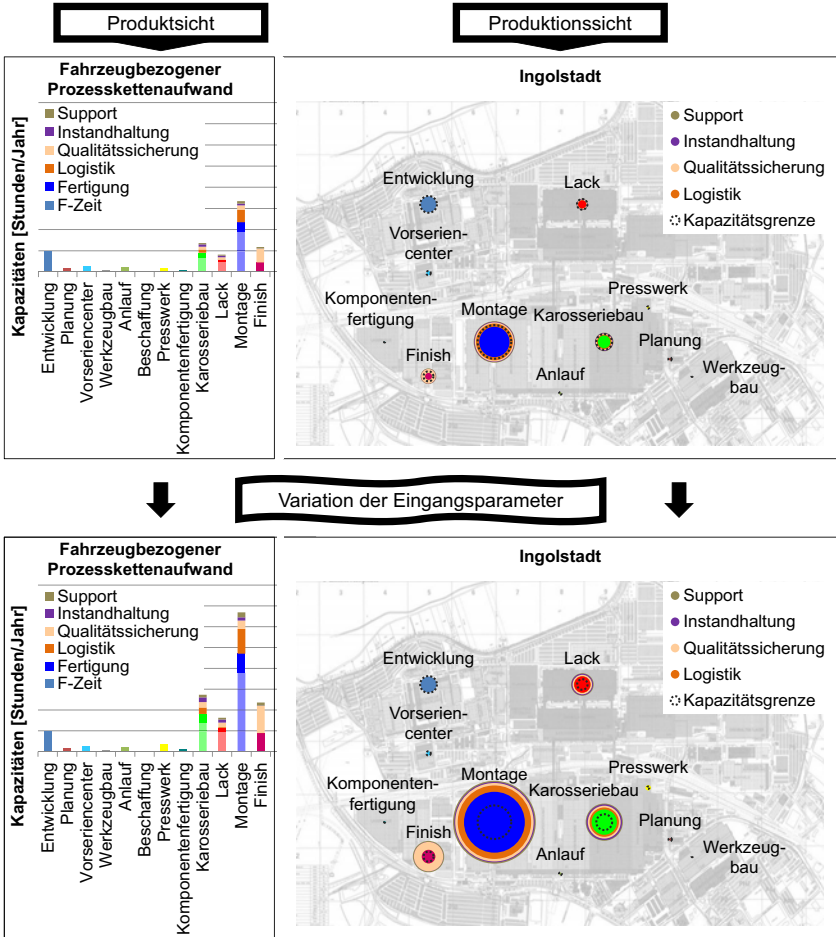


Abbildung 5.12: Visualisierung der Veränderungen im FactoryVariationPlanner

Über den in der VBA-Programmierung hinterlegten Algorithmus werden aus der Kombination der Eingangsgrößen mit dem Fabrikmodell die Kapazitäten berechnet. Diese werden im

Ausgabetableau des Planungstools in Summe der Stunden pro Jahr auf Basis der tpu für die jeweiligen technologischen Segmente der Prozesskette ausgegeben. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt produktbezogen auf den Ebenen des gesamten Produktportfolios, einzelner Produktsegmente oder für einzelne Systeme für die Kapazitätsaufwendungen entlang der Prozesskette. Produktionsbezogen werden die Kapazitäten der funktionalen Segmente auf Jahresbasis für die verschiedenen Standorte ausgegeben und in Form von Technologieknoten auf den Werksplänen der Standorte visualisiert. Die zeitliche Entwicklung der Kapazitäten pro Jahr über den Zeithorizont von zehn Jahren schließt die Ausgabe produkt- und standortbezogen ab und dient als Report über den Zeitverlauf.

Exemplarisch sind in Abbildung 5.12 die Ergebnisse aus einer Variation der Eingangsparameter aus Produkt- und Produktionssicht für einen Standort visualisiert, wie sie automatisiert aus der Dynamisierung im FactoryVariationPlanner ausgegeben werden. Aus Sicht der Produkte wird im praktischen Beispiel der produktbezogene Prozesskettenaufwand in Kapazitätsstunden pro Jahr für die betrachteten Produktsegmente berechnet und ausgegeben, aus Sicht der Produktion erfolgt die Ausgabe für die einzelnen Standorte. Auf den Werksplänen werden die funktionalen Segmente entsprechend ihrer räumlichen Lage in Knoten visualisiert, deren Durchmesser das Maß für die Kapazitäten pro Jahr darstellen. Die Kapazitätsgrenzen aufgrund der Standortrestriktionen sind gestrichelt eingezeichnet.

Damit werden die Wirkungsmechanismen, die durch Einwirkung der Veränderungstreiber auf die Fabrikstrukturen ausgelöst werden, in ihren kapazitiven Dimensionen entlang der gesamten Prozesskette abgebildet. Aus den Ergebnissen ist somit der Anpassungsbedarf der Strukturen abzuleiten und zeitlich zu terminieren. Das Planungstool dient im Weiteren als Versuchslabor für die Untersuchung und Bewertung verschiedener Szenarien, die sich aus den Wandlungstreibern ergeben.

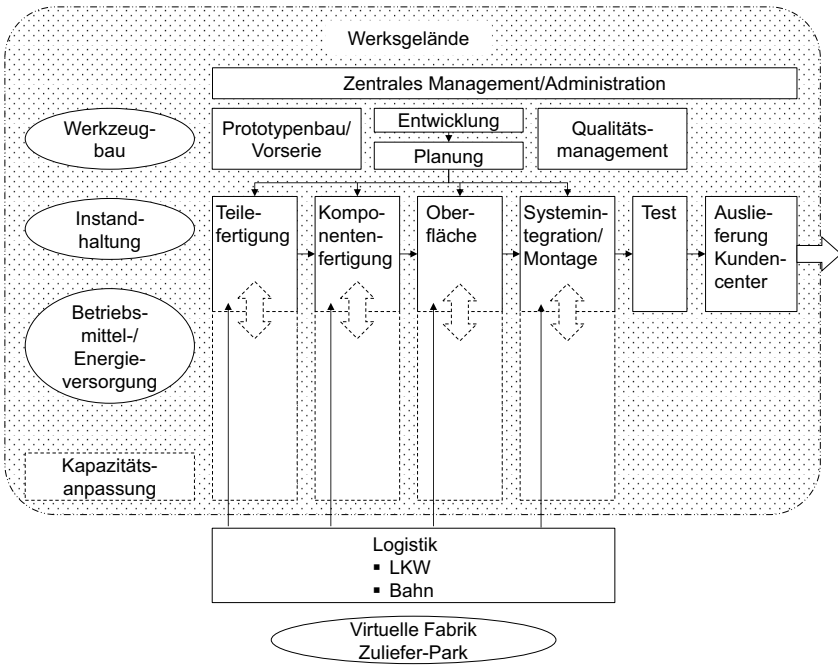
Die technologischen Wirkungsketten sind in weiterführenden Studien zu bewerten und über eine Anpassung der Datenbasis in tpu in das Planungstool zu integrieren.

## **5.5 Grundmodell einer idealen Fabrikstruktur**

Aus dem Anpassungsbedarf ergibt sich die Notwendigkeit, die Fabrikstrukturen mit ihren Standortprofilen und Kapazitäten anzupassen und Maßnahmen zur Flexibilisierung einzuleiten. Dazu sind alternative Konzepte zu entwickeln, mit denen sich die strukturelle Adaptionfähigkeit der Produktion erzielen lässt. In der Fabrikplanung ist zuerst eine restriktionslose Idealplanung durchzuführen, welche die objektiven Maßstäbe [Kettner et al. 1984] für die real umsetzbaren Alternativen setzt. Dies soll im Folgenden auf die systematische Strukturplanung übertragen werden. Vor diesem Hintergrund ist ein Grundmodell für die Idealstruktur

einer Fabrik zu entwickeln, welche die Erfordernisse für eine strukturelle Wandlungsfähigkeit erfüllt und sich somit in Bezug auf ihre Standortprofile und Kapazitäten so schnell wie möglich unter minimalen Aufwand anpassen lässt.

Der Konzeption einer Idealstruktur wird zugrunde gelegt, dass alle funktionalen und technologischen Segmente mit unbegrenzten Kapazitäten für das gesamte Produktprogramm an einem Standort zur Verfügung stehen. Das Produktionsnetzwerk ist somit als ein Knoten dargestellt, der in seiner Struktur auf Standortebene zu beschreiben ist. Anzustreben sind kurze Wege, um eine schnelle Reaktionsfähigkeit in den technischen und organisatorischen Abläufen zu erzielen. In Abbildung 5.13 sind die Anforderungen der Wandlungsfähigkeit in Form eines logischen Grundmodells für eine ideale Fabrikstruktur umgesetzt.



**Abbildung 5.13: Grundmodell einer Idealstruktur für eine Fabrik**

Die Wertschöpfungskette der Fabrik umfasst die Segmente der Teilerfertigung, Komponentenfertigung, Oberfläche, Systemintegration und einen abschließenden Prüf- und Testbereich. Diese haben in ihrer logischen Anordnung bis zur Kundenauslieferung unter dem Aspekt kurzer und einfacher Wege dem Materialfluss zu folgen. Das Auftragsmanagement verläuft entgegen dem Materialfluss. Die Materialversorgung erfolgt über die Logistik aus dem Zulieferpark einer virtuellen Fabrik in unmittelbarer Nähe zum Werksgelände direkt in die

Technologiesegmente hinein. Die der Produktion vorgelagerten Bereiche des Engineerings sind an zentraler Stelle in organisatorischer und räumlicher Nähe zur Produktion anzusiedeln. Die Prototypenfertigung ist als Stufe zwischen der Entwicklung und der Produktion nahe dieser beiden Bereiche und der Peripherie anzuordnen. Das Qualitätsmanagement muss die in der Konstruktion festgelegten Toleranz- und Maßsysteme für die Produktherstellung in der Produktion gewährleisten. Das Höchstmaß an Qualität ist im Test- und Prüfbereich vor Auslieferung zum Kunden sicherzustellen. Vor diesem Hintergrund erfolgt die logische Anordnung des Qualitätsmanagements neben der Entwicklung und Produktionsendstufe vor Kundenauslieferung. Die peripheren Bereiche sind am Rande des Werksgeländes unterzubringen. Der Werkzeugbau ist in Nähe zu den vorgelagerten Prozessen zu platzieren, um einen kurzen Informationsfluss zum Prototypenbau, der Konstruktion und dem Qualitätswesen zu gewährleisten. Die Werkzeug-, Betriebsmittel- und Medienversorgung sowie die Instandhaltung sind in der Peripherie nahe der Produktion anzuordnen.

Die Standortstruktur ist so auszulegen, dass wie in Abbildung 5.13 dargestellt, eine Anpassung der Kapazitäten in Bezug auf die Ressourcen Maschinen und Anlagen, Personal sowie Fläche möglich ist. Die Atmungsfähigkeit des Werks ist sowohl für die Erweiterung als auch die Reduzierung der Kapazitäten vorzusehen.

Ausgehend von diesem Idealmodell einer wandlungsfähigen Fabrikstruktur, die in einem Knoten zusammengeführt ist, sind nun strategische Alternativen für ein Realkonzept zu entwickeln, das auf eine vernetzte Produktion mit mehreren Standorten anzuwenden ist.

## **5.6 Konzeption alternativer Strukturkonzepte**

Die Methodik zur Konzeption alternativer Strukturkonzepte wird in fünf Planungsschritten unterteilt. Zuerst sind Grundüberlegungen zur Strukturierung von Fabriken vor dem Hintergrund der Zielkriterien unter optimalen Bedingungen anzustellen. Anschließend sind die grundlegenden strategischen Entwicklungsmöglichkeiten für eine Fabrikstruktur darzulegen und hinsichtlich ihrer strategischen Bedeutung und Wirkung auf die Wandlungstreiber zu bewerten. Auf Basis dieser Entwicklungslinien sind dann Partialmodelle für die technologischen Segmente zu erstellen, die dann abschließend zu alternativen Strukturmodellen zusammenzuführen sind.

### **5.6.1 Grundprinzipien zur Strukturbildung von Fabriken**

Für die Strukturierung der Fabriken müssen Prinzipien entwickelt werden, durch deren Anwendung optimale Strukturkonzepte für Fabriken abgeleitet werden können. Diese müssen ausgehend von Idealkonzepten den realen Bedingungen gerecht werden und ein Optimum zwischen den Zielsetzungen für eine Fabrikstruktur anstreben. Die Zielsetzung im Rahmen

eines idealen Konzepts für eine wandlungsfähige Fabrikstruktur ist ein Höchstmaß an Wandlungs- und Anpassungsfähigkeit. Kurze Wege in der Organisation und den Abläufen sowie eine schnelle Reaktionsfähigkeit bei Veränderungsprozessen sind die entscheidenden Charakteristika einer wandlungsfähigen Struktur. Sie verlangt ein hohes Maß an Flexibilität hinsichtlich der Fähigkeit, eine große Bandbreite von Produkten herzustellen und ihre Kapazitäten unverzüglich der Nachfrage anzupassen. Veränderte Anforderungen sind schnell in die technologischen Segmente umzusetzen. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet sinkt mit steigender Wandlungsfähigkeit die Produktivität des Fabriksystems und somit dessen ökonomische Effizienz. Produktivitätssteigerungen beziehen sich sowohl auf die Arbeits- als auch die Maschinenproduktivität, erhöhen somit den Durchsatz pro Stunde, und streben die volle Auslastung der Ressourcen an. Aufgrund der Tatsache, dass sich ideale Extremkonzepte entweder vor dem Hintergrund der Wandlungsfähigkeit oder der Produktivität ausschließen, ist für die Ableitung eines Strukturkonzepts im Rahmen der Planungssystematik ein Optimum zwischen den beiden Zielsetzungen anzustreben (Abbildung 5.14).

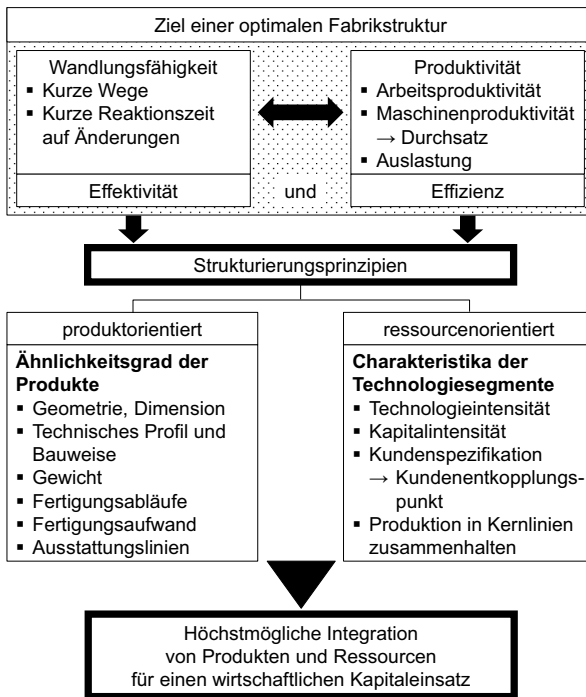


Abbildung 5.14: Grundprinzipien zur Strukturierung von Fabriken



Durch die Wandlungsfähigkeit wird die Effektivität der Fabrikstrukturen gewährleistet, die richtigen Dinge und Zielgrößen zu fokussieren und sich den Anforderungen anzupassen. Vor dem Hintergrund der Produktivität sind diese Anpassungsprozesse „richtig“ durchzuführen, das heißt möglichst effizient unter geringem Ressourcenverbrauch. Für den Fabrikbetrieb am optimalen Betriebspunkt sind somit beide Zielsetzungen gleichermaßen zu erfüllen und bei der Auslegung einer Fabrikstruktur zu berücksichtigen. Unter diesen Gesichtspunkten sind im Folgenden die Strukturierungsprinzipien für Fabriken festzulegen. Diese sind aus den zwei Sichten Produkt- und Produktionsstruktur herzuleiten, da diese in ihrer Vernetzung maßgeblich die Struktur einer Fabrik definieren.

Produktorientiert ist der Ähnlichkeitsgrad der Produkte für die Gruppierung von Produkten entscheidend. Diese Ähnlichkeit ist zu beschreiben hinsichtlich der Geometrie und Dimensionen, insbesondere der Querschnittsfläche, dem technischen Profil, der Bauweise und der technologischen Ähnlichkeit des Produktkonzepts. Im Weiteren sind das Gewicht, die konstruktiv festgelegten Fertigungsabläufe und Aufbaufolgen, ihr Fertigungsaufwand sowie die Ähnlichkeit der Ausstattungslinien richtungsweisend für die Zusammenführbarkeit zu Produktgruppen.

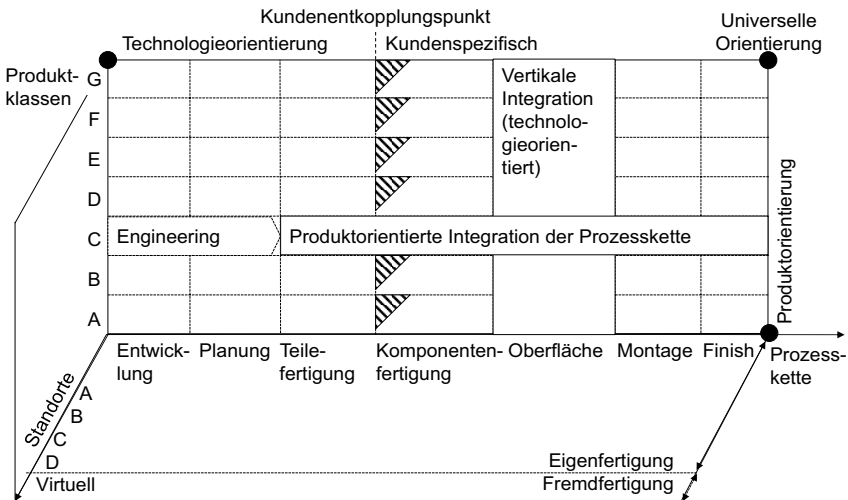
Die ressourcenorientierten Kriterien zur Strukturbildung ergeben sich aus den Charakteristika der technologischen Segmente. Technologieintensive Bereiche sind zumeist sehr kapitalintensiv und sind vor diesem Hintergrund auf Produktivität und Auslastung zu trimmen. In Abhängigkeit des Kundenentkopplungspunkts, sind auftragsneutrale Fertigungsbereiche wie sie häufig in der Teilefertigung vorkommen, als Losgrößenfertigung zu steuern und diese Segmente durch Verteilzentren von der kundenspezifischen Auftragsfertigung zu trennen. Losgrößenfertigungen sind aufgrund ihrer Kapitalintensität auf Technologieorientierung und Produktivität auszurichten, kundenauftragsspezifische Fertigungssegmente sind auf Kundenorientierung zu halten. Unter kunden- und marktspezifischen sowie logistischen Gesichtspunkten sind die Kernlinien der Produktion in der Kette zusammenzuhalten. Am Beispiel Automobil bezieht sich dieser Grundsatz auf die Fahrzeugkernlinie Karosseriebau, Lackiererei und Montage sowie die Kernlinie der Motorenfertigung.

Als strategische Grundlinie für die Strukturierung ist die höchstmögliche Integration der Produkte sowie der Ressourcen und Funktionen für einen wirtschaftlichen Kapitaleinsatz anzustreben. Um die für den Wettbewerb erforderliche Wandlungsfähigkeit zu erreichen, ist die Produktstruktur in die Produktionsstruktur zu übertragen und deren Vernetzung zu harmonisieren.

### 5.6.2 Strategische Stoßrichtungen

Im Folgenden sind generelle Entwicklungsstrategien für wandlungsfähige Fabrikstrukturen zu konzipieren. Die strategischen Stoßrichtungen sind aus den drei Dimensionen der Produktklassen, der Prozesskette und den Standorten zu entwickeln und im Einklang mit den Strukturierungsprinzipien auszuarbeiten (Abbildung 5.15).

Die strategischen Stellhebel liegen in der Bandbreite und Kombination von Produkten und Technologien, ihren strategischen Ausprägungen sowie deren Zusammenführung und Zuweisung zu Standorten der Eigen- oder Fremdfertigung. Die grundsätzlichen Ausrichtungen folgen einer Technologie- oder Produktorientierung sowie Mischformen, die sich auf Basis der Strukturierungsprinzipien für die Prozesskette ergeben. Für technologieorientierte Konzepte ist vertikal über die Produktklassen hinweg zu integrieren, produktorientierte Konzepte bedingen die horizontale Integration der Prozesskette entlang der jeweiligen Stufen vom Engineeringbereich bis in die Serienproduktion. Die universelle Orientierung als Extremkonzept ergibt sich aus der durchgängigen Produkt- und Technologieorientierung.



**Abbildung 5.15: Strategische Stoßrichtungen für eine wandlungsfähige Fabrikstruktur**

Zur Steigerung der strukturellen Wandlungsfähigkeit sind die strategischen Stoßrichtungen mit Wandlungsbefähigern auszustatten, die auf die Fabriken und ihre Vernetzung im Produktionsnetzwerk zu übertragen sind. In Erweiterung zu den fünf Wandlungsbefähigern, die in Kapitel 2.4.1.3 beschrieben wurden, sind im Weiteren folgende sieben Befähiger zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit in den strategischen Entwicklungslinien zu berücksichtigen:

- Skalierbarkeit in qualitativer und quantitativer Hinsicht
- Modularität
- Kompatibilität und Standardisierung
- Universalität
- Mobilität
- Integration
- Wissen

Aus strategischen Überlegungen und unter Anwendung von Kreativitätstechniken ergeben sich folgende sechs grundsätzliche Strategien für eine wandlungsfähige Fabrikstruktur:

- Strategie der Flexibilisierung
- Strategische Veränderung der Eigen-/Fremdfertigung
- Strategische Vergabe von Technologien mit Wachstumspotential
- Integration der Prozesskette
- Strategie der Standardisierung
- Strategie der Wissensintegration

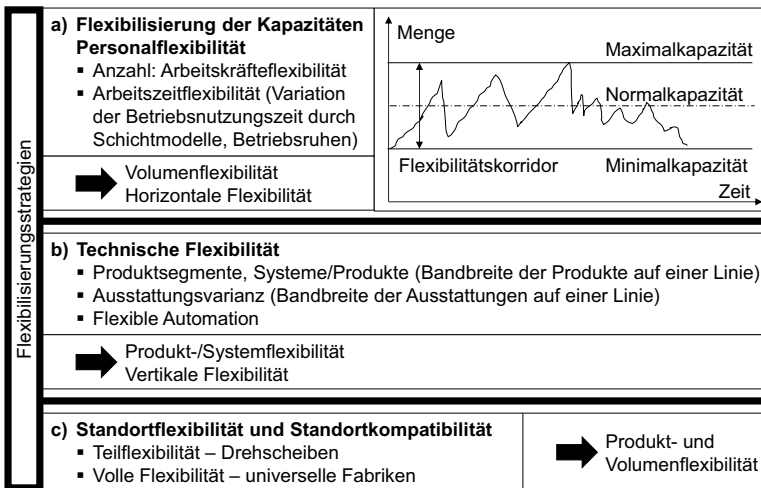
Diese werden im Weiteren präzisiert und als Grundlinien unter Berücksichtigung der sieben Wandlungsbefähiger ausgearbeitet.

### **5.6.2.1 Strategie der Flexibilisierung**

Flexibilisierungskonzepte für die Produktion sind bereits seit den 80-er Jahren die Antwort auf die Dynamik im industriellen Umfeld. Zunächst bezog sich die Entwicklung von Flexibilisierungskonzepten auf Maschinen, Anlagen und die Organisation, später folgten die Flexibilisierung technologischer Segmente wie beispielsweise die Montage [Laucht 1995] sowie Ansätze zu deren Bewertung [Westkämper et al. 2005; Roscher 2008]. Vor dem Hintergrund der wachsenden Vernetzung und Turbulenz der Fabriken, gewinnen Flexibilisierungsstrategien für die Strukturen zunehmende Bedeutung. In diesem Zusammenhang werden die Flexibilisierungsstrategien in ihrer Ausprägung klassifiziert und den wandlungsfähigen Strukturkonzepten als wichtiger strategischer Stellhebel zugrunde gelegt. Sie umfassen die Flexibilisierung der Kapazitäten, die technische Flexibilität sowie die Standortflexibilität und -kompatibilität (Abbildung 5.16).

Variierende Stückzahlen sind eine der am wenigsten vorhersehbaren und schwerwiegendsten Wandlungstreiber der Produktion. Zur wirtschaftlichen Herstellung variierender Mengengerüste sind folglich die Kapazitäten zu flexibilisieren. Die Volumenflexibilität, deren Flexibilitätskorridor zwischen Maximal- und Minimalkapazität liegt, ist permanent den Rahmenbedingungen des Marktes anzupassen. Die Maximalkapazität ist durch die technische Grenze der

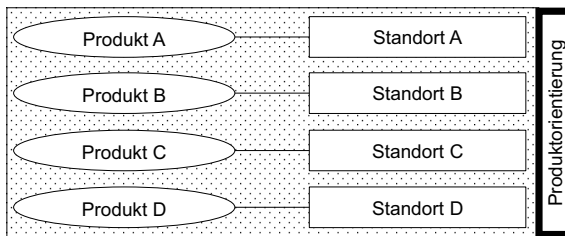
Maschinen- und Anlagentechnik bei einer maximalen Betriebsnutzungszeit von theoretisch 24 Stunden an 365 Tagen bestimmt, die Minimalkapazität ergibt sich aus produktionswirtschaftlicher Sicht durch die Fixkosten der technischen Anlagen. Für die quantitative Skalierbarkeit der Volumina stellt somit die Personalflexibilität bis zum Erreichen der technischen Grenzen der entscheidende Stellhebel dar. Die Flexibilisierung der Personalkapazitäten ist auf zwei Arten zu erreichen: zum einen durch die Variation der Anzahl der Arbeitskräfte, zum anderen durch die Anpassung der Arbeitszeiten. Die Arbeitskräfteflexibilität wird im mittelfristigen Bereich durch die Personalplanung gesteuert. Die grundlegenden Stellhebel liegen in der Zusammensetzung befristeter und unbefristeter Anstellungsverträge, Ein- und Ausstellungen sowie der Abordnung von Arbeitskräften an andere Einsatzorte [Roscher 2008; Dudic 2010]. Der Stellhebel der Arbeitszeitflexibilität liegt in der Variation der Betriebsnutzungszeit durch die Anpassung der Schicht- und Arbeitszeitmodelle sowie Betriebsruhen.



**Abbildung 5.16: Flexibilisierungsstrategien für die Produktion**

Übertragen auf Standortkonzepte ergibt sich für die kapazitive Flexibilisierung in Reinform eine horizontale Flexibilität und Ausrichtung der Standorte auf reine Produktorientierung. Die Produkte werden fix den Standorten zugeordnet und in Extremausprägung auf Solitärlinien produziert (Abbildung 5.17). Verbunden ist dies mit hohen Investitionskosten aufgrund redundant vorhandener technologischer Segmente, die für die jeweiligen Produktklassen spezialisiert sind. Diese strategische Ausrichtung implementiert eine produktorientierte Dezentralisierungsstrategie der technologischen Segmente. Ihr Umfang hängt davon ab, über welche Stufen der Prozesskette horizontal integriert wird. Denkbar ist eine Integration bis in die vorgelagerten Prozesse hinein. Diese Ansätze werden in Kapitel 5.6.2.4 diskutiert.

In Konsequenz ergibt sich eine Spezialisierung der Standorte auf einzelne Produktprogramme, deren Volumenschwankungen nur über die Personalflexibilität des Werks auszugleichen sind, zwischen den Standorten ist kein Kapazitätsabgleich vorgesehen. Durch spezialisierte Produktionskonzepte können die jeweiligen Produktprogramme mit hoher Wirtschaftlichkeit produziert werden, allerdings nur, wenn die Nachfrage eine hohe Auslastung der Maschinen und Anlagen über ihre Fixkostengrenze hinweg zulässt. In der strategischen Grundausrichtung im Produktionsverbund werden sich stückzahlorientierte Standorte für Volumenfertigung und Standorte für die Herstellung hochtechnologischer und komplexer Produktprogramme herauskristallisieren. Die durchgängige Spezialisierung und Segmentierung nach Produkten führt zu einer eindeutigen Zuordnung von Quellen und Senken ohne Redundanzen in der Belieferung der Standorte. Folglich ist die Komplexität der Steuerung der externen Logistikkette im Vergleich zu anderen Flexibilisierungskonzepten überschaubar.



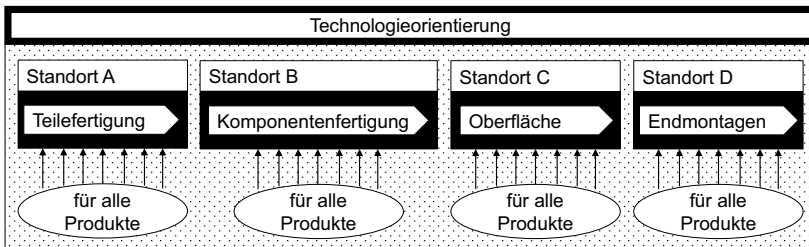
**Abbildung 5.17: Kapazitive Flexibilisierung und Produktorientierung**

Im Zuge der steigenden Varianten- und Ausstattungsvielfalt der Produktprogramme sowie kürzeren Innovationszyklen reicht die reine kapazitive Flexibilisierung der Ressourcen für eine produktionswirtschaftliche Herstellung der Produktbandbreite nicht aus. Für einen wirtschaftlichen Kapitaleinsatz sind die Ressourcen technisch zu flexibilisieren, so dass die Herstellung verschiedener Produkte und Ausstattungsvarianten auf den Linien eines Standorts möglich ist. In Abhängigkeit des Flexibilisierungsgrads werden lebenszyklus- und saisonal bedingte Auftragsschwankungen zwischen den Produkten ausgeglichen, was für eine permanent hohe Auslastung der Ressourcen sorgt [Roscher 2008].

Die strategische Linie der technischen Flexibilisierung der Ressourcen implementiert die technologieorientierte funktionale Segmentierung der Standortkonzepte und schafft in Extremausprägung Fabriken mit technologischen Schwerpunktsegmenten (Abbildung 5.18). Die reine Technologieorientierung führt zu einer Zentralisierung der funktionalen Segmente und zu spezialisierten Technologie- und Kompetenzhochburgen innerhalb des Produktionsnetzwerks. Folglich verändern sich die Vergabeschnitte der Produkte nach rein funktionalen Gesichtspunkten entlang der Prozesskette. Die funktionale Segmentierung setzt eine Null-

Fehler Übergabe an das nächste Segment voraus, um die Verantwortlichkeiten eindeutig zurückführen zu können. Insbesondere bei einer räumlichen Trennung und Zuweisung der Segmente zu unterschiedlichen Standorten entstehen lange Qualitätsregelkreise zwischen den Prozessschnittstellen.

Die vertikale Integration von Produkten schafft Synergien, erfordert jedoch eine hohe technische Flexibilität der Ressourcen in der Bearbeitung verschiedener Produktkonzepte. In Extremausprägung sind rein technologieorientierte Konzepte in der Praxis nicht wirtschaftlich umzusetzen. Wirtschaftlich sinnvoll ist es jedoch, die Produkte nach ihrem Ähnlichkeitsgrad zu Gruppierungen zusammenzuführen und die Flexibilität zur Herstellung dieser Produktgruppen zu schaffen. Die technische Flexibilisierung für die Herstellung unterschiedlicher Produktklassen, -segmente und Ausstattungsvarianten ist entscheidend, um der Änderungsdynamik und Komplexität der Produkte gerecht zu werden. Vor diesem Hintergrund spielt die Integrationsfähigkeit der Ressourcen für Änderungen in Bezug auf neue Produkt- und Ausstattungsvarianten eine große Rolle, auch über den Produktlebenszyklus hinaus. Um Überdimensionierungen zu vermeiden, ist in diesem Zuge strategisches Vorausdenken gefordert, mit dem die Wandlungsfähigkeit der Ressourcen erhöht und diese situationsgerecht angepasst werden können.



**Abbildung 5.18: Technische Flexibilisierung und Technologieorientierung**

Der vertikalen Integration kommt unter Berücksichtigung der Lerneffekte eine besondere Bedeutung zu. Das Leistungsniveau einer Produktionslinie wird beschrieben durch den Verlauf ihrer Lernkurve. Wird nun ein weiteres Produkt oder eine Produktvariante in diese Linie integriert, wird sich dieses Produkt nach einem kurzen Anlaufprozess, der zu einem Sprung im Kurvenverlauf führt, auf das Leistungsniveau der vorherrschenden Lernkurve einpendeln. Dieses Phänomen hat vor dem Hintergrund permanenter Produktanläufe und sinkender Stückzahlen pro Variante strategische Relevanz. Bei einer Integration eines Produkts auf die Linie mit dem besten Leistungsniveau überlagern sich die Kurven mit den damit verbundenen Skaleneffekten und pendeln sich auf das Leistungsniveau der besten Linie ein, was zu einer Reduzierung der hpu im Gesamtverlauf führt. Bei Überschreiten der technischen Voll-

auslastung ist die Best Practice Linie identisch zur Produktion der weiteren Volumina am selben oder an einem anderen Standort zu duplizieren.

Produktivitätssteigerungen der Maschinen und Anlagentechnik zur Erhöhung des Durchsatzes sind über Umtaktungen, Prozessoptimierungen in den technischen Grenzen oder über die Steigerung des Automatisierungsgrads zu erreichen. In der Regel sind die technologischen Segmente der Teile- und Komponentenfertigung sowie der Oberfläche bereits auf einem sehr hohen Automatisierungsniveau, so dass das größte Potential für eine Automatisierung in der Systemintegration besteht. Aufgrund der hohen Produkt- und Teilevarianz in den Montagen kommt nur eine flexible Automatisierung der technischen Ressourcen in Frage.

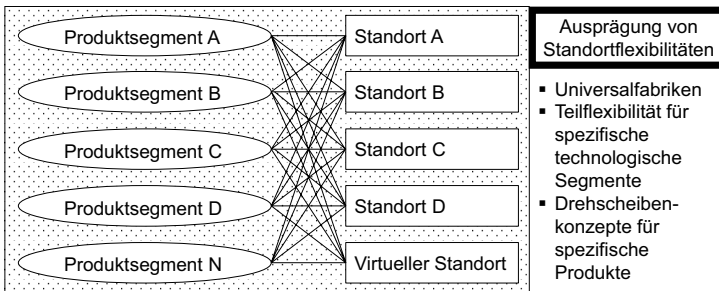
Ein aktuelles Beispiel für ein flexibel automatisiertes Montagekonzept findet sich in der Automobilindustrie für die Hinterachsmontage der C-Klasse von Mercedes Benz, in der seit 2009 45 kooperierende Roboter vernetzt miteinander arbeiten. Am Ende des Prozesses wird die Hinterachse an eine manuelle Montage übergeben, welche die variantenbildenden Komponenten im letzten Arbeitsschritt auf einer Drehscheibe mit Stückzahlflexibilität integriert. Am Beispiel konnte sowohl eine hohe Produktivität sowie eine hohe Flexibilität, wie sie für die manuelle Montage zu erwarten ist, nachgewiesen werden [Zürn et al. 2010].

Das Beispiel zeigt das Potential und die technischen Möglichkeiten einer Automatisierungsstrategie in Kombination mit manuellen Tätigkeiten in der Montage auf. Voraussetzung einer Automatisierung sind repetitive Tätigkeiten und standardisierte Prozesse. Zu prüfen sind bei diesen Lösungen die technische Machbarkeit, die Flexibilität und die Wirtschaftlichkeit der Investitionen.

Die Kombination aus quantitativ kapazitiver und qualitativ technischer Flexibilität über die Standortgrenzen hinweg führt zu einer Flexibilisierung der Standorte in Bezug auf die Zuweisung von Produktsegmenten (Abbildung 5.19). Die Fähigkeit, Produkte an verschiedenen Standorten zu produzieren, ist in einer vernetzten Produktion ein strategischer Ansatz, um Auftragsschwankungen zwischen den Werken auszugleichen und eine kundennahe Produktion zu ermöglichen.

Standortflexibilität und -kompatibilität kann in verschiedenen Stufen ausgeprägt sein. Im Extremkonzept bilden sich Universalfabriken heraus, in denen jede Art von Produkten und ihren Varianten hergestellt werden kann. Aufgrund eines immensen Investitionsbedarfs und geringer Produktivität ist dieses Konzept unter den wirtschaftlichen Gesichtspunkten einer variantenreichen Serienproduktion, wie bereits in Kapitel 2.4.1.3 im Rahmen der Wandlungsbefähiger ausgeführt, nicht rentabel. Möglich sind Teilflexibilitäten für spezifische technologische Segmente, die partiell zwischen den Standorten verschoben werden können, wie es

sich unter Umständen für die Systemintegration anbietet, um kundenspezifische Ausstattungsvarianten marktorientiert zu montieren. Erfolgsversprechend sind Drehscheibenkonzepte für spezifische Produkte, um auf operativer Ebene die Ressourcenauslastung zwischen zwei Standorten auszugleichen. Ein sehr erfolgreiches Beispiel ist die Drehscheibe der Audi A4 Limousine zwischen den Standorten Ingolstadt und Neckarsulm, um saisonale und produktlebenszyklusbedingte Schwankungen auszugleichen [Dreves 2007]. Die Konsequenz eines Drehscheibenkonzepts sind jeweils zwei logistische Senken, die von internen und externen Lieferanten versorgt werden müssen, was die Komplexität der logistischen und informationstechnischen Steuerung erhöht.



**Abbildung 5.19: Flexibilisierung der Standorte**

Die Rekonfigurierbarkeit des Netzwerks wird erreicht durch die Flexibilisierung der Standorte und der technischen Ressourcen mit einer Erhöhung der Standortkompatibilitäten sowie der Integrationsfähigkeit der Produkte in bestehende Produktionssysteme.

In den Flexibilisierungskonzepten sind wesentliche Wandlungsbefähiger vertreten, die einen Beitrag zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit leisten, insbesondere die Skalierbarkeit in qualitativer und quantitativer Dimension, die Kompatibilität, die Integration und die Universalität in wirtschaftlicher Ausprägung. Die Voraussetzung zu einer wirtschaftlichen Umsetzung der Flexibilisierungsstrategien in Standortkonzepten ist zum einen die Berücksichtigung der Strukturierungsprinzipien und zum anderen die Kopplung mit einer Standardisierungsstrategie in Bezug auf die Produkte, Ressourcen und Prozesse, welche in Kapitel 5.6.2.5 ausgeführt wird.

### 5.6.2.2 Veränderung der Wertschöpfungstiefe

Die Veränderung der Wertschöpfungstiefe und die damit verbunden Inourcing- und Outsourcingprozesse sind bei Strukturanpassungen Stellhebel, um die Kompetenzen im Unternehmen neu zu ordnen, Schwerpunkte zu setzen und den Restriktionen der Werke zu be-



gegenen. Die Konzentration auf die Kernkompetenzen hat zu einer massiven Reduzierung der Wertschöpfungstiefe in den vergangenen Jahren geführt. Um die Veränderung der Wertschöpfungstiefe strategisch für die Steigerung der strukturellen Wandlungsfähigkeit zu nutzen, reichen diese Argumentationen nicht aus. Vielmehr müssen Kriterien gefunden werden, wie Fertigungsaufgaben im Produktionsnetzwerk vor dem Hintergrund der Wandlungsfähigkeit zu vergeben sind. Die Zusammenstellung der Vergabekriterien zeigt Abbildung 5.20.

Vergabekriterien zur Zuweisung von Fertigungsaufgaben
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Die Fertigung von Produkten und Komponenten mit <b>hoher Varianz und Änderungsintensivität</b> wird <b>zentralen</b> Produktionsstandorten zugewiesen, welche eine schlanke Organisation mit kurzen und schnellen Wegen in den Prozessketten Entwicklung, Fertigung und Disposition aufweisen.</li> <li>2. <b>Beruhigte</b> Produktionen für weniger belebte Komponenten und Bereiche mit geringer Änderungshäufigkeit sind <b>entfernt</b> liegenden Standorten zuzuweisen.</li> <li>3. Technologien mit hohem Kapitaleinsatz werden an einem Standort konzentriert, wobei Systemkompetenzen an zentralen Standorten zu fertigen sind. Die Folge sind <b>spezialisierte</b> Standorte mit Höchstleistung und hochspezialisierter Kompetenz und Qualifikation der Betriebsbereiche.</li> <li>4. <b>Spezielle</b> Aufgaben werden an kleinen Standorten gefertigt.</li> <li>5. Die Vergabebeschnitte erfolgen nur bei <b>definiertem konstruktiven Fertigungszustand</b>.</li> </ol>

**Abbildung 5.20: Vergabekriterien zur Zuweisung von Fertigungsaufgaben**

Produkte und Komponenten, die eine hohe Varianz und Änderungsintensität aufweisen, sind zentralen Standorten zuzuweisen, um kurze Wege in den Prozessketten der Entwicklung, Produktion und Disposition zu schaffen. Die zentralen Standorte sind mit einer schlanken Organisation zu führen, deren Entscheidungs- und Umsetzungswege kurz und unkompliziert sind.

Weniger belebte Komponenten, die eine geringe Änderungsintensität aufzeigen, sind beruhigten Standorten zuzuordnen, die entfernt von der Zentrale liegen.

Technologien mit hohem Kapitaleinsatz sind aus wirtschaftlichen Gründen an einem Standort zu konzentrieren. Systemkompetenzen sollten an zentralen Standorten liegen, wie beispielsweise elektrische Systeme oder Antriebssysteme. Sie verlangen eine hohe Spezialisierung und Höchstleistung der Arbeitsbereiche Entwicklung, Arbeitsplanung, Instandhaltung und Qualitätswesen durch hochspezialisierte Kompetenz und fachspezifische Qualifikation.

Spezielle Fertigungsaufgaben sind kleinen Standorten zuzuweisen, welche sich wie Zulieferfabriken auf ihre Partialkompetenzen spezialisieren.

Grundsätzlich gilt für alle Zuweisungen wie in Kapitel 3.1.3 argumentiert, dass Vergabebeschnitte aus Qualitätsgründen nur an definierten konstruktiven Zuständen zu setzen sind. Die definierten prüfbaren Zustände sind den technischen Zeichnungen zu entnehmen, welche die Toleranzen und Maßhaltigkeiten für die Qualitätsprüfung vorgeben.

Auf Basis dieser Vergabekriterien ist die Erhöhung des Eigenfertigungsanteils und die Zuweisung zu zentralen Standorten für komplexe Bauteile zu empfehlen, die eine hohe Systemkompetenz verlangen. Des Weiteren sind Komponenten mit hoher Systemverantwortung und Sicherheitsrelevanz wie beispielsweise die Ausrüstungskomponenten eines Fahrzeugs, Sicherheits- und Assistenzsysteme, Motorsteuerungen, Fahrwerk und Getriebe an zentralen Standorten zu integrieren. Dies gilt ebenso für kundenspezifische Ausstattungsvarianten, um schnell auf Veränderungen zu reagieren sowie für Komponenten mit Differenzierungspotential zum Wettbewerber. Für diese sind die Kompetenzen entlang der gesamten Prozesskette erforderlich. Diese Grundlinie hat eine Steigerung der Komplexität und Kompetenzen an den zentralen Standorten zur Folge.

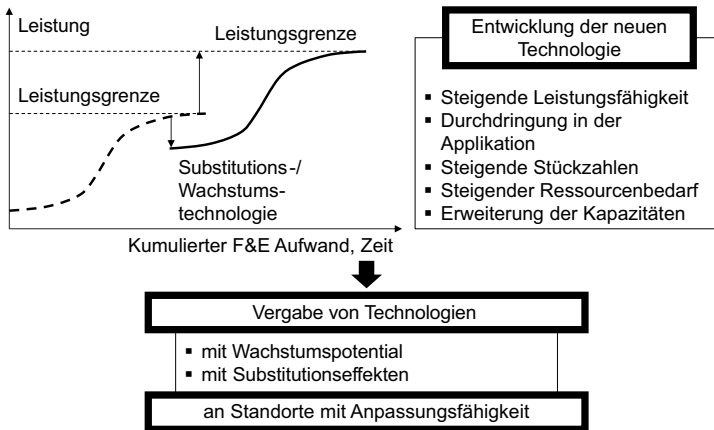
Die Reduzierung des Eigenfertigungsanteils und Vergabe von Produktionsaufgaben an Zulieferer hat für Komponenten und Teile mit geringer Änderungsintensität zu erfolgen, die nicht marktdifferenzierend sind. Derzeit liegt die Komplexität der Ausstattungsvarianz bei JIS-Anlieferungen hauptsächlich beim Lieferanten. Folglich spiegeln sich Volumenschwankungen wesentlich im Umfeld der Lieferanten wieder, wo der Einfluss auf Kapazitätsanpassungen langwieriger ist und zu zeitlichen Verzögerungen in der eigenen Kapazitätsanpassung führt. Um Reaktionsschnelligkeit in den Veränderungsprozessen zu erreichen, ist die Struktur der Fabriken entsprechend der Vergabekriterien neu zu definieren.

### **5.6.2.3 Vergabe von Technologien mit Wachstumspotential**

Technologien haben wie Produkte einen Lebenslauf, deren Leistungspotential in Abhängigkeit vom Forschungs- und Entwicklungsaufwand durch das Technologie S-Kurven-Konzept nach McKinsey beschrieben werden kann. Hat eine Technologie ihre Reifephase erreicht, desto mehr Investitionsaufwand ist erforderlich, um noch Leistungssteigerungen zu erzielen, sie nähert sich ihrer maximalen Leistungsgrenze an [Bullinger 1999; Herrmann 2010; Schuh et al. 2011].

Durch die Substitution der alten durch eine neue Technologie mit Wachstumspotential erfolgt ein Technologiesprung, der zu neuen technischen Möglichkeiten und Leistungspotentialen führt. Wachstumstechnologien durchdringen aufgrund ihrer Leistungssteigerungen die Applikation und werden zur Produktion steigender Stückzahlen angewandt. Folglich steigt der Ressourcenbedarf, wodurch eine Kapazitätsanpassung erforderlich ist (Abbildung 5.21). Für die Vergabe von Technologien mit Substitutionseffekten und Wachstumspotential bedeutet dies, dass sie an Standorte mit kapazitiver und technologischer Anpassungsfähigkeit zu vergeben sind, um dem Potential gerecht zu werden.

Aktuelle Beispiele für Technologien mit Wachstumspotential finden sich im Bereich elektrischer Systeme wie der Elektrifizierung des Antriebsstrangs, der damit verbundenen Batteriespeichersysteme und der zunehmenden Integration von Funktionen. Die Elektrifizierung der Antriebssysteme führt zu einer tiefgreifenden Veränderung der Produktstrukturen, substituiert ganze Komponenten und technologische Bereiche der konventionellen Motoren- und Getriebefertigung und wirkt sich zudem massiv auf die Montagekonzepte für den Batterieeinbau aus.



**Abbildung 5.21: Leistungsentwicklung einer Technologie mit Wachstumspotential**

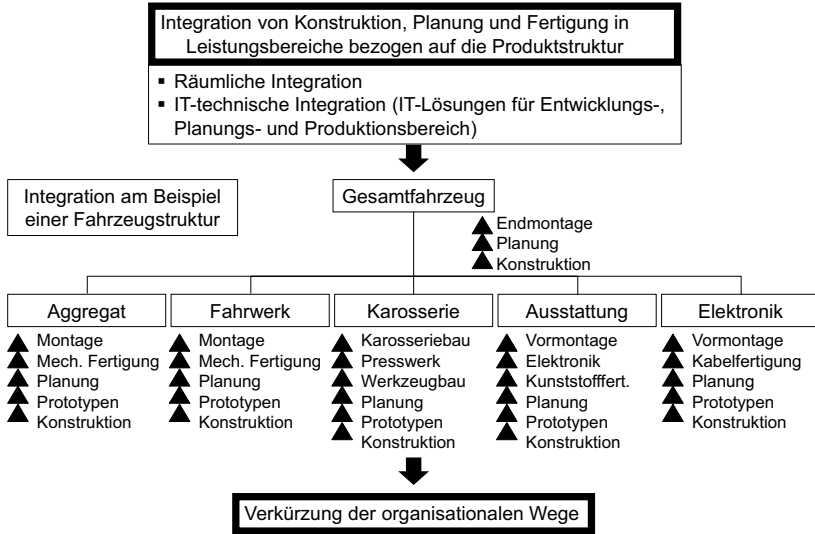
Ein weiteres Thema liegt im Bereich der werkstoffgetriebenen Leichtbaukonzepte mit einer konstruktiven Veränderung der Bauweisen. Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen in der Karosserie eines Fahrzeugs substituiert den klassischen Karosseriebau, erfordert eine massive Anpassung der Verbindungs- und Fügetechnologien und verändert die Anforderungen an die Oberflächenbehandlung und Lackierung.

Beides sind Beispiele für technologiegetriebene Strukturveränderungen mit erheblichen Wirkungsketten. Diese sind szenarienbasiert im Rahmen der strategischen Planung für Strukturanpassungen der Fabriken in ihren zeitlichen Dimensionen zu analysieren und zu bewerten.

### 5.6.2.4 Integration der Prozesskette

Im Zuge der steigenden Änderungsdynamik und kürzeren Innovationszyklen der Produkte sind die Reaktionszeiten auf Änderungen einer der entscheidenden Schlüsselfaktoren für eine wettbewerbsfähige Produktion. Vor diesem Hintergrund sind zum einen die Veränderungsprozesse zu systematisieren und zum anderen die Wege und Zeiten entlang der Pro-

zesskette zu verkürzen. Ein strategischer Ansatz, um die Verkürzung der Wege zu erreichen, ist die Integration der Prozesskette in Bezug auf die Konstruktion, Planung und Fertigung in autonome Leistungsbereiche bezogen auf die Produktstruktur (Abbildung 5.23).



**Abbildung 5.22: Verkürzung der organisationalen Wege durch Integration der Prozesskette**

Die Integration der Prozesskette kann auf zwei Arten erfolgen, die räumliche Integration der funktionalen Bereiche in autonome Leistungssegmente oder die informationstechnische Integration. Die Ausgangsbasis bildet in beiden Fällen die Produktstruktur, die auf die Produktions- und damit die Organisationsstruktur zu übertragen ist. Die Produktstruktur gibt den Vorranggraphen für die gesamte Prozesskette vor und legt somit die Abläufe bis zur Kundenauslieferung fest. Am Beispiel einer Fahrzeugstruktur sind die Leistungsbereiche auf der Systemebene 1. Ordnung bis in die Komponentenebene 2. Ordnung dargestellt. Insbesondere die Komponenten der Produktstruktur, die eine hohe Varianz und Dynamik aufweisen, profitieren von einer räumlichen Nähe und kurzen Wegen von der Konstruktion und Berechnung über den Prototypenbau, die technische Absicherung, Planung bis in die Fertigung und Montage hinein, da hier Schnelligkeit in der Reaktion, Planung und Umsetzung von Veränderungen gefragt ist.

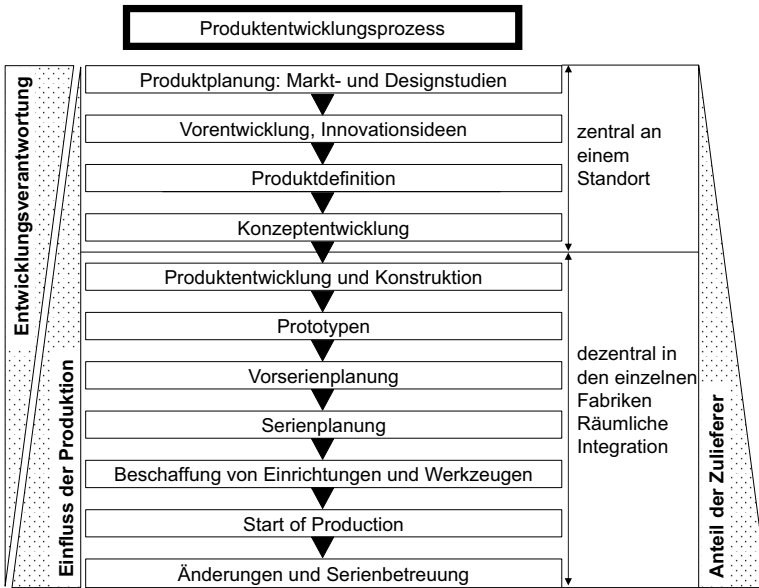
Die durchgängige Übertragung der Produktstruktur in die Produktionsstruktur weist allen Komponenten die funktionalen und technologischen Segmente zu, die für deren Erstellung erforderlich sind. Im Beispiel führen die Aggregate ein Leistungssegment an, das aus der

Konstruktion, den Prototypen, der Planung, der mechanischen Fertigung und Bearbeitung sowie der Aggregatmontage besteht. Das Fahrwerkssegment umfasst die auf Fahrwerke spezifizierten Funktionen. Das Leistungssegment der Karosserie integriert wiederum die Konstruktion, den Prototypenbau und die Planung sowie den Werkzeugbau, das Presswerk und die Karosseriemontage. Das Leistungssegment der Ausstattungen ist, wie aus der Varianz- und Komplexitätsanalyse zu schließen ist, als äußerst komplex und dynamisch einzustufen. Die schnelle Umsetzung kundenspezifischer Individualisierungsumfänge ist hier von großer Bedeutung. Das Leistungssegment der Ausstattungen umschließt neben den vorgelegten Engineeringbereichen große Bereiche der Kunststofffertigung, Elektronik und Vormontage. Im Leistungsbereich der Elektronik dominiert die Kabelfertigung. In allen Leistungssegmenten sind die indirekten Funktionen dezentral zu integrieren, die zur Autonomie des Segments beitragen. Die Leistungssegmente auf Komponentenebene sind dann im Leistungssegment der Systemintegration mit den Funktionen Konstruktion, Planung und Endmontage zusammenzuführen. Die jeweiligen Leistungssegmente haben sich durch die Prinzipien Marktorientierung, Autonomie, Selbstorganisation, Selbstoptimierung, Kooperation, Dynamik und Anpassungsfähigkeit wie die Leistungseinheiten des Stuttgarter Unternehmensmodells [Westkämper et al. 2009] auszuzeichnen, um einen Beitrag zur Wandlungsfähigkeit des gesamten Fabriksystems und seinen Strukturen zu leisten.

Für die Integrationsstrategie bezüglich der Prozesskette sind die Schnittstellen in den Produkten und Ressourcen zu definieren. Im Wesentlichen sind die Grenzlinien zwischen Integration und Funktionalisierung zu ziehen. Die Integration führt zu einer Dezentralisierung der Verantwortlichkeiten in den einzelnen Fabriken, die Funktionalisierung führt zur Zentralisierung der Verantwortungsbereiche an einem zentralen Standort. Für die Festlegung der Schnittstellen ist der Produktentwicklungsprozess als Ganzes zugrunde zu legen und die Prozessschritte detailliert den Standorten zuzuweisen (Abbildung 5.23).

Im Prinzip umfasst der Produktentwicklungsprozess unternehmens- und branchenübergreifend die dargestellten Prozessschritte. Begonnen wird mit Markt- und Designstudien für die Planung neuer Produkte beziehungsweise der nachfolgenden Produktgeneration. Auf Basis dieser Ergebnisse werden Innovations- und Produktideen im Rahmen der Vorentwicklung vorangetrieben und mehrere Alternativen parallel diskutiert. Aus diesen Alternativen wird dann eine ausgewählt und im Zuge der Produktdefinition für die Konzeptentwicklung freigegeben. Ausgehend vom Produktkonzept erfolgt die Produktentwicklung und Detailkonstruktion inklusive Berechnung, Auslegung und Dimensionierung. Deren Ergebnis wird durch virtuelle sowie reale Prototypen und Testprodukte abgesichert. Nach den Test- und Analysephasen beginnt die Vorserienplanung, die in die Serienplanung übergeben wird. Sind die Werk-

zeuge, Vor- und Einrichtungen beschafft, beginnt der Hochlauf der Serienproduktion. Während der Serienproduktion erfolgt die Serienbetreuung und das Änderungswesen. Entlang der Prozesskette nimmt die Entwicklungsverantwortung stetig ab, während der Einfluss der Produktion und der Anteil der Zulieferer zunimmt.



**Abbildung 5.23: Veränderung der Prozesskette mit detaillierter Standortzuweisung**

Die grundsätzliche Schnittstelle zwischen Zentralisierung und Dezentralisierung ist nach der Konzeptentwicklung zu ziehen. Bis dahin sind die Prozessschritte auftrags- und kundenneutral und können zentral von Experten des Designs, der Entwicklung und Planung durchgeführt werden. Spezifisch wird es ab der Detailkonstruktion, die zur Berücksichtigung der vorhandenen Ressourcen möglichst an den Standorten durchzuführen ist, wo später das Produkt anläuft, in Serie produziert und kontinuierlich verbessert wird. In diesen Bereichen ist Dynamik und Präzision gefordert, um die Serienreife zu erreichen und später das Änderungswesen schnell und effizient durchzuführen.

Validierungsprozesse, die aus Absicherungs- und Haftungsgründen erforderlich sind, sind ausschließlich zentral durchzuführen und zu verantworten. Dies betrifft alle Funktionsteile, die miteinander vernetzt sind und Systemverantwortung tragen. Dies betrifft im Fahrzeugbau und Luftfahrtbereich zum Beispiel die Verantwortung für das Crash Verhalten, Bremssysteme und andere sicherheitsrelevante Systemkomponenten. Anpassungskonstruktionen während der Serie und kundenspezifische Teile sind dezentral in den Fabriken vor Ort in die

Produkte zu integrieren und an die zentrale Entwicklung für die nachfolgende Produktgeneration zurückzukoppeln.

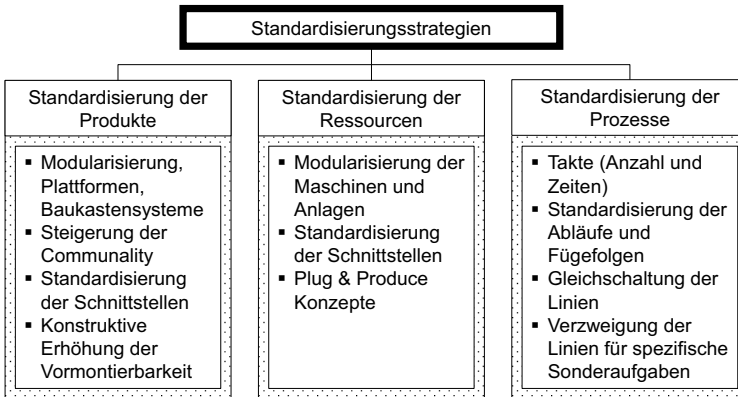
Alternativ oder zur Unterstützung der räumlichen Integration, kann die Integration der Prozesskette auf Basis der heutigen Informations- und Kommunikationssysteme auch auf informationstechnischem Weg erfolgen. Die informationstechnische Abbildung der Prozesskettenintegration erfordert ein durchgängiges Datenmanagement der Produkte, Ressourcen und Prozesse in einer IT-Architektur, welche die Integration der Bereiche Entwicklung, Planung und Produktion über die Standortgrenzen hinweg unterstützt. Ein durchgängiges Datenmanagement erfordert die Verfügbarkeit standardisierter und kompatibler Systeme an allen Standorten, deren Daten kontinuierlich zu pflegen und zu aktualisieren sind. Dies umfasst die gesamte CAx-Kette inklusive der indirekten Bereiche, in der die Produktstruktur den Aufbau der Systeme bestimmt. Die Durchgängigkeit und Aktualität der Stücklisten von der Entwicklung über die Planung, Fertigung und Rückkopplung nach Änderungen ist dabei ein grundlegender Baustein, in den alle technischen und vertriebstechnischen Restriktionen einzupflegen sind. Die Abrufbarkeit und Pflege der Daten muss dabei von allen Standorten gewährleistet sein. Die IT-Architektur des Systems muss an die Dynamik der Fabriken anpassbar sein und die IT-Systeme mit ihren Teilsystemen mit Zugriffssicherheiten gegenüber externen Angriffen ausgestattet sein.

#### **5.6.2.5 Strategie der Standardisierung**

Standardisierungsstrategien dienen der Beherrschung der Komplexität im turbulenten Umfeld der industriellen Produktion. Sie implementieren die Fähigkeit, Änderungen unter geringem Aufwand und beherrschbaren Wechselwirkungen in ein System zu integrieren und zu desintegrieren und befähigen somit zum Wandel und zur Adaption der Strukturen. Standardisierungsstrategien im Bereich der Fabrikstrukturen können sich auf die Produkte, die Ressourcen und die Prozesse beziehen (Abbildung 5.24).

Die Konstruktionsprinzipien der Produkte legen maßgeblich die erforderlichen Fertigungsprinzipien, -konzepte und Aufbaufolgen fest. Je weiter die Konstruktionskonzepte der Produkte und Produktklassen voneinander abweichen, desto vielfältiger und aufwendiger ist ihre Herstellung. Werden die Produkte getrennt voneinander mit spezifischen Produktionskonzepten gefertigt, sind erhebliche Ressourcen in der Entwicklung, Planung und Fertigung gefragt, die mit hohen Investitionen verbunden sind. Werden Flexibilisierungsstrategien in der Produktion verfolgt, so ist deren technische Realisierung in Bezug auf die technische Machbarkeit äußerst aufwendig und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht zu vertreten. Aus diesen Gründen sind die Produkte in ihren konstruktiven Ausprägungen soweit zu standardisieren, dass sie wirtschaftlich hergestellt werden können und dennoch den Individualisie-

rungsanforderungen der Kunden und der Märkte genüge leisten. Ansatzpunkte liegen in Plattform-, Modularisierungskonzepten und Baukastensystemen, aus denen Bauteile und Komponenten über die Produktklassen hinweg standardisiert und modularisiert für den Einbau in die Systeme entwickelt werden.



**Abbildung 5.24: Standardisierungsstrategien**

Die Automobilindustrie arbeitet seit langem an diesen Konzepten, erkennt auch deren Potential, unterscheidet sich aber nach wie vor in der Konsequenz der Anwendung und Umsetzung. Insbesondere im Premiumsegment werden der Entwicklung in ihrer Kreativität große Freiräume eingeräumt, welche die Komplexität in den gesamten Abläufen der Produktentstehung nach oben treiben. Die Transparenz über die Komplexität und deren Auswirkungen auf die Produktion, wie sie in der Analyse in Kapitel 5.1.2 beschrieben ist, dient als Ausgangspunkt und Motivation zur Umsetzung von Standardisierungsstrategien dieser Art. Zur Aufwandsreduzierung in der Entwicklung und Produktion führt korrelierend mit den Modularisierungs- und Baukastenkonzepten die konsequente Steigerung des Kommunalitätsgrads der Komponenten und Teile, das heißt die Erhöhung des Gleichteileanteils in den Produkten des Produktprogramms. Ein wesentlicher Aspekt der Produkt- und Komponentengestaltung sind die Standardisierung der Schnittstellen zwischen den Komponenten der Produktstruktur. Sind diese standardisiert und die Einbaufähigkeit fertigungsgerecht in den Dimensionen abgesichert, ist die Geometrie des Teils selbst in der Gestaltung skalierbar und im Design frei. Ziel ist, die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten durch standardisierte Schnittstellen zu reduzieren und damit die Kompatibilität zu erhöhen. In diesem Zusammenhang spielt auch die Vormontierbarkeit der Komponenten eine große Rolle. Durch einen hohen Vormontagegrad der Komponenten ist eine hohe Funktionsintegration zu erreichen, deren Varianz



sich in den Nebenlinien bemerkbar macht, für die Hauptlinien jedoch durch standardisierte Schnittstellen unbedeutend ist.

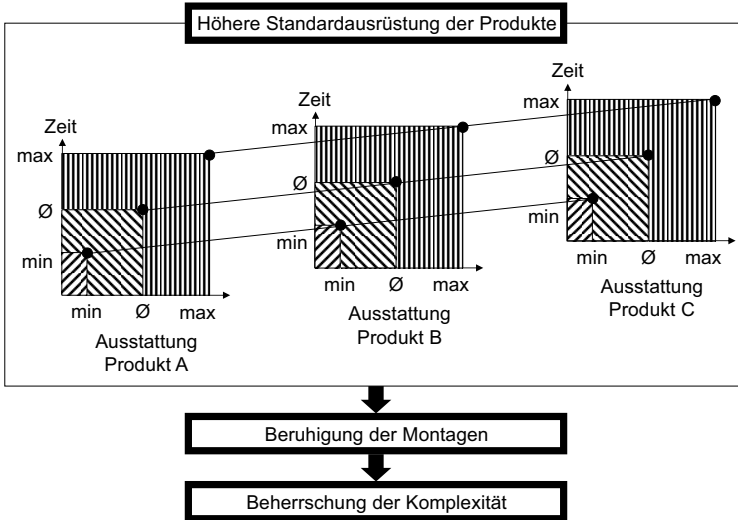
Die Standardisierung der Ressourcen bezieht sich auf die Maschinen- und Anlagentechnik, die durch einen modularen Aufbau an Flexibilität und gleichzeitig an Standards gewinnt. Wichtig hierbei sind insbesondere die Schnittstellen der Module, durch die Modulbestandteile kompatibel in die Linie integriert und desintegriert werden können. Hingewiesen sei in diesem Zusammenhang auf Plug and Produce Konzepte, die sich den qualitativen und quantitativen Anforderungen aus den Produkten und ihren Mengengrößen anpassen lassen und somit der Forderung nach Skalierbarkeit, Modularität, Kompatibilität und Mobilität nachkommen.

Der dritte wichtige Stellhebel in Bezug auf Standardisierungsstrategien bezieht sich auf die Prozesse, die für alle Produkte, Produktklassen, Ressourcen, Linien und Standorte gleichzuschalten sind. Dies betrifft die Takte, ihre Anzahl pro Linie und die Taktzeiten, die durchgängig und konsequent für alle Produkte zu standardisieren sind. Dies hat auch zur Folge, dass einige Takte der Linien für bestimmte Produkte nicht belegt sind und in Form von Leertakten in den Linien vorhanden sind. Der zweite Punkt bezieht sich auf die Standardisierung der Abläufe, Aufbau- und Fügefolgen in den Linien, die zum einen von den konstruktiven Rahmenbedingungen und zum anderen von den Fertigungskonzepten abhängen. Die Linien sind für alle Produkte in ihrem Aufbau, ihren Takten und Abläufen gleichzuschalten und am selben Standort als auch über die Standortgrenzen hinweg zu duplizieren, um sie für die aufwandsarme Integration neuer Produkte und Änderungen unter standardisierten Bedingungen zu befähigen. Spezifische Varianten und Ausstattungen sind folglich aus den Hauptlinien zu desintegrieren und in Nebenlinien als spezifische Sonderaufgabe zu fertigen. Dieses Konzept erfordert die Verzweigung der Linienkonzepte und eine Trennung von standardisierten und speziellen Fertigungsaufgaben. In der Konsequenz entstehen somit dynamische, komplexe Nebenlinien, die in die beruhigten Hauptlinien führen.

Ein produktseitiger Ansatz, der zur Beruhigung der Linien insbesondere in den Montage-segmenten führt, ist die Standardisierung der Ausstattungslinien und deren Segmentierung in Minimal-, Durchschnitts- und Maximalausstattung der Produkte. Eine grundsätzlich höhere Standardausrüstung der Produkte führt zu einer Beruhigung der Montagesegmente und dient somit der Beherrschung der Komplexität (Abbildung 5.25).

Für die jeweiligen Produkte werden Flexibilitätskorridore in Bezug auf die Ausstattungen gebildet. Die Produkte werden in drei Flexibilitätskorridore untergliedert. Der erste Flexibilitäts-

korridor umfasst die minimal ausgestatteten Produkte mit minimalem Fertigungsaufwand, der zweite umfasst die Durchschnittsprodukte mit durchschnittlichen Fertigungszeiten, der letzte die maximal ausgestatteten Produkte eines Typs mit maximal erforderlicher Fertigungszeit.



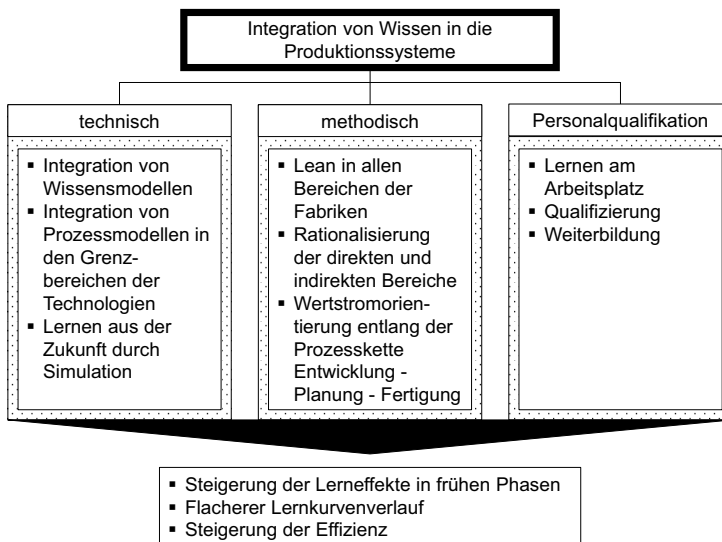
**Abbildung 5.25: Höhere Standardausrüstung der Produkte**

Der Grundsatz der Strategie der höheren Standardausrüstung ist, dass die vom Kunden gewählte Produktkonfiguration der nächst höheren Ausrüstung zugeteilt wird und das Produkt somit höher ausgestattet als bestellt gefertigt und an den Kunden ausgeliefert wird. Dies führt zu einer massiven Reduzierung der Teilevielfalt und senkt die Komplexität in den Montage-, Logistik-, Informations- und Steuerungsprozessen. Dafür steigen der zeitliche Fertigungsaufwand sowie die Kosten für die Beschaffung höherwertiger Ausstattungskomponenten. Unter diesen beiden Gesichtspunkten sind Wirtschaftlichkeitsrechnungen durchzuführen, um die Vorteile einer Produktionsberuhigung den Nachteilen höherer Beschaffungs- und direkter Fertigungskosten gegenüberzustellen. Potential zur Aufwandsreduzierung ist bei dieser Strategie nicht in den direkten, sondern vornehmlich in den indirekten Kostenbereichen zu erschließen. Eine durchgängig höhere Standardausrüstung kann über alle Produkte hinweg angewandt und diese in Ausstattungsklassen produziert werden.

#### 5.6.2.6 Strategie der Wissensintegration

Wissen ist eine strategische Komponente, die Fabrikstrukturen dazu befähigt, sich den wechselnden Anforderungen anzupassen und sich zu wandeln. Die Lernfähigkeit von sozio-technischen Systemen ist eine Grundvoraussetzung für eine wettbewerbsfähige Weiterent-

wicklung der Produktion. Sie ermöglicht sowohl kontinuierliche Verbesserungen in den Produkten, Technologien und Prozessen, kann aber darüber hinaus auch als strategischer Ansatz zur langfristigen Steigerung der strukturellen Wandlungsfähigkeit in den Fabriken eingesetzt werden. Wissen ist der Wettbewerbsfaktor, mit dem Reaktionsschnelligkeit in Entwicklungs-, Planungs- und Produktionsprozessen der variantenreichen Serienfertigung erzeugt und komplexe Abläufe auch in den Grenzbereichen der Prozesse beherrscht und beschleunigt werden können. Unter diesen Gesichtspunkten kommt der Integration von Wissen in die Produktionssysteme außerordentliche Bedeutung zu [Westkämper 2010a, Westkämper 2010b]. Die Integration von Wissen hat sich im Kontext der Fabriken und ihrer Strukturen auf die technischen, methodisch organisationalen und personellen Befähigungen zu beziehen (Abbildung 5.26).



**Abbildung 5.26: Integration von Wissen in Produktionssysteme**

Insbesondere bei den technologischen Segmenten, die in ihrem Automatisierungsgrad und ihrer Präzision bereits weit fortgeschritten sind und in ihrer Leistungsfähigkeit nach dem Technologie S-Modell weit ausgereift sind, sind Optimierungen nur noch in den Grenzbereichen der Technologien möglich. Die Integration von Wissen und technischer Lernfähigkeit befähigt, technische Grenzen qualitativ und kapazitiv zu überschreiten und Rationalisierungseffekte in den Grenzbereichen zu erzielen. Durch die Erhöhung des Automatisierungsgrads in Verbindung mit integrierten Wissensmodellen sind die Taktzeiten der technologischen Verfahren und Prozesse weiter zu reduzieren. Die Engpässe der Technologien und

Verfahren sind wesentlich durch die Prozesszeiten und die Zeiten bestimmt, die zur zuverlässigen und präzisen Einstellung der Parameter erforderlich sind. Die Reduzierung der Prozesszeiten kann durch Prozessmodelle erfolgen, in denen die für die Maschinen- und Anlagentechnik optimalen Parametereinstellungen hinterlegt sind. Eine zuverlässige und durchgängige Parameterdokumentation senkt die Rüstzeiten zur Parametereinstellung und sorgt für stabile Prozesse sowie qualitativ hochwertige Prozessergebnisse. Durch die Integration von Wissens- und Prozessmodellen sind Leistungssteigerungen in den Grenzbereichen der Technologien und Prozesse zu erreichen. Die Generierung und Optimierung von Wissensmodellen erfolgt über ein Lernen aus der Zukunft durch Simulation der technischen Prozesse. Die Prozesse sind in technischen Modellen abzubilden und die Parameter durch Simulationsdurchläufe dem Optimum möglichst in Echtzeit anzunähern und anzupassen. Um die Wechselwirkungen im Gesamtsystem abzuschätzen ist hierzu die Integration der Modelle in eine durchgängige IT-Prozesslandschaft notwendig.

Wissen spielt auch im methodischen und organisatorischen Bereich eine große Rolle. Die Integration der methodischen Lernfähigkeit in den direkten und den indirekten Bereichen der Fabriken reduziert Verschwendung und führt zu schlanken Abläufen nach dem Lean-Prinzip in allen Bereichen der Fabriken. Hierzu sind die Prozesse und Abläufe in den indirekten Bereichen zu standardisieren und der Wertstromgedanke in die indirekten und der Produktion vorgelagerten Segmente zu übertragen. Abläufe, die nicht zu einer Wertsteigerung des Produkts führen, sind aus den Geschäftsprozessen konsequent zu eliminieren. In Bezug auf Rationalisierungspotential im indirekten Bereich ist grundsätzlich zwischen Routineaufgaben und Aufgaben, die Kreativität erfordern, zu unterscheiden und in den Ablaufstrukturen zu trennen. Für Routineaufgaben bietet sich die Automatisierung mit Hilfe von wissensbasierten Systemen und Werkzeugen an, die durch das indirekte Personal gepflegt, betreut und optimiert werden. Aufgaben konzeptioneller Art, die eine hohe Kreativität und abteilungsübergreifenden Austausch erfordern, sind räumlich zu integrieren, um hohe Synergieeffekte und Reaktionsschnelligkeit in den indirekten Abläufen zu erzielen.

Entscheidend bei Ansätzen, die Lernfähigkeit und Wissen in Systeme implementieren, ist das Personal und seine Qualifikation. Lernen am Arbeitsplatz, Qualifizierung und Weiterbildung sind die wesentlichen Voraussetzungen, um implizites Wissen der Mitarbeiter weiterzuentwickeln und nachhaltig für das Unternehmen und seine Prozesse zu nutzen. Durch die permanente Weiterentwicklung und Förderung der Lernfähigkeit der Mitarbeiter werden diese langfristig an das Unternehmen gebunden und sind aufgrund ihrer Erfahrung und ihres Wissens der Treiber für Optimierungen und einer kontinuierlichen Verbesserung der Produkte, Ressourcen und Prozesse in allen Bereichen und auf allen Ebenen der Fabriken.

### 5.6.3 Wirkung der strategischen Stoßrichtungen auf die strategischen Zielsetzungen und die Wandlungstreiber

Im Folgenden sind die strategischen Stoßrichtungen hinsichtlich ihrer Wirkung auf die strategischen Ziele und die Wandlungstreiber zu bewerten. Die Beschreibung der Wirkungslinien in genereller Form dient dazu, Spannungsfelder zwischen den Zielen zu erkennen, Priorisierungen der Anforderungen aus den strategischen Zielen und den Wandlungstreibern vorzunehmen sowie positive und negative Wechselwirkungen der konzeptionellen Entwicklungsgroßlinien für die weiteren Planungsschritte zu erkennen und zu berücksichtigen. In Anlehnung an die Qualitätsmanagementmethode Quality Function Deployment (QFD), beschrieben in [Schloske 2011], und ihre Bestandteile wird ein Wirkungswürfel mit Dachmatrix entwickelt, der die drei Dimensionen strategische Ziele, die Wandlungstreiber und die strategischen Stoßrichtungen in Betracht zieht (Abbildung 5.27).

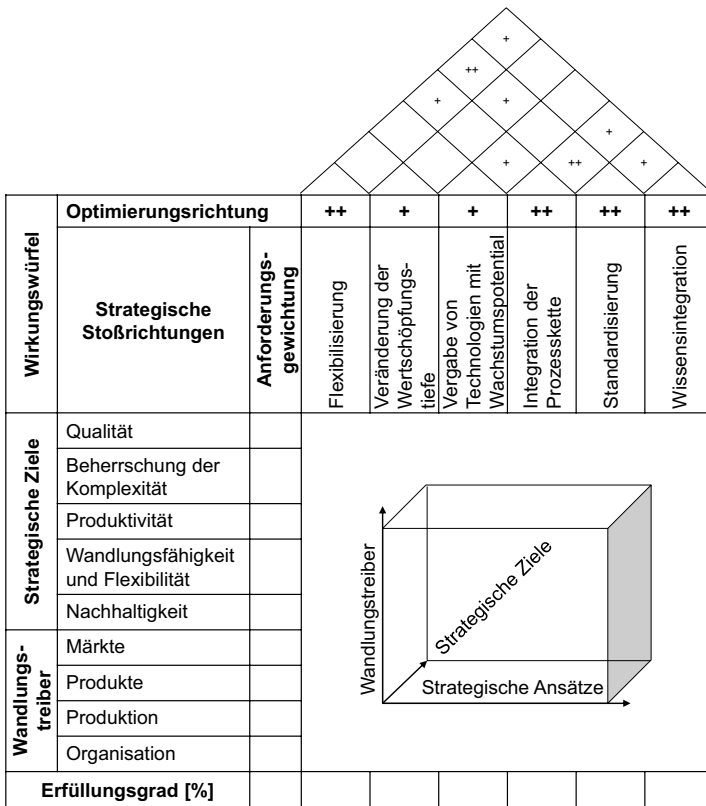


Abbildung 5.27: Wirkungswürfel zur Bewertung der strategischen Stoßrichtungen

In einem ersten Schritt erfolgt die Priorisierung der strategischen Ziele durch einen paarweisen Vergleich. In einer Paarvergleichsmatrix werden die jeweiligen Ziele hinsichtlich ihrer Wichtigkeit in den drei Klassen wichtiger, gleich wichtig und weniger wichtig miteinander verglichen. In einer zweiten Paarvergleichsmatrix erfolgt die Bewertung zur Priorisierung der Wandlungstreiber nach dem gleichen Schema. Die beiden Matrizen werden zusammengeführt und hinsichtlich ihrer Bedeutung gewichtet. Vor dem Hintergrund, dass die Strukturplanung unter Berücksichtigung von Ansätzen zur Steigerung der strukturellen Wandlungsfähigkeit durchzuführen ist, sind die Wandlungstreiber im Gesamtkontext als bedeutender einzustufen als die übrigen strategischen Ziele. Sowohl die strategischen Zielsetzungen als auch die Priorisierungen haben den unternehmensspezifischen Prämissen zu folgen und sind projektspezifisch anzupassen. Durch die Bildung der Quersumme ergeben sich die gewichteten Anforderungen, die zur besseren Vergleichbarkeit normiert werden.

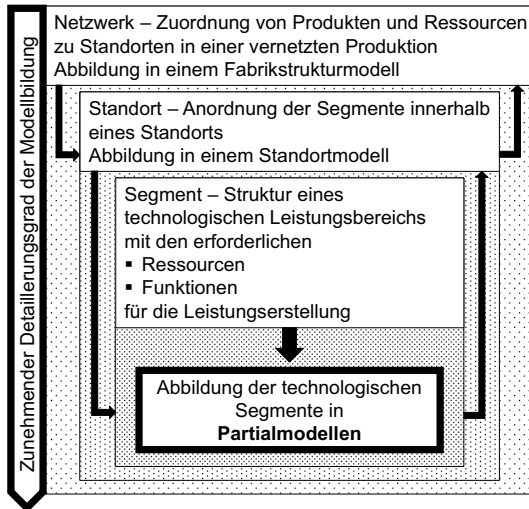
In einem zweiten Schritt erfolgt nun ein Variantenvergleich zwischen den strategischen Stoßrichtungen im Hinblick auf die Anforderungen aus den Zielen und Wandlungstreibern. Die Bewertung erfolgt in fünf Kategorien: stark positiver Einfluss, positiver Einfluss, kein Einfluss, negativer Einfluss und stark negativer Einfluss. Durch die Multiplikation dieser Größen mit der jeweiligen Wichtigkeit der Anforderungen und der Summation der Produkte je Lösungsalternative ergibt sich eine Gesamtbewertung der strategischen Stoßrichtungen in Form eines Erfüllungsgrads, der prozentual in Abhängigkeit der besten Lösungsvariante ausgedrückt wird.

Abschließend werden im dritten Schritt die strategischen Stoßrichtungen hinsichtlich ihrer gegenseitigen Einflussrichtung in der Dachmatrix des Wirkungswürfels begutachtet und die Optimierungsrichtung im Gesamtkontext abgeleitet. Zu unterscheiden ist zwischen stark positivem, positivem, keinem, negativem und stark negativem Einfluss. Wie aus der Dachmatrix in Abbildung 5.27 ersichtlich ist, ergänzen sich die Flexibilisierung und Standardisierung stark positiv. Negative Auswirkungen bestehen zwischen den Ansätzen nicht, was eine gute Basis für die Kombination der Stoßrichtungen darstellt. Auf Grundlage dieser Matrix werden die Korrelationen zwischen den Entwicklungslinien transparent und können synergetisch für konkrete Standortkonzepte im Rahmen der weiteren Planungsschritte zusammengeführt werden. Ein Beispiel für eine Bewertung im Wirkungswürfel ist Anhang A.1 zu entnehmen.

#### **5.6.4 Entwicklung von Partialmodellen für eine Fabrik**

Aus den strategischen Stoßrichtungen sind im Folgenden Konzeptionen abzuleiten, mit denen sich die Wandlungsfähigkeit in den Strukturen der Fabriken nachhaltig steigern lässt. Hierzu sind die Ebenen der Fabriken in ihrer vertikalen Struktur, wie sie in Kapitel 2.2.2 beschrieben sind, heranzuziehen und in Modellen abzubilden. Das Gesamtsystem ist in seinen

Strukturebenen mit zunehmendem Detaillierungsgrad zu modellieren und in der Rückkoppelung wiederum zum Gesamtmodell mit steigendem Abstraktionsgrad zu aggregieren (Abbildung 5.28).

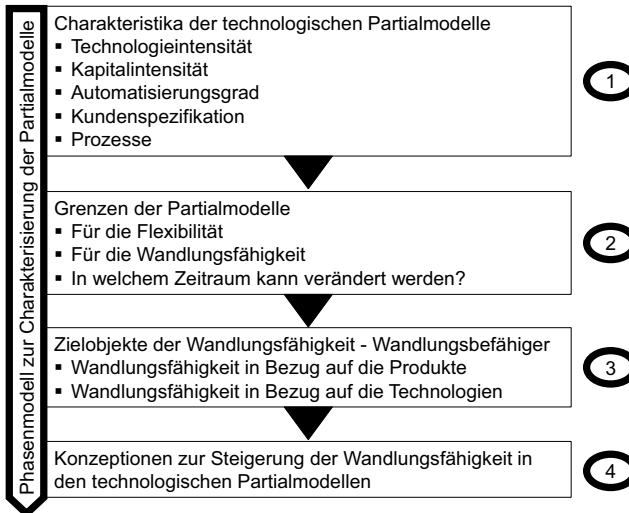


**Abbildung 5.28: Abbildung der technologischen Segmente in Partialmodellen**

Bislang erfolgte die Modellbildung zur Ableitung strategischer Konzepte auf den Ebenen des Produktionsnetzwerks und der Standorte. Die Konzeptionen auf Netzwerkebene umfassen die Zuordnung von Produkten und Ressourcen zu Standorten in einer vernetzten Produktion. Diese sind in ihrer Ausgangskonfiguration im Fabrikstrukturmodell abgebildet. Eine Ebene tiefer sind die Standorte in Bezug auf ihre kapazitiven Ressourcen und ihrer räumlichen Anordnung innerhalb der Werksgrenzen modelliert. Ein Prinzipmodell einer Idealstruktur für eine Fabrik unter dem Gesichtspunkt der Wandlungsfähigkeit ist in Kapitel 5.5 beschrieben. Dieses Grundmodell ist nun auf der Ebene der technologischen Segmente, die den Standorten des Produktionsnetzwerks zugeordnet werden und damit in ihrem Zusammenwirken die Struktur der Fabriken bilden, in Partialmodellen zu modellieren. Die Segmente stellen technologische Leistungsbereiche dar, die für ihre Eigenständigkeit und Autonomie alle zur Leistungserstellung erforderlichen Ressourcen und Funktionen bündeln und die daher im Kontext der Wandlungsfähigkeit mit Wandlungsbefähigern auszustatten sind. Die Veränderungsfähigkeit der technologischen Segmente bezieht sich auf den Wandel im mittelfristigen taktischen Zeithorizont (siehe Kapitel 2.3), der den Grundlinien und Visionen aus der langfristigen strategischen Planung zu folgen hat. Im Gegenzug eröffnen die technologischen Segmente mit ihren Fähigkeiten und Ausprägungen Gestaltungs- und Umsetzungspotentiale für die

Strukturplanung im langfristigen Zeitbereich auf Standort und Netzwerkeebene. Zur Ausarbeitung konzeptioneller Ansätze zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit auf der Ebene der Leistungssegmente, sind diese in Partialmodellen abzubilden und zu beschreiben.

Die Charakterisierung der technologischen Leistungssegmente hat in Teilschritten zu erfolgen, deren Phasen in Abbildung 5.29 beschrieben sind.



**Abbildung 5.29: Phasenmodell zur Charakterisierung der Partialmodelle**

Die erste Phase dient der Beschreibung der Segmente unter technologischen Gesichtspunkten, die zur Strukturbildung der Fabriken entsprechend der ressourcenseitigen Strukturierungsprinzipien von Interesse sind. Die Charakteristika der Modelle werden anhand ihrer Technologie- und Kapitalintensität sowie in ihrem Automatisierungsgrad beschrieben. Zur Festlegung des Kundenentkopplungspunkts und im Hinblick auf die Auftragssteuerung im logistischen und informationstechnischen Sinne ist der Grad kundenspezifischer Ausprägungen innerhalb des Segments zu spezifizieren. Abschließend sind die Besonderheiten innerhalb der technischen und logistischen Prozesse, des Material-, Informations-, und Energieflusses sowie der Abläufe zu charakterisieren.

In der zweiten Phase sind die begrenzenden Faktoren innerhalb der Partialmodelle in Bezug auf die Veränderungsfähigkeiten Flexibilität und Wandlungsfähigkeit aufzuzeigen sowie die Zeiträume abzuschätzen, im Rahmen derer die technologischen Segmente an die Anforderungen aus den Wandlungstreibern anzupassen sind.



Im Weiteren sind die Zielobjekte zu benennen, die aus Sicht der Produkte und der Produktionstechnologien zum Wandel zu befähigen sind.

Auf dieser Basis sind abschließend Konzeptionen zu entwickeln, die dazu beitragen, die Wandlungsfähigkeit der technologischen Partialmodelle zu steigern. Die Partialmodelle sind für alle technologischen Bereiche der Fabriken im Produktionsnetzwerk zu erstellen, um anschließend zu einer Gesamtstruktur zusammengeführt zu werden.

Das technologische Segment der Montage ist wie aus den Analysen der Produkte und ihrer Komplexität zu schließen ist, ein äußerst dynamischer Bereich mit schwankenden Anforderungen und folglich hohem Wandlungsbedarf. Aus diesem Grund wird im Folgenden exemplarisch das Partialmodell für das Montagesegment einer Automobilfabrik aufgebaut, wie dies gleichermaßen für alle technologischen Segmente des Fahrzeugbaus Presswerk, Karosseriebau und Lackiererei sowie für die mechanische Fertigung, Vor- und Endmontage der Motorenfertigung geschehen ist.

Das grundsätzliche Modell der Montage mit seinen Teilsegmenten Vormontage und Endmontage sowie den für die Autonomie des Montagesegments erforderlichen Funktionen zeigt schematisch Abbildung 5.30.

Der Hauptmaterialfluss des Montagesegments folgt der Hauptlinie, in die die Rohkarosse aus der Lackiererei eingesteuert wird. In getakteten Abläufen und Arbeitsfolgen durchläuft der kundenspezifische Auftrag die Takte, Fertigungsgruppen und Bandabschnitte, die teilweise automatisiert ablaufen wie zum Beispiel die Scheibenmontage, Hochzeit und Kraftstoffbefüllung. Die Belieferung der Linie hat je nach Komponente oder Bauteil entweder über die Vormontagen oder direkt an die Hauptlinie möglichst Just in Time in der richtigen Sequenz zu erfolgen. Die Vormontagelinien sind nach dem Fischgrätenprinzip in die Hauptlinie zu überführen, um kurze Wege und Transportzeiten zu gewährleisten. Auch die Vormontagelinien sind kundenspezifisch Just in Time zu beliefern. Zur autonomen Leistungserstellung verfügt das Segment über alle notwendigen Einrichtungen der direkten und indirekten Bereiche und ist an das Produktionssteuerungssystem mit den erforderlichen Schnittstellen zu den betrieblichen Informations- und Kommunikationssystemen angeschlossen. Über diese Schnittstelle hat das Leistungssegment alle erforderlichen Zugriffe und Einsichten in relevante Arbeitsunterlagen. Das Segment verfügt über alle planenden und steuernden Funktionen, die zur eigenständigen Auftragserfüllung befähigen und Optimierungen im Sinne selbstorganisierenden Handelns zulassen. Ebenfalls sind die peripheren Bereiche, welche die Funktionsfähigkeit des Segments gewährleisten wie die Betriebsmittelverwaltung, Wartung und Instandhaltung integriert. Zur Sicherung einer Null-Fehler Produktion ist die dezentrale Quali-

tätssicherung in das Leistungssegment eingegliedert und verantwortet alle Prüfungen in den Takten sowie den abschließenden Prüf- und Finishbereich, bevor die Disposition des Endprodukts erfolgt.

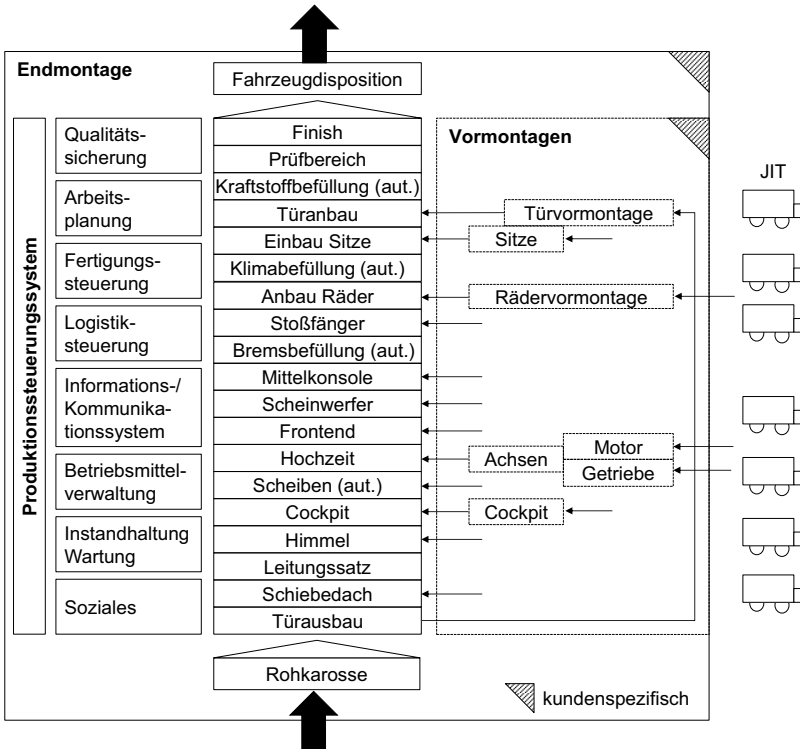


Abbildung 5.30: Partialmodell der Montage am Beispiel der Automobilindustrie

Trotz vorwiegend manueller Tätigkeiten in den Linien und einem im Vergleich zu den vorgelegerten technologischen Segmenten geringen Automatisierungsgrad, zeichnet sich die Montage insbesondere aufgrund des zunehmenden großen elektronischen Bereichs mit den erforderlichen Prüfeinrichtungen durch eine hohe Technologieintensität und Kapitalbindung in Bezug auf die Betriebsmittel aus. Kennzeichnend sind kundenspezifische Produkt- und Ausstattungsvarianten, deren Teile- und Komponentenvielfalt einer enormen Dynamik und Änderungsintensität unterliegen. Dies führt zu einer hohen produktseitigen Komplexität, die sich in den betrieblichen Abläufen der Montage widerspiegelt. In der Konsequenz ergeben sich hochkomplex integrierte logistische und informationstechnische Prozesse, mit denen die fùgetechnischen Abläufe und Folgen zu koordinieren sind und die hohe Anforderungen an das Betriebs- und Produktionsmanagement der Montage stellen (Abbildung 5.31).

1. Charakteristika der Montage
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vorwiegend manuelle Tätigkeiten, geringer Automatisierungsgrad</li> <li>▪ Hohe Technologie- und Kapitalintensität im elektronischen Bereich und Prüfbereich</li> <li>▪ Kundenspezifische Produktvarianten und Ausstattungen</li> <li>▪ Hohe Teilevarianz und Komplexität</li> <li>▪ Hohe Integration der logistischen und fügetechnischen Prozesse mit hohen Anforderungen an das Betriebsmanagement</li> </ul>

**Abbildung 5.31: Charakterisierung des Montagesegments**

In der Komplexität und Vielfalt der Varianten und Abläufe liegen auch die Grenzen in Bezug auf die Veränderungs- und Anpassungsfähigkeit des Montagesegments. Die Grenzen sind in die drei Ressourcenbereiche unterteilt: Grenzen in Bezug auf die Maschinen und Anlagen, das Personal und die Fläche (Abbildung 5.32).

Grenzen der Maschinen- und Anlagentechnik bestehen hinsichtlich der quantitativen Anpassung der technischen Kapazitäten verbunden mit der Veränderung des technisch möglichen Durchsatzes. Zurückzuführen sind diese Restriktionen auf minimal mögliche Takt- und Prozesszeiten, die bereits in den Grenzbereichen der technologischen Fähigkeiten operieren und den Engpass der gesamten Abläufe darstellen. In qualitativer Hinsicht bestehen Grenzen in Bezug auf die Produkt-, Varianten- und Ausstattungsflexibilität, deren Fertigung in den Maschinen, Anlagen und Vorrichtungen aufgrund technischer und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen und Begebenheiten nicht vorgesehen ist.

2. Grenzen der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit		
<b>Maschinen und Anlagen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quantitativ: technische Kapazität, Taktzeit</li> <li>▪ Qualitativ: Produkt- und Variantenflexibilität</li> </ul>	<b>Personal</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quantitativ: Personalkapazitäten, Arbeitszeitmodelle, Tarifverträge, Betriebsvereinbarungen</li> <li>▪ Qualitativ: Qualifikation</li> </ul>	<b>Fläche</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quantitativ: Produktdimensionen, Gewicht</li> <li>▪ Logistikfläche</li> </ul>

**Abbildung 5.32: Grenzen der Veränderungsfähigkeit in der Montage**

Personelle Restriktionen beziehen sich quantitativ auf die Anpassungsfähigkeit der Personalkapazitäten, die maßgeblich durch die Arbeitszeitmodelle bestimmt sind und deren Umstellbarkeit von den jeweils gültigen Tarifverträgen und Betriebsvereinbarungen abhängt. Die qualitative Grenze liegt in der Flexibilität des Personals hinsichtlich der Einsatzfähigkeit für verschiedene Fertigungs- und Bearbeitungsaufgaben. Diese Grenze wird bestimmt durch die Qualifikation und Kompetenz der Personalressourcen.

Die dritte Dimension umfasst Flächenrestriktionen, die quantitativ zur Herstellung einer größeren Produktmenge aufgrund mangelnder Logistikfläche fehlen oder aber aufgrund der Produktdimensionen in Breite, Höhe und Gewicht nicht den Anforderungskriterien genügen.

### 3. Zielobjekte der Wandlungsfähigkeit - Wandlungsbefähiger

- Flexible Montage der Produkt- und Ausstattungsvarianz
- Fähigkeit zur Integration und Desintegration neuer Produkte, Varianten und Ausstattungen → Anläufe
- Beherrschung der logistischen und informationstechnischen Dynamik und Komplexität

#### **Abbildung 5.33: Anforderungen und Zielobjekte der Wandlungsfähigkeit**

Zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit im Montagesegment sind Konzeptionen zu entwickeln, mit denen sich die dargestellten Grenzen in andere Dimensionen überschreiten lassen. Die Anforderungen beziehen sich folglich erstens auf die technische und personelle Fähigkeit, die Produkt- und Ausstattungsvarianz aller Fahrzeuge flexibel montieren zu können. Zweitens sind neue Produkte, Varianten und Ausstattungen in die Abläufe und Arbeitsfolgen aufwandsarm in Form permanenter Anläufe und Änderungen zu integrieren und zu desintegrieren sowie die mit diesen beiden Anforderungen verbundenen logistischen und informationstechnischen Prozesse in ihrer Dynamik und Komplexität zu beherrschen (Abbildung 5.33).

Aus diesen Anforderungen sind im Folgenden Ansätze zu entwickeln, mit denen die Wandlungsfähigkeit im Montagesegment konzeptionell unterstützt werden kann. Die Ansätze sind in produktseitige und ressourcenseitige Konzepte zu klassifizieren, die sich gegenseitig unterstützen und synergetisch ergänzen (Abbildung 5.34).

Produktseitig liegt einer der entscheidenden Stellhebel in der konstruktiven Auslegung und Gestaltung der Produkte. Durch eine hohe konstruktive Vormontierbarkeit der Ausrüstungs- und Ausstattungskomponenten lässt sich der Vormontagegrad in den Nebenlinien erhöhen und die Hauptlinien im Hinblick auf ihre Komplexität beruhigen. Die Standardisierung der Schnittstellen zum Einbau der Komponenten in alle Produkte vereinfacht die Abläufe und flexibilisiert die Prozesse für unterschiedliche Bauteile und Komponenten. Die Standardisierung kann ausgedehnt werden im Hinblick auf die skalierbare Konstruktion der Komponenten für verschiedene Produktklassen und die Erhöhung des Kommunalitätsgrades über die Produktsegmente hinweg. Diese Standardisierungskonzepte auf Produktseite können durch Modulbaukästen unterstützt werden, aus denen die Komponenten für unterschiedliche Konfigurationen kundenindividuell zusammengestellt werden können.

Ressourcenseitig bestehen Ansätze in der Standardisierung der Linien, Montageabläufe, Fügefolgen, Takte und Prozesse für alle Produkte. Dies bedeutet gleiche Linien für die Montage aller Produkte. Die Standardisierung und Duplikation der Linien ermöglicht die Integri-

on aller Produkte in eine Linie, wodurch Lerneffekte zur Effizienzsteigerung gezielt und strategisch genutzt werden können.

4. Konzeptionen zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit in der Montage	
<p>produktseitig</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ konstruktive <b>Vormontierbarkeit</b> der Ausrüstungs-/Ausstattungs-komponenten zur Beruhigung der Hauptlinie</li> <li>▪ <b>Standardisierung</b> der Schnittstellen zum Einbau von Komponenten für alle Produkte</li> <li>▪ Konstruktive Skalierbarkeit</li> <li>▪ Hohe Kommunalität</li> <li>▪ Komponenten aus den Modulbaukästen</li> </ul>	<p>ressourcenseitig</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Standardisierung</b> der Linien, Montageabläufe, Takte und Prozesse für alle Produkte</li> <li>▪ <b>Modularisierung</b> des Montageaufbaus erhöht den technischen Flexibilisierungsgrad durch Befähigung zur Integration und Desintegration von Arbeitsfolgen (Plug &amp; Produce)</li> <li>▪ <b>Verzweigung</b> der Linie für spezielle Montageaufgaben</li> <li>▪ Montage der kundenspezifischen Varianz ausschließlich in der Vormontage</li> <li>▪ Hoher <b>Vormontagegrad</b> kundenspezifischer Ausstattungen</li> <li>▪ Verknüpfung der Vormontage mit der Hauptlinie nach dem Fischgrätenprinzip</li> <li>▪ <b>Flexible Automation</b> von Montagevorgängen, die eine hohe Präzision erfordern oder aus ergonomischen Gründen mit automatisierten Lösungen unterstützt werden können</li> <li>▪ Produktivitätssteigerung durch flexible Automatisierung der produkttypunabhängigen Montageaufgaben</li> <li>▪ Logistiksystem mit kurzen Wegen an die Linie, Lieferung des Fremdbezugs direkt an die Hauptlinie JIT/JIS bzw. für die Ausstattungen direkt an die Vormontagelinien</li> </ul>

**Abbildung 5.34: Konzeptionen zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit in den Montagesegmenten**

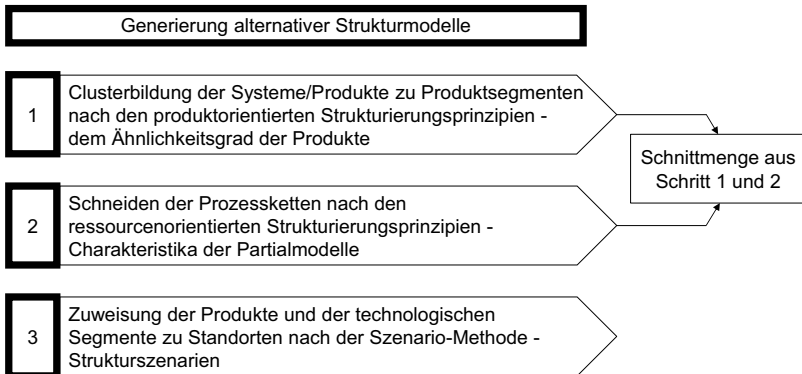
Durch eine Modularisierung der Montagelinien lassen sich die Arbeitsinhalte und -folgen in den Linien durch Integration und Desintegration von Modulen anpassen und somit der technische Flexibilisierungsgrad durch Plug and Produce Konzepte erhöhen. Für spezielle Montageaufgaben sind die Montagelinien in Haupt- und Nebenlinien zu verzweigen, um die kundenspezifische Varianz und Individualisierungsumfänge ausschließlich in den Vormontagelinien zu montieren. Damit ist der Vormontagegrad der Komponenten zu erhöhen und die Varianz aus der Hauptlinie fernzuhalten. Zur Gewährleistung kurzer Wege sind die Verzweigungen der Haupt- und Nebenlinien nach dem Fischgrätenprinzip anzuordnen. Montagevorgänge, die eine hohe Präzision erfordern und unter ergonomischen Gesichtspunkten für das Personal als schwere Tätigkeiten einzustufen sind, sind mit flexiblen Automatisierungslösungen zu unterstützen. Die Automatisierung ist auch zwecks Produktivitätssteigerungen für Montagevorgänge in Betracht zu ziehen, die produktunabhängig und repetitiv durchführbar sind. Zur Optimierung der Prozess- und Taktzeiten ist Wissen in die technischen Anlagenkonzepte zu integrieren. Im Hinblick auf die zu montierende Varianz der Komponenten und Teile ist der Vorkommissionierungsgrad in der Belieferung der Haupt- und Vormontagelinien hoch zu halten und das Logistiksystem so auszulegen, dass kurze Wege an die Linien ver-

wirklich werden können. Der Fremdbezug ist vor diesem Hintergrund Just in Time bzw. Just in Sequence direkt an die Linie zu liefern.

Das Partialmodell umfasst die Aspekte aller Wandlungsbefähiger und gilt in seiner Konzeption generell und standortübergreifend für alle Montage- und Produktsegmente. Die Partialmodelle wurden für alle Segmente erstellt und sind im weiteren Planungsschritt in ein Gesamtmodell zu überführen.

### 5.6.5 Entwicklung alternativer Strukturmodelle

Die Strukturmodelle werden generiert, indem die Partialmodelle zu alternativen Strukturkonzepten auf der Ebene der Standorte und des Produktionsnetzwerks zusammengeführt werden. Dies erfolgt grundsätzlich in drei Teilschritten, die auf den bisherigen Planungsstand aufbauen (Abbildung 5.35).



**Abbildung 5.35: Entwicklung alternativer Strukturszenarien**

In einem ersten Schritt werden die Produkte nach ihrem Ähnlichkeitsgrad entsprechend der in Kapitel 5.6.1 beschriebenen produktorientierten Strukturierungsprinzipien zu Clustern zusammengefasst. Im zweiten Schritt werden die Prozessketten nach den ressourcenorientierten Strukturierungskriterien geschnitten. Das Schneiden der Prozessketten erfolgt auf Grundlage der technologischen Charakteristika der Partialmodelle, die für die jeweiligen Segmente der vernetzten Produktion erstellt wurden. Die Schnittmenge der ersten beiden Schritte dient als Eingangsgröße, um Strukturszenarien zu generieren. Im dritten und letzten Schritt werden die Produktcluster und Systeme sowie die technologischen Segmente den Standorten zugewiesen. Diese kreative Planungsphase erfolgt in Form von Gestaltungsszenarien nach dem Vorgehen der Szenario-Methode, deren Grundlagen in Kapitel 3.2.3 beschrieben sind.

Die grundlegenden Alternativen werden unter Berücksichtigung der vorhandenen Kapazitäten und Standortprofile, die im Rahmen der Planungsmethodik detailliert untersucht und zu Modellen abstrahiert wurden, szenarienbasiert entwickelt. Hierzu ist die Matrix, aus der die strategischen Grundlinien in Abbildung 5.15 abgeleitet wurden, in Bezug auf die Produkte, Standorte und die Prozesskette zu konkretisieren sowie Strukturszenarien zu generieren und zu beschreiben. Das Planungsergebnis der Szenarienbildung sind alternative Strukturmodelle, die unter Berücksichtigung der strategischen Stoßrichtungen und ihrer Wandlungsbefähiger entwickelt werden. Sie haben den Grundprinzipien zur Strukturbildung und somit den Charakteristika der Produkte sowie den ressourcenbasierten Partialmodellen zu entsprechen.

Im Folgenden werden exemplarisch drei grundlegende Szenarien aus der praktischen Anwendung der Planungsmethode kurz und prägnant beschrieben, die dann einer detaillierteren Bewertung zu unterziehen sind.

Produkt-segmente	Produkt-klassen	Prozesskette/Technologiesegmente										Standorte			
		Entwicklung	Planung	Prototypenbau/ Vorserie	Werkzeugbau	Fremdfertigung	Mechanische Fertigung	Teilefertigung	Komponenten- fertigung	Oberfläche	Vormontagen	Endmontage	Finish	A	B
														C	D
E-Segment	E.1	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
D-Segment	D.2	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	D.1	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
C-Segment	C.2	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	C.1	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
B-Segment	B.3	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	B.2	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	B.1	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
A-Segment	A.4	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	A.3	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	A.2	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	A.1	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Motoren		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

**Abbildung 5.36: Strukturalternative A – durchgängiges Drehscheibenkonzept**

In Strukturalternative A (Abbildung 5.36) werden die Produkte zu Segmenten vergleichbarer Bauweise, technischem Profil und Dimension gruppiert und entsprechend der Klassifizierung oberes, mittleres und unteres Segment den Standorten zugewiesen. Die Produktsegmentierung legt die horizontalen Schnitte in der Zuordnung und damit die erforderliche Flexibilisierung sowie die resultierende Integration in vertikaler Richtung fest. In horizontaler Richtung wird die Prozesskette so geschnitten, dass kurze Reaktionszeiten und eine hohe technisch

umsetzbare Integration der Ressourcen für einen wirtschaftlichen Kapitaleinsatz an den Standorten erzielt werden. Die der Serienproduktion vorgelagerten Segmente der Entwicklung, Planung und des Prototypenbaus werden in zentral zu verantwortende und dezentrale produktspezifische Aufgabenbereiche unterteilt, die den produzierenden Fabriken zugewiesen werden. So sind kurze Wege von der Konstruktion in die Produktion für den laufenden Serienbetrieb zu verwirklichen, da die Experten für die Produktsegmente vor Ort angesiedelt sind. Der Werkzeug- und Vorrichtungsbau wird zentral dem Standort A zugewiesen, an dem auch die zentralen Elemente der Vorserie angesiedelt werden. Die mechanische Fertigung ist als spezifisches Segment, in dem eine hohe Präzision erforderlich ist, an einem Standort zu zentralisieren. Denkbar ist für diesen Bereich ein entfernt liegender Standort, der sich auf diese Technologien in seinen Abläufen und flachen Organisationsformen spezialisiert. Unter technologischen Gesichtspunkten ist im praktischen Beispiel die räumliche Zuordnung der mechanischen Fertigung der Produktlinie Fahrzeugfertigung mit der der Motorenfertigung an einen Standort zur Erzielung gegenseitiger Synergieeffekte in Betracht zu ziehen. Grundsätzlich sind die Kernlinien Systemfertigung Fahrzeug und Komponentenfertigung Motoren aufrechtzuerhalten.

Die Teilefertigung erfolgt auftragsneutral in Losgröße mit dem Ziel voller Auslastung an drei Standorten für das untere, mittlere und obere Produktsegment. An das Ende der Teilefertigung ist der Kundenentkopplungspunkt zu setzen, so dass ab der Komponentenfertigung auftragspezifisch und markorientiert in einer zusammenhängenden Kette produziert wird. Diese Prozesskette ist grundsätzlich für jedes zu fertigende Produkt bis Kundenauslieferung zusammenzuhalten.

Das Strukturszenario sieht durchgängige Drehscheiben für die gesamten Produktsegmente vor, die für eine gleichmäßige Auslastung aller Werke der vernetzten Produktion sorgen. Für diese Drehscheiben sind die Linien identisch an den zweiten Standort zu duplizieren. Die Produktklassen innerhalb eines Segments und die Maschinen- und Anlagentechnik auf der Ressourcenseite sind so zu konstruieren und auszulegen, dass die Produktsegmente in eine für dieses Segment flexibilisierte Linie eines Standorts integriert werden können. In einem zweiten Schritt ist die Integration über die Produktsegmentgrenzen hinweg auszudehnen. Wie in Kapitel 5.6.2.1 im Rahmen der Flexibilisierungsstrategien beschrieben, kommt der vertikalen Integration über die Produktklassen und -segmente unter Produktivitäts- und Flexibilitätsgesichtspunkten sowie unter Berücksichtigung der Lerneffekte große Bedeutung zu. In Standortkonzept A ist vor diesem Hintergrund das C-Segment in das B-Segment an Standort B zu integrieren. An Standort A erfolgt diese Integration zwischen dem B-Segment und dem A-Segment. Aufgrund der unterschiedlichen Bauweisen sind D- und C-Segment derzeit in der praktischen Anwendung technisch und wirtschaftlich nicht integrierbar.



Langfristig sind die Bauweisen und technischen Profile des C- und D-Segments insoweit anzugleichen, dass auch diese Integration realisierbar ist. Dies gilt insbesondere für Strukturalternative B (Abbildung 5.37), die sortenreine Werke vorsieht, bei denen keine Freiheitsgrade in Bezug auf Standortflexibilitäten und weiteres vertikales Integrationspotential zwischen den Produktsegmenten bestehen. Im Gegensatz zu Alternative A werden die Standorte auf die ihnen zugewiesenen Produkte spezialisiert und sind innerhalb ihrer Werksgrenzen den Anforderungen entsprechend zu flexibilisieren.

Produktsegmente	Produktklassen	Prozesskette/Technologiesegmente										Standorte					
		Entwicklung	Planung	Prototypenbau/ Vorserie	Werkzeugbau	Fremdfertigung	Mechanische Fertigung	Teilefertigung	Komponenten- fertigung	Oberfläche	Vormontagen	Endmontage	Finish	A	B		
E-Segment	E.1	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
D-Segment	D.2	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
	D.1	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
C-Segment	C.2	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
	C.1	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
B-Segment	B.3	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
	B.2	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
	B.1	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
A-Segment	A.4	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
	A.3	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
	A.2	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
	A.1	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
Motoren		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	

Abbildung 5.37: Strukturalternative B – sortenreine Standorte

Strukturalternative C sieht Rennerwerke innerhalb des Produktionsnetzwerks im unteren Produktsegment vor (Abbildung 5.38). Die der Produktion vorgelagerten Bereiche des Engineerings sind alternativ zu den anderen Konzepten in Summe dem zentralen Standort zugewiesen. Die Teilefertigung erfolgt an den beiden Standorten A und B jeweils für die oberen sowie die mittleren und unteren Produktsegmente, wobei die komplette Fertigungskette der Produktklassen A.4 und D.2 einem virtuellen Standort zugeordnet wird. An Standort B werden die oberen Segmente gefertigt, Standort A ist für das mittlere und gehobene untere Produktsegment verantwortlich, die Standorte C und D fertigen die Rennerprodukte im unteren Segment. Drehscheiben sind in diesem Konzept wie in der vorherigen Alternative B nicht vorgesehen.

Produkt-segmente	Produkt-klassen	Prozesskette/Technologiesegmente										Standorte							
		Entwicklung	Planung	Prototypenbau/ Vorserie	Werkzeugbau	Fremdfertigung	Mechanische Fertigung	Teilefertigung	Komponenten- fertigung	Oberfläche	Vormontagen	Endmontage	Finish	A	B	C	D	Virtuell	
E-Segment	E.1																		
D-Segment	D.2																		
	D.1																		
C-Segment	C.2																		
	C.1																		
B-Segment	B.3																		
	B.2																		
	B.1																		
A-Segment	A.4																		
	A.3																		
	A.2 R																		
	A.2 E																		
	A.1																		
Motoren																			

Abbildung 5.38: Strukturalternative C – Rennerwerke

Die exemplarisch dargestellten Strukturalternativen, die in Form von Gestaltungsszenarien erarbeitet wurden, integrieren die Partialmodelle zu Gesamtlösungen im Kontext einer Strukturplanung zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit einer vernetzten Produktion. Die Alternativen berücksichtigen in ihren Ausprägungen wandlungsbefähigende Elemente und führen diese zu Strukturkonzepten auf der Systemebene des Produktionsnetzwerks zusammen. Diese Konzepte stehen im weiteren Verlauf zur Diskussion und sind hinsichtlich ihrer Auswirkungen im Gesamtkontext der Fabrikstrukturen zu bewerten.

### 5.7 Auswahl des optimalen Strukturkonzepts

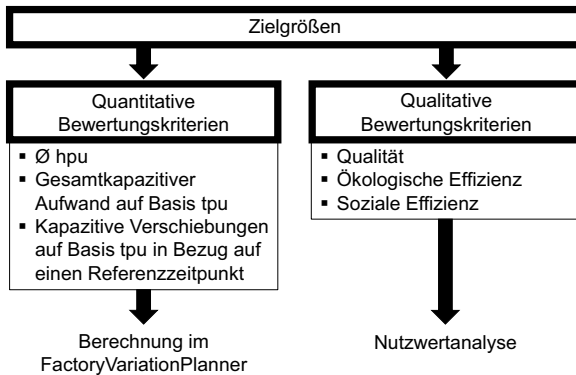
Die Planungssystematik schließt mit einem Bewertungsverfahren zur Auswahl des optimalen Strukturkonzepts für eine wandlungsfähige und vernetzte Fabrikstruktur. In diesem Zusammenhang sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Konzepte nur für einen bestimmten Zeitpunkt unter den zu diesem Zeitpunkt gültigen Rahmenbedingungen optimal sind, und sich von diesem Optimum im Zuge der fortlaufenden Veränderungen und Dynamik wieder entfernen. Überschreitet die Abweichung vom optimalen Betriebspunkt einen bestimmten Grenzwert, ist der Planungsdurchlauf erneut durchzuführen.

Zur Bewertung der Strukturalternativen sind Bewertungskriterien aufzustellen, die der Beurteilung aller Konzepte zugrunde gelegt werden. Anschließend sind Belastungsszenarien zu

generieren, mit denen die Strukturkonzepte konfrontiert werden und abschließend ist dann die Bewertung der Alternativen nach einem systematischen Verfahren durchzuführen.

**5.7.1 Bewertungskriterien für ein optimales Strukturkonzept**

Für die Bewertung der alternativen Gestaltungsszenarien eines Fabrikstrukturkonzepts sind Kriterien festzulegen, die den Zielgrößen einer wettbewerbsfähigen Produktion im turbulenten Umfeld und ihrer Vernetzung im Produktionsverbund gerecht werden. Aus der obersten Prämisse der Wettbewerbsfähigkeit wurden in Kapitel 2.3 die strategischen Ziele einer zukunftsfähigen Produktion definiert, welche im Folgenden in quantitative und qualitative Bewertungskriterien zu überführen sind (Abbildung 5.39). Die Bewertung der Konzepte im Rahmen dieser Arbeit erfolgt ausschließlich anhand quantitativ messbarer Größen. Die Bewertung der Konzepte in qualitativer Hinsicht ist über eine Nutzwertanalyse durchzuführen, die allerdings nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit ist.

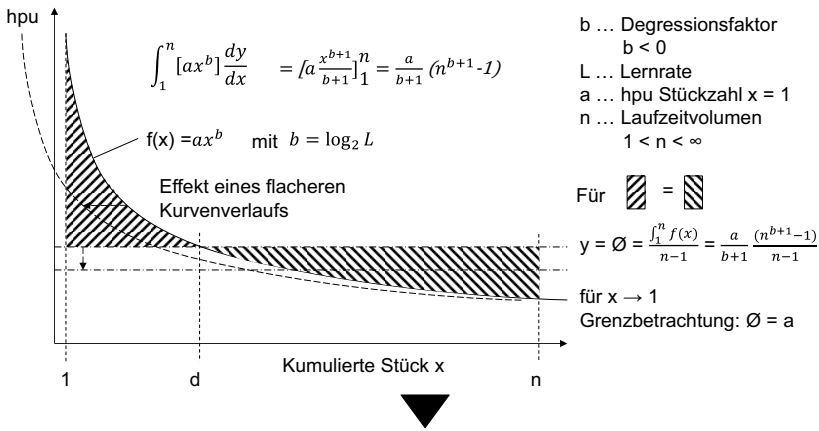


**Abbildung 5.39: Bewertungskriterien für ein optimales Strukturkonzept**

Die ökonomische Effizienz bestimmt maßgeblich die Wettbewerbsfähigkeit der industriellen Produktion und den Zeitpunkt einer notwendigen Fabrikadaption. Vor diesem Hintergrund sind strukturelevante Veränderungen und deren Auswirkungen auf und innerhalb der Fabrikstrukturen in erster Linie hinsichtlich ihrer ökonomischen Effizienz zu bewerten. Die Bewertung erfolgt quantitativ auf Basis von drei messbaren Bewertungskriterien, deren Bewertungsgrundlage aus den Ergebnissen der Planungsschritte zur Verfügung steht. Die verlässlichste Größe zur Messung der ökonomischen Effizienz innerhalb eines Unternehmens der variantenreichen Serienfertigung sind die Summe der Stunden pro Produkt in hpu für die Produktion und tpu für die gesamte Prozesskette inklusive des Engineerings. Aus diesem Grund werden die durchschnittlichen hpu als maßgebliche Bewertungsgröße für die Strukturkonzepte herangezogen. Entscheidend sind zur Bewertung einer Strukturanpassung und

deren Auswirkungen im Gesamtsystem der Fabriken neben den durchschnittlichen Stunden pro Produkt der gesamtkapazitive Aufwand sowie die kapazitiven Verschiebungen in Bezug auf einen Referenzzeitpunkt. An diese Bewertung der Strukturalternativen ist anschließend eine Investitionsstrategie zur Umsetzung der Konzepte abzuleiten, deren Kosten in weiteren Studien abzuschätzen sind. Die Abschätzung und Berechnung der Investitionskosten für die jeweiligen Szenarien ist jedoch nicht Teil der Bewertung im Rahmen dieser Arbeit.

Die durchschnittlichen Stunden pro Produkt über die gesamte Produktlaufzeit sind die entscheidende Maßgröße zur Bewertung der ökonomischen Effizienz der Produktion. Die Stunden pro Produkt folgen der Lernkurve, welche das Leistungsvermögen der Ressourcen über die Produktlebensdauer widerspiegelt. Aus diesem Verlauf sind folglich die durchschnittlichen hpu zu berechnen. Die durchschnittlichen hpu ergeben sich für die kumulierte Stückzahl d, für welche die beiden Flächen zwischen dem Lernkurvenverlauf und den durchschnittlichen hpu in den Grenzen der kumulierten Stückzahl 1 und d, sowie d und n gleich groß sind (Abbildung 5.40).



- Für sinkende Laufzeitvolumina entstehen steigende Durchschnittswerte.
- Für sinkende Start hpu sinken die Durchschnittswerte.
- Eine Verschiebung der Lernkurve nach links, das heißt ein flacher Lernkurvenverlauf senkt die Durchschnittswerte.

**Abbildung 5.40: Bewertung der durchschnittlichen Stunden pro Produkt in hpu**

Der Lernkurvenverlauf folgt  $f(x)$  nach Gleichung (3.1).

Für den Schnittpunkt d gilt zur Berechnung der durchschnittlichen hpu  $\varnothing$ :

$$\int_1^d f(x) dx - \emptyset \times (d - 1) = \emptyset \times (n - d) - \int_d^n f(x) dx \quad (5.4)$$

wobei

$x$  = Stückzahl kumuliert

$\emptyset$  = durchschnittlicher Stundenaufwand in [hpu]

$d$  = kumulierte Stückzahl bei  $\emptyset$

$n$  = Laufzeitvolumen des Produkts  $1 < n < \infty$

$x$  = Stückzahl kumuliert

Aus (5.4) ergibt sich für die durchschnittlichen Stunden hpu  $\emptyset$ :

$$\emptyset = \frac{\int_1^n f(x) dx}{n - 1} \quad (5.5)$$

Mit  $f(x)$  nach Gleichung (3.1) in (5.4) und der Bildung des Integrals errechnen sich die durchschnittlichen Stunden hpu  $\emptyset$  nach folgendem Zusammenhang:

$$\emptyset = \frac{a}{b + 1} \frac{(n^{b+1} - 1)}{n - 1} \quad (5.6)$$

mit

$a$  = Stunden bei  $x = 1$

$b$  = Degressionsfaktor nach Gleichung (3.2)

und der Grenzwertbetrachtung

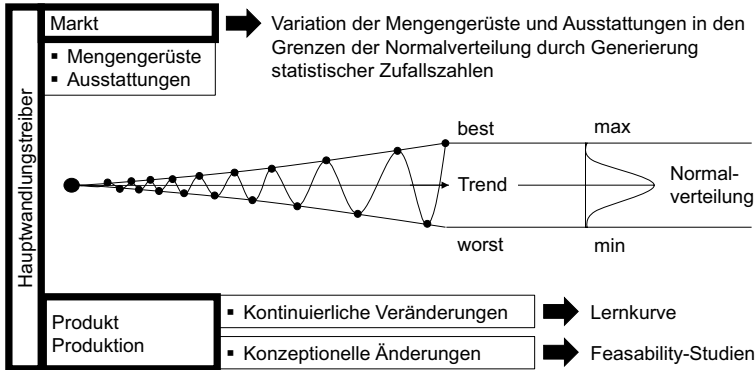
für  $x \rightarrow 1$ ,  $y = \emptyset \rightarrow a$

Die durchschnittlichen Stunden sinken sowohl für steigende Laufzeitvolumina  $n$  und für sinkende Anfangsstunden  $\text{hpu} = a$ . Ein flacherer Lernkurvenverlauf ist übertragen auf die Koordinatenachsen mit einer Verschiebung der Lernkurve nach links zu beschreiben, was ebenfalls zu einer Reduzierung der Durchschnittswerte führt. Flache Kurvenverläufe sind durch die Ansätze der strategischen Stoßrichtungen zu verwirklichen, wobei die Integration von Produkten in leistungsfähigere Linien einer der wesentlichen Stellhebel für diesen Effekt darstellt und in der Bewertung der Alternativen zu berücksichtigen ist.

### 5.7.2 Belastungsszenarien zur Bewertung von Strukturalternativen

Die Wandlungstreiber sind die Auslöser, welche die industrielle Produktion zur Anpassung ihrer Strukturen zwingen. Unter diesem Gesichtspunkt sind die Konzepte in der Bewertung dem Einfluss der Veränderungstreiber auszusetzen und hinsichtlich ihrer Wandlungsfähigkeit zu begutachten.

Hierfür sind Belastungsszenarien zu generieren und zu untersuchen, wie die Strukturalternativen auf diesen Einfluss reagieren (Abbildung 5.41). Diese Szenarien werden für die nicht zu beeinflussenden Wandlungstreiber des Marktes, die Mengengerüste und die Ausstattungen, erstellt. Mit zunehmendem Planungshorizont nehmen die Unsicherheiten in Bezug auf die Abschätzung der Mengengerüste und Ausstattungszusammensetzungen zu.



**Abbildung 5.41: Belastungsszenarien aus den Hauptwandelungstreibern**

Die Basis für die Variation der Mengengerüste bilden die Planwerte aus dem langfristigen Marketing- und Absatzplan, die nach oben und unten hin schwanken. Die Grenzen sind auf Basis von Untersuchungen der Planabweichungen vom Ist der vergangenen Jahre durch den Planer festzulegen. Während die Planwerte das Trendszenario vorgeben, bilden die Grenzen jeweils die Extremszenarien „best case“ und „worst case“ nach oben und unten ab. Zur Abbildung der Marktturbulenz und den Auswirkungen auf die Auftragszahlen sind in den Grenzen einer Standardabweichung statistische Zufallszahlen für die Mengengerüste der Produktsegmente zu generieren, die in ihrer Anzahl zu statistisch belastbaren Untersuchungsergebnissen führen. Über die Zufallszahlen werden Mengengerüste generiert, welche den durch den Markt zu produzierenden Produktmix modellhaft abbilden.

Die Ausstattungen sind in den Grenzen der Maximal- und Minimalausstattung der Produkte zu variieren. Die Verteilung der Ausstattungsvarianten in den drei Ausstattungskategorien minimal,  $\emptyset$  und maximal erfolgt auf Basis von Verteilungsuntersuchungen bereits produzierter Produkte, deren Untersuchungsergebnisse der Bewertung zugrunde gelegt werden.

Die kontinuierlichen Veränderungen in den Wandelungstreibern der Produkte und der Produktion werden über Lernkurvenmodelle abgebildet, deren Lernraten entsprechend der durchgeführten Analyseergebnisse für die Belastungsszenarien eingestellt werden.

Für die konzeptionellen Änderungen sind ergänzende Studien in Form von Feasibilities durchzuführen und daraus Szenarien in Bezug auf ihre strukturelle Wirkung zu entwickeln. Die ergänzenden Studien sind für die Belastungsszenarien in diesem Zusammenhang nicht vorgesehen.

Aus der Kombination der zu variierenden Faktoren der Mengengerüste, der Ausstattungen und der Lerneffekte, sind Belastungsszenarien zu entwickeln, die als Eingangsgrößen zur Bewertung der Strukturalternativen dienen. Die Belastungsszenarien sind unter den vorgegebenen Kriterien für einen bestimmten Zeitpunkt zu generieren und auf die Gestaltungsszenarien anzuwenden.

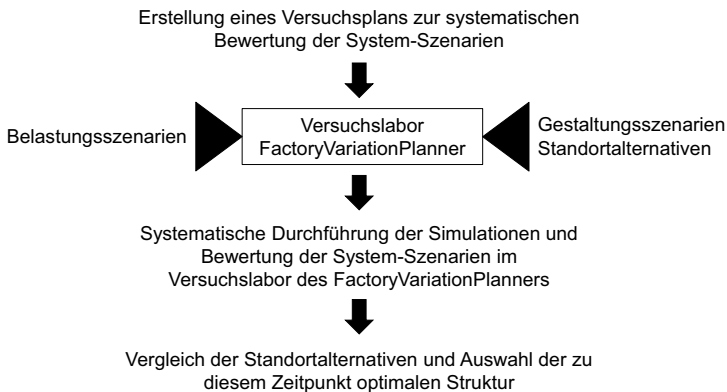
### 5.7.3 Bewertung der Strukturalternativen

Die Bewertung der Strukturalternativen erfolgt in Bezug auf die quantitativen Bewertungskriterien der hpu und tpu sowie dem gesamtkapazitiven Aufwand pro Jahr zu einem festgelegten Zeitpunkt. Dieser wird bestimmt durch den Wandlungsbedarf und Anpassungsdruck der Fabrikstrukturen, der sich aus den Wandlungstreibern ergibt. Somit bestimmen die Veränderungstreiber den Zeitpunkt für eine Strukturanpassung, deren Handlungsfelder und Alternativen vorab zu bewerten sind. Die massiven strukturellen Veränderungen sind in der Regel an die Einführung neuer Produkte und Systeme in der Produktion gekoppelt, womit sich diese Zeitpunkte für eine Bewertung alternativer Szenarien anbieten. Diese Veränderungen sind in ihren zeitlichen Skalen und der wechselseitigen Abhängigkeiten dem Technologiekalender zu entnehmen und deren Terminierung in die Bewertungszeitpunkte der strategischen Alternativen zu übertragen.

Für diese Zeitpunkte sind die Standortalternativen und ihre Belastungen aus den Wandlungstreibern zu System-Szenarien zusammenzufassen. Zur systematischen Bewertung der System-Szenarien ist ein Versuchsplan zu erstellen, nach dem die Alternativen durchgespielt werden (Abbildung 5.42).

Die Versuchsdurchführung erfolgt im FactoryVariationPlanner, der alle zur Bewertung erforderlichen Modelle integriert hat und sich somit hervorragend als Versuchslabor und Experimentierfeld zur Bewertung alternativer Strukturkonzepte eignet. Diese werden in Modellen und Simulationen den Belastungen aus den Wandlungstreibern ausgesetzt. Die Simulationsdurchläufe der System-Szenarien werden im FactoryVariationPlanner nach dem systematischen Vorgehen des Versuchsplans durchgeführt und in Bezug auf ihre kapazitiven Konsequenzen zu den festgelegten Zeitpunkten bewertet. Die Ergebnisse der Simulationsdurchläufe beruhen auf unternehmensspezifisch analysierten Datenmodellen und sind somit in ihrer Aussagekraft belastbar. Aufgrund der statistisch erstellten Eingangsgrößen erfolgt eine umfassende und für den Wandel repräsentative Bewertung der Standortalternativen, die dem

Auswahlverfahren eines optimalen Konzepts zuverlässig zugrunde zu legen ist. Aus dem Vergleich der Standortalternativen untereinander und in Bezug auf einen Referenzzeitpunkt, ist der Veränderungsaufwand zur Umsetzung der Konzepte abzuschätzen und die optimale Lösung unter den vorgegebenen Rahmenbedingungen auszuwählen. Dieses Bewertungsverfahren bildet somit ein belastbares Fundament für eine Strukturanpassung der Fabriken eines Produktionsnetzwerks der variantenreichen Serienfertigung.



**Abbildung 5.42: Systematische Bewertung der System-Szenarien**

Die systematische Variation der Wandlungsparameter und Belastung verschiedener Standortkonzepte in Simulationen im FactoryVariationPlanner führt zur Transparenz der kapazitiven Wirkungslinien in den Strukturmodellen der Fabriken. Für die jeweiligen Standortalternativen ist der durch die Wandlungstreiber erforderliche Flexibilisierungsgrad aus den Simulationsergebnissen ablesbar, der bei erneuten Veränderungen im Sinne der Wandlungsfähigkeit der Fabrikstrukturen wiederum anzupassen ist. Dieser Veränderungsbedarf löst einen erneuten Planungsdurchlauf aus, womit von einer permanenten Planung und kontinuierlichen Strukturadaptation auszugehen ist. Insbesondere vor diesem Hintergrund ist die Planungsunterstützung durch ein automatisiertes Planungswerkzeug von außerordentlicher Bedeutung. In kurzen Planungszeiträumen sind proaktiv Anpassungsbedarfe abzuleiten und alternative Strukturkonzepte hinsichtlich ihrer Wirkungsketten bewertbar. Die Unsicherheiten, die mit dem langfristigen Planungshorizont einer strategischen Planung verbunden sind, erfordern ein Denken in Szenarien und alternativen Handlungsoptionen. Deren proaktive Bewertung durch die Planungsabteilungen der Produkt-, Produktions- und Absatzstrategie ermöglicht im Bedarfsfall, der durch die Veränderungen ausgelöst wird, eine schnelle und systematische Anpassung der Fabrikstrukturen im Einklang mit den strategischen Entwicklungslinien zur Steigerung des Flexibilitäts- und Wandlungspotentials einer vernetzten Produktion.



## **6 Validierung der Planungssystematik am Beispiel einer vernetzten Produktion der Automobilindustrie**

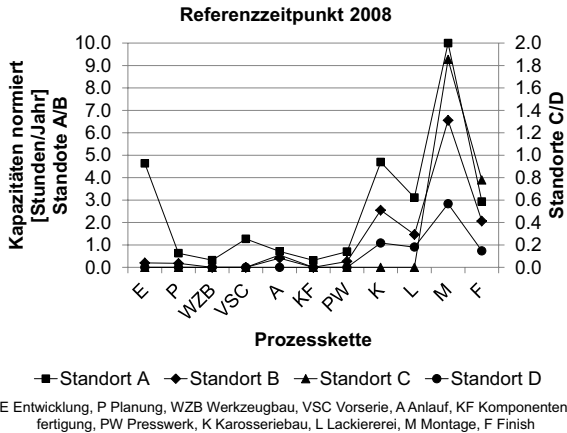
Die Planungssystematik zur strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung wurde in einem Industrieunternehmen des Automobilbaus angewendet und die einzelnen Planungsschritte mit Realdaten des Unternehmens verifiziert. Betrachtungsgegenstand waren wie in der Ausführung der Methodik dargestellt das gesamte Produktprogramm sowie das korrespondierende Produktionsnetzwerk bestehend aus den Standorten der Eigenfertigung A bis D sowie dem virtuellen Standort der Fremdfertigung. Zur Verifizierung der Systematik werden im Folgenden die drei Strukturalternativen, welche in Kapitel 5.6.5 vorgestellt wurden, systematisch mit dem FactoryVariationPlanner, in dem die Datenmodelle der Fabrikstrukturen integriert sind, in Form von Systemszenarien durchgespielt und bewertet. Im zweiten Teil wird ein Ausblick der Anwendung der Planungsmethodik auf technologiegetriebene Strukturveränderungen einer vernetzten Produktion gegeben und abschließend aus der Durchführung der Validierung ein Fazit zur praktischen Anwendung der Planungsmethodik gezogen.

### **6.1 Variation der Fabrikstrukturen und deren systematische Planung für ein Produktionsnetzwerk der Automobilindustrie**

Entsprechend der Vorgehensweise zur Auswahl und Bewertung von Strukturalternativen in Kapitel 5.7 werden das Strukturkonzept A der durchgängigen Drehscheiben (Abbildung 5.36), das Strukturkonzept B der sortenreinen Werke (Abbildung 5.37) und das Strukturkonzept C der Rennerfabriken (Abbildung 5.38) als Gestaltungsszenarien den Belastungen aus dem Markt heraus ausgesetzt und unter Berücksichtigung der kontinuierlichen Veränderungen über das Lernkurvenmodell systematisch im FactoryVariationPlanner simuliert. Der Beschaffungsanteil wird in der Versuchsdurchführung ausgeschlossen. Die Bewertungsgrößen sind der gesamtKapazitive Ressourcenaufwand, die Verschiebungen in Bezug auf den Referenzzeitpunkt sowie die durchschnittlichen hpu.

Als Referenzzeitpunkt wird das Jahr 2008 festgelegt, da für den Zeitraum dieses Jahres die Daten belastbar sind und ein repräsentatives Abbild der Fabrikstruktur für einen Zeitpunkt vor der Finanzkrise bieten, welche auch die Automobilindustrie massiv getroffen hat. Die Daten in den Darstellungen werden durchgängig in Bezug auf den Ressourceneinsatz der Montage des Standorts A auf den Wert 10.0 [Stunden/Jahr] normiert (Abbildung 6.1). Dieser Wert stellt den größten Aufwand eines technologischen Segments der Prozesskette in hpu an einem zentralen Standort dar und wird vor diesem Hintergrund präzise und zuverlässig im

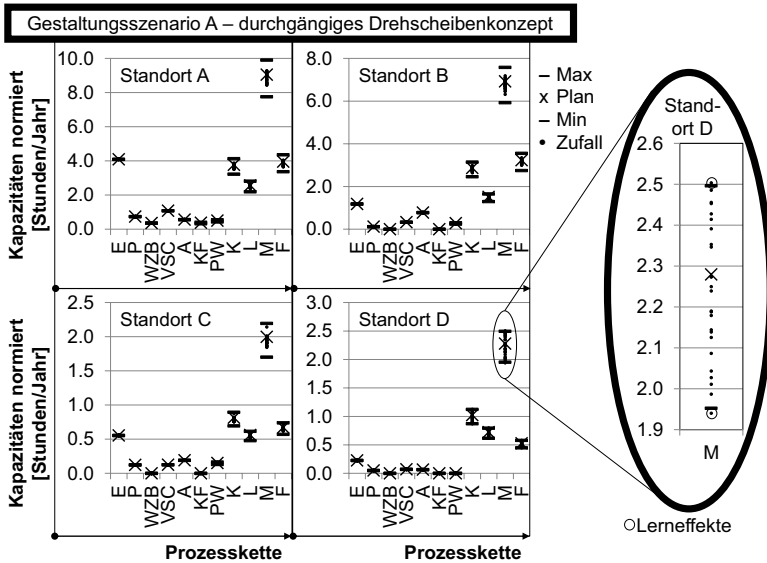
Unternehmen verfolgt, daher eignet er sich als Referenzpunkt zur Normierung. Standort A ist zum Zeitpunkt 2008 der größte Standort des Produktionsnetzwerks und umfasst alle funktionalen und technologischen Kompetenzen der Prozesskette. Standort B ist kleiner in den Bereichen der Produktion, die der Produktion vorgelagerten Bereiche sind alle bis auf den Werkzeugbau vor Ort vertreten, jedoch nicht mit den Kapazitäten wie an Standort A. Standort C ist ein reiner Montagestandort, Standort D ist eine Fahrzeugfabrik ohne Presswerk.



**Abbildung 6.1: Kapazitätsstruktur der Prozesskette zum Referenzzeitpunkt**

Auf Basis dieser Referenz werden nun die Gestaltungsszenarien A bis C, welche unter Berücksichtigung der Ansätze der Wandlungsfähigkeit konzipiert wurden, den Belastungsszenarien ausgesetzt. Die zu variierenden Parameter beziehen sich dabei auf die Mengengerüste, die Ausstattungsvarianten und die Lerneffekte. Variiert werden in einem ersten Schritt die Mengengerüste über Zufallszahlen im Bereich der Abweichungen von +10 % und -15 % vom Plan. Die Festlegung dieser Grenzen beruht auf Untersuchungen der Planabweichungen in den vergangenen Jahren. Die Variation der Mengengerüste wird unter Berücksichtigung der Lerneffekte durchgeführt und die Verteilung der Ausstattungen zugrunde gelegt, welche im Durchschnitt in der Vergangenheit produziert wurde. Aufgrund struktureller Veränderungen, welche aus dem Technologiekalender für die Jahre 2014 und 2015 zu entnehmen sind, wird das Jahr 2015 für die Berechnung der Szenarien in Betracht gezogen und das Jahr 2020 als Ausblick simuliert. Die Mengengerüste entsprechen bis 2010 den Realwerten, für 2011 wird das voraussichtliche Ist zugrunde gelegt. Ab 2012 werden die Plan-, Maximal- und Minimalwerte sowie die daraus generierten Zufallszahlen angesetzt.

Gestaltungsszenario A sieht durchgängige Standortkompatibilitäten über Drehscheiben und neben dem zentralen Engineering an Standort A dezentrale Engineeringkompetenzen zur Serienbetreuung in den Fabriken vor Ort vor (Abbildung 6.2). Dies führt zu einem Abbau der Entwicklungs- und Vorserienkompetenzen in Standort A und dem Aufbau dieser Ressourcen in den anderen Standorten. Kurze Wege von der Entwicklung über die Planung in die Fertigung sind die Konsequenz dieser Zuordnung. Insgesamt ist aufgrund steigender Mengengerüste mit einem gesteigerten Ressourcenbedarf zu rechnen. Dieser verteilt sich vornehmlich auf die Standorte B, C, und D. Standort C wächst durch den Aufbau der Produktionskompetenzen Presswerk, Karosseriebau und Lackiererei sowie durch die Zuweisung der Fahrzeuge A.2, A.3 und A.4, in der Drehscheibe mit Standort A um das 1,6-fache. Aufgrund eines auslaufenden Fahrzeugprojekts in 2008 und dem Anlauf des Fahrzeugs A.1 erfährt der Standort D ein deutliches Wachstum in den Bereichen der Produktion gegenüber dem Referenzjahr. Der in den Standorten zu installierende Flexibilitätsbedarf, um den Extrema der Maximal- und Minimalmengen gerecht zu werden, beträgt an allen Standorten je nach Lerneffekten relativ gleichmäßig +9,5 % und -14,4 % vom Planbedarf.



**Abbildung 6.2: Variation der Mengengerüste in Gestaltungsszenario A**

Die Ressourcenbedarfe aus den Zufallszahlen liegen in der Regel zwischen diesen Bereichen, weisen jedoch an Standort D in der Montage eine Ausnahme auf, wie es in Abbildung 6.2 vergrößert ist. Zufallszahl 6 erfordert geringere Ressourcen als der Minimalbedarf, Zu-

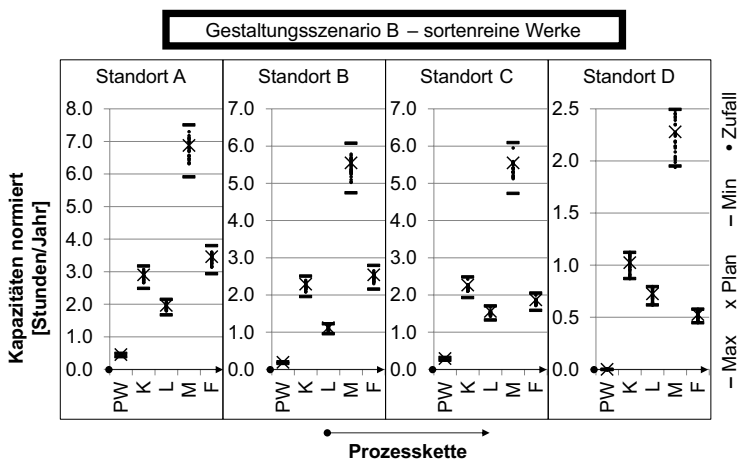
fallszahl 11 erfordert einen höheren Bedarf als der Maximalbedarf. Dies hängt damit zusammen, dass bei Zufallszahl 6 bis 2015 die kumulierte Gesamtmenge höher ist als die kumulierte Minimalmenge und somit aufgrund der Lerneffekte geringere hpu angesetzt werden als im Minimalextremum. Bei Zufallszahl 11 liegt die kumulierte Menge unter der kumulierte Maximalmenge, was bei den Maximaextrama zu geringeren hpu führt, und daher bei Zufallszahl 11 trotz in 2015 punktuell geringerer Stückzahlen zu einem insgesamt höheren Ressourcenbedarf führt.

Der Flexibilitätskorridor an Standort D wird über die Berechnung mit den Zufallszahlen voll aus- bzw. sogar überausgeschöpft. Dies hängt damit zusammen, dass diesem Standort nur das Fahrzeug A.1 zugewiesen ist und daher über die Zufallszahlen kein Produktmix im Standort generiert werden kann. An den anderen Standorten entsteht jeweils ein Produktmix, welcher sich untereinander so ausgleicht, dass der durch die Maximal- und Minimalextrema definierte Flexibilitätskorridor nicht erforderlich ist. Der aus dem Maximal- und Minimalbedarf der 25 Zufallszahlen abgeleitete Flexibilitätsbedarf der Presswerke liegt an Standort A bei +3,8 % und -6,8 %, an Standort B bei +3,6 % und -8,7 % sowie an Standort C bei +8,1 % und -9,4 %. Die technologischen Segmente des Karosseriebaus, der Lackiererei, der Montage und des Finish sind an allen Standorten vertreten. Aus diesem Grund wird näherungsweise die Durchschnittsabweichung aus diesen Gewerken repräsentativ pro Standort als erforderlicher Flexibilitätskorridor angegeben. Demzufolge muss Standort A zwischen +2,3 % und -7,1 % atmen, Standort B zwischen +3,8 % und -8,1 % sowie Standort C zwischen +7,1 % und -7,8 % für einen Zufallszahlenbereich von +10 % und -15 %. Die Berücksichtigung der Produktmixe in Zufallszahlen führt folglich zu deutlich geringeren Flexibilitätsbedarfen als die Kalkulation über die Extrema.

Standortszenario B sieht sortenreine Werke vor (Abbildung 6.3). Die Kompetenzzuweisung des Engineerings ist gleich dem Szenario A, aus diesem Grund wird im Folgenden nur auf die Produktion eingegangen. Grundsätzlich ist bei diesem Szenario festzustellen, dass die Ressourcenbedarfe in der Produktion der Standorte A um 27 % und B um knapp 10 % sinken, während sich die Kapazitätsbedarfe der Standorte C und D vervierfachen im Vergleich zu 2008. In diesem Konzept verliert der Standort B das A-Segment an Standort C, Standort B verliert das B-Segment an Standort A und Standort D erlebt wie bereits in Szenario A den Hochlauf des Fahrzeugs A.1.

Die aus den Maximal- und Minimaextrema abgeleiteten Flexibilitätsbedarfe entsprechen denen des Szenarios A, während sich die aus den Maxima und Minima der Zufallszahlen in den Standorten A und B maßgeblich erhöhen. Aufgrund der geringeren Produktvielfalt an den Standorten A und B gleichen sich die Produktionszahlen in den Gewerken nicht mehr in dem Maße aus. Die Flexibilitätsbedarfe der Presswerke steigen an Standort A und liegen

zwischen +6,3 % und -8,0 %, gleiches gilt für Standort B, an dem sie bei +4,5 % und -10,2 % liegen. Vor dem Hintergrund, dass Standort C im Vergleich zu Szenario A Anteile des Segments A aus Standort A hinzugewinnt, steigt die sich ausgleichende Menge und sinkt folglich der Flexibilitätsbedarf prozentual auf +7,6 % und -8,7 %. In den Bereichen der übrigen Produktion bleiben die Standorte C und D wie bei Szenario A, der erforderliche Flexibilitätskorridor an Standort A steigt auf +5,6 % und -8,5 % und an Standort B auf +4,4 % und -9,3 %.

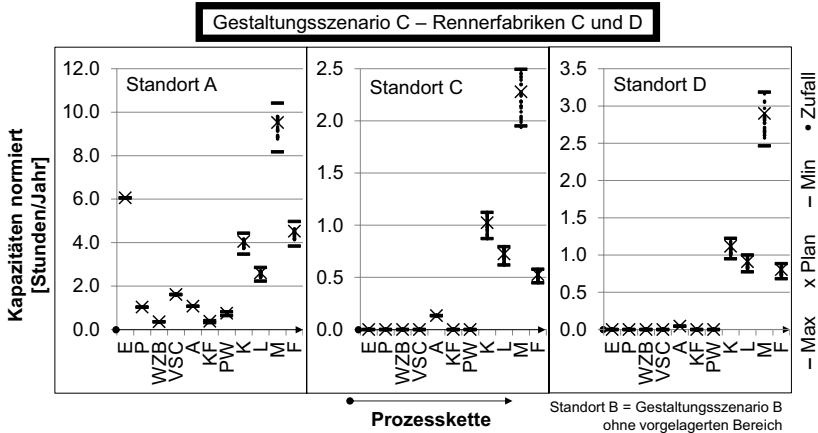


**Abbildung 6.3: Variation der Mengengerüste in Gestaltungsszenario B**

Gestaltungsszenario C sieht Rennerfabriken der Standorte C und D sowie Exotenfabriken der Standorte A und B vor (Abbildung 6.4). Die Engineeringbereiche werden zentral dem Standort A zugewiesen, womit der Ressourcenbedarf der vorgelagerten Bereiche an diesem Standort um 32 % steigt. In Bezug auf die Produktion bleibt im Vergleich zum Referenzjahr der Ressourcenbedarf des Standorts A aufgrund der sich aufhebenden Effekte des Mengenwachstums und der Reduzierung der hpu durch die Lerneffekte unverändert. Standort B verliert wie in Szenario B 10 %. Standort C als eine der Rennerfabriken wächst um das 1,7-fache, die Rennerfabrik D verfünffacht sich in den Dimensionen des Ressourcenbedarfs.

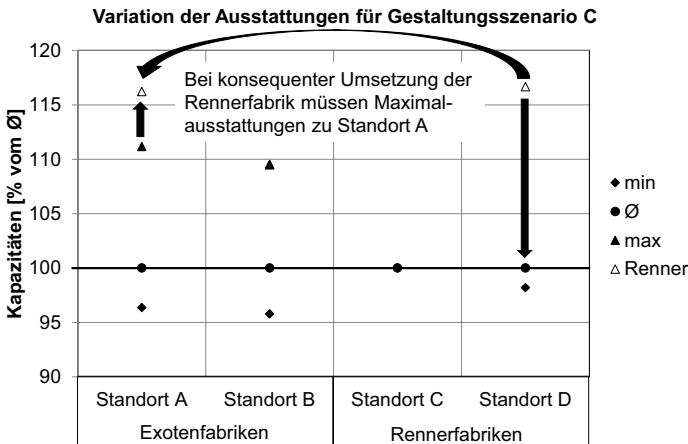
Die Flexibilitätsbedarfe aus den Maximal- und Minimalextremen entsprechen denen des Szenarios A und B, wohingegen sich die aus den Zufallszahlen abgeleiteten unterscheiden. Die Presswerke verteilen sich wie im Referenzjahr 2008 auf die Standorte A und B. Das Presswerk in Standort A erfordert einen Flexibilitätskorridor von +3,6 % und -7,5 %, der in Standort B liegt zwischen +4,5 % und -10,2 %. In den übrigen Bereichen der Produktion sind aus den Extrembedarfen der Zufallszahlen die Flexibilitätskorridore an Standort A zwischen +2,8%

und -8,2%, an Standort B +4,4 % und -9,3 %, an Standort C +9,8 % und -14,9 % und an Standort D +9,1 % und -11,2 % abzuleiten.



**Abbildung 6.4: Variation der Mengengerüste in Gestaltungsszenario C**

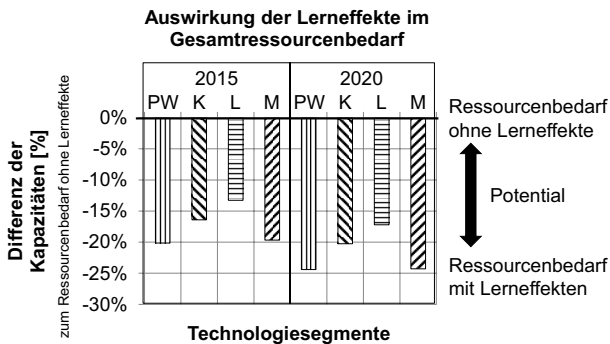
Die Versuchsdurchführungen der Mengenvariation erfolgte ohne Variation des Wandlungstreibers Ausstattung, welcher im Folgenden anhand des Gestaltungsszenarios C erläutert werden soll. Gestaltungsszenario C erfordert die Betrachtung der Ausstattungsvarianten, da diese bei der Zuweisung der Fahrzeuge zu Renner- und Exotenfabriken eine maßgebliche Rolle zu spielen haben.



**Abbildung 6.5: Variation des Wandlungstreibers Ausstattungsvarianten**

In Abbildung 6.5 sind am Gestaltungsszenario C die Ausmaße der Variation der Ausstattungen in Bezug auf die Kalkulation mit den Durchschnittsausstattungen der Fahrzeuge veranschaulicht. Da sich, wie in Kapitel 5.1.2 im Rahmen der Varianzanalyse bestätigt, Ausstattungsvarianten vornehmlich nur in der Montage auswirken, wird im Folgenden auch nur die Montage betrachtet. Bei einer Standortzuweisung auf Basis von Renner- und Exotenderivaten ergeben sich die Spielräume, welche durch die ausgefüllten Dreiecke in Abbildung 6.5 dargestellt sind. Für Standort A bedeutet dies einen ausstattungsbedingten Kapazitätsbedarfskorridor von +11 % und -4 %, für Standort B von +10 % und -4 %. Standort C fertigt ein Fahrzeug aus dem unteren Segment, für das keine ausstattungsbedingten Daten vorliegen. Aufgrund der Segmentzugehörigkeit ist jedoch mit geringeren Abweichungen zu rechnen, als dies für die oberen Fahrzeugsegmente der Standorte A und B zutrifft. An Standort D wäre trotz der Zuweisung von Rennerfahrzeugen mit durch Ausstattungen bedingten Schwankungen von +17 % und -2 % zu rechnen. Bei konsequenter Umsetzung der Rennerfabriken müssen demnach die Ausstattungsvarianten bei der Zuweisung der Fahrzeuge zu Standorten mit berücksichtigt werden und eine Segmentierung nach Ausstattungen, wie in Abbildung 5.25 der strategischen Stoßrichtungen vorgeschlagen, vorgenommen werden. In Konsequenz würden dann die Fahrzeuge der Maximalausstattungen dem Standort A zugewiesen werden, dessen Flexibilitätsbedarf sich dann auf +16 % und -4 % erhöht und der von Standort D sich auf -2 % reduziert. Aus der Betrachtung der Ausstattungsvariation ist zu schließen, dass sich diese neben den Mengengerüsten maßgeblich auf den erforderlichen Ressourceneinsatz auswirkt und bei einer Standortzuweisung und Ressourcenkalkulation gleichermaßen zu betrachten ist.

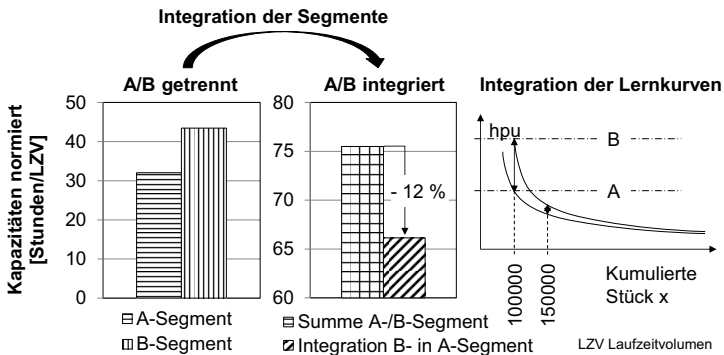
Die Variation der Parameter Mengen und Ausstattungen erfolgte unter Berücksichtigung der Lerneffekte, deren Auswirkungen nun quantifiziert werden (Abbildung 6.6).



**Abbildung 6.6: Auswirkung der Lerneffekte im Gesamtressourcenbedarf**

Eine prozentuale Gegenüberstellung des Gesamtressourcenbedarfs aller Standorte unter Berücksichtigung der Lerneffekte im Vergleich zum Kapazitätsbedarf bei einer Ressourcenkalkulation ohne Lerneffekte zeigt Abbildung 6.6. Hierzu wird die Differenz zur Betrachtung ohne Lerneffekte herangezogen. In 2015 ergeben sich Abweichungen nach unten im Presswerk um 20 %, im Karosseriebau um 16 %, in der Lackiererei um 13 % und in der Montage um 20 %. Aufgrund der steigenden kumulierten Mengen sind die sich durch die Lerneffekte ergebenden Differenzen in 2020 noch beträchtlicher. Die Prozentwerte sind in Bezug auf die normierten Absolutwerte der Kapazitäten zu sehen, welche in Anhang A.2 veranschaulicht sind. Die normierten Differenzen liegen im Presswerk bei 235 [Stunden/Jahr], im Karosseriebau bei 1664 [Stunden/Jahr], in der Lackiererei bei 820 [Stunden/Jahr] und in der Montage bei 4958 [Stunden/Jahr], so dass sich die größten Potentiale im absoluten Maßstab in der Montage ergeben.

Unter diesem Gesichtspunkt wird im Folgenden exemplarisch die Montage herangezogen, um die Effekte einer Integration der Produktsegmente, wie sie in den strategischen Stoßrichtungen in Kapitel 5.6.2.1 vorgeschlagen wurde, unter Berücksichtigung der Lerneffekte zu zeigen. Die Integration der Produktsegmente kann grundsätzlich für alle Standortsszenarien durchgeführt werden. Die Integration der Produktsegmente A und B kommt aufgrund der Standortverteilung für Gestaltungsszenario A in Frage.



**Abbildung 6.7: Integration der Segmente und deren quantitative Bewertung**

Die Kalkulation des Ressourcenbedarfs erfolgt auf Basis der durchschnittlichen hpu  $\bar{\varnothing}$  über das Laufzeitvolumen der Produktsegmente, deren Berechnung nach Gleichung (5.6) in Kapitel 5.7.1 erfolgt. Werden die Segmente A und B getrennt montiert, so ergeben sich über die Produktlaufzeiten normierte Ressourcenbedarfe von 32 [Stunden/LZV] für Segment A und 43 [Stunden/LZV] für Segment B, was in Summe einen Kapazitätsbedarf von 75 [Stunden/LZV]



ergibt. Wird nun das Produktsegment B in die bessere Leistungslinie des Produktsegments A integriert, so pendelt sich das Segment B auf die Leistungskurve des A-Segments ein, was über die Laufzeitvolumina der Produktsegmente 12 % Ressourcenreduzierung ausmacht.

Aus der systematischen Variation der Parameter konnten die Wechselwirkungen marktseitiger und kontinuierlicher Belastungen auf die Fabrikstrukturen und ihre Strukturalternativen aufgezeigt und quantitativ anhand des Ressourceneinsatzes für 2015 im Vergleich zum Referenzjahr 2008 bewertet werden. Die zu erwartende Entwicklung der Belastungen auf die Gestaltungsszenarien A, B und C für das Jahr 2020 ist dem Ausblick in Anhang A.3, Anhang A.4 und Anhang A.5 zu entnehmen.

## **6.2 Planung technologiegetriebener Strukturveränderungen am Beispiel der Elektrifizierung des Antriebsstrangs**

Die Planungsmethode und das entwickelte EDV-technische Planungssystem, deren Anwendung im vorherigen Abschnitt am praktischen Beispiel für marktgetriebene und kontinuierliche Veränderungen gezeigt wurde, sind so konzipiert, dass sie auch zur Planung konzeptioneller technologiegetriebener Veränderungen einsetzbar sind. Die Vorgehensweise, wie sie in Kapitel 5 detailliert wurde, behält uneingeschränkt ihre Gültigkeit und soll im Folgenden anhand der Elektrifizierung des Antriebsstrangs kurz skizziert werden.

Ausgangsbasis bildet auch für technologisch konzeptionelle Wandlungstreiber der Produkt- und Produktionsstrukturen die Charakterisierung und Modellierung der existierenden Strukturen innerhalb eines Produktionsnetzwerks, wie sie zu Beginn der Planungssystematik durchgeführt und in das Planungssystem integriert wurden. Aus dem Technologiekalender sind dann die Einführungszeitpunkte der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge zu entnehmen und die damit korrelierenden technologischen Veränderungen in den Systemen der Fahrzeuge und den fertigungstechnischen Wechselwirkungen in den Produktionstechnologien sowie den organisatorischen Auswirkungen wie beispielsweise die Qualifizierung der Mitarbeiter für den Umgang mit Hochvolttechnik zu betrachten. Diese Wechselwirkungen sind qualitativ im Technologiekalender zu vermerken und zeitlich zu synchronisieren. Unter diesen Gesichtspunkten sind dann Studien durchzuführen, welche die technologischen und kapazitiven Wechselwirkungen auf die Fabrikstrukturen untersuchen. Substitutionseffekte dieser Technologie beziehen sich auf die konventionelle Antriebstechnologie mit der klassischen Motoren- und Getriebefertigung sowie den Einbau der Batterie, deren Fertigungsschritte in die Montagelinien zu integrieren sind. In einer ersten Näherung ist davon auszugehen, dass der Aufwand der Substitutionstechnologie den der konventionellen Technologie langfristig nicht übersteigen darf. In detaillierteren Studien ist dann zu quantifizieren, wie stark sich die Ver-

änderungen aufgrund der Substitutionseffekte auf die hpu der Fahrzeuge auswirken, welche Anteile hinzukommen und welche Fertigungsschritte wegfallen. Die quantifizierten Effekte sind dann im Datenmodell der Produkt- und Produktionsstrukturen des FactoryVariation-Planners zu ergänzen und dieses für die neue Technologie zu modifizieren. Anschließend erfolgt eine Abschätzung der Volumina, mit denen für die neue Technologie der Elektrifizierung zu rechnen ist und aus denen sich Segmentverschiebungen in der Zusammensetzung der Gesamtvolumina von konventioneller und elektrifizierter Antriebstechnologie ergeben. Mit diesen Mengengerüsten ist dann die Simulation im FactoryVariationPlanner durchzuführen und daraus der erforderliche Ressourceneinsatz abzulesen. Nach den Kriterien der strategischen Vergabe von Technologien mit Wachstums- und Substitutionspotential in Kapitel 5.6.2.3 ist die Technologie einem Standort mit Anpassungsfähigkeit zuzuweisen und die Ressourcenkalkulation mit dieser Netzwerkconfiguration erneut im Planungssystem durchzuführen.

### **6.3 Fazit aus der Verifizierung der Planungsmethodik**

Aus der Anwendung der Planungssystematik am praktischen Beispiel einer Strukturplanung für eine vernetzte und wandlungsfähige Produktion der Automobilindustrie ist zu schließen, dass sich diese für den industriellen und praktischen Einsatz im Rahmen einer strategischen Planung und wandlungsfähigen Gestaltung der Fabrikstrukturen in einem Produktionsnetzwerk eignet.

Durch die systematische Parametervariation der Wandlungstreiber konnten die Wechselwirkungen im Hinblick auf alternative Gestaltungsszenarien proaktiv untersucht werden. Deren quantitative Effekte wurden in Bezug auf Verschiebungen der Kapazitäten im Vergleich zu einem Referenzzeitpunkt als auch auf deren absolut erforderlichen Ressourceneinsatz in den funktionalen und technologischen Segmenten der Standorte begutachtet. Die Berücksichtigung der Lerneffekte in der Kalkulation der Ressourcen hat aufgezeigt, dass durch diese eine deutliche Reduzierung der hpu und somit des gesamtkapazitiven Aufwands erreicht wird und diese für die strategische Ausrichtung und Planung der Strukturen von Fabriken weiter zu nutzen sind. Auf Grundlage dieser Bewertung sind die Konsequenzen der jeweiligen Szenarien auch im Hinblick auf deren Variabilität und Wandlungsfähigkeit transparent und können der Auswahl des für einen bestimmten Zeitpunkt optimalen Konzepts belastbar zugrunde gelegt werden.

Darüber hinaus wurde der Einsatz der Planungsmethode am Beispiel der Elektrifizierung skizziert und damit deren Anwendbarkeit für konzeptionelle technologiegetriebene Strukturveränderungen gezeigt.

## **7 Zusammenfassung und Ausblick**

Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftigen Forschungsbedarf gegeben.

### **7.1 Zusammenfassung**

Die Turbulenzen im Umfeld der industriellen Produktion haben zu einer Neuformation der global vertretenen Produktionsunternehmen geführt und stellen diese vor dem Hintergrund der wachsenden Dynamik und Vernetzung in und im Umfeld der Fabriken stetig vor neue Herausforderungen, denen sie sich durch eine permanente Anpassung ihrer Strukturen auf allen Skalen der Produktion stellen müssen. In der industriellen Praxis werden strategische Entscheidungen zur Anpassung der Strukturen weitestgehend unter hohem Zeitdruck getroffen und basieren auf dem intuitiven und pragmatischen Sachverstand weniger Experten, nicht aber auf Grundlage einer systematischen und belastbaren Entwicklung. Im Zuge der sich verschärfenden Dynamik und Komplexität der Planungsgegenstände sowie der Planungsprozesse selbst gelangt diese Vorgehensweise aufgrund der vielfältigen zu berücksichtigenden Einflussfaktoren an ihre Grenzen. Die Wandlungsfähigkeit der Fabriken und ihrer Vernetzung ist zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor geworden und verlangt aufgrund ihrer zahlreichen Wechselwirkungen eine vorausschauende und systematische Planung unter Berücksichtigung der Veränderungen.

In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb eine Planungssystematik zur permanenten Adaption der Fabrikstrukturen entwickelt, deren Anwendung im Rahmen einer strategischen Planung zu einer systematischen Steigerung der strukturellen Wandlungsfähigkeit einer vernetzten Produktion führt.

Aus der Analyse bestehender Produktionskonzepte zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit von Fabriken und den methodischen Strukturierungs- und Planungsansätzen wurden unter Berücksichtigung der Einfluss- und Zielgrößen einer strategischen Planung die Anforderungen an die Planungssystematik abgeleitet. Daraus ergab sich, dass die Planungsmethode für den Anwenderkreis einer ganzheitlichen strategischen Planung praktikabel und sich für die kontinuierliche Anwendung in der strategischen Planung der Fabrikstrukturen eignen muss, deren Planungsanstoß jeweils durch die Veränderungstreiber gegeben wird. Die Planungsmethodik wurde in fünf Planungsphasen untergliedert, in denen die bestehenden Fabrikstrukturen durch die Wandlungstreiber dynamisiert werden und daraus alternative Struk-

turmodelle unter Berücksichtigung von Ansätzen zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit entwickelt sowie abschließend bewertet werden.

Zur umfassenden Analyse der bestehenden Produkt- und Produktionsstrukturen vernetzter Fabriken auf den Ebenen des Produktionsnetzwerks, der Standorte und der Segmente wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die existierenden Strukturen in Bezug auf die Produkte und ihre Varianz, den vorherrschenden Standortprofilen und Restriktionen im Hinblick auf die technologischen und kapazitiven Rahmenbedingungen und den Prozessen charakterisiert sowie in einem Fabrikstrukturmodell einer vernetzten Produktion abgebildet werden. Aus der Analyse der Entwicklungen der Fabriken wird dann das Potential zur Effizienzsteigerung abgeleitet.

Darauf aufbauend wurde die Dynamik des Fabrikumfelds in Bezug auf die einwirkenden Einflussfaktoren untersucht und daraus die für die Strukturanpassung relevanten Wandlungstreiber identifiziert. Diese beziehen sich auf die Entwicklung der Märkte, der Produkte und der Produktvarianz sowie der Produktion in technologischer und organisatorischer Hinsicht. Über den Einsatz des Technologiekalenders werden dann diese Treiber in ihren zeitlichen Dimensionen und Wechselwirkungen synchronisiert.

Zur Variation des Fabrikstrukturmodells durch die Wandlungstreiber wurde ein EDV-basiertes Planungswerkzeug konzipiert und im FactoryVariationPlanner umgesetzt. In diesem wurden die Datenmodelle der vernetzten Fabriken mit ihren Produkt- und Produktionsstrukturen sowie die Wandlungstreiber integriert. Mit diesem Planungssystem werden aus der Dynamisierung durch die Veränderungen Wandlungsbedarfe auf Basis der Überschreitung der bestehenden kapazitiven Restriktionen abgeleitet.

Vor dem Hintergrund des bestehenden Wandlungsbedarfs wurde ausgehend von einem idealen Grundmodell einer Fabrikstruktur der Weg zur Konzeption alternativer Strukturkonzepte für eine vernetzte Produktion aufgezeigt. Hierzu wurden unter Berücksichtigung der produkt- und ressourcenbasierten Sichtweisen Prinzipien zur Strukturbildung von Fabriken hergeleitet. Darauf aufbauend wurden grundsätzliche strategische Stoßrichtungen für die Entwicklung der Fabrikstrukturen zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit konzipiert und die Bewertung ihrer Wirkungsweisen auf die strategischen Zielsetzungen und die Wandlungstreiber methodisch unterstützt. Zur konzeptionellen Steigerung der Wandlungsfähigkeit in den technologischen Segmenten wurde eine Vorgehensweise zur Erstellung von Partialmodellen vorgestellt, welche dann unter Anwendung der Szenario-Technik zu alternativen Strukturmodellen zusammengeführt werden.

Zur Auswahl eines optimalen Konzepts wurden Bewertungskriterien festgelegt und eine systematische Vorgehensweise zur Bewertung der strategischen Alternativen unter dem Einfluss der Wandlungstreiber vorgeschlagen. Die Bewertung wird anhand quantitativer Kriterien durch Simulationen im FactoryVariationPlanner durchgeführt und die Ergebnisse der Auswahl des Optimalkonzepts zugrunde gelegt.

Die Planungssystematik wurde in ihren einzelnen Schritten in einer vernetzten Produktion der Automobilindustrie angewendet und ihre Durchführbarkeit am praktischen Beispiel verifiziert. Damit wurde mit dieser Arbeit ein Beitrag zur systematischen Planung und strategischen Entwicklung der Fabrikstrukturen geleistet, mit dem die Unternehmen der industriellen Produktion ihre strukturelle Wandlungsfähigkeit steigern können.

## 7.2 Ausblick

Die entwickelte Planungssystematik bezieht sich auf die strategische Planung und Gestaltung einer vernetzten Produktion auf den Ebenen des Produktionsnetzwerks, der Standorte und der funktionalen und technologischen Segmente entlang der Prozesskette. Unter diesem Gesichtspunkt bietet die in dieser Arbeit entwickelte Planungssystematik Ansatzpunkte für zukünftige darauf aufbauende Forschungsarbeiten.

Entwicklungsmöglichkeiten bestehen in der Weiterführung der Methode in die Tiefe für die darunterliegenden Fabrikebenen beginnend bei den Segmenten bis in die Prozesse hinein, um die Wandlungsfähigkeit auf Basis der strategischen Vorgaben auch in diesen Skalen zu steigern sowie einer Erweiterung in die Breite unter Einbeziehung der Zulieferer.

Im Hinblick auf den zeitlichen Planungshorizont sind Anwendungen im Rahmen einer taktischen und operativen Planung denkbar. Zu suchen ist nach Lösungsansätzen im taktischen Bereich in Bezug auf die mittelfristige Gestaltung der Produktionssegmente und -systeme unter Berücksichtigung der technischen und technologischen Alternativen. Vor dem Hintergrund der Wandlungsfähigkeit sind zudem Arbeitszeitsysteme und Referenzmodelle für den flexiblen Personaleinsatz zu entwickeln, mit denen auf operativer Ebene die personalkapazitive Atmungsfähigkeit der Standorte, Segmente und Systeme erreicht werden kann. Dies kann bis in die operative Steuerung der Produktion ausgedehnt werden.

Basierend auf den Ergebnissen, welche aus der Anwendung der Planungssystematik resultieren, ist die Investitionsstrategie für die Umsetzung der Strukturanpassungen abzuleiten und zu konzipieren. Hierfür bedarf es einer Methode zur monetären Bewertung von Strukturalternativen und der Verankerung dieser Investitionskonzepte in die strategische Unternehmensplanung. Unter diesem Aspekt ist die Planungssystematik, welche zur Ableitung einer Produktionsstrategie entwickelt und verifiziert wurde, zur Anwendung in die Ebenen der Unternehmensstrategie weiterzuentwickeln.

## Summary

### **Method of strategic structure planning for a changeable manufacturing network in customized series production**

Systemic changes in the industrial environment have led to tremendous changes of the global manufacturing structures. The environment of manufacturing is characterized by the trend of concentrations of enterprises due to mergers and acquisitions. This has been leading to a networked and interlinked production with manufacturing at different sites in the world. This goes along with strong rising production volumes in total. Comparing the volume history with the productivity history, it is noticed, that the productivity rate is positive, but not in the same dimension like the production rate. This has also to do with the customization of the products, where the number of variants to be produced explosively expanded and the volumes per lot continuously went down. In order to reduce complexity in their own production network, outsourcing and the concentration on the core competence was the point of action in the past and lead to a very low level of value added in manufacturing companies. Optimization focused on the logistical control of the supply chains and outsourcing strategies in low cost countries. This is in the current situation of dynamism not sufficient.

Manufacturers operate in complex manageable manufacturing networks in an environment, which is characterized by permanent change. Consequently, they are faced by the challenges of the turbulent environment and are forced to adapt their factory structures permanently in order to maintain their global competitiveness. The adaptation of factory structures on the level of a production network, its manufacturing sites and the technological segments of production is a complex strategic planning task, which has to be performed in accordance to the strategy of the enterprise. In practice, strategic decisions about adapting factory structures are usually made under strong time pressure and are based on the intuitional and pragmatic knowledge of few experts in manufacturing. But they are not the result of a systematic development, where the chances and risks are evaluated under certain conditions. Due to the intensified dynamism and complexity of the planning objects, the planning processes and the manifold impacting factors, which have to be considered in the purpose of structural adaptations, this way of working comes to its limitations. Nevertheless, the changeability of factory structures has become to a key factor of competitiveness. Thus, changeability needs to be developed in a systematic way of strategic planning, taking into consideration that manufacturing is permanently impacted by change, which has strong and manifold effects on the manufacturing structures.

Therefore, a planning method for a permanent and systematic adaptation of factory structures was developed in this dissertation. The application in strategic planning systematically increases the structural changeability of a networked production. A factory structure is a socio-technical system which is defined by the products, the production with its resources, technologies, capacities, the processes, the characteristics of the manufacturing sites, insourced and outsourced value added as well as the relations between these elements to be considered. The factory structure as defined in the environment of change is the objective of the method in context of a long-term planning and adaptation.

Based on a detailed analysis of literature about manufacturing concepts, which deal with the challenge of increasing the changeability in factories and the methodological approaches for planning and structuring, the requirements for the planning method were derived taking the influencing factors and the long-term objectives of a strategic planning into account. The planning method was to be developed for a feasible application and support in strategic product, production, technology development and the sales and marketing planning in a permanent planning process, which has to be activated by the change drivers. The planning method was structured in five planning phases, where the existing factory structures are to be varied by the change drivers. Based on the change pressure, alternative models for structuring the factories are to be derived in order to increase their changeability and evaluated in the end.

For analyzing the existing product and production structures of networked and interlinked factories on the levels of the production network, the manufacturing sites and the segments, a procedure was developed. Based on the proposed steps the present structures regarding the products and their variants as well as the production with its predominant characteristics, boundaries and restrictions in technology and capacity and the processes can be described and modeled in a factory structure model of the manufacturing network. Following the development of the factories from the past to the present, room for improving the efficiency of the system is deduced.

Based on the results of the situation and configuration of the manufacturing network in present, the dynamism and resulting turbulence of the manufacturing environment was investigated regarding the impacting factors and the relevant change drivers for a structure adaptation were identified. They concern the development of the markets, the product variants and the production from technological and organizational point of view. These change drivers are to be synchronized in their time line and alternating effects by using the technology roadmap.

For the variation of the factory structure model by the change drivers coming from the markets, products and production, a software-based planning tool was developed and realized in the FactoryVariationPlanner. In this software tool the data models of the networked factories with their product and production structures and the change drivers were integrated. In this planning system, the necessity and pressure for an adaptation is derived for a specific point in time, when the variation coming from the change driver goes beyond the existing capacity restrictions of the technological segments.

In the first step of the required adaptation, an ideal concept of a factory structure fulfilling the requirements of changeability was described. Based on this ideal model, the steps to be taken for developing alternative structure models for a networked production under real conditions were specified. Therefore, principles for structuring factories in a production network were defined based on the characteristics of the products and the resources. Taking them into consideration, basic strategic lines of impact for gathering changeable factory structures were compiled. The valuation of the effects on the strategic objectives and the change drivers are methodologically supported by an effect cube. For increasing the changeability in the technological segments, a method was formulated to develop partial models for the segments of the whole system with concepts of changeability, which can be integrated to alternative structure models by following the procedure of the scenario technique.

For extracting the optimal concept, principles of choice were defined in accordance to the strategic objectives, changeability and economic efficiency of the manufacturing network. The quantitative criteria concern the average hours per product and the overall capacity effort per year in comparison to a fixed reference point. For evaluating the several strategic concepts, a systematic procedure was proposed with respect to the change drivers. According to this systematic the valuation is to be conducted by simulations in the FactoryVariationPlanner. In this way, all of the alternative concepts are impacted by the change drivers and the effects on the criteria of choice are a fundamental basis for the strategic decision about an optimal concept for a structure adaptation.

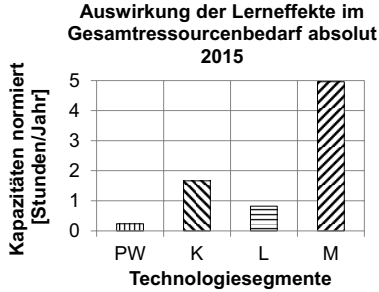
The planning method was accomplished in all its steps in an automotive manufacturing network. In this way, its feasibility and usability was validated in practical use. For this reason, with this dissertation, a contribution for a systematic planning and the strategic development of factory structures on the levels of the network, the sites and the segments of production was made. With the application of this method, enterprises of industrial manufacturing will be able to increase their structural changeability systematically.



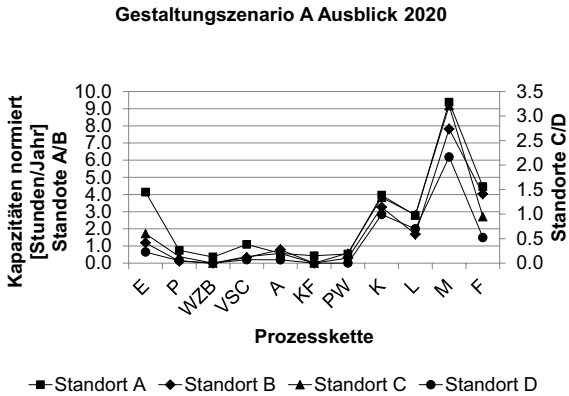
# Anhang

Optimierungsrichtung	Kriterium (unten) ist wichtiger = 2 gleich wichtig = 1 unwichtiger = 0 als Kriterium (rechts)						++		++		++		++		++						
		Qualität	Beherrschung der Komplexität	Produktivität	Wandlungsfähigkeit und Flexibilität	Nachhaltigkeit	Mengengerüste	Ausstattung	konstruktive Änderungen	Kompetenzzuordnung	technische Konzepte und Technologien	Methoden, KVP	Ressourcenmanagement	Informations- und Kommunikationssysteme	Summe	Normierung	Flexibilisierung	Veränderung der Wertschöpfungstiefe	Vergabe von Technologien mit Wachstumspotential	Integration der Prozesskette	Standardisierung
Qualität	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	8	3,3	0	0	0	3	5	5
Beherrschung der Komplexität	0	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1,7	5	3	0	3	5	3
Produktivität	0	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1,7	-3	0	0	0	5	5
Wandlungsfähigkeit und Flexibilität	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1,3	5	0	0	5	3	3
Nachhaltigkeit	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,4	3	0	0	3	3	3
Mengengerüste	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	23	9,6	5	0	0	0	5	0
Ausstattung	2	2	2	2	2	0	2	1	2	2	2	2	2	21	8,8	5	0	0	0	5	0
konstruktive Änderungen	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	19	7,9	3	0	0	5	3	3
Kompetenzzuordnung	2	2	2	2	2	0	1	1	2	2	2	2	2	20	8,3	5	3	0	3	3	0
technische Konzepte und Technologien	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	24	10	3	0	3	3	3	5
Methoden, KVP	2	2	2	2	2	0	0	0	0	2	2	2	1	13	5,4	3	0	0	0	3	5
Ressourcenmanagement	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	2	1	1	11	4,6	3	0	0	0	3	0
Informations- und Kommunikationssysteme	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	1	1	12	5,0	3	0	0	3	5	3
Erfüllungsgrad														198	30	117	209	109			
pozentualer Erfüllungsgrad [%]														95	14	56	100	52			

Anhang A.1: Beispiel einer Bewertung im Wirkungswürfel

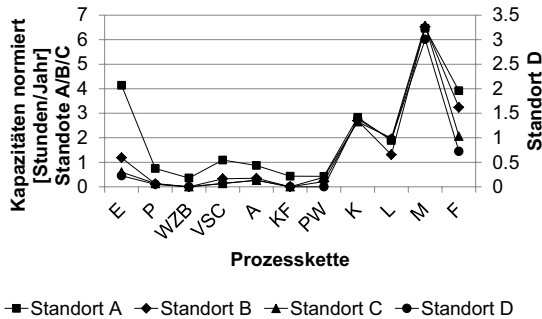


**Anhang A.2:** Auswirkung der Lerneffekte in Absolutwerten des Ressourcenbedarfs für 2015



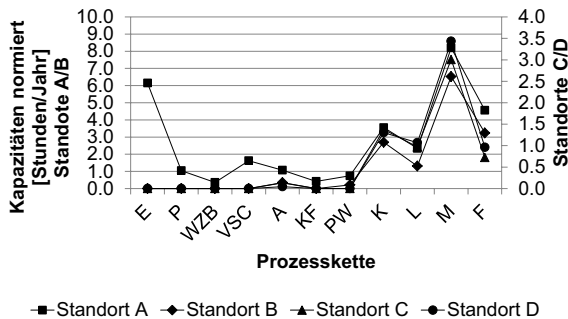
**Anhang A.3:** Ausblick des Gestaltungsszenario A für 2020

**Gestaltungsszenario B Ausblick 2020**



**Anhang A.4: Ausblick des Gestaltungsszenario B für 2020**

**Gestaltungsszenario C Ausblick 2020**



**Anhang A.5: Ausblick des Gestaltungsszenario C für 2020**

## Literaturverzeichnis

- Abele 2006 Abele, T.: Verfahren für das Technologie-Roadmapping zur Unterstützung des strategischen Technologiemanagements. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2006. (IPA-IAO-Forschung und Praxis Nr. 441). Stuttgart, Univ., Diss., 2006
- Abele et al. 2007 Abele, E.; Hueske, B.; Kuhn, S.: Optimierung der globalen Wertschöpfungsstrukturen: Integrierte Betrachtung von Standort- sowie Make-or-Buy-Entscheidungen am Beispiel eines Medizingeräteherstellers. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 102 (2007), Nr. 5, S. 280–285
- Abele et al. 2008 Abele, E.; Liebeck, T.; Merz, N.: Globale Produktion - eine Frage des Standorts?! Wie Unternehmen systematisch die Struktur ihres Produktionsnetzwerks gestalten können. In: wt Werkstattstechnik online 98 (2008), 1/2, S. 92–97
- Aggteleky 1987 Aggteleky, B.: Fabrikplanung: Band 1 Grundlagen - Zielplanung - Vorarbeiten, unternehmerische und systemtechnische Aspekte - Marketing und Fabrikplanung. 2. Aufl. München: Hanser, 1987
- Aggteleky 1990a Aggteleky, B.: Fabrikplanung: Band 3 Ausführungsplanung und Projektmanagement, Planungstechnik in der Rationalisierungsphase. München: Hanser, 1990
- Aggteleky 1990b Aggteleky, B.: Fabrikplanung: Band 2 Betriebsanalyse und Feasability-Studie: technisch-wirtschaftliche Optimierung von Anlagen und Bauten. 2. Aufl. München: Hanser, 1990
- Argote et al. 1990 Argote, L.; Epple, D.: Learning Curves in Manufacturing. In: Science 247 (1990), Nr. 4945, S. 920–924
- Balve 2002 Balve, P.: Ein Rahmenkonzept zur Gestaltung wandlungsfähiger Auftragsmanagementsysteme. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2002. (IPA-IAO-Forschung und -Praxis Nr. 343). Stuttgart, Univ., Diss., 2001
- Barad et al. 1988 Barad, M.; Sipper, D.: Flexibility in manufacturing systems: definitions and Petri net modelling: International Journal of Production

- Research. In: International Journal of Production Research 26 (1988), Nr. 2, S. 237–248
- Bauernhansl 2003 Bauernhansl, T.: Bewertung von Synergiepotenzialen im Maschinenbau. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2003. Aachen, RWTH, Diss., 2002.
- Beer 1959 Beer, S.: Cybernetics and management. London: English Univ. Press, 1959. (Management Science Series)
- Beer 1995 Beer, S.: Brain of the firm. 2. Aufl. Chichester: Wiley, 1995. (The managerial cybernetics of organization)
- Bergholz 2006 Bergholz, M.: Objektorientierte Fabrikplanung. Aachen: Shaker, 2006. (Berichte aus der Produktionstechnik). Aachen, RWTH, Diss, 2005
- Bergmann 2010 Bergmann, L.: Nachhaltigkeit in Ganzheitlichen Produktionssystemen. Essen: Vulkan-Verl., 2010. (Schriftenreihe des IWF). Braunschweig, Techn. Univ. Carolo-Wilhelmina, Diss., 2009
- Bliss 2000 Bliss, C.: Management von Komplexität: Ein integrierter, systemtheoretischer Ansatz zur Komplexitätsreduktion. Wiesbaden: Gabler, 2000. (Schriftenreihe Unternehmensführung und Marketing Bd. 35). Münster (Westfalen), Univ., Diss., 1998
- BMU et al. 2007 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); ecosence – Forum Nachhaltige Entwicklung der Deutschen Wirtschaft e.V.; Center for Sustainability Management (CSM) der Leuphana Universität Lüneburg (Hrsg.): Nachhaltigkeitsmanagement in Unternehmen: Von der Idee zur Praxis; Managementansätze zur Umsetzung von Corporate Social Responsibility und Corporate Sustainability. Lüneburg: Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit u.a., 2007
- Bullinger 1999 Bullinger, H.-J.: Innovations- und Technologiemanagement. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management, CD-ROM. Berlin u.a.: Springer, 1999 (Hütte), S. 4-1 - 4-54
- Burgstahler 1997 Burgstahler, B.: Synchronisation von Produkt- und Produktionsentwicklung mit Hilfe eines Technologiekalenders. Essen: Vulkan-

- Verlag Classen, 1997. (Schriftenreihe des IWF). Braunschweig, Techn. Univ. Carolo-Wilhelmina, Diss., 1996
- Busch et al. 2004      Busch, A.; Dangelmaier, W.: Integriertes Supply Chain Management: Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse. Wiesbaden: Gabler, 2004
- Chryssolouris 1996      Chryssolouris, G.: Flexibility and Its Measurement. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 45 (1996), Nr. 2, S. 581–587
- Darwin 2003      Darwin, C.: The origin of the species. New York NY: Fine Creative Media, 2003. (Barnes & noble classics)
- de Toni et al. 1998      Toni, A. de; Tonchia, S.: Manufacturing flexibility: A literature review: International Journal of Production Research. In: International Journal of Production Research 36 (1998), Nr. 6, S. 1587–1617
- Destatis 2011a      Statistisches Bundesamt: Produktionsindex für das Verarbeitende Gewerbe: Deutschland, Monate, Original- und bereinigte Daten, Wirtschaftszweige (WZ2008 Hauptgruppen und Aggregate). Wiesbaden: Genesis Online Datenbank, 2011, S. 42153-0001. URL <https://www-genesis.destatis.de>, 09.06.2011
- Destatis 2011b      Statistisches Bundesamt: VGR des Bundes - Bruttowertschöpfung (nominal/preisbereinigt): Deutschland, Jahre, Wirtschaftsbereiche. Wiesbaden: Genesis Online Datenbank, 2011, S. 81000-0103. URL <https://www-genesis.destatis.de>, 09.06.2011
- Destatis 2011c      Statistisches Bundesamt: VGR des Bundes - Erwerbstätige: Deutschland, Jahre, Wirtschaftsbereiche. Wiesbaden: Genesis Online Datenbank, 2011, S. 81000-0111. URL <https://www-genesis.destatis.de>, 09.06.2011
- Destatis 2011d      Statistisches Bundesamt: VGR des Bundes - Produktionswert (nominal/preisbereinigt): Deutschland, Jahre, Wirtschaftsbereiche. Wiesbaden: Genesis Online Datenbank, 2011, S. 81000-0101. URL <https://www-genesis.destatis.de>, 07.06.2011
- Destatis 2011e      Statistisches Bundesamt: Wirtschaft und Statistik, Mai 2011. URL <http://www.destatis.de>, 07.06.2011

- DIN 6789-2            DIN 6789-2 1990-09: Dokumentationssystematik. zurückgezogen ohne Ersatz 2011-06
- Dohms 2001            Dohms, R.: Methodik zur Bewertung und Gestaltung wandlungsfähiger, dezentraler Produktionsstrukturen. Aachen: Shaker, 2001. (Berichte aus der Produktionstechnik 2001,11). Aachen, RWTH, Diss., 2000
- Dreves 2007            Dreves, F.: Tüpfengleiche Anlagen. In: Automobil Industrie 55 (2007). URL <http://www.automobil-industrie.vogel.de/produktion/articles/98484>, 24.08.2011
- Dudic 2010            Dudic, D.: Modell für die Fabrik Life Cycle-orientierte Produktplanung und -entwicklung. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2010. (IPA-IAO Forschung und Praxis 499). Stuttgart, Univ., Diss., 2010
- EIMaraghy 2009        EIMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. London: Springer, 2009. (Springer Series in Advanced Manufacturing)
- EIMaraghy et al. 2009    EIMaraghy, H.; Wiehndahl, H. P.: Changeability - An Introduction. In: EIMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. London: Springer, 2009 (Springer Series in Advanced Manufacturing), S. 3–24
- Eversheim 1997        Eversheim, W.: Prozeßorientiertes Qualitätscontrolling: Qualität meßbar machen. Berlin: Springer, 1997
- Eversheim 1999        Eversheim, W.: Produktentstehung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management, CD-ROM. Berlin u.a.: Springer, 1999 (Hütte), S. 7-1 - 7-149
- Felix 1998            Felix, H.: Unternehmens- und Fabrikplanung: Planungsprozesse, Leistungen und Beziehungen. 1. Aufl. München: Hanser, 1998. (REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation)
- Fiebig 2004            Fiebig, C.: Synchronisation von Fabrik- und Technologieplanung. Düsseldorf: VDI-Verl., 2004. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft 165). Hannover, Univ., Diss., 2004

- Fink et al. 2000 Fink, A.; Schlake, O.; Siebe, A.: Wie Sie mit Szenarien die Zukunft vorausdenken: Was Szenarien für die Früherkennung leisten und wie sie konkrete Entscheidungen unterstützen. In: Harvard Business Manager (2000), Nr. 2, S. 34–47
- Friese 2008 Friese, M.: Planung von Flexibilitäts- und Kapazitätsstrategien für Produktionsnetzwerke der Automobilindustrie. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum, 2008. (Berichte aus dem IFA 2008,1). Hannover, Univ., Diss., 2008
- Gausemeier et al. 1999 Gausemeier, J.; Fink, A.: Führung im Wandel: Ein ganzheitliches Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung. München: Hanser, 1999
- Gausemeier et al. 2009 Gausemeier, J.; Plass, C.; Wenzelmann, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. München: Hanser, 2009
- Gille et al. 2011 Gille, C.; Zwissler, F.: Bewertung von Wandlungstreibern: Voraussetzung einer wandlungsfähigen Unternehmensausrichtung. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011), Nr. 5, S. 310–313
- Giret et al. 2005 Giret, A.; Botti, V.; Valero, S.: MAS Methodology for HMS. In: Marik, V. (Hrsg.): Holonic and multi-agent systems for manufacturing: Proceedings: Second International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, HoloMAS 2005, Copenhagen, Denmark, August 22nd-24th, 2005. Berlin: Springer, 2005, S. 39–49
- Golden et al. 2000 Golden, W.; Powell, P.: Towards a definition of flexibility: in search of the Holy Grail? In: Omega 28 (2000), Nr. 4, S. 373–384
- Goldman 1996 Goldman, S. L.: Agil im Wettbewerb: Die Strategie der virtuellen Organisation zum Nutzen des Kunden. Berlin: Springer, 1996
- Grote et al. 2005 Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. 21. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2005



- Grundig 2009 Grundig, C.-G.: Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 3. Aufl. München: Hanser, 2009
- Handke 2000 Handke, S.: Konzept zur Strukturplanung komplexer technischer Systeme: Systematische Produktstrukturierung zur Vereinfachung technischer und organisatorischer Schnittstellen im Produktentstehungsprozess. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2000. (IPA-IAO Forschung und Praxis 316). Stuttgart, Univ., Diss., 1999
- Harms 2004 Harms, T.: Agentenbasierte Fabrikstrukturplanung. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum, 2004. (Berichte aus dem IFA 2004,1). Hannover, Univ., Diss., 2004
- Heger 2007 Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum, 2007. (Berichte aus dem IFA 2007,1). Hannover, Univ., Diss., 2006
- Heinen et al. 2010 Heinen, T.; Peter, K.; Erlach, K.; Nyhuis, P.; Lanza, G.; Westkämper, E.: Zukunftsthemen der Fabrikplanung: Wohin geht der Trend? - Ergebnisse einer umfangreichen Online-Umfrage des VDI-Fachausschusses "Fabrikplanung". In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010), Nr. 5, S. 405–409
- Hellingrath et al. 2008 Hellingrath, B.; Hegmanns, T.; Maaß, J.-C.; Toth, M.: Prozesse in Logistiknetzwerken – Supply Chain Management. In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.): Handbuch Logistik. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- Henderson 1984 Henderson, B. D.: Die Erfahrungskurve in der Unternehmensstrategie. 2. Aufl. Frankfurt/Main: Campus, 1984
- Henfling 1978 Henfling, M.: Lernkurventheorie: Ein Instrument zur Quantifizierung von produktivitätssteigernden Lerneffekten. Gerbrunn bei Würzburg: Lehmann, 1978
- Henn et al. 1999 Henn, G.; Kühnle, H.: Strukturplanung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management, CD-ROM. Berlin u.a.: Springer, 1999 (Hütte), S. 9-57 - 9-92
- Hernández 2003 Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung.. Düsseldorf: VDI-Verl., 2003. (Fortschritt-Berichte

- VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft 149). Hannover, Univ., Diss., 2002
- Herrmann 2010 Herrmann, C.: Ganzheitliches Life Cycle Management: Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. (VDI-Buch)
- Hieber 1991 Hieber, W. L.: Lern- und Erfahrungskurveneffekte und ihre Bestimmung in der flexibel automatisierten Produktion. München: Vahlen, 1991. (Controlling-Praxis). Stuttgart, Univ., Diss., 1991
- Hild 2005 Hild, R.: Automobilindustrie: stark reduzierte Wertschöpfungsquote und gebremste Produktivitätsentwicklung. In: ifo Schnelldienst 58 (2005), Nr. 21, S. 39–46
- Hüttenrauch et al. 2008 Hüttenrauch, M.; Baum, M.: Effiziente Vielfalt: Die dritte Revolution in der Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- IMS 2011 IMS. URL <http://www.ims.org>, 10.08.2011
- Jovane et al. 2009 Jovane, F.; Westkämper, E.; Williams, D. (Hrsg.): The ManuFuture Road: Towards competitive and sustainable high-adding-value manufacturing. Berlin: Springer, 2009
- Junghanns 1971 Junghanns, W.: Planung neuer Fertigungssysteme für die Einzel- und Serienfertigung. Aachen, RWTH, Fak. für Maschinenwesen, Diss., 1971
- Kettner et al. 1984 Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München: Hanser, 1984
- Kirchner et al. 2003 Kirchner, S.; Winkler, R.; Westkämper, E.: Unternehmensstudie zur Wandlungsfähigkeit von Unternehmen. Ergebnisse einer Unternehmensbefragung unter 200 deutschen produzierenden Unternehmen. In: wt Werkstatttechnik online 93 (2003), Nr. 4, S. 254–260
- Kleinert et al. 2000 Kleinert, J.; Klodt, H.: Megafusionen: Trends, Ursachen und Implikationen. Tübingen: Mohr Siebeck, 2000

- Koren 2010                      Koren, Y.: The global manufacturing revolution: Product-process-business integration and reconfigurable systems. Hoboken, NJ: Wiley, 2010
- Kössler et al. 2009              Kössler, P.; Rumpelt, T.: Die Komplexität beherrschen. In: Sonderausgabe Automobil Produktion, 60 Jahre Audi Ingolstadt (2009), S. 20–21
- KPMG 2010                      KPMG: Unternehmens- und Markenkonzentration in der europäischen Automobilindustrie: Mögliche Szenarien im Jahr 2025. URL <http://www.kpmg.de/Publikationen/20173.asp>, 07.06.2011
- Kuhn et al. 2002                 Kuhn, A.; Hellingrath, B.: Supply Chain Management: Optimierte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette. Berlin: Springer, 2002. (Engineering)
- Kunow 2006                      Kunow, A.: Anreizsteuerung unter Berücksichtigung von Lernkurveneffekten. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2006. (Gabler Edition Wissenschaft, Hallesche Schriften zur Betriebswirtschaft Bd. 20). Halle-Wittenberg, Univ., Diss., 2006
- Lanza et al. 2011a                Lanza, G.; Moser, R.; Ruhrmann, S.; Peter, K.: Systematisch zum wandlungsfähigen globalen Wertschöpfungsnetzwerk. Ein Ansatz zur Ist-Analyse für die gezielte Integration wandlungsfähiger Strukturen. In: wt Werkstatttechnik online 101 (2011), Nr. 4, S. 206–209
- Lanza et al. 2011b                Lanza, G.; Moser, R.; Scholz-Reiter, B.; Schukraft, S.; Meil, P.; Rasp, F.: Planung und Optimierung wandlungsfähiger globaler Wertschöpfungsnetzwerke: Planning and optimization of changeable global value added networks. In: Industrie Management 27 (2011), Nr. 3, S. 57–60
- Laucht 1995                      Laucht, O.: Flexibilisierung der manuellen Großmontage. Essen: Vulkan-Verl., 1995. (Schriftenreihe des IWF). Braunschweig, Techn. Univ. Carolo-Wilhelmina, Diss., 1995
- Liebeck 2009                      Liebeck, T.: Markt- und ressourcenorientierter Ansatz zur strategischen Gestaltung globaler Produktionsnetzwerke. Aachen: Shaker, 2009. (Schriftenreihe des PTW). Darmstadt, Techn. Univ, Diss., 2008

- Liker 2006 Liker, J. K.: Der Toyota-Weg: 14 Managementprinzipien des weltweit erfolgreichsten Automobilkonzerns. 1. Aufl. München: Finanz-Buch-Verl., 2006
- Lindemann et al. 2006 Lindemann, U.; Maurer, M.: Entwicklung und Strukturplanung individualisierter Produkte. In: Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, S. 41–62
- Löffler et al. 2010a Löffler, C.; Lakeit, A.; Westkämper, E.: Methodology for Structure-Analysis of Automotive Manufacturing. In: Sihn, W.; Kuhlang, P.; Westkämper, E. (Hrsg.): Sustainable Production and Logistics in Global Networks: 43rd CIRP International Conference on Manufacturing Systems, May 26th-28th, 2010, Vienna, Proceedings. Wien, Graz: Neuer Wissenschaftlicher Verlag, 2010, S. 925–932
- Löffler et al. 2010b Löffler, C.; Westkämper, E.; Unger, K.: Method for analysis and dynamism of factory-structure in automotive manufacturing. In: Ganjezadeh, F. (Hrsg.): Proceedings of the 20th FAIM International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: Intelligent Manufacturing and Services. July 12th-14th, 2010, Oakland, CA, USA, 2010
- Löffler et al. 2011a Löffler, C.; Westkämper, E.; Unger, K.: Änderungsdynamik und Varianz im Automobilbau. Analyse der Produktvarianz und deren Auswirkung auf die Produktion: Change in automotive manufacturing. Analysis of product variance and its effects on production. In: wt Werkstattstechnik online 101 (2011), Nr. 3, S. 99–104
- Löffler et al. 2011b Löffler, C.; Westkämper, E.; Unger, K.: Change Drivers and Adaptation of Automotive Manufacturing. In: Duffie, N. A.; Westkämper, E.; u.a. (Hrsg.): New Worlds of Manufacturing: 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems, June 1st-3rd, 2011, Madison, Wisconsin, USA, Proceedings. Madison, WI, USA.: Omnipress, 2011
- Löffler et al. 2011c Löffler, C.; Westkämper, E.; Unger, K.: Method for analysis and dynamism of factory structure in automotive manufacturing: Conference papers of Flexible Automation and Intelligent Manufacturing -

- Intelligent manufacturing and services. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 27 (2011), Nr. 4, S. 741–745
- Löffler et al. 2011d Löffler, C.; Westkämper, E.; Unger, K.: Model of a Factory Structure Under Changeability Aspects in Automotive Manufacturing. In: *Journal of Machine Engineering* 11 (2011), 1-2, S. 35–45
- Lunze 2010 Lunze, J.: *Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. 8. Aufl. Berlin: Springer, 2010. (Springer-Lehrbuch)
- Malik 2000 Malik, F.: *Strategie des Managements komplexer Systeme: Ein Beitrag zur Management-Kybernetik evolutionärer Systeme*. 6. Aufl. Bern: Haupt, 2000. St. Gallen, Hochsch., Habil.-Schr., 1977
- Möller 2008 Möller, N.: *Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme*. München: Herbert Utz Verlag, 2008. (Forschungsberichte IWB Band 212). München, Techn. Univ., Diss., 2008
- Müller-Stewens 2006 Müller-Stewens, G.: Die Fusionswelle hält an. In: *IO New Management* 75 (2006), Nr. 11, S. 14–18
- Nachtwey et al. 2009 Nachtwey, A.; Schwarz, S.; Riedel, R.; Schopp, M.: Entwicklung einer Methode zur Ableitung von Flexibilitätsklassen in der Produktion: Development of a methodology for the determination of flexibility classes in production. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (2009), Nr. 4, S. 224–228
- Narain et al. 2000 Narain, R.; Yadav, R. C.; Sarkis, J.; Cordeiro, J. J.: The strategic implications of flexibility in manufacturing systems. In: *International Journal of Agile Management Systems* 2 (2000), Nr. 3, S. 202–213
- Nofen et al. 2005 Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Löllmann, F.: Bedeutung der Wandlungsfähigkeit für die Zukunftsrobustheit von Fabriken. In: Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F. (Hrsg.): *Planung modularer Fabriken: Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*. München: Hanser, 2005, S. 8–15
- Nyhuis et al. 2007 Nyhuis, P.; Kolakowski, M.; Heinen, T.: Adequate and Economic Factory Transformability – Result of a Benchmarking. In: Zäh, M.;

- ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): 2nd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2007), Toronto, Ontario, Canada, July 22nd - 24th, 2007. Windsor, Ontario, Canada, 2007, S. 189–198
- Nyhuis et al. 2008 Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; Abele, E.; Wörn, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen: Transformable production systems. Theoretical background to the transformability of production systems. In: wt Werkstattstechnik online 98 (2008), 1/2, S. 85–91
- Nyhuis et al. 2009 Nyhuis, P.; Fronia, P.; Pachow-Frauenhofer, J.; Wulf, S.: Wandlungsfähige Produktionssysteme: Ergebnisse der BMBF-Vorstudie "Wandlungsfähige Produktionssysteme". In: wt Werkstattstechnik online 99 (2009), Nr. 4, S. 205–210
- Ohno 1993 Ohno, T.: Das Toyota-Produktionssystem. Frankfurt/Main, New York: Campus-Verl., 1993
- Oliver Wyman 2007 Oliver Wyman: 2015 Car Innovation: Innovationsmanagement in der Automobilindustrie. URL <http://www.car-innovation.de>, 21.08.2011
- Pawellek 2008 Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung: Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. (VDI-Buch)
- Peters et al. 2005 Peters, R.; Többen, H.: A Reference-Model for Holonic Supply Chain Management. In: Marik, V. (Hrsg.): Holonic and multi-agent systems for manufacturing: Proceedings: Second International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, HoloMAS 2005, Copenhagen, Denmark, August 22nd-24th, 2005. Berlin: Springer, 2005, S. 221–232
- Piller 2006 Piller, F. T.: Mass Customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. 4. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2006. (Gabler Edition Wissenschaft: Markt- und Unternehmensentwicklung). Würzburg, Univ., Diss., 1999

- REFA 1985 REFA: Methodenlehre der Planung und Steuerung: Teil 1. 4. Aufl. München: Hanser, 1985
- Reinhart et al. 1999 Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Hirschberg, A.; Selke, C.: Reaktionsfähigkeit für Unternehmen. Eine Antwort auf turbulente Märkte: Response capability for business enterprises. An answer to turbulent markets. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 94 (1999), 1/2, S. 21–24
- Rockstroh 1977 Rockstroh, W.: Die technologische Betriebsprojektierung: Band 1: Grundlagen und Methoden der Projektierung. Berlin: Verlag Technik, 1977
- Ropohl 2009 Ropohl, G.: Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik. 3. Aufl. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe, 2009. Karlsruhe, Univ., Habil.-Schr., 1978
- Roscher 2008 Roscher, J.: Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie. Stuttgart, Univ., Diss., 2008
- Schenk et al. 2004 Schenk, M.; Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Berlin: Springer, 2004
- Schloske 2011 Schloske, A.: QFD (Quality Function Deployment). In: Werdich, M. (Hrsg.): FMEA - Einführung und Moderation: Durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung (inkl. Methoden im Umfeld). Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011
- Schmigalla 1995 Schmigalla, H.: Fabrikplanung: Begriffe und Zusammenhänge. 1. Aufl. München: Hanser, 1995. (REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation)
- Schmitz 1996 Schmitz, W. J.: Methodik zur strategischen Planung von Fertigungstechnologien: Ein Beitrag zur Identifizierung und Nutzung von Innovationspotentialen. Aachen: Shaker, 1996. (Berichte aus der Produktionstechnik 96,1), Aachen, RWTH, Diss., 1995
- Schönsleben 2011 Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement: Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011

- Schuh 2005 Schuh, G.: Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools. 2. Aufl. München: Hanser, 2005
- Schuh et al. 2007a Schuh, G.; Wesch, C.; Koch, S.; Gulden, A.; Gottschalk, S.: Objektorientierte Fabrikplanung: Teil 2: Architekturen und Vorgehensweise. In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007), Nr. 3, S. 170–174
- Schuh et al. 2007b Schuh, G.; Wesch, C.; Koch, S.; Gulden, A.; Gottschalk, S.: Objektorientierte Fabrikplanung: Teil 1: Modellierung modularer Produktionsstrukturen. In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007), Nr. 3, S. 166–169
- Schuh et al. 2011 Schuh, G.; Klappert, S.; Schubert Johannes; Nollau, S.: Grundlagen zum Technologiemanagement. In: Schuh, G.; Klappert, S. (Hrsg.): Technologiemanagement Band 2: VDI-Buch. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2011
- Schulze et al. 2011 Schulze, C. P.; Reinema, C.; Nyhuis, P.: Kriterien zur Bewertung von Strukturvarianten: Criteria for the assessment of structure variants. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011), Nr. 3, S. 115–118
- Sesterhenn 2003 Sesterhenn, M.: Bewertungssystematik zur Gestaltung struktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme. Aachen: Shaker, 2003. (Berichte aus der Produktionstechnik 2003,1). Aachen, RWTH, Diss., 2002
- Sethi et al. 1990 Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: Flexibility in manufacturing: A survey. In: International Journal of Flexible Manufacturing Systems 2 (1990), S. 289–328
- Stepping 2007 Stepping, A.: Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und ganzheitlichen Produktionssystemen: Eine Methode zur Konfiguration von Fabrikplanungsprojekten. Aachen: Shaker, 2007. (Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH) 136). Karlsruhe, Univ., Diss., 2007
- Taylor 1994 Taylor, G. D.: Flexibility: definition, measurement, and design issues. In: ASME (Hrsg.): ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, 1994, 75th Anniversary Commemora-



- tive Vol., Materials Handling Engineering Division, 1994. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1994, S. 77–81
- Tharumarajah 2003 Tharumarajah, A.: From Fractals and Bionic to Holonics. In: Deen, S. M. (Hrsg.): Agent-based manufacturing: Advances in the holonic approach. Berlin: Springer, 2003 (Advanced information processing).
- Ueda et al. 1997 Ueda, K.; Vaario, J.; Ohkura, K.: Modeling of Biological Manufacturing Systems for Dynamic Reconfiguration. In: Annals of the CIRP 46 (1997), Nr. 1, S. 343–346
- Ueda et al. 2000 Ueda, K.; Hatono, I.; Fujii, N.; Vaario, J.: Reinforcement Learning Approaches to Biological Manufacturing Systems. In: Annals of the CIRP 49 (2000), Nr. 1, S. 343–346
- Ueda et al. 2001 Ueda, K.; Fujii, N.; Hatono, I.; Vaario, J.: Line-Less Production System Using Self-Organization. In: Annals of the CIRP 50 (2001), Nr. 1, S. 319–322
- Ueda et al. 2002 Ueda, K.; Fujii, N.; Hatono, I.; Kobayashi, M.: Facility Layout Planning Using Self-Organization Method. In: Annals of the CIRP 51 (2002), Nr. 1, S. 399–402
- VDI 5200 Blatt 1 VDI 5200 Blatt 1 2011-02: Fabrikplanung - Planungsvorgehen
- Warnecke et al. 1992 Warnecke, H.-J.; Hüser, M.: Die fraktale Fabrik: Revolution der Unternehmenskultur. Berlin: Springer, 1992
- Warnecke et al. 1993 Warnecke, H.-J.; Hüser, M.: Revolution der Unternehmenskultur: Das fraktale Unternehmen. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1993
- WCED 1987 World Commission on Environment and Development: Brundtland-Report, Our Common Future, Chapter 2: Towards Sustainable Development. 1987. URL <http://www.un-documents.net/ocf-02.htm>, 07.08.2011
- Wemhöner 2006 Wemhöner, N.: Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau. Aachen: Shaker, 2006. (Berichte aus der Produktionstechnik 2006,12). Aachen, RWTH, Diss., 2005

- Westkämper 1986 Westkämper, E.: Strategische Investitionsplanung mit Hilfe des Technologiekalenders. In: Wildemann, H. (Hrsg.): Strategische Investitionsplanung für neue Technologien in der Produktion: 2. Fertigungswirtschaftliches Kolloquium an der Universität Passau, 5.-7. März 1986. München: gfmt-Ges. für Management u. Technologie-Verl. KG, 1986, S. 143–182
- Westkämper 1999 Westkämper, E.: Entwicklung und Optimierung der Strukturen in der industriellen Produktion. In: Innovation in Struktur und Methode der Produktion: Düsseldorf: VDI Verlag, 1999. (VDI-Berichte; 1500), S. 1–8
- Westkämper 2001 Westkämper, E.: Leistungsplanung wandlungsfähiger Fabriken. Fabrik 2005+: Agilität und Produktivität im Fokus. In: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (Hrsg.): Fabrik 2005+: Agilität und Produktivität im Fokus: 3. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung, Stuttgart, 3.-4. April 2001. Landsberg/Lech: verlag moderne industrie, 2001
- Westkämper 2004 Westkämper, E.: Technologiekalender als Instrument der strategischen Planung. In: Spath, D. (Hrsg.): Forschungs- und Technologiemanagement: Potenziale nutzen - Zukunft gestalten. München: Hanser, 2004, S. 149–159
- Westkämper 2006a Westkämper, E.: Deutschland - Standort mit Zukunft? Forschung für die Zukunft: Germany - Location with Future? Research for the Future. In: Wirth, S. (Hrsg.): Von der integrierten Fertigung zur vernetzten Produktion: Festschrift zum Ehrenkolloquium anlässlich des 70. Geburtstages von Prof. Siegfried Wirth, 13. Juli 2006, Chemnitz, 2006, S. 27–50
- Westkämper 2006b Westkämper, E.: Digital Manufacturing in the global Era. In: Westkämper, E. (Hrsg.): Digital manufacturing in the global era. Digital Enterprise Technology. Setubal/Portugal: International Institution for Production Engineering Research CIRP, 2006
- Westkämper 2006c Westkämper, E.: Innovationsmanagement mit dem Technologiekalender. In: Gleich, R.; Rauen, H.; Russo, P.; Wittenstein, M. (Hrsg.): Innovationsmanagement in der Investitionsgüterindustrie treffsicher

- voranbringen: Konzepte und Lösungen. Frankfurt/Main: VDMA Verlag, 2006, S. 104–113
- Westkämper 2007 Westkämper, E.: Nachhaltige Strategien der Produktion am Standort Deutschland: Sustainable Strategies for Manufacturing in Germany. In: Zahn, E. (Hrsg.): Erfolgreich produzieren am Standort Deutschland: Eine strategische Herausforderung. Bonn: Lemmens Medien, 2007 (Eine Reihe des Förderkreises Betriebswirtschaft an der Universität Stuttgart e.V.), S. 25–47
- Westkämper 2008 Westkämper, E.: Fabriken sind komplexe langlebige Systeme. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin: Springer, 2008, S. 85–107
- Westkämper 2010a Westkämper, E.: Integration von Wissen in Maschinen und Anlagen. In: Ingenieurspiegel. Fachmagazin für Ingenieure (2010), Nr. 3, S. 12–14
- Westkämper 2010b Westkämper, E.: Wissen für die Produktion der Zukunft - Lernfabrik für das advanced Industrial Engineering. In: FTK (Hrsg.): Stuttgarter Impulse - Fertigungstechnik für die Zukunft: Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart, 29.-30. September 2010. Stuttgart: Gesellschaft für Fertigungstechnik, 2010, S. 607–630
- Westkämper et al. 1997 Westkämper, E.; Lücke, O.; Witt, G.: Die lernende Organisation: Die Anwendung von Lernkurven präzisiert die Fertigungsplanung. In: Arbeitsvorbereitung 34 (1997), Nr. 2, S. 88–92
- Westkämper et al. 2000 Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen: Ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld. In: wt Werkstattstechnik online 90 (2000), 1/2, S. 22–26
- Westkämper et al. 2005 Westkämper, E.; Roscher, J.: Bewertung flexibler Endmontagesysteme für die Automobilindustrie durch Simulation des Realbetriebs. In: wt Werkstattstechnik online 95 (2005), Nr. 4, S. 181–185
- Westkämper et al. 2009 Westkämper, E.; Zahn, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009

- Wiendahl 1996      Wiendahl, H.-P.: Fabrikplanung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Hütte: Produktion und Management; Betriebshütte. 7., völlig neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 1996, S. 9-1 - 9-31
- Wiendahl 2002      Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit. Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik: Transformability - Key factor for future factories. In: wt Werkstattstechnik online 92 (2002), Nr. 4, S. 122–127
- Wiendahl 2010      Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Aufl. München: Hanser, 2010
- Wiendahl et al. 2000      Wiendahl, H.-P.; Hernández Morales, R.: Wandlungsfähigkeit - neues Zielfeld in der Fabrikplanung: Changeability - new target in plant planning. In: Industrie Management 16 (2000), Nr. 5, S. 37–41
- Wiendahl et al. 2002      Wiendahl, H.-P.; Hernández Morales, R.; Grienitz, V.: Planung wandlungsfähiger Fabriken: Erschließung von Potentialen mit Hilfe des Szenario-Managements. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 97 (2002), 1-2, S. 12–17
- Wiendahl et al. 2005      Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F. (Hrsg.): Planung modularer Fabriken: Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München: Hanser, 2005
- Wiendahl et al. 2007      Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H. H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable manufacturing - classification, design and operation. In: CIRP Annals 56 (2007), Nr. 2, S. 783–809
- Wiendahl et al. 2009      Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. München: Hanser, 2009
- Wildemann 1987      Wildemann, H.: Strategische Investitionsplanung: Methoden zur Bewertung neuer Produktionstechnologien. Wiesbaden: Gabler, 1987
- Wildemann 1994      Wildemann, H.: Fertigungsstrategien: Reorganisationskonzepte für eine schlanke Produktion und Zulieferung. 2. Aufl. München: TCW-Transfer-Centrum, 1994. (TCW 6)

- Wildemann 1998 Wildemann, H.: Die modulare Fabrik: Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung. 5. Aufl. München: TCW-Transfer-Centrum, 1998. (TCW 2)
- Wirth 2000 Wirth, S. (Hrsg.): Flexible temporäre Fabrik: Arbeitsschritte auf dem Weg zu wandlungsfähigen Fabrikstrukturen. Wissenschaftliche Berichte FZKA-PFT 203. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt, 2000
- Wirth et al. 2001 Wirth, S.; Baumann, A.: Wertschöpfung durch vernetzte Kompetenz: Schlanke Kompetenzkooperation: Überlebensstrategie für kleine Produktions- und Dienstleistungsunternehmen. München: Huss, 2001. (Logistik Wissen Produktion 1)
- Womack et al. 1990 Womack, J. P.; Jones, D. T.; Roos, D.: The machine that changed the world: Based on the Massachusetts Institute of Technology 5 million dollar 5 year study on the future of the automobile. New York: Rawson, 1990
- Wright 1936 Wright, T. P.: Factors affecting the cost of airplanes. In: Journal of the Aeronautical Science 3 (1936), Nr. 2, S. 122–128
- Wyns 1999 Wyns, J.: Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: The Key to Support Evolution and Reconfiguration. Leuven, KU, Toegepaste Wetenschappen, Departement Werkuigkunde, Diss., 1999
- Zahn 1988 Zahn, E.: Produktionsstrategie. In: Henzler, H. A. (Hrsg.): Handbuch strategische Führung. Wiesbaden: Gabler, 1988, S. 515–542
- Zahn 2011a Zahn, E.: Produktion in globalen Netzwerken. In: Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering, Universität Stuttgart (Hrsg.): Innovation und Produktion – Zukunftsfähigkeit durch neue Wege, Jahrestagung GSaME, 2011
- Zahn 2011b Zahn, E.: Strategisches Management globaler Produktionsnetzwerke. In: Kemper, H.-G.; Pedell, B.; Schäfer, H. (Hrsg.): Management vernetzter Produktionssysteme: Innovation, Nachhaltigkeit und Risikomanagement. 1. Auflage. München: Vahlen, 2011, S. 9–24

- Zahn et al. 1994      Zahn, E.; Dillerup, R.: Fabrikstrategien und -strukturen im Wandel. In: Zülch, G. (Hrsg.): Vereinfachen und verkleinern: Die neuen Strategien in der Produktion. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1994 (HAB-Forschungsberichte, 6), S. 15–51
- Zürn et al. 2010      Zürn, M.; Klumpp, W.; Reichenbach, M.; Zipter, V.: Neuartige Montagekonzepte für die Automatisierung im Automobilbau. In: MM - Maschinenmarkt. Das IndustrieMagazin (2010), Nr. 21, S. 40–42