

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

MICHAEL NEUMANN

---

# Methode für eine situationsbasierte Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit in der Serienmontage



Universität Stuttgart



Fraunhofer

IPA

**Herausgeber:**

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

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

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

**Michael Neumann**

**Methode für eine situationsbasierte Adaption  
und Absicherung der Produktionsfähigkeit in  
der Serienmontage**

**Kontaktadresse:**

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

**STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG****Herausgeber:**

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

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

Titelbild: © Nataliya Hora – Fotolia.com

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-0816-6

**D 93**

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

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

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2015

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 07 11 9 70-25 00  
Telefax 07 11 9 70-25 08  
E-Mail [verlag@fraunhofer.de](mailto:verlag@fraunhofer.de)  
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

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

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

## GELEITWORT DER HERAUSGEBER

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

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

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

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

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

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

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper





**Methode für eine situationsbasierte Adaption und  
Absicherung der Produktionsfähigkeit  
in der Serienmontage**

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

von

Dipl.-Ing. Michael Neumann  
aus Gera

Hauptberichter: Univ.-Prof. a.D. Dr-Ing. Prof. E.h. Dr-Ing. E.h. Dr. h.c.  
Engelbert Westkämper  
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Dombrowski

Tag der mündlichen Prüfung: 24.09.2014

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb  
der Universität Stuttgart

2014



## Vorwort

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

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper für die enge Betreuung und für wichtige Hinweise zu inhaltlichen Verbesserungen sowie für interessante Impulse und Diskussionen. Zudem danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Dombrowski für die engagierte Übernahme des Mitberichts.

Neben meiner Erstbetreuerin Frau Dr. Carmen Constantinescu, MBA bedanke ich mich auch bei meinen sehr geschätzten Kollegen Martin Landherr, Dominik Lucke und Johannes Volkmann für die vielen Gespräche, kritischen Hinweise und Hilfestellungen. Ohne deren kontinuierliche Unterstützung wäre die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Einen besonderen Dank möchte ich Herrn Hans-Friedrich Jacobi aussprechen, welcher mit stetiger Motivation und unerschütterlichem Engagement einen großen Teil zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen hat.

Zudem möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen der GSaME und des Fraunhofer IPA bedanken, die mich während meiner Arbeit unterstützt und begleitet haben, für die aufgeschlossene und freundliche Art, die stete Hilfsbereitschaft und die gute Zusammenarbeit. Meinen Mitstreitern Barbara, Carina, Eva, Andreas, Jonathan, Mark, Philip, Tobias und Omar danke ich für die Aufmunterungen, die Zusprüche und die vielen positiven Erinnerungen.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern Martina und Wolfgang Neumann: Für ihre beständige, unerschütterliche und vorbehaltlose Unterstützung trotz aller Kurven in meinem Lebensweg, dass sie mir meinen Freiraum gegeben und mich immer gefördert haben – Danke!

Michael Neumann

Oktober 2014





## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
Zusammenfassung.....	IX
Summary .....	XII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Problemstellung .....	2
1.3 Zielsetzung und Aufgabenstellung.....	4
1.4 Aufbau der Arbeit .....	6
2 Begriffsdefinition und Stand der Wissenschaft und Technik im Untersuchungsbereich .....	7
2.1 Neue Leitbilder für Produktionsunternehmen.....	7
2.2 Abgrenzung der Arten der Anpassungsfähigkeit.....	9
2.2.1 Flexibilität .....	9
2.2.2 Wandlungsfähigkeit .....	10
2.2.3 Adaptionfähigkeit .....	11
2.2.4 Produktionsfähigkeit .....	13
2.3 Montagesysteme in der variantenreichen Serienproduktion.....	14
2.3.1 Struktur von Montagesystemen .....	15
2.3.2 Das Montagesystem im Kontext der variantenreichen Produktion .....	17
2.3.3 Aufgaben und Zielsetzung von Montagesystemen .....	18
2.3.4 Anforderungen zukünftiger Montagesysteme in Kontext der variantenreichen Serienfertigung.....	20
2.4 Auftragsmanagement im turbulenten Umfeld.....	21
2.5 Technische Änderungsfähigkeit in Produktionssystemen .....	24
2.6 Zwischenfazit .....	25
2.7 Stand und Tendenzen in der Wissenschaft und Technik .....	26

2.7.1	Relevanz der Wandlungsfähigkeit bei der Gestaltung von zukünftigen Montagesystemen .....	26
2.7.2	Systematiken zur Montageplanung und -optimierung .....	30
2.7.3	Softwareunterstützende Methoden.....	34
2.7.4	Ansätze zur technischen Adaptionfähigkeit .....	36
2.8	Defizit hinsichtlich der Adaption von Montagesystemen.....	38
3	Grundlagen zur situationsbasierten Adaption von Montagesystemen.....	40
3.1	Charakterisierung der Montagesystemstruktur .....	40
3.1.1	Struktur existierender Montagesysteme.....	40
3.1.2	Einflussgrößen der heutigen Montageplanung und -optimierung.....	43
3.2	Das Montagesystem als Regelkreis.....	45
3.3	Adaptionfähigkeit von Montagesystemen.....	47
3.3.1	Charakterisierung der Adaptionfähigkeit .....	47
3.3.2	Situationen mit Bedarf zur operativen Adaption .....	49
3.4	Handlungsspielräume zur Adaption.....	51
3.5	Produktionsfähigkeit in Montagesystemen.....	53
3.6	Bewertungsgrößen adaptionsfähiger Montagesysteme.....	54
3.7	Ableitung von Anforderungen .....	56
4	Methode zur situationsbasierten Adaption von Montagesystemen .....	58
5	Detaillierte Darstellung der Methode zur situationsbasierten Adaption.....	63
5.1	Analyse des Montagesystems und Darstellung des Umfelds.....	63
5.1.1	Analyse der Montagesystemstruktur.....	63
5.1.2	Potenzial der Wirtschaftlichkeitssteigerung.....	70
5.1.3	Adaptionsrestriktionen in variantenreichen Serienmontagen .....	73
5.2	Identifikation vorherrschender Abweichungen.....	76
5.2.1	Situationsbasierte Änderungsdynamik.....	77
5.2.2	Situationsbasierte Handlungsspielräume zur Adaption .....	79
5.2.3	Absicherung der Produktionsfähigkeit.....	83
5.3	Entwicklung situationsbasierter Adaptionskonzepte .....	86
5.3.1	Prämissen zur situationsbasierten Adaption .....	88
5.3.2	Konzeption eines digitalen Werkzeugs zur Adaptionserstellungsunterstützung .....	89

---

5.3.3	Realisierung des digitalen Werkzeugs .....	92
5.4	Situationsbasierte Adaption von Montagesystemstrukturen.....	95
5.4.1	Leitsätze zur Adaption .....	95
5.4.2	Ausprägungsarten.....	98
5.4.2.1	Situationsbasiert kurzfristige Adaption.....	100
5.4.2.2	Vorausschauende Adaption.....	102
5.4.2.3	Strukturelle Adaption .....	104
5.4.2.4	Steigerung der Adaptionsfähigkeit.....	106
5.4.2.5	Auswahl der Adaptionsausprägungen.....	108
5.4.3	Erstellung von Adaptionskonzepten .....	110
5.5	Bewertung der Adaptionskonzepte .....	111
5.5.1	Bewertungsgrundlagen.....	111
5.5.2	Bewertungsvorgehen.....	114
6	Validierung der Methode am Beispiel der Lernfabrik und eines Montagesystems.....	117
6.1	Lernfabrik „advanced Industrial Engineering“ (aIE).....	117
6.1.1	Darstellung des Untersuchungsbereichs .....	117
6.1.2	Bestimmung des Adaptionsfähigkeitsgrads .....	118
6.1.3	Fazit der alpha-Validierung .....	121
6.2	Situationsbasierte Adaption eines Montagesystems in der Maschinenbaubranche .....	122
6.2.1	Darstellung der Montagelinie der variantenreichen Serienfertigung.....	122
6.2.2	Durchführung situationsbasierter Adaptionen .....	123
6.3	Steigerung der systemimmanenten Adaptionsfähigkeit.....	129
6.4	Fazit aus der Validierung .....	131
7	Fazit und Ausblick .....	133
7.1	Fazit.....	133
7.2	Ausblick .....	134
	Literaturverzeichnis .....	135



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Thesen zur Produktion der Zukunft [BDI 2005] .....	3
Abbildung 1.2:	Ansatz und Methode zur kurzfristigen Reaktion auf das turbulente Umfeld von Montagesystemen .....	5
Abbildung 1.3:	Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit.....	6
Abbildung 2.1:	Turbulentes Umfeld von Unternehmen in Anlehnung an [Westkämper und Zahn 2009] .....	8
Abbildung 2.2:	Anpassung der Produktion durch das Konzept der Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Nyhuis et al. 2008].....	11
Abbildung 2.3:	Nutzen und Aufwand der virtuellen Absicherung in Anlehnung an [Westkämper 2008a].....	14
Abbildung 2.4:	Sichten der Systemtheorie in Anlehnung an [Ropohl 2009] .....	16
Abbildung 2.5:	Abgrenzung des Systems Montage in Anlehnung an [Warnecke 1984] [Westkämper 2009b] .....	17
Abbildung 2.6:	Einflüsse auf komplex vernetzte Montagesysteme in Anlehnung an [Westkämper 2001] .....	17
Abbildung 2.7:	Betrachtungsrahmen der variantenreichen Serienfertigung in Anlehnung an [Westkämper 2006c].....	18
Abbildung 2.8:	Anforderungen an zukünftige Montagesystemplanung und -adaption in Teilen ergänzt durch [Feldmann et al. 2004].....	21
Abbildung 2.9:	Ablauf und Inhalte der Produktionsplanung und -steuerung in Anlehnung an [Wiendahl 2002a] in Erweiterung zu [Hackstein 1989] .....	23
Abbildung 2.10:	Voraussetzungen für technische Anpassungsfähigkeit in Anlehnung an [Westkämper 2009b] .....	25
Abbildung 2.11:	Ansätze zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen adaptiert von [Hernández 2003] und [Wiendahl 2005] .....	27
Abbildung 2.12:	Skalierung der Produktion und Struktur der Leistungseinheiten adaptiert von [Westkämper und Zahn 2009] .....	28
Abbildung 2.13:	Merkmale der Produktionsstrukturierungen [Westkämper und Zahn 2009] .....	30

---

Abbildung 2.14: Ablauf und Aktivitäten der Montagesystemplanung [Lotter und Wiendahl 2006] [Westkämper 2001] .....	31
Abbildung 2.15: Ablauf der einmaligen Normalplanung und Einordnung der Montagesystemplanung .....	33
Abbildung 2.16: Modellerstellungssystematik digitaler Werkzeuge in Anlehnung an [VDI 1993].....	34
Abbildung 2.17: Herausforderungen in der heutigen Anwendung von digitalen Werkzeugen .....	35
Abbildung 2.18: Schnittstellen von Modulen in einem Produktionssystem adaptiert von [Nofen 2006].....	36
Abbildung 2.19: Defizite in der heutigen Montageadaption in Anlehnung an [Westkämper und Zahn 2009] [Westkämper 2009a] [Kapp 2011] .....	39
Abbildung 3.1: Skalierung des Montagesystems und Vernetzung der Leistungseinheiten...41	
Abbildung 3.2: Montagesystemstruktur in Anlehnung an [Westkämper 2006b] .....	42
Abbildung 3.3: Eigenschaften und Restriktion eines Montagesystems in Anlehnung an [Lotter und Wiendahl 2006] .....	43
Abbildung 3.4: Ablauf der Inbetriebnahme und Optimierung von Montagesystemen.....	44
Abbildung 3.5: Kurzfristige Abweichungen hinsichtlich der durchgeführten Normalplanung .....	44
Abbildung 3.6: Technische Disruption im Produktionsumfeld (Warnecke und Jacobi 1991) .....	45
Abbildung 3.7: Prinzip des Montagesystembetriebs als Regelkreis .....	46
Abbildung 3.8: Einflussgrößen und Möglichkeiten zur Erhöhung der Adaptionfähigkeit von Montagesystemen .....	47
Abbildung 3.9: Absicherung der Produktionsfähigkeit von Montagesystemen nach einer Adaption mit Hilfe von digitalen Modellen in Teilen adaptiert von [Westkämper 2006b] .....	48
Abbildung 3.10: Quellen der Abweichung hinsichtlich des wirtschaftlichen Betriebs eines Montagesystems in Anlehnung an [Lotter und Wiendahl 2006].....	50
Abbildung 3.11: Einteilung der Wandlungsobjekte in einen zeitlichen Rahmen in Teilen adaptiert von [Lotter und Wiendahl 2006] .....	51
Abbildung 3.12: Generelle Handlungsspielräume zur Anpassung eines Montagesystems .....	52

Abbildung 3.13: Zielgrößen der Produktion nach [Kletti und Schumacher 2011].....	54
Abbildung 3.14: Abweichung der klassischen von den situationsbasierten Zeithorizonten....	55
Abbildung 3.15: Bewertungsgrundlage für situationsbasierte Adaptionen .....	56
Abbildung 4.1: Gesamtkonzept der situationsbasierten Adaption.....	59
Abbildung 4.2: Aufbau und Ablauf der Methode zur situationsbasierten Adaption .....	60
Abbildung 5.1: Definition der Montagesystemstruktur in einer variantenreichen Serienfertigung .....	64
Abbildung 5.2: Wirkbeziehungen im Betrachtungsrahmen.....	66
Abbildung 5.3: Ausprägungsgrad der Adaptionfähigkeit in einem Montagesystem .....	69
Abbildung 5.4: Klassifizierung der Adaptionfähigkeit in einem Montagesystem mit Hilfe des morphologischen Kastens .....	70
Abbildung 5.5: Potentielle Wirtschaftlichkeitssteigerung nach der situationsbasierten Adaption (qualitativ).....	71
Abbildung 5.6: Aufrechterhalten der Produktion durch situationsbasierte Adaption.....	73
Abbildung 5.7: Restriktionen hinsichtlich der Adaptionfähigkeit von Montagesystemstrukturen.....	74
Abbildung 5.8: Qualitativer Einfluss auf die situationsbasierte Adaptionfähigkeit von Bestandteilen eines Montagesystems .....	76
Abbildung 5.9: Ableitung der Gruppen hinsichtlich der Abweichungen für eine situationsbasierte Adaption.....	78
Abbildung 5.10: Situationen die einen Bedarf zur kurzfristigen Adaption hervorrufen .....	79
Abbildung 5.11: Vorgehen zur Einteilung der Handlungsspielräume .....	80
Abbildung 5.12: Zugeordnete und zeitlich charakterisierte Handlungsspielräume .....	82
Abbildung 5.13: Vorgehensweise zur Absicherung der Produktionsfähigkeit nach einer Adaption .....	84
Abbildung 5.14: Kennzahlen zur Absicherung der Produktionsfähigkeit situationsbasierter Adaptionskonzepte .....	84
Abbildung 5.15: Ausprägung der Kennzahlen zur Absicherung der Produktionsfähigkeit in Anlehnung an [Kletti und Schumacher 2011] [REFA 1993] .....	85
Abbildung 5.16: Vorgehen zur situationsbasierten Konzeption von Adaptionen und der Absicherung der Produktionsfähigkeit .....	87
Abbildung 5.17: Bestandteile des digitalen Werkzeugs .....	90

---

Abbildung 5.18: Fabrikobjekte und deren Charakterisierungsvorgehen innerhalb des digitalen Werkzeugs .....	91
Abbildung 5.19: Digitales Werkzeug zur situationsbasierten Adaption der Montagesystemstruktur - schematisch.....	93
Abbildung 5.20: Benutzeroberfläche und Funktionen des digitalen Werkzeugs.....	93
Abbildung 5.21: Detaillierung des digitalen Werkzeugs .....	94
Abbildung 5.22: Datenformate und Programmiersprache des digitalen Werkzeugs.....	95
Abbildung 5.23: Leitsätze zur Adaption und deren gegenseitige Beeinflussung .....	96
Abbildung 5.24: Zielkonflikt der Wirtschaftlichkeit des Betriebs und der Adaptionsfähigkeit.....	97
Abbildung 5.25: Ausprägung der situationsbasiert kurzfristigen Adaption .....	100
Abbildung 5.26: Ausprägung der vorausschauenden Adaption.....	103
Abbildung 5.27: Ausprägung der strukturellen Adaption.....	105
Abbildung 5.28: Steigerung der systemimmanenten Adaptionsfähigkeit .....	107
Abbildung 5.29: Auswahl der ordnungsgemäßen Adaptionsausprägung hinsichtlich des identifizierten Adaptionsfähigkeitsgrads .....	109
Abbildung 5.30: Ablauf der Adaptionskonzepterstellung .....	110
Abbildung 5.31: Bewertungsgrundlage für Adaptionskonzepte.....	112
Abbildung 5.32: Bewertungskriterien für Adaptionskonzepte .....	113
Abbildung 5.33: Vorgehensweise zur systematischen Bewertung der Adaptionskonzepte ..	115
Abbildung 6.1: Komponenten der Lernfabrik „advanced Industrial Engineering“ .....	118
Abbildung 6.2: Modell der Lernfabrik.....	119
Abbildung 6.3: Adaptionsfähigkeitsgrad der Lernfabrik.....	120
Abbildung 6.4: Ermittlung der Adaptionsausprägung basierend auf dem Adaptionsfähigkeitsgrad .....	121
Abbildung 6.5: Darstellung des Untersuchungsbereichs .....	123
Abbildung 6.6: Ermittlung des Adaptionsfähigkeitsgrads der Montagelinie zur Montage von Elektrogeräten.....	124
Abbildung 6.7: Ermittlung der Adaptionsausprägung der Montagelinie.....	125
Abbildung 6.8: Auswirkungen der Störungen und der situationsbasiert kurzfristigen Adaption auf die Montagelinie .....	127
Abbildung 6.9: Ergebnis der Steigerung der Adaptionsfähigkeit der Montagelinie.....	130



## Abkürzungsverzeichnis

aIE	advanced Industrial Engineering
BDE	Betriebsdatenerfassung
BMS	Bionic Manufacturing System
bzw.	beziehungsweise
CIM	Computer Integrated Manufacturing
ERP	Enterprise Ressource System
HMS	Holonic Manufacturing System
IFF	Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
MSM	Montagesystemstrukturmodell
PPS	Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme
RMS	Reconfigurable Manufacturing System
sAs	Summe der Stunden für eine situationsbasierte Adaption
SUM	Stuttgarter Unternehmensmodell
QS	Qualitätssicherung

## Zusammenfassung

Markt- und kundenseitige Forderungen stören eine vorausschauende Planung der Produktionsabläufe. Kürzere Produktlebenszyklen und der Wunsch nach innovativen und individuellen Produkten drücken sich innerhalb der Montagesysteme durch höhere Volumenschwankungen hinsichtlich der Auftragseingänge und der zu produzierenden Stückzahlen aus. Dies wiederum bedingt eine permanente Anpassung der Strukturen, um einen wirtschaftlichen Betrieb des Montagesystems in einer variantenreichen Serienfertigung gewährleisten zu können. Derzeitige kurzfristige Maßnahmen konzentrieren sich auf die Optimierung und Flexibilisierung von Strukturen und Prozessen auf Basis von Erfahrungen und Intuition. Dies führt zu gewachsenen Strukturen, die nicht immer vollständig dokumentiert werden. Diese Vorgehensweise erzeugt zusätzliche Turbulenzen, da folgende Adaptionen auf nicht aktuellen Planungsständen durchgeführt werden und somit Adaptionsvorhaben konzipiert werden, die nicht oder nur suboptimal implementiert werden können. Stillstände und Produktionsausfälle sind Konsequenzen daraus, die schließlich zu Widerständen bei Mitarbeitern gegen weitere Anpassungsvorgänge führen. Die Adaptionsfähigkeit eines Montagesystems, auf eben diese kurzfristig auftretenden Einflüsse, ist jedoch ein entscheidender Wettbewerbsvorteil für Unternehmen, besonders in Hochlohnländern. Eine permanente, strukturierte und kurzfristige Anpassung der Montagesystemstruktur unter Berücksichtigung der komplexen Wirkbeziehungen ist nicht länger optional.

In der vorliegenden Arbeit wurde daher eine Methode zur situationsbasierten Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit von Serienmontagen entwickelt, mit der eine permanente und systematische Reaktion auf interne und externe Turbulenzen ermöglicht wird. Der Zeitraum der Adaptionen bezieht sich dabei auf den in dieser Arbeit definierten situationsbasierten Zeithorizont, der von einer Schicht bis maximal vier Wochen wirkt.

Mit Hilfe der Analyse vorhandener Ansätze und Methoden zur Steigerung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Produktionsstrukturen, wurden Defizite herausgestellt und Anforderungen abgeleitet, die für eine permanente situationsbasierte Adaption benötigt werden. Basierend darauf wurde eine Methode konzipiert die für Mitarbeiter der fertigungsnahen Bereiche intuitiv anwendbar ist. Die Methode besteht aus fünf Schritten, die in ihrer Gesamtheit eine strukturierte und permanente Adaption hinsichtlich kurzfristig wirkender Einflussfaktoren ermöglicht. Zudem bietet die Methode die Möglichkeit, die Adaptionsfähigkeit eines Montagesystems ganzheitlich zu steigern, wenn

in einem Unternehmen Montagesystemstrukturen vorherrschen, die eine kurzfristige Adaption nur beschränkt zulassen.

Die Vorgehensweise zur Analyse und Modellierung der Montagesystemstruktur und der Wirkbeziehungen entlang des entwickelten Montagesystemstrukturmodells, ermöglicht die Aufnahme relevanter Fabrikobjekte und Prozesse. Zudem lässt sich, durch das entwickelte Vorgehen zur Bestimmung des Adaptionfähigkeitsgrads, die Bandbreite der zur Verfügung stehenden Handlungsspielräume für eine situationsbasierte Adaption bestimmen. Gleichzeitig werden vorhandene Restriktionen hinsichtlich der Erstellung von Adaptionskonzepten aufgezeigt. Das erstellte Modell dient zudem als Ausgangsbasis zur Entwicklung von situationsbasierten Adaptionskonzepten.

In einem zweiten Schritt wurden Handlungsspielräume herausgearbeitet, die eine situationsbasierte Reaktion innerhalb des definierten situationsbezogenen Zeithorizonts möglich machen. Dieser ist wiederum in situationsbasiert kurzfristig, mittelfristig und langfristig unterteilt, um auch strukturelle Adaptionen berücksichtigen zu können. Die Handlungsspielräume beziehen sich auf die Einflussfaktoren hinsichtlich der Betriebsmittel, des Personals, der Aufträge und Produkte sowie der Technologie und der Peripherie und sind jeweils den definierten Zeithorizonten zugeordnet. Zudem wurde ein Vorgehen entwickelt, welches mit Hilfe von leistungsbezogenen Kennzahlen die Absicherung der Produktionsfähigkeit nach einer Adaption ermöglicht.

Zur Erstellung von Adaptionskonzepten und zur Unterstützung der Kennzahlenberechnung wurde ein app-basiertes digitales Werkzeug konzipiert und umgesetzt. Mit Hilfe eines speziell für Montagesysteme entwickelten Datenmodells und einer darauf basierenden Ressourcenbibliothek wird eine effiziente Modellierung der Ist-Situation sichergestellt. Das digitale Werkzeug unterstützt somit eine strukturierte Modellierung und Analyse und dient zur Beschleunigung des Adaptionsvorgangs.

Zur Erstellung von Adaptionskonzepten wurden Ausprägungsarten identifiziert, die eine zielgerichtete Adaption hinsichtlich des identifizierten Adaptionfähigkeitsgrads verfolgen. Zudem wurden Adaptionsausprägungsarten entwickelt, die die Struktur des vorhandenen Montagesystems auf langfristige Sicht adaptionsfähiger gestalten und somit eine erhöhte Anzahl an Maßnahmen, in Form von Handlungsspielräumen, für eine situationsbasiert kurzfristige Adaption zur Verfügung stellen. Mit Hilfe eines entwickelten Verfahrens wird der Prozess der Adaptionsausprägungsauswahl unterstützt.

Eine belastbare und aussagekräftige Bewertung der erstellten Adaptionskonzepte und die letztendliche Umsetzungsentscheidung eines Adaptionskonzepts werden mit Hilfe von industrienahen Krite-

rien durchgeführt. Die Bewertung erfolgt dabei anhand quantitativer Bewertungskriterien – sAs – sowie leistungsbasierten Kennzahlen und wird durch qualitative Kriterien komplementiert.

Der logische Aufbau der Methode wurde in einer alpha-Validierung gezeigt. Anschließend wurde die Methode in ihrer Gesamtheit an einem praktischen Beispiel validiert. Damit leistet diese Arbeit einen Beitrag, der die Reaktionsfähigkeit von Montagesystemen hinsichtlich kurzfristiger Einflussfaktoren, durch die Nutzung situationsbasierter Adaptionen erhöht, sowie die Wirtschaftlichkeit und die sich daraus ableitende Wettbewerbsfähigkeit steigert.

## Summary

Assembly systems which are characterized by a volume production of customized products are influenced by the market and the customer. This complicates a structured planning of the production. Shorter product life cycles and the request for innovative and individual products create higher variability in volumes considering incoming orders and lot sizes within an assembly system. Due to this fact, an increasing need for permanent adaptations of assembly system structure arises, to be able to operate efficiently. Today short time adaptations are based on experience, concentrate on optimizing structures and implement flexible processes. This leads to evolved structures of assembly systems, which are most of the time slightly documented. The disadvantage of this procedure is the development of additional turbulences. Since following adaptations are based on obsolete planning states they cause the development of adaptation concepts which can be implemented insufficiently. Downtimes and loss of production time are consequences, which lead to a rejection of following adaptations by the work force. The ability to adapt an assembly system in a very short time is however a significant advantage in competition. Especially for companies which are located in high wage countries, given that short time based adaptations ensure an efficient operation of assembly systems. A permanent and structured adaptation of assembly systems is therefore not any longer optional.

Therefore a method for situation-based adaptation and validation of the manufacturing capability of assembly systems was developed, which enables a permanent and structured adaptation of assembly systems considering internal and external turbulences.

By analyzing approaches and methods which pursue the increasing of the flexibility and changeability of production systems, short comings and requirements were identified, which are needed to perform a situation-based adaptation. Based on this a method was developed, which is suitable to efficiently support workers in developing adaptation concepts of assembly systems. This method is structured in five steps, which enable a permanent adaptation considering short time based influences driven from order compositions, product variants and last minute changes as well as technical disruptions. Additionally the method considers the enhancement of the overall adaptation ability to support even less adaptive assembly systems.

The structured analysis of the assembly system and its interdependencies enables the characterization of factory objects and processes within the chosen system boundary. This enables the develop-

ment of an assembly system model. Furthermore, with the employment of the model the degree of the adaptation ability can be identified and proper actions can be planned and executed. Simultaneously restrictions considering the development of adaptation concepts are revealed.

Within the second step of the method situation-based actions are identified, which allow a short time reaction within the situation-based time horizon. The situation-based time horizon is structured in short-, middle- and long-term ranges, to be able to perform adaptations, which consider structural adaptations, also. The situation-based actions concentrate on internal and external influences considering resources, personnel, orders, products, technologies and periphery. They are arranged according different groups and situation-based time horizons. A procedure which enables the validation of the manufacturing capability of an adaptation concept was developed, too. This validation method is based on industry acknowledged key performance indicators.

An app-based digital tool was developed to support the workers in the process of developing a model of the assembly system. This tool employs a specialized data model and a resource library to support an efficient model development. Additionally the digital tool contains a structured modeling procedure to accelerate the development of adaptation concepts.

To ensure an optimal adaptation process different adaptation types were developed and introduced. The range of these adaptation types allows on the one hand a situation-based short time adaptation and on the other hand long-term adaptations considering the enhancement of the adaptation ability of an assembly system. The optimal selection of an adaptation type at any time and situation is supported by a developed procedure. The assessment of the developed adaptation concepts and the final implementation will be performed through the use of suitable criteria, which allow a resilient and significant assessment. The assessment is based on quantitative key performance indicators and will be supported by qualitative criteria. The developed method was validated within an industrial application.

This research project makes a contribution to enhance the ability for short-term adaptations within assembly systems regarding short-term influences. The possibility the encounter these with situation-based adaptations and actions enhance the economic efficiency of the assembly system operation and ensure the ability to compete within a global producti



# 1 Einleitung

Nur der Wandel ist konstant. Von dieser Erkenntnis sind auch produzierende Unternehmen der heutigen Zeit nicht ausgenommen. Megatrends wie die zunehmende Individualisierung, die steigende Rohstoffknappheit, die stetige Forderung nach Nachhaltigkeit und die zunehmende Globalisierung der Produktion sowie der Finanzmärkte wirken dabei als interne sowie externe Einflussfaktoren auf produzierende Unternehmen ein [Abele und Reinhart 2011] [Westkämper 2014]. Hinsichtlich dieser Randbedingungen operieren heutige Unternehmen in einem turbulenten Umfeld. Dieses wirkt sich direkt auf die Produktion und damit auf deren Wettbewerbsfähigkeit aus [Wiendahl 2005] [Westkämper und Zahn 2009] [Westkämper 2008b] [Koren 2010]. Um in diesem Umfeld eine langfristige und nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit aufrechterhalten zu können, erfordert es eine permanente Anpassung der Produktion sowie der Unternehmensstrukturen. Permanente Anpassungen führen jedoch zwangsläufig zu einem erhöhten Planungsaufwand und einer steigenden Anzahl von Umrüstungen, die sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit der Unternehmen auswirken können [Wiendahl 2004]. Langfristig werden lediglich die Unternehmen bestehen bleiben, die diesen Herausforderungen ohne größere Mobilisierung von Aufwänden – zeitlich und finanziell – begegnen. Daher gilt es, das Agieren und Reagieren in Unternehmen mit geeigneten Methoden so zu unterstützen, dass nachhaltig, effizient und wirtschaftlich eine permanente Anpassung der Produktion auf externe sowie interne Turbulenzen möglich ist [Westkämper 2009a].

## 1.1 Ausgangssituation

Das turbulente Umfeld produzierender Unternehmen wirkt sich direkt durch externe und interne Einflüsse auf die Fabriken und deren Strukturen aus. Der stärkere Wunsch der Kunden nach individuellen und innovativen Produkten, die gleichzeitig über den gesamten Lebenslauf einen ökologischen Fußabdruck aufweisen sollen [Abele und Reinhart 2011] [Schaltegger et al. 2012], zeichnet seit Jahren ein Bild von sich verkürzenden Produktlebenszyklen und einer steigenden Anzahl an Produktvarianten [Gausemeier und Wiendahl 2011]. Zur stärkeren Differenzierung gegenüber der Konkurrenz werden vermehrt Hochleistungswerkstoffe in den Produkten verwendet, was sich häufig in einer steigenden Varianz der Produkte ausdrückt. Die Entwicklung höherer Varianz in den Produktportfolios ist zudem marktseitig zu erkennen, da im Auftragseingang der Unternehmen höherer Volumenschwankungen mit der Tendenz zu kleineren Stückzahlen zu verzeichnen sind [Schuh et al. 2008] [VDMA 2013]. Zudem wirkt auf Unternehmen im produzierenden Umfeld,



durch eine zunehmende globale Produktion, ein stärkerer Kostendruck, da ganze Erzeugnisse bzw. Produktgruppen in Billiglohnländern sowie Schwellenländern (BRIC-Staaten) kostengünstig gefertigt werden [Westkämper 2014]. Das zu verzeichnende Umfeld zwingt Unternehmen permanent am wirtschaftlichen Optimum zu operieren, um eine langfristige Wettbewerbsfähigkeit aufrechterhalten zu können. Die Konsequenz aus diesen Entwicklungen ist eine stetige Integration von innovativen Technologien in die Fabrikssysteme [Müller 2013]. Gleichzeitig wird diesen Entwicklungen mit einer verstärkten Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) entlang des gesamten Produktionslebenszyklus begegnet, um den Informationsfluss effizient gestalten und den gestiegenen Bedarf an Wissen decken zu können [FIR e. V. 2013]. Neben den markt- und kunden-seitigen Einflüssen stehen Unternehmen zudem Einflüssen aus der öffentlichen Hand in Form von Gesetzen, Normen und Richtlinien gegenüber. Zwar werden Unternehmen schon immer von diesem Umfeld beeinflusst, jedoch ist die Varietät und Anzahl dieser Einflüsse, die sich direkt auf die Produktion auswirken, gestiegen [Eurostat 2012].

Am stärksten ist jedoch der Bereich der Montage davon betroffen, da dieser den letzten Schritt der Wertschöpfungskette darstellt und produkt- sowie technologieseitige Änderungen eine stetige Anpassung der Strukturen erfordern [Abele und Reinhart 2011]. Die daraus resultierende Notwendigkeit zur permanenten Aktion und Reaktion – innerhalb des Montagesystems – lässt Strukturen entstehen, die schwer nachvollziehbar sind, nicht immer ordnungsgemäß dokumentiert und teilweise zu sogenannten „gewachsenen“ Strukturen mutieren. Dies erschwert wiederum folgende Anpassungen und Optimierungen [Kühn 2006] [Erlach 2010]. In der Literatur wird dieses Phänomen mit der Zunahme der Komplexität und Varianz in der Montage mit all den Elementen und Relationen beschrieben [Westkämper 2008b]. Um dieser Entwicklung zu begegnen, nutzen heutige Unternehmen unterschiedliche Strategien. Zum einen werden Standardisierungsstrategien angewandt, die eine weitgehende Standardisierung der Produktkomponenten, Prozesse und Ressourcen verfolgt [Nyhuis et al. 2011]. Zum anderen werden Flexibilisierungs- und Wandlungsfähigkeitsstrategien verfolgt, die eine Reaktion außerhalb systemimmanenter Grenzen auf externe und interne Turbulenzen ermöglicht und somit der Veränderungsgeschwindigkeit und der Innovationsdynamik begegnet [Wiendahl et al. 2009].

## **1.2 Problemstellung**

Die skizzierte Ausgangssituation zeigt, dass auf die Montage produzierender Unternehmen ein massiver, kurzfristig sowie langfristig geprägter Anpassungsdruck einwirkt. Besonders hinsichtlich der

Herausforderung eine hohe Produktivität, unter dem Einfluss von kundenspezifischen Produktvarianten, variierenden Auftragszusammensetzungen sowie technologischen Innovationen, zu gewährleisten, sind permanente Anpassungen der Montagestruktur nicht länger optional, sondern vielmehr ein entscheidender Wettbewerbsvorteil, um im turbulenten Umfeld adäquat operieren zu können [Westkämper 2007] [Abele und Reinhart 2011]. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung macht dies in der Publikation IKT2020 deutlich. Dabei wurden die Themenbereiche Erhöhung der Anpassungsfähigkeit, Steigerung der Produktivität, Beherrschbarkeit der Komplexität und Nutzung von leistungsfähiger Technologie adressieren [BMBF 2007]. Das BDI beschäftigt sich ebenfalls mit diesem Themengebiet und hat 32 Thesen zur Produktion der Zukunft postuliert, von denen fast die Hälfte die intelligente Produktion betreffen (Abbildung 1.1).

BDI Thesen zur Forschung für die intelligente Produktion	
1. Die Produktion ist der wichtigste Sektor der deutschen Volkswirtschaft	5. Ausrichtung auf die Zukunft
2. Die Produktion braucht ein Gesamtreformkonzept zur Standortpflege	6. Nur der Wandel ist konstant: Die Anpassungsfähigkeit erhöhen
3. Ein hohes Wohlstandsniveau erfordert Spitzenleistung in der Produktion	7. Arbeiten im Netzwerk
4. Die Ausgaben für die Produktionsforschung müssen gesteigert werden	8. Der richtige Umgang mit Komplexität
	9. Life Cycle Orientierung
	10. Digitale Produkte: Grenzen überwinden
	11. Chancen durch Produzieren mit hohen Standards
	12. Chancen durch Produzieren mit neuen Anwendungen – Digitale Produktion
	13. Höchstleistungstechnologie
	14. Humans und Robotics: Flexible Automation

Abbildung 1.1: Thesen zur Produktion der Zukunft [BDI 2005]

Die damit verbundene Forderung nach Ansätzen und Methoden, die die Anpassungsfähigkeit von Montagesystemen in der variantenreichen Serienfertigung erhöhen, wurde schon seit Langem von der Wissenschaft erkannt und konsequent unter anderem von WIENDAHL, WESTKÄMPER, ZAHN, ELMARAGHY, KOREN, SCHENK UND NYHUIS verfolgt. Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten waren Konzepte zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit der Montagesystemstruktur, die durch Mobilitätsstrategien, Funktionsintegration, Modularisierung und die Einführung der schlanken Produktion sowie der verstärkten Nutzung von IKT erreicht werden können [Lotter und Wiendahl 2006] [El-Maraghy 2009] [Westkämper und Zahn 2009] [Koren 2010] [Nyhuis et al. 2011] [Schenk et al. 2010].

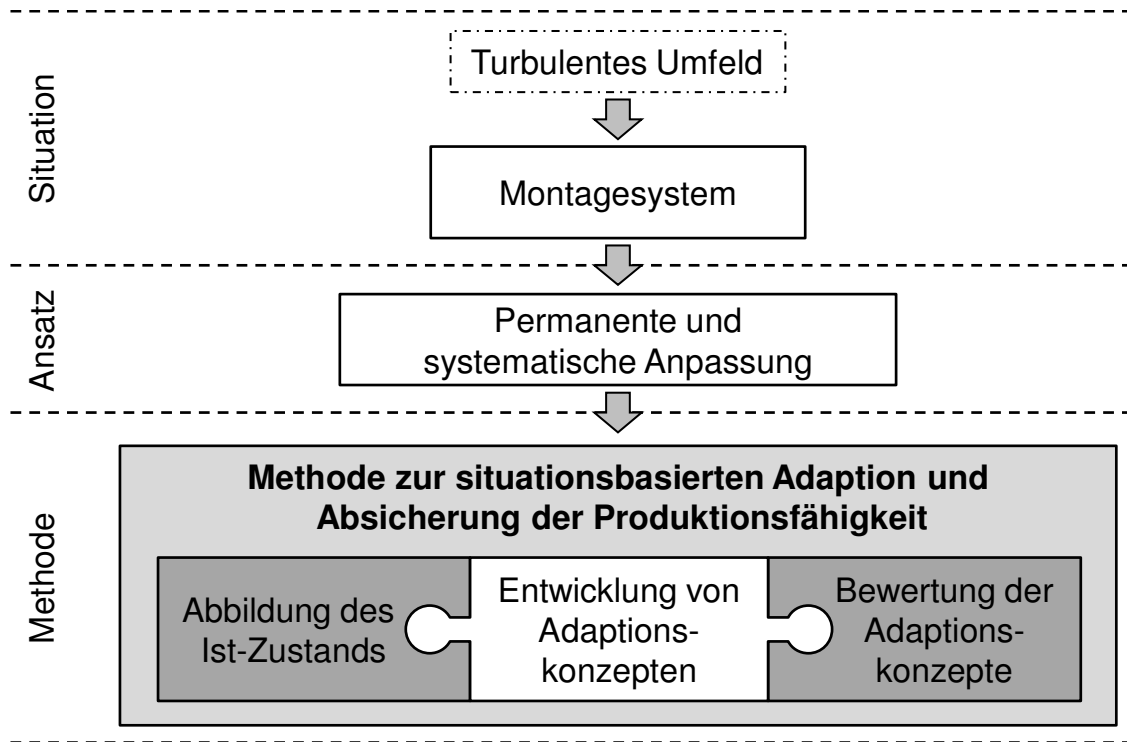
Diese Ansätze setzen den Fokus jedoch weitgehend auf die mittel- bis langfristige Steigerung der Wandlungsfähigkeit durch strukturelle Veränderung, die das Potenzial für zukünftige Anpassungsmöglichkeiten erhöhen. Eine kurzfristige und permanente Reaktion auf interne sowie externe Turbulenzen – vom Markt oder Kunden – stellt für Unternehmen immer noch eine große Herausforderung dar [Westkämper 2014]. Diese reagieren mit großen zeitlichen und finanziellen Anstrengungen auf Einflussfaktoren aus dem turbulenten Umfeld und entwickeln Lösungen, deren Umsetzung meist große Zeitspannen in Anspruch nehmen. Nicht selten sind diese mit dem Stillstand der Produktion verbunden und lassen nur die Hoffnung offen, dass die gefundene Lösung, die erwartete Wirkung und Produktivitätssteigerung entfalten werden [Hernández 2003]. Dies impliziert, dass die Produktionsfähigkeit eines Montagesystems nach einer Anpassung nicht immer gewährleistet ist, was wiederum zu weiteren Zeitverzögerungen und Produktivitätseinbußen führt. Die heutigen Entwicklungen führen somit zwangsläufig zu einer komplexeren Struktur der Montage und zunehmend historisch gewachsenen Strukturen.

Es wird daher die Steigerung der kurzfristigen Reaktionsfähigkeit hinsichtlich des turbulenten Umfelds benötigt [Löffler 2011] [Westkämper 2011] [Müller 2013], sodass eine systematische und kurzfristige Anpassungsfähigkeit der Montage bezüglich der Vielzahl an permanent einwirkenden Turbulenzen ermöglicht wird [Löffler 2011] [Westkämper 2014]. Bislang fehlt jedoch eine Methode, mit der eine kurzfristige Anpassung der Montage systematisch und permanent erreicht und eine Absicherung der Produktionsfähigkeit durchgeführt werden können.

### **1.3 Zielsetzung und Aufgabenstellung**

Ausgehend von den in der Problemstellung geschilderten Herausforderungen ist das übergeordnete Ziel dieser Arbeit, produzierende Unternehmen zu einer kurzfristigen Anpassung von variantenreichen Montagesystemen im turbulenten Umfeld zu befähigen und damit einen konkreten Beitrag zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit zu liefern. Um dies erreichen zu können ist das operative Ziel dieser Arbeit eine Methode zur situationsbasierten Adaption für variantenreiche Montagesysteme zu entwickeln. Dafür sind folgende Aufgaben zu erfüllen. **(1)** Die Methode muss eine umfassende, aber effiziente, Aufnahme des aktuellen Ist-Zustands des Montagesystems unterstützen, die die Ausgangsbasis für situationsbasierte Adaptionen darstellt. **(2)** In einem weiteren Schritt muss ein Vorgehen zur Identifikation vorherrschender Abweichungen, die die Struktur und die Organisation des Montagesystems direkt betreffen, erarbeitet werden. Diese stellen Einflussgrößen und Randbedingungen dar, die den wirtschaftlichen Betrieb des Montagesystems beeinflussen. **(3)** Um diesen

effizient entgegenwirken zu können, müssen darauffolgend Handlungsspielräume, die einen kurzfristigen Umsetzungszeitraum aufweisen, abgeleitet werden, mit denen Adaptionskonzepte entwickelt werden können. (4) Anschließend muss eine Vorgehensweise konzipiert werden, mit der die quantitative und optional qualitative Bewertung der erstellten Adaptionskonzepte durchgeführt werden kann (Abbildung 1.2).



**Abbildung 1.2:** Ansatz und Methode zur kurzfristigen Reaktion auf das turbulente Umfeld von Montagesystemen

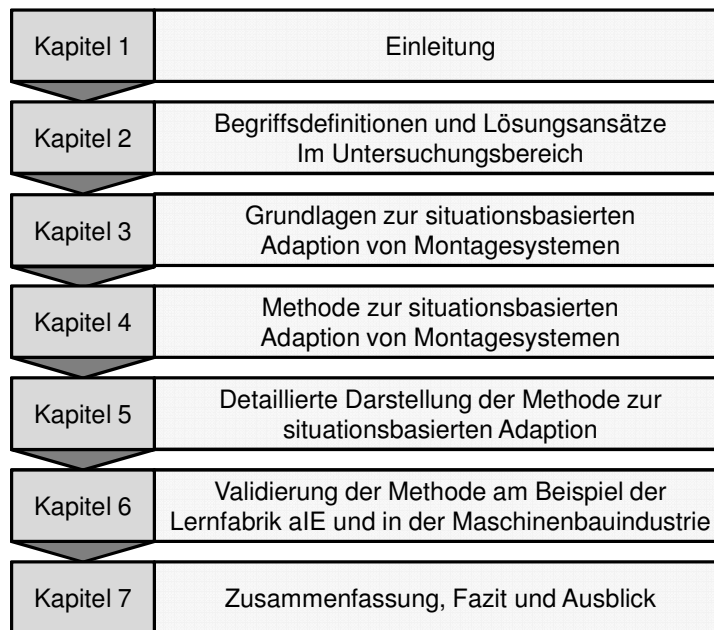
Neben der Entwicklung und Bewertung der Adaptionskonzepte muss ein Verfahren zur Absicherung der Produktionsfähigkeit der erstellten Adaptionskonzepte entwickelt werden, um weiterhin eine wirtschaftliche Produktion gewährleisten zu können.

Zur Aufnahme des Ist-Zustands, der Integration der Eingangsgrößen und der Erstellung von Adaptionskonzepten sowie der Absicherung der Produktionsfähigkeit ist ein EDV-Werkzeug zu konzipieren und umzusetzen, das eine effiziente Durchführung der situationsbasierten Adaption ermöglicht und unterstützt.

Die Grundlagen der Methode werden anhand der Lernfabrik „advanced Industrial Engineering“ validiert. Darauf aufbauend wird die gesamte Methode an einem praktischen Beispiel der Maschinenbaubranche durchgeführt und validiert.

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel, in denen die Schritte zur Ziel- und Aufgabenerreichung ausführlich beschrieben sind. In Kapitel 1 wird die Ausgangssituation heutiger Unternehmen dargestellt, die als Basis für die Erläuterung der Problemstellung dient. Aufbauend darauf wird die Ziel- und Aufgabenstellung dieser Arbeit beschrieben.



**Abbildung 1.3:** Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit

In Kapitel 2 werden die grundlegenden Begrifflichkeiten, die zum Verständnis der Arbeit erforderlich sind, erörtert und eine Übersicht des Betrachtungsrahmens gegeben, in dem der Gültigkeitsbereich der entwickelten Methode skizziert wird. Zudem wird der Stand der Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Ansätze und Methoden heutiger Montageplanung und -optimierung untersucht, um mit den erkannten Defiziten die Relevanz der vorliegenden Arbeit zu unterstreichen. Darauf folgend werden in Kapitel 3 Grundlagen, die für eine situationsbasierte Adaption von variantenreichen Montagesystemen erforderlich sind, veranschaulicht und Anforderungen an die Methode abgeleitet. Anschließend erfolgt in Kapitel 4 die Konzeption der Methode auf Basis der identifizierten Defizite und Anforderungen. Kapitel 5 beschreibt die Methode im Detail. Dabei werden die einzelnen Schritte und die Vorgehensweise zusammenhängend diskutiert. Die Methode zur situationsbasierten Adaption wird in Kapitel 6 anhand der Lernfabrik „advanced Industrial Engineering“ validiert und durch ein praktisches Beispiels in der Maschinenbauindustrie validiert. In Kapitel 7 erfolgt die Zusammenfassung der Ergebnisse, wird ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen gegeben.

## **2 Begriffsdefinition und Stand der Wissenschaft und Technik im Untersuchungsbereich**

Hohe individualisierte Nachfrage von Kunden sowie politische und gesellschaftliche Veränderungstreiber bzw. Forderungen verschärfen den Wettbewerb und erschweren die Verfolgung entscheidender Erfolgsfaktoren und somit das Unternehmensmanagement. Zuverlässige Prognosen und darauf basierende kurz- bis mittelfristige Anpassungen der Produktionssysteme sind zu einem schwierigen Unterfangen geworden, da vertraute Erfolgsfaktoren zunehmend an Bedeutung verlieren. Unternehmen, die sich in diesem Umfeld befinden, planen Aufträge und Ressourcen ohne genaue Kenntnis der aktuellen Situation des Montagesystems, um vermeintlich termintreu zu liefern [Westkämper 2001] [Spath et al. 2002]. Dies führt zu weiteren Turbulenzen innerhalb der Wertschöpfungskette, in Form von Störungen, Auftragsänderung und Kapazitätsbedarfsschwankungen [Wiendahl 2002a].

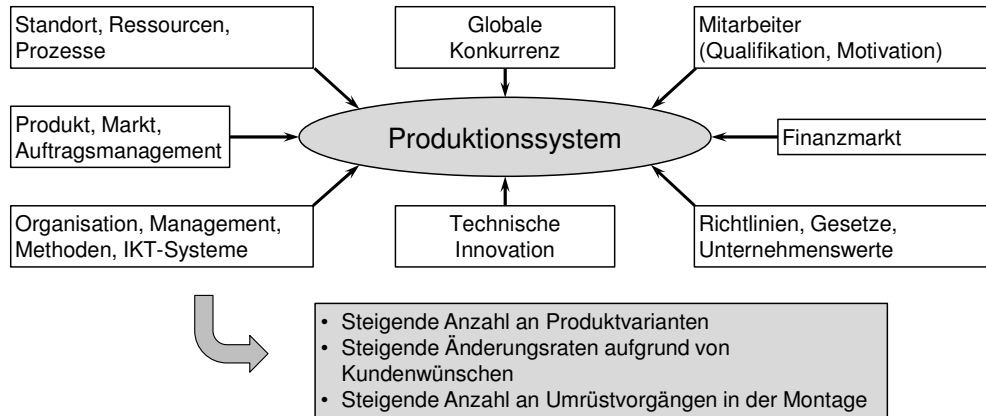
In diesem Kapitel werden die begrifflichen Grundlagen erläutert und der Betrachtungsrahmen dargestellt, in dem die zu entwickelnde Methode ihre Gültigkeit besitzt. Zudem wird auf den Stand der Wissenschaft und Technik in Form von heutigen Ansätzen und Verfahren zur Planung und Anpassung von Montagesystemen eingegangen. Dies bildet die Ausgangslage und zeigt den Handlungsbedarf auf – in Form von abgeleiteten Defiziten – eine Methode zu entwickeln, die eine situationsbezogene Adaption von Montagesystemen in der variantenreichen Serienfertigung auf einwirkende Abweichungen ermöglicht und die die anschließende Produktionsfähigkeit sicherstellt.

### **2.1 Neue Leitbilder für Produktionsunternehmen**

Aus den Ausführungen der Einleitung wird deutlich, dass eine effiziente und reaktionsschnelle Anpassung der Fabrikstrukturen, besonders hinsichtlich der aktuellen Montagesysteme, mehr als notwendig ist. Dies zu ermöglichen, stellt jedoch keine triviale Aufgabe dar, da inner- sowie außerbetriebliche Einflussfaktoren permanent auf die Unternehmen einwirken (Abbildung 2.1). Diese markt- und kundenseitigen Anforderungen lassen hauptsächlich drei relevante Leitbilder erkennen, die die Anforderungen an die zu verwendenden Betriebsmittel, Anlagen und Organisationskonzepte verändern. Diese lassen sich durch

- die zunehmende Individualisierung und den Anstieg der Produktvarianten,
- die steigende Änderungsraten in der Auftragszusammensetzung sowie
- die steigende Anzahl von Rüstvorgängen und technischen Änderungen

beschreiben [Wiendahl 2002a] [Wiendahl 2004] [Müller 2013]. Im Folgenden werden diese kurz dargestellt, um das Umfeld in dem sich heutige Produktionsunternehmen befinden, charakterisieren zu können.



**Abbildung 2.1:** Turbulentes Umfeld von Unternehmen in Anlehnung an [Westkämper und Zahn 2009]

Der Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt hat die Anforderungen an heutige Produktionsunternehmen stark verändert. Die vom Kunden erwünschte Vielfalt hinsichtlich der Produkte sowie die Forderung nach nachhaltigen Produktstrukturen wirken sich auf moderne Produktionssysteme aus. Eine Folge aus dieser Entwicklung ist der Anstieg der Produktvarianten bei immer kürzeren Lebenszyklen. Diese Entwicklung führt zu einer höheren Komplexität von Produkten, die in der Produktion abgebildet werden müssen [Schuh 2005] [Jovane et al. 2009]. Die Beherrschung der steigenden Varianz von Produkten respektive Produktionssystemen beschreibt eines von drei Leitbildern, die von heutigen Unternehmen adressiert werden müssen. Organisatorisch stellt die steigende Varianz Unternehmen vor eine weitere Konsequenz: Volumenschwankungen mit einer Tendenz zu niedrigeren Stückzahlen und einer höheren Variantenschwankung in der täglichen Auftragszusammensetzung. Dies stellt Unternehmen vor einem erhöhten Koordinationsaufwand in der Produktion [Wiendahl 2002a] [Wiendahl 2004]. Die zwingende Konsequenz aus den zwei genannten Leitbildern ist die technologische Anpassung der Produktion. Bedingt durch die sinkenden Stückzahlen und die variierende Auftragszusammensetzung steigen die Anzahl von Rüstvorgängen sowie die Häufigkeit von Technologieintegrationen [Wiendahl 2004] [Westkämper 2009a]. Die Beherrschung der steigenden Anzahl von Rüstvorgängen und technischen Änderungen ist ein weiteres Leitbild, welches das heutige Umfeld von Unternehmen charakterisiert. Durch die Abhängigkeit und die gegenseitige Beeinflussung der Leitbilder muss diesen mit geeigneten ganzheitlichen Methoden begegnet werden, um jederzeit einen wirtschaftlichen Betrieb von Montagesystemen gewährleisten zu können.

## 2.2 Abgrenzung der Arten der Anpassungsfähigkeit

Die Verfolgung einer Flexibilitäts- und Wandlungsfähigkeitsstrategie eröffnet Unternehmen große Vorteile in einem kunden- und marktorientierten Umfeld. Somit sind diese Unternehmen in der Lage auf extern und intern wirkende Einflüsse adäquat zu reagieren und ihre Strukturen dynamisch anzupassen. Eine kurzfristige Adaptionsfähigkeit ist in Unternehmen jedoch nur beschränkt vorhanden [Westkämper 2007]. Die wissenschaftliche Literatur diskutiert und definiert die Begrifflichkeiten der Änderungsfähigkeit unterschiedlich. In diesem Abschnitt werden die Charakteristika der Begriffe Flexibilität, Wandlungsfähigkeit, Adaptionsfähigkeit und Produktionsfähigkeit erläutert und eine Abgrenzung, die in dieser Arbeit Gültigkeit besitzt, vorgenommen.

### 2.2.1 Flexibilität

Der Begriff der Flexibilität wird in der Literatur vielfältig diskutiert [Hernández 2003] [Kaluza und Behrens 2005] [Wiendahl et al. 2009]. Im Umfeld der Produktion werden hauptsächlich Ansätze zur technischen und organisatorischen Flexibilisierung entwickelt, die serviceorientierte Betreibermodelle, hoch qualifiziertes, einsatzortunspezifisches Personal oder eine Erhöhung der Mobilität von Fabrikstrukturen – Maschinen, Anlagen, Transportsysteme – verfolgen. Für eine optimale Umsetzung dieser Ansätze müssen flexible Planungsmethoden entwickelt werden, die einen Zusammenhang zwischen der Organisation eines Unternehmens und der physischen Produktion herstellen, um Flexibilität systemimmanent in der Planung von Unternehmensstrukturen berücksichtigen zu können [Kaluza und Behrens 2005]. Eine umfassende Erläuterung vorhandener Definitionen und Ansätzen zur Planung flexibler Produktionsstrukturen, hinsichtlich der Erhöhung der Flexibilität, würde über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen. Daher wird in diesem Zusammenhang auf einschlägige Literatur verwiesen, die sich mit den genannten Themengebieten auseinandersetzen [Sethi und Sethi 1990] [Toni und Tonchia 1998] [Narain et al. 2000] [Hillmer 1987] [Wolf 1989] [Grunwald 2002].

Trotz des in der Literatur viel diskutierten Themenfelds, gibt es kein einheitliches Verständnis über den Begriff Flexibilität [Hernández 2003] [Nachtwey et al. 2009]. Gemein haben diese Definitionen jedoch, dass der Flexibilität eine statische Komponente zugesprochen wird, die innerhalb eines vorher definierten Handlungsspielraums hinsichtlich Qualität, Kosten und Zeit greift [Reinhart et al. 1999] [Westkämper et al. 2000b] [Nyhuis 2008ab] [Wiendahl 2010]. Dabei wird jedoch nicht die Veränderung der Elemente oder der Struktur innerhalb einer Fabrik eingeschlossen [Schmigalla 1995] [Wiendahl 2005]. Der Begriff der Flexibilität besitzt somit eine passive und eingeplante

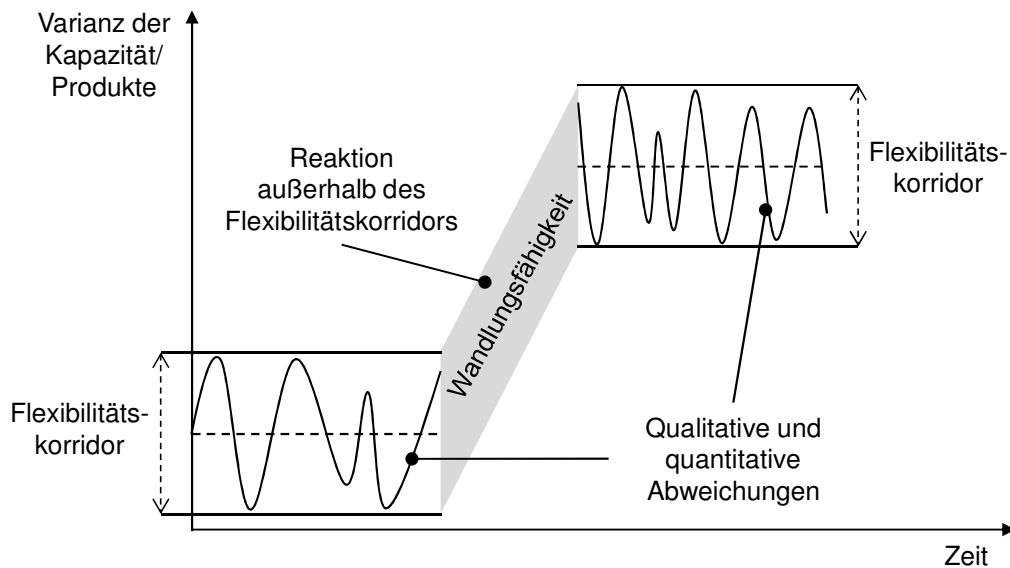


Komponente, die in einem bestimmten Korridor der Produktion agiert [Westkämper et al. 2000b]. Mit Hilfe der implementierten Flexibilität, wird eine erhöhte Änderungsgeschwindigkeit erreicht, die wiederum die Wirtschaftlichkeit der Produktion positiv beeinflusst. In dieser Arbeit wird der Definition von WESTKÄMPER gefolgt:

*„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. 2000b]

### **2.2.2 Wandlungsfähigkeit**

Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Handlungsspielraum nicht ausreichend für eine adäquate Reaktion auf die sprunghaften externen und internen Turbulenzen ist [Wiendahl und Hernández 2000], wurde ebenfalls in der Wissenschaft aufgezeigt und mit dem Konzept der Wandlungsfähigkeit ergänzt. Diese begrenzt sich nicht nur auf einem vorher geplanten, systemimmanenten Rahmen, sondern ermöglicht eine komplette Neuausrichtung der Produktion, der Tätigkeitsbereiche und der Dienstleitungen [Kaluza und Behrens 2005]. Die stärkste Verbreitung findet der Begriff der Wandlungsfähigkeit im ingenieurwissenschaftlichen Bereich, in dem technisch- und humanorientierte Ansätze der Wandlungsfähigkeit verfolgt werden. Diese Ansätze zeichnen sich durch die starke Erweiterung des Handlungsspielraums außerhalb vorher definierter Grenzen aus, die nicht mehr nur durch Technologie, sondern auch durch Kreativität der Mitarbeiter erreicht wird [Hernández 2003] [Westkämper et al. 2000b]. Das Konzept der Wandlungsfähigkeit erlaubt das Überschreiten bisheriger Flexibilitätskorridore und somit eine Anpassungsfähigkeit auf starke Umwelteinflüsse (Abbildung 2.2). In der Literatur hat der Begriff der Wandlungsfähigkeit, genau wie die Flexibilität, keine eindeutige Definition erfahren. Allerdings beinhalten vorherrschende Definitionen eine Anpassung an zuvor nicht geplante oder vorgedachte Einflüsse auf die Produktion [Hernández 2003]. Die Maßnahmen, mit denen diesen Einflüssen entgegengewirkt wird, sind jedoch unterschiedlich. REINHART gliedert das Unternehmensumfeld in unterschiedliche Turbulenzkorridore – turbulent, indifferent, sicher. Zur Bewertung des Ausmaßes der benötigten Wandlungsfähigkeit führt er den Begriff der Reaktionsfähigkeit ein. Die Summe der Flexibilitäts- und der Reaktionsfähigkeitsanforderung ergibt dann die benötigte Wandlungsfähigkeit. Dabei beschreibt die Reaktionsfähigkeit die Fähigkeiten, mit denen Turbulenzen begegnet werden kann [Reinhart et al. 1999].



**Abbildung 2.2:** Anpassung der Produktion durch das Konzept der Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Nyhuis et al. 2008]

WIRTH sieht als zentrale Maßnahme die Mobilität der Fabrikstruktur und deren Elemente [Wirth et al. 2000]. EVERSHEIM dagegen sieht die Lösung in mobilen Fabrikmodulen, die standortübergreifend verlagerungsfähig sind [Eversheim und Neuhausen 2001] [Eversheim et al. 2002]. WIENDAHL, der das Thema der Wandlungsfähigkeit bedeutend mitgeprägt hat [Wiendahl 2002b] [Wiendahl 2005] [Wiendahl et al. 2009] [Wiendahl 2010], greift die Definition von WESTKÄMPER auf [Wiendahl 2002a]. Diese bezieht sich auf das sozio-technische System in seiner Gesamtheit [Westkämper und Zahn 2009] und umfasst auch die Mitarbeiter, neben technologischen Komponenten, als essenziellen Faktor. Aus diesem Grund wird die Definition von WESTKÄMPER der Arbeit zugrunde gelegt. Wandlungsfähigkeit ist somit wie folgt definiert:

*„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 Umfeldveränderungen hinwirken.“* [Westkämper et al. 2000b]

### 2.2.3 Adaptionfähigkeit

Der Begriff der Adaptionfähigkeit im Produktionsumfeld hängt eng mit der Wandlungsfähigkeit von Fabrikstrukturen zusammen. Adaptionfähigkeit bedingt sowohl wandlungsfähige als auch transparente Strukturen und Prozessketten sowie eine gewisse Modularität und Mobilität der Ferti-

gungsanlagen [Wiendahl 2005]. Auch WESTKÄMPER und ZAHN erläutern den Begriff der Adaptionsfähigkeit innerhalb einer wandlungsfähigen Produktion. Dabei wird aufgezeigt, dass eine nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit nur durch zeitlich kurzfristige Adaptionen sichergestellt werden kann, die durch strategische Beweglichkeit (Geschwindigkeit), Wirtschaftlichkeit, Modularität von Maschinen und Anlagen sowie flexiblen Ressourcen ermöglicht wird [Westkämper und Zahn 2009]. Zudem hat sich SCHEER den Begriff der Adaptionsfähigkeit angenommen und beschreibt diesen als wichtigen Erfolgsfaktor für Unternehmen, mit dem schnell (zeitlich) auf externe sowie interne Turbulenzen durch Prozessanpassungen reagiert werden kann [Scheer et al. 2006]. Neben der Anwendung auf das Umfeld der Produktion wird der Begriff der Adaptionsfähigkeit auf Produktionsnetzwerkebene [BDI 2005] [Westkämper 2009a], im Umfeld der Strategieausrichtung [Schuh 1996] [Frese 1999] und der Nachhaltigkeit [Bauer 2008] verwendet.

Die Definitionen der Adaptionsfähigkeit unterscheiden sich zwar im jeweiligen Anwendungsbe- reich und den benötigten Voraussetzungen, jedoch beinhalten diese meist einen Bezug zu einer zeitlich schnellen bzw. raschen Reaktion auf permanent wirkende Einflüsse. Besonders WESTKÄMPER hebt diesen Aspekt hervor. Dieser definiert den Rahmen um die Adaptionsfähigkeit wie folgt.

*„Die Herausforderungen bei Änderungen an Strukturen gehen mit einem zeitlichen Problem zusammen, wenn Eigentum, Personal, Methoden oder IT verändert werden sollen. Adaption hat also eine zeitliche Komponente. Die wichtigen Faktoren bei der Ermöglichung von Adaptionsfähigkeit sind also die zeitlichen und kostenmäßigen Randbedingungen.“* [Westkämper 2009a]

Um zu einer Definition der Adaptionsfähigkeit zu gelangen, welche in dieser Arbeit Gültigkeit besitzt, muss die Adaption selbst erläutert und deren Charakteristika beschrieben werden. Unter einer Adaption kann ganz allgemein eine vorgeschlagene Lösung verstanden werden, die für ein gegebenes Problem anwendbar ist, um ein System so zu manipulieren, dass eine Verbesserung eintritt. Dies kann auch durch eine komplexe Umstrukturierung des Systems erfolgen. Der Adaptionsbegriff enthält folgende Charakteristika [Beierle und Kern-Isberner 2006]:

- das Entfernen einer alten Lösung,
- die Implementierung einer neuen Komponente in eine alte Lösung,
- den Austausch einer alten Komponente gegen eine neue Komponente oder
- die Transformation einer alten Lösung.

Auf die Produktion angewandt bedeutet dies, dass ein bestehendes System in Form von speziellen Adaptionen bzw. Verbesserungen, Substitutionen und Transformationen verändert werden kann [Kolodner 1997]. Damit ergibt sich für diese Arbeit, in Anlehnung an WESTKÄMPER und der Berücksichtigung von zeitlichen und wirtschaftlichen Randbedingungen, folgende Definition von Adaptionfähigkeit:

*„Der Begriff der Adaptionfähigkeit beschreibt die Möglichkeit einer kurzfristigen Reaktion auf permanent wirkende interne sowie externe Einflüsse auf die sozio-technischen Produktionsstruktur, denen in Form von situationsbasierten Anpassungen, Substitutionen sowie Transformationen der gesamten oder der teilweisen Produktionsstruktur begegnet wird, um eine Verbesserung zu erzielen, die zeitliche und kostenmäßige Randbedingungen einhält und somit einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglicht.“*

Der Begriff situationsbasiert wird in dieser Arbeit als eine kontextbezogene, schnelle und kurzfristige Reaktion der Produktionsstrukturen auf sich permanent wandelnde Einflüsse definiert.

Zudem soll die Abgrenzung zwischen dem klassischen Rüsten und der Adaption kurz erläutert werden. Rüsten nach REFA wird hinsichtlich der technischen Einrichtung durch *„das Vorbereiten des Arbeitssystems bzw. der Betriebsmittel für die Erfüllung der Arbeitsaufgabe sowie – falls erforderlich – das Rückversetzen in den ursprünglichen Zustand“* definiert und *„beim Menschen seine eigene Vorbereitung auf das Ausführen der Aufgabe (z. B. Auftragsunterlagen lesen)“* spezifiziert [REFA 2014].

Dies drückt aus, dass ein geplanter Umbau des Montagesystems für einen folgenden Auftrag durchgeführt wird. Eine situationsbasierte Adaption jedoch, stellt im Gegensatz dazu eine nicht im Voraus geplante Reaktion auf kurzfristige Einflussgrößen innerhalb der technischen und organisatorischen Handlungsspielräume aus. Daraus ergibt sich, dass nicht alle Vorgänge, welche bei Rüsten nach REFA durchlaufen werden durchgeführt werden müssen, sondern nur notwendige situationsbasierte Adaptionen, die eine weitere wirtschaftliche Fertigung ermöglichen.

## **2.2.4 Produktionsfähigkeit**

Der Begriff der Produktionsfähigkeit ist im Bereich der Digitalen Fabrik hinsichtlich der virtuellen Absicherung weit verbreitet. Hier wird überprüft, ob das geplante Konzept umsetzungsfähig ist und den geplanten Leistungsbedarf in Form von Ausführbarkeit und Kapazitätsanforderungen gerecht wird. Mit Hilfe digitaler Systeme werden Modelle erstellt und durch entsprechende Simulationen

Fehler aufgedeckt, die erst bei der Inbetriebnahme auftreten würden [Westkämper und Zahn 2009]. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

Durch diese Vorgehensweise kann eine vorgeschaltete Fehlerbehebung erreicht werden. Die virtuelle Absicherung der Konzeptplanung bedeutet im Vorfeld zwar einen zusätzlichen Aufwand, da ein digitales Modell erstellt und Simulationsläufe durchgeführt werden müssen, jedoch ist ersichtlich, dass während der Produktion weniger Aufwand für die spätere Bereinigung von Fehlplanungen und somit weniger Anpassungen des Systems durchgeführt werden müssen.

Auf den Bereich der Montagesystemadaption angewandt, bedeutet dies, das konzeptionelle Adaptionvorhaben vor der Umsetzung auf deren nachfolgende Produktionsfähigkeit überprüft werden müssen, um zeitweise Stillstände oder Rückabwicklungen von Montagesystemen nach einer durchgeführten Adaptionen zu verhindern und somit wirtschaftlichen Einbußen entgegenzuwirken.

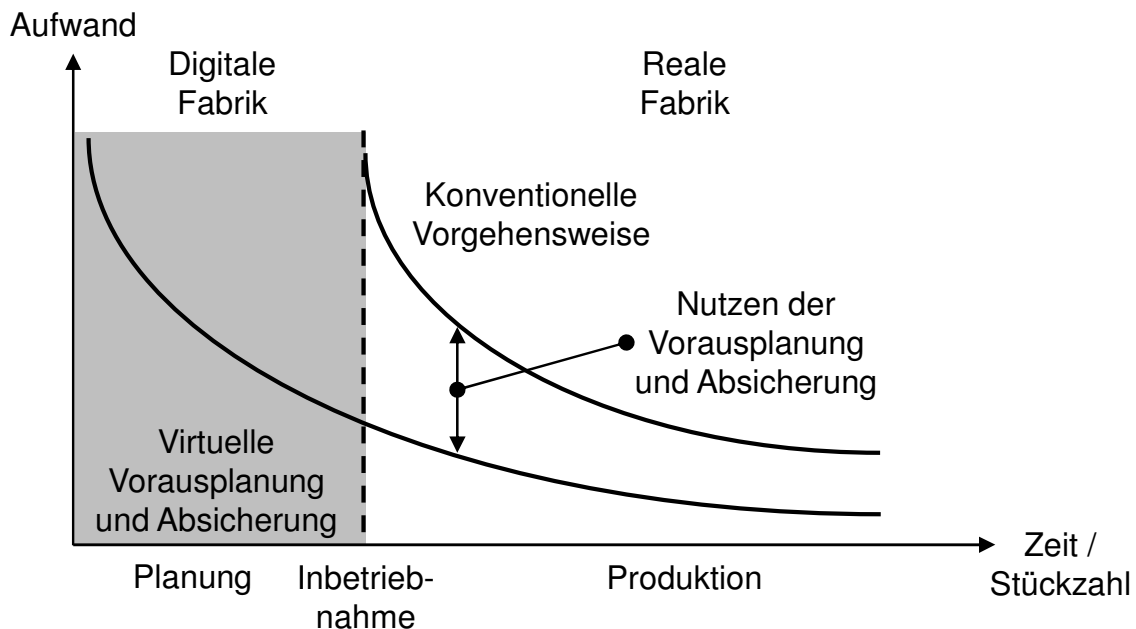


Abbildung 2.3: Nutzen und Aufwand der virtuellen Absicherung in Anlehnung an [Westkämper 2008a]

## 2.3 Montagesysteme in der variantenreichen Serienproduktion

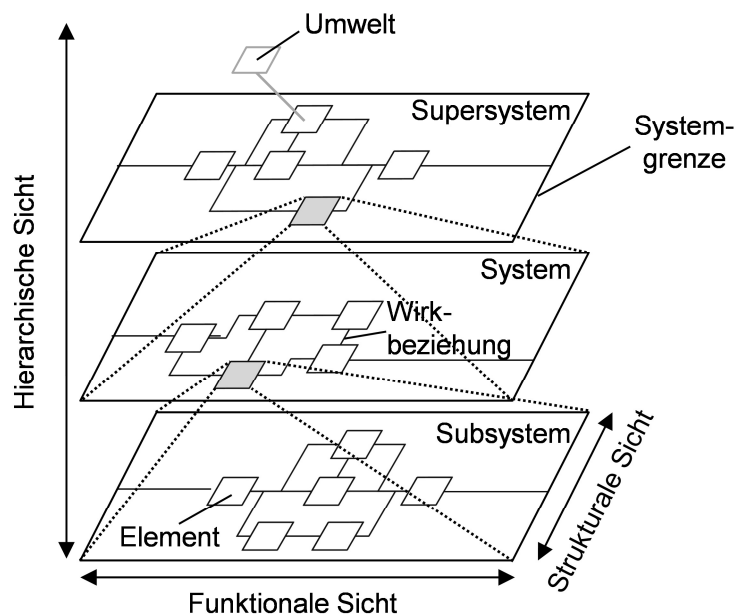
Zur Förderung eines einheitlichen Verständnisses von Montagesystemen wird in diesem Abschnitt der Arbeit eine systemtheoretische Einordnung der Montage in das Fabrikumfeld vorgenommen. Zudem wird darauf eingegangen, wie heutige Montagesysteme der variantenreichen Serienfertigung in den komplexen Unternehmensstrukturen operieren und welche Aufgaben und Ziele diese verfolgen. Abschließend werden Anforderungen heutiger Montagesysteme identifiziert, um diese im Verlauf der Arbeit aufgreifen und berücksichtigen zu können.

### 2.3.1 Struktur von Montagesystemen

Montagesysteme sind durch eine Vielzahl von Elementen und komplexen Wirkbeziehungen gekennzeichnet, die eine strukturierte Beschreibung und eine gezielte Untersuchung erschweren. Elemente stellen darin jegliche Art von Fabrikobjekte dar, die durch Wirkbeziehungen in Form von Einflüssen, Relationen, Restriktionen oder Interaktionen, über verschiedene Organisationseinheiten hinweg, miteinander verbunden sind. In diesem Kontext kann ein Montagesystem als komplex und hierarchisch strukturiert beschrieben werden. Das erschwert eine situationsbezogene Adaption, da technische bzw. organisatorische Anpassungen an einem Einzelnen oder einer Gruppe von Elementen, nicht bedachte Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben können [Westkämper und Zahn 2009]. Zur Analyse und Untersuchung von komplexen Systemen im Produktionsumfeld stellt die Systemtheorie einen bewährten Ansatz dar [Hernández 2003]. Sie bietet einen allgemeingültigen Gestaltungs- und Betrachtungsrahmen zur Beschreibung und Lösung von komplexen Problemen auf einer abstrakten Ebene, unter dem Einsatz von einheitlichen Werkzeugen und Begriffen. Sie findet ihren Ursprung in der allgemeinen Systemtheorie, welche in den 30er Jahren von Ludwig von Bertalanffy – einen Biologen und Systemtheoretiker – entwickelt wurde. Die allgemeine Systemtheorie ist so formuliert, dass diese fachübergreifend, beispielsweise in den Sozial- und Geisteswissenschaften, in der Physik, der Philosophie sowie den Wirtschaftswissenschaften anwendbar ist [Ropohl 2009]. Zudem fand die Systemtheorie Einzug in das Umfeld der Produktion, da dieses ebenfalls komplexe und hierarchische Charakteristika aufweist [Westkämper und Zahn 2009]. Ein System wird innerhalb der Systemtheorie durch eine dreiteilige Sicht definiert. Die funktionale Sicht beschreibt Elemente eines Systems mit dem Black-Box Ansatz. Dabei werden nur die Eingangsgrößen, die Ausgangsgrößen und der Zustand eines Elementes betrachtet [Schenk et al. 2010]. Dies ermöglicht es, die ausführende – funktionale – Komponente eines Elementes zu beschreiben. Die strukturelle Sicht beschreibt Elemente und deren Wirkbeziehungen. Somit kann das Verhalten eines Systems in seiner Gesamtheit nachvollzogen werden. Diese Ansicht zeigt auf, dass die Gesamtheit der Eigenschaften mehr ist, als die Summe aller einzelnen Elemente und deren Eigenschaften. Die hierarchische und damit dritte Sicht beschreibt den Aufbau eines Systems durch Sub- und Supersysteme [Ropohl 2009].

Daher lässt sich folgende Aussage für komplexe Systeme treffen. Ein System besteht aus einer Vielzahl von Elementen, die durch Wirkbeziehungen miteinander verbunden sind. Die im System enthaltenen Elemente besitzen wiederum Eigenschaften und Handlungsmöglichkeiten, die zweckorientiert operieren. Wirkbeziehungen drücken sich durch Relationen, Restriktionen oder Interakti-

onen aus, die über Systemgrenzen hinaus wirken und dem gesamten System eine Struktur verschaffen. Jedes System kann durch Subsysteme beschrieben und einem Supersystem zugeordnet werden. Die Abgrenzung eines Systems erfolgt durch eine Systemgrenze hinsichtlich seiner Umwelt (Abbildung 2.4) [Herrmann 2010] [Ropohl 2009].



**Abbildung 2.4:** Sichten der Systemtheorie in Anlehnung an [Ropohl 2009]

Angewandt auf das sozio-technische System der Montage bedeutet dies, dass Elemente beispielsweise durch Materialien, Betriebsmittel und Personal innerhalb des Unternehmens repräsentiert werden. Diese besitzen diverse Attribute und Prozesse, die wiederum unterschiedliche Verhaltensweisen der Elemente nach sich ziehen. Das System Montage ist dabei in dem Supersystem „Produktionssystem“ eingebettet, das wiederum dem Supersystem „Fabriksystem“ zugeordnet ist.

Die Elemente des Montagesystems sind durch Wirkbeziehungen verbunden, die hauptsächlich durch Material-, Medien- und Informationsflüsse repräsentiert werden (Abbildung 2.5). Die Wirkbeziehungen erstrecken sich dabei über die gesamte vertikale (hierarchische Sicht) und horizontale Struktur (funktionale Sicht) des Montagesystems [Wiendahl 2010] [Westkämper und Zahn 2009]. Wie in der Systemtheorie beschrieben weist das gesamte System somit Eigenschaften auf, die nicht in den einzelnen Elementen enthalten sind. Somit hängt die Effizienz des Montagesystems nicht nur von der Effizienz der einzelnen Elemente ab, sondern von der Vernetzung im Ganzen [Jovane et al. 2009]. Daher ist es erforderlich eine ganzheitliche Betrachtung des Montagesystems in dieser Arbeit zu verfolgen.

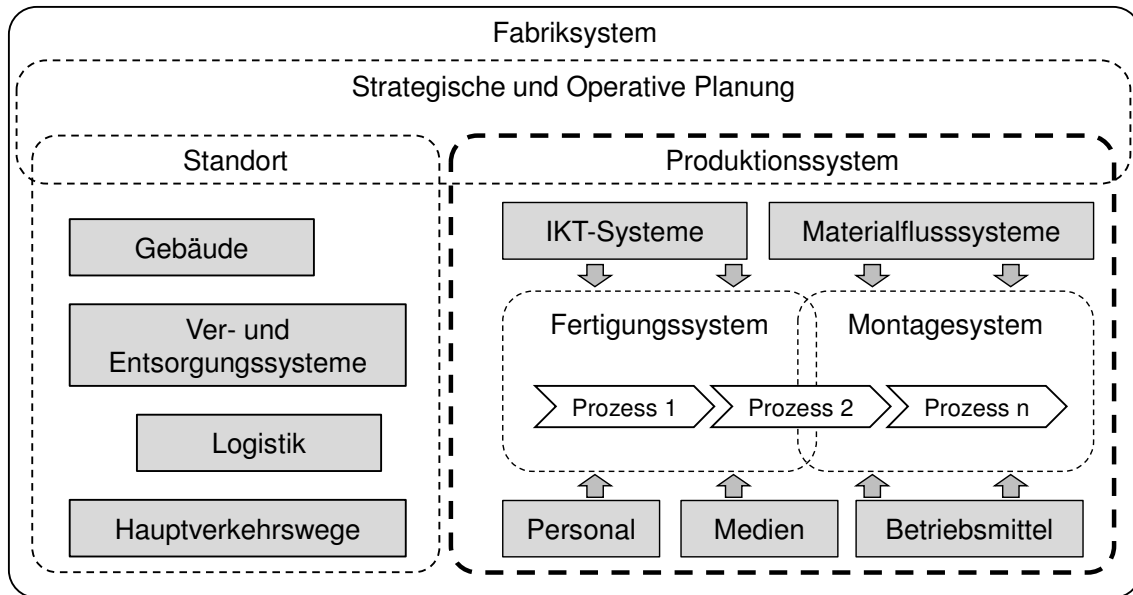


Abbildung 2.5: Abgrenzung des Systems Montage in Anlehnung an [Warnecke 1984] [Westkämper 2009b]

### 2.3.2 Das Montagesystem im Kontext der variantenreichen Produktion

Im Kontext der variantenreichen Produktion werden Montagesysteme durch zwei Sichtweisen geprägt. Die klassische Sicht auf die Montage beschreibt diese als reine Teilfunktion des Fertigen [VDI 2860 Blatt 1]. Diese Sicht blendet jedoch die komplexe Vernetzung der Montage innerhalb eines Produktionssystems und ihrer Umwelt nahezu komplett aus [Westkämper 2001]. Neben der klassischen Sicht existiert, innerhalb neuerer Ansätze, eine integrierte Sichtweise, die Montagesysteme in einem komplex vernetzten Umfeld aus internen und externen Einflüssen agieren sehen.

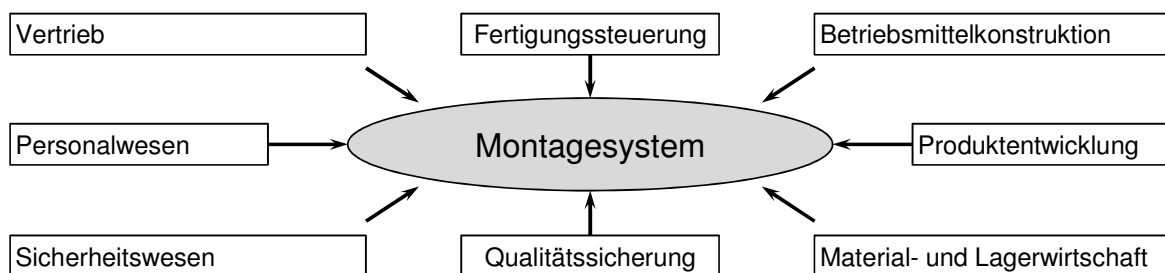


Abbildung 2.6: Einflüsse auf komplex vernetzte Montagesysteme in Anlehnung an [Westkämper 2001]

Diese weist Montagesystemen situationsbezogene, verkettete und stochastische Charakteristika zu [Weiß 2000]. Dabei setzt sich ein Montagesystem aus mehreren Materialfluss-, Informations- und Kommunikationssystemen sowie Bearbeitungssystemen, in denen spezifische Prozesse ablaufen (Produktionszellen, Arbeitsplätze und Maschinen), zusammen [Westkämper und Zahn 2009]. Neuerer Ansätze eröffnen somit einen ganzheitlichen Blick auf die Wirkzusammenhänge in einem Mon-



tagesystem und sehen das Umfeld der Montage durch diverse Einflussfaktoren beschrieben, die in Abbildung 2.6 dargestellt sind [Lotter und Wiendahl 2006].

Produktionsart	Einzelproduktion		Serienproduktion		Massenproduktion	
Fertigungsverfahren	Urformen	Umformen	Trennen	Fügen	Beschich.	Stoffeig.
Organisationsprinzip	Werkstattfertigung		Inselfertigung		Fließ/Serienfertigung	
Automatisierung	Manuell		Hybrid		voll automatisiert	
Skalen	Prozess	Maschine	Zelle	System	Segment	Standort
Produktstruktur	Einteilig		Mehrteilig		Komplexe Struktur	
Auftragsart	Einzelauftrag		Rahmenvertrag		Lager	
Kundeneinfluss	Niedrig		Mittel		Hoch	
Zulieferereinfluss	Niedrig		Mittel		Hoch	

Direkter Anwendungsbereich  
  Bedingter Anwendungsbereich  
  Nicht betrachtet

**Abbildung 2.7:** Betrachtungsrahmen der variantenreichen Serienfertigung in Anlehnung an [Westkämper 2006c]

Aufgrund der bereits erfolgten hohen Wertschöpfung an den Teilprodukten, die in der Montage aus verschiedenen Bereichen überwiegend gefügt oder „montiert“ werden, sollte die Verweilzeit dieser in der Montage minimal sein [Abels 1993]. Das verstärkt die Forderung nach einer hohen Adaptionsfähigkeit der Montage, um effektiv und effizient auf technische Änderungen aus vorgelagerten Produktionsbereichen reagieren bzw. die steigende Anzahl an Kundenwünschen hin zu höchst individuellen Produkten berücksichtigen und somit jederzeit an einem wirtschaftlichen Betriebspunkt produzieren zu können. Zusammengefasst kann der Betrachtungsrahmen dieser Arbeit damit folgendermaßen dargestellt werden.

### 2.3.3 Aufgaben und Zielsetzung von Montagesystemen

Wie bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben, unterliegt das Umfeld von Montagesystemen einem stetigen Wandel. Daraus ergeben sich spezifische Teilaufgaben, die ein Montagesystem erfüllen muss, um Umwelteinflüsse adäquat berücksichtigen zu können und somit einen wirtschaftlichen Betrieb aufrechtzuerhalten. Dazu zählen die effiziente und flexible Reaktion auf Produktvarianten und die damit einhergehende Mengeneffekte, die Integration schwankender Auftragszusammensetzungen in das Produktionsprogramm und der Einsatz modernster Technologie hinsichtlich der Anlagen sowie der IKT [Westkämper 2001] [Kletti und Schumacher 2011].

Ein Montagesystem muss solche Aufgaben unter hohen Ansprüchen hinsichtlich der Qualität, der Verfügbarkeit und des Faktors Kosten realisieren können [Lotter und Wiendahl 2006]. Die Gesamt-

aufgabe ist es also, die vorherrschenden Kundenwünsche hinsichtlich qualitativ hochwertiger Produkte zu einem adäquaten Preis in einem bestimmten Zeitrahmen zu einer beauftragten Menge zu erfüllen und die sich daraus ergebende Komplexität des Montagesystembetriebs zu beherrschen [Wiendahl 2004].

Das klassische Ziel des Bereithaltens von ausschließlicher Kapazitätsflexibilität reicht heutzutage jedoch nicht mehr aus, da hier rasch kostenbedingte Grenzen erreicht werden. Zudem sind heutige Montagekonzepte bereits so flexibel ausgelegt, dass diese einen gleichschnell dahinfließenden Auftragsstrom mengenvariabel realisieren können [Wiendahl 2002b]. Das Gesamtziel jedes Montagesystem ist somit der Betrieb bei möglichst niedrigen Fixkosten sowie bei gleichzeitigem Erzielen bedarfsorientierter Volumen und Variantenflexibilität [Wiendahl 2002a]. Unter diesem Gesichtspunkt erfahren vor allen folgende Teilziele hohe Priorität:

- *Flexibilität integrieren*: Die technische und organisatorische Anpassungsfähigkeit des Montagesystems hinsichtlich der Art und Menge zu produzierender Teile (Stückzahlflexibilität/Variantenflexibilität), um auf Bedarfsschwankungen reagieren zu können [Eversheim 2002].
- *Prozesssicherheit erhöhen*: Die Erfüllung von Verfügbarkeits- und Qualitätskriterien während des Betriebs sowie der optimale Anlauf nach Anpassungen [Wiendahl 2004].
- *Logistik und Materialbereitstellung gewährleisten*: Implementierung geeigneter Teilebereitstellung und -zuführung (Materialbereitstellung) sowie Just-in-Sequence und Just-in-time (Lieferantenanbindung) [Lotter und Wiendahl 2006].
- *Informationsfluss gewährleisten*: Bestmögliche Entscheidungen durch zeitnahe und anwendungsorientierte Bereitstellung von Informationen [Kletti und Schumacher 2011].
- *Technologische Innovationen beherrschen*: Integration modernster Technologie (Automatisierungspotenzial) zur effizienten Bearbeitung kundenindividueller Produkte und Erreichung höchster Qualitätsansprüche (Montagequalität) [Westkämper 2001].
- *Mitarbeiterqualifikation erhöhen*: Reaktionsschnelles Handeln auf externe Turbulenzen (Arbeitszeiten) bedingt fachlich vielseitig ausgebildete Mitarbeiter (Personaleinsatz) [Stock 2013].
- *Flächenausnutzung optimieren*: Optimale Ausnutzung der Flächen ermöglicht die Reduktion von Flächenkosten und technischen Investitionen [Eversheim 2002].

Die klassische Sicht der ausschließlichen Kapazitätsflexibilität bietet keine adäquate Reaktionsmöglichkeit auf die komplexen Wirkbeziehungen innerhalb und das turbulente Umfeld außerhalb von Montagesystemen. Daher wird in dieser Arbeit der komplex vernetzten Sicht auf das Montagesystem gefolgt.

### **2.3.4 Anforderungen zukünftiger Montagesysteme in Kontext der variantenreichen Serienfertigung**

Veränderungen der Produkte, der Produktionsmenge, der Technologie aber auch der wirtschaftlichen Ziele eines Unternehmens ziehen stetige Anpassungsprozesse nach sich, die von Mitarbeitern vorbereitet und durchgeführt werden müssen. Werden diese nicht effizient, effektiv und permanent vollzogen, weicht die Produktion vom wirtschaftlichen Betriebspunkt ab und verliert an Wettbewerbsfähigkeit [Westkämper 2006a]. Daraus ergeben sich Anforderungen für die Planung und Adaption zukünftiger Montagesysteme, mit denen eine kurze Reaktionszeit auf Turbulenzen sowie ein wirtschaftlicher, termin- und mengengerechter Betrieb realisiert werden kann, der zugleich zugesagte Qualitätskriterien und Preisvorstellungen erfüllt [Wiendahl 2004].

Eine zentrale Anforderung an zukünftige Montagesysteme ist damit die Beherrschung des Zieldreiecks Wirtschaftlichkeit, Termintreue und Flexibilität, das eine Detaillierung des klassischen Zieldreiecks Kosten, Qualität und Zeit darstellt [Westkämper 2001]. Die zunehmende Komplexität von Montagesystemen bedingt daher Maßnahmen, die das Potenzial zur Adaption erhöhen und Methoden, die die mitarbeiterseitige Entscheidungskompetenz erhöhen und unterstützen. Die ganzheitliche Sicht auf das System Montage sowie die vorherrschenden Einflussfaktoren ist dabei eine wesentliche Anforderung, um sich von Einzeloptimierungen in Form von Prozessanpassungen zu lösen und aufwandsarme Systemlösungen gestalten zu können [Balve 2002]. Zur effizienten Erarbeitung von aufwandsarmen Systemlösungen müssen Methoden eingesetzt werden, die zur Erstellung und Bewertung von Szenarien beitragen. Dies ermöglicht eine gezielte Entscheidung für eine Adoptionsvariante auf Basis von Kompromissen, die gesamtsystemisch die höchste Effizienz ermöglicht [Westkämper 2001]. Eine weitere Anforderung, die eine wesentliche Voraussetzung für eine adaptionsfähige Montagesystemstruktur darstellt, ist die technische Flexibilität. Diese manifestiert sich in der Steigerung der Konfigurierbarkeit von Anlagen, Maschinen und Arbeitsplätzen durch Wandlungsfähigkeitsstrategien, Modularisierungskonzepte und Schnittstellenstandardisierung [Nyhuis et al. 2008]. Durch diese kann reaktionsschnell auf Änderungen in der Auftrags- oder Produktzusammensetzung reagiert werden, bedingt jedoch eine gewisse Überdimensionierung der

technischen Elemente – Zielkonflikte –, da Module für spezifische Aufgaben vorgehalten werden müssen und daher nicht jederzeit im Einsatz sind [Wiendahl 2004].

Markt und Kunde	Produktion	Personal	Leistung und Kosten
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marktbeobachtung</li> <li>- Informationsbereitstellung</li> <li>- Strategische Kooperation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flussorientierung</li> <li>- IKT-Systeme</li> <li>- Entscheidungsunterstützung</li> <li>- Technische Flexibilität</li> <li>- Ganzheitliche Systemsicht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Teilautonome Einheiten</li> <li>- Qualifikationen</li> <li>- Anbindung an IKT-Systeme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kennzahlensysteme</li> <li>- Prozesskostenbetrachtung</li> <li>- Wirtschaftlichkeit des Betriebs</li> </ul>

**Abbildung 2.8:** Anforderungen an zukünftige Montagesystemplanung und -adaption in Teilen ergänzt durch [Feldmann et al. 2004]

Für die Beherrschung des Zieldreiecks, in dem sich Montagesysteme befinden ist zudem eine anwendungsorientierte Anbindung an die IKT-Systeme des Unternehmens nötig. Dies ermöglicht eine gezielte Versorgung der Mitarbeiter mit Informationen über die aktuelle Situation des Montagesystems und befähigt diese vorhandene Probleme zu verstehen und eigenverantwortlich zu lösen [Wiendahl 2010]. Daraus ergibt sich zudem die Anforderung Mitarbeitern den Zugang zu Qualifikationen zu ermöglichen, welche die Entscheidungskompetenzen steigern [Westkämper 2006a]. Abbildung 2.8 stellt Anforderungen an die zukünftige Montagesystemplanung und -adaption zusammenfassend dar.

Um den erläuterten Anforderungen effektiv begegnen zu können, werden Montagesysteme mit adäquaten Arbeitsorganisationen benötigt, die sich in kürzester Zeit durch eine systemimmanente Fähigkeit zur Selbstorganisation – Planungs- und Entscheidungskompetenz – adaptieren lassen und somit reaktionsschnell auf kunden- und marktseitige Einflüsse antworten können. Die Adaptionsfähigkeit begründet sich dabei in der flexiblen räumlichen, technischen und organisatorischen Anpassung des Montagesystems sowie der unabdingbaren menschlichen Kreativität und Intelligenz der Mitarbeiter [Westkämper und Zahn 2009].

## 2.4 Auftragsmanagement im turbulenten Umfeld

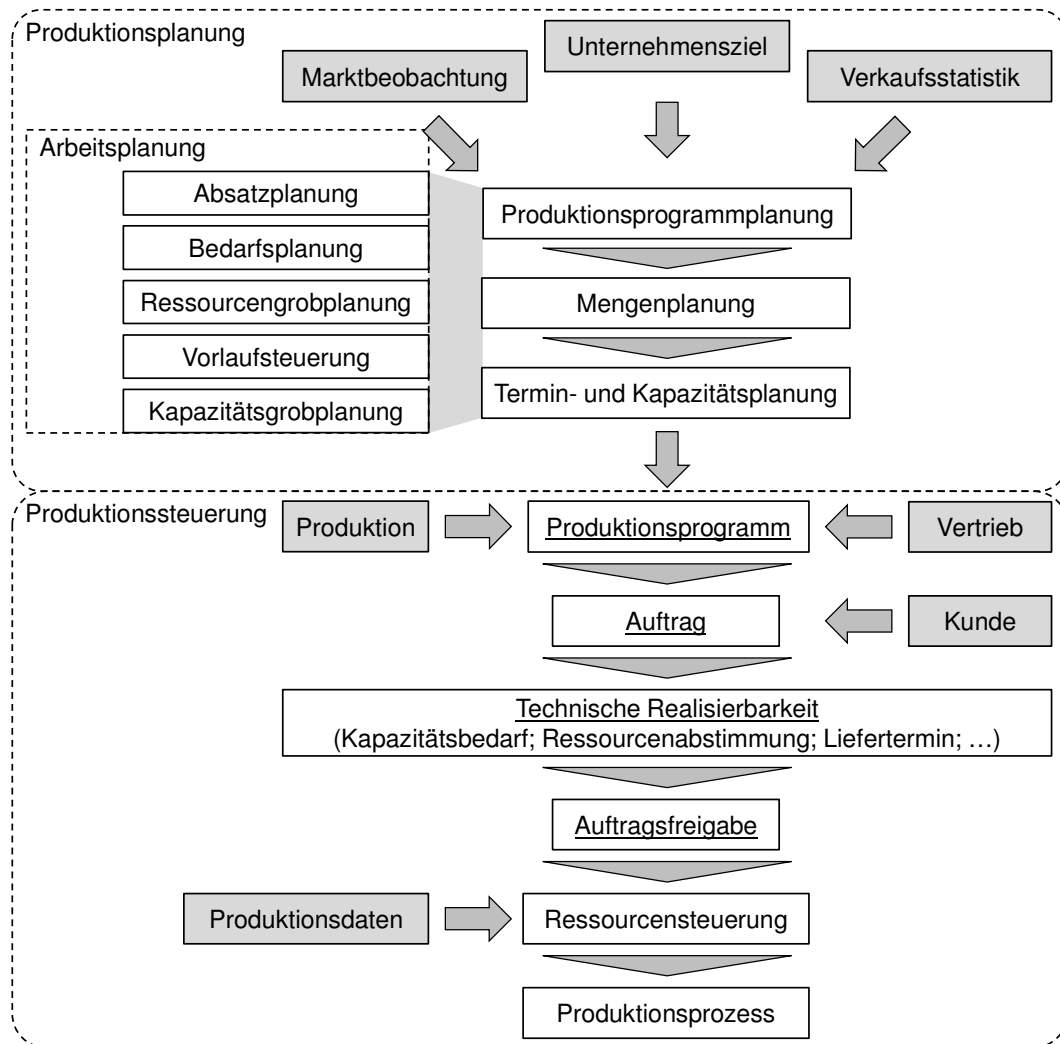
Neben der Produktionsstruktur der Montage ist das Management von Auftragseingängen und deren Abarbeitung von großer Bedeutung, da diese Turbulenzen im System verursachen können. Die Aufgabe des Auftragsmanagements ist es das laufende Produktionsprogramm nach Art und Menge im Voraus zu planen. Dazu werden die vorhandenen und die benötigten Kapazitäten gegeneinander

abgeglichen, um Kundenaufträge von der Angebotseinholung bis zum Versand einplanen und steuern zu können [Wiendahl 2002a] [Balve 2002]. Dies wird durch die Nutzung von Produktionsplanungs- und -steuerungssystemen (PPS), die auf einer vorhersehbaren Zukunft mit periodenbezogenen Vorgaben basieren, ermöglicht [Westkämper und Zahn 2009]. Die Überwachung der Auftragsabwicklung gehört genauso zu den Aufgaben des PPS, wie die Reaktion auf unvorhergesehene einzelfallbezogene Korrekturen in Form von Eilaufträgen und Kapazitätsanpassungen [Wiendahl 1996]. Die Abgrenzung der Aufgaben der Produktionsplanung und der Produktionssteuerung wurde vielfältig diskutiert. Für eine ausführliche Erläuterung der Abgrenzung wird an dieser Stelle auf einschlägige Literatur verwiesen [VDI 1992] [Wiendahl 1996] [Schotten 1998] [Westkämper et al. 2000a] [Schuh 2006] [Schönsleben 2011]. Ableitend ist diesen Abgrenzungen gemein, dass die Produktionsplanung mittel- bis langfristige Mengen-, Termin-, Produktionsprogramm- und Kapazitätsplanungen basierend auf der Arbeitsplanung durchführt und die Produktionssteuerung die Auftragsfreigabe und -überwachung übernimmt (Abbildung 2.9). Dieses größtenteils auf statische Abläufe ausgerichtete Auftragsmanagement hält den turbulenten Einflüssen im heutigen Produktionsumfeld nicht Stand, da häufige kurzfristige Änderungen in der Auftragszusammensetzung nicht adäquat berücksichtigt werden können. Damit fallen die Termin- und Kapazitätsplanung aus der rollierenden Planung ins Hintertreffen und die Mengenplanung mit der Bereitstellung kann nicht mehr effizient gesteuert werden [Balve 2002] [Volling 2009]. Der Ausdruck „Der Produktionsplan ist veraltet, bevor er die Fertigung gesehen hat!“ ist kennzeichnend dafür und lässt Verantwortliche mit der Steuerung per Hand reagieren. Daraus resultieren hohe Durchlaufzeiten und Spontanaktionen, die zu Termin- und Kostenüberschreitungen sowie großen Verwaltungsaufwand führen [Wiendahl 2002a].

Dies verstärkt die Forderung nach dynamischen Auftragsmanagementmethoden, die sich durch eine kontinuierliche Anpassungsfähigkeit und situationsbezogene Entscheidungsfindung auszeichnen (Pritschow und Brinzer 2002). WIENDAHL entwickelte einen Ansatz zur situativen Konfiguration des Auftragsmanagements, in dem externen Anforderungen mit internen Fähigkeiten in Form von situativ auswählbaren Planungsmethoden begegnet werden [Wiendahl 2002a].

WESTKÄMPER erweitert die Systemgrenze und bezeichnet das Auftragsmanagement als ein ideelles bzw. reelles Instrument zur wirtschaftlichen und flexiblen Abwicklung von Kundenaufträgen. Diese Definition berücksichtigt neben den erläuterten Funktionen der PPS-Systeme zudem die technischen, organisatorischen und humanen Einflussfaktoren. Die Erweiterung des Fokus des Auftragsmanagements hinsichtlich des sozio-technischen Systems Fabrik ermöglicht eine flexible und

schnelle Einplanung von Auswirkungen externer Turbulenzen [Westkämper et al. 1998]. Auch BALVE greift den Rahmen des sozio-technischen Systems auf und entwickelt ein Konzept zur Gestaltung wandlungsfähiger Auftragsmanagementsysteme, das einen periodenbezogenen Flexibilitätskorridor einplant, in dem das System agieren kann [Balve 2002].



**Abbildung 2.9:** Ablauf und Inhalte der Produktionsplanung und -steuerung in Anlehnung an [Wiendahl 2002a] in Erweiterung zu [Hackstein 1989]

Heutige Auftragsmanagementsysteme decken den Bereich der Planung sehr gut ab, jedoch werden Anforderungen hinsichtlich der Steuerung im kurzfristigen Bereich nur unzureichend berücksichtigt [Westkämper und Zahn 2009]. Die Auftragszusammensetzung hat jedoch große Auswirkungen auf den Betrieb der Montagesysteme, auf die situationsbasiert durch Adaptionen reagiert werden muss. Daher ist diesem Punkt in der Arbeit eine hohe Priorität zu zusprechen, um mit der zu entwickelnden Methode einen optimalen Betrieb gewährleisten zu können.

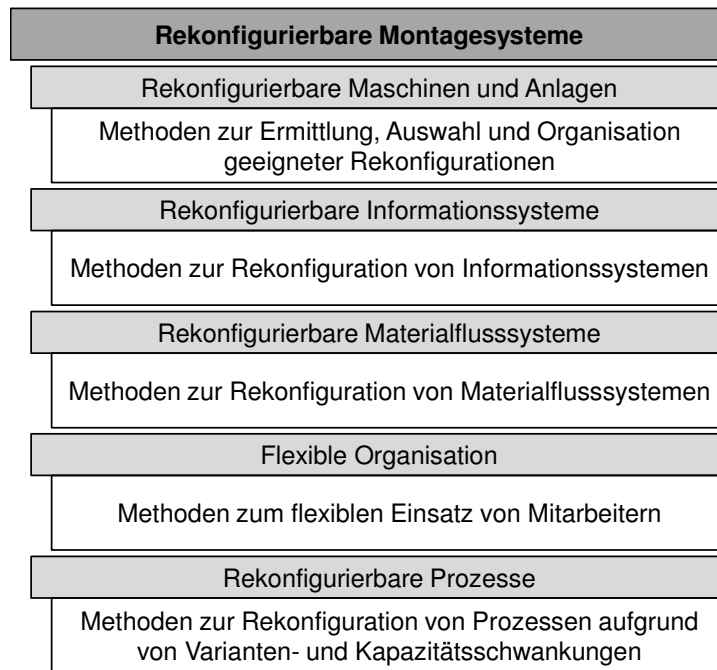
## 2.5 Technische Änderungsfähigkeit in Produktionssystemen

Neben dem Auftragsmanagement hat die technische Änderungsfähigkeit einen bedeutenden Einfluss auf den Betriebszustand der Montage. Die technische Änderungsfähigkeit in Produktionssystemen muss dabei vom Technologiemanagement abgegrenzt werden. Das Technologiemanagement zeichnet sich durch eine strategische Sichtweise aus und beschäftigt sich mit der langfristigen Identifikation, Integration und Steuerung sowie der Nutzung von Früherkennungssystemen bezüglich innovativer Technologien [Specht und Möhrle 2002] [Zahn 1995] [Bullinger 2002]. Mit dem Technologiekalender, der von WESTKÄMPER entwickelt wurde, kann eine Synchronisation zwischen zukünftigen Produkten, benötigten und identifizierten Technologien und dem Faktor Zeit erreicht werden [Westkämper 2012]. Unterstützt wird der Technologiekalender vom Technologie-Roadmapping. Dies ist ein strukturiertes Vorgehen zur Analyse, Prognose und Visualisierung von Technologien und zeigt für einzelne oder mehrere Technologiefelder auf, wann Technologien verfügbar werden, wie sie aufeinander aufbauen und sich gegenseitig ablösen [Laube 2009]. Das Ziel des strategischen Technologiemanagements ist es, technologisches Potenzial zu erkennen und in die Innovationspolitik des Unternehmens einzubinden, um eine mittel- bis langfristige Wettbewerbsfähigkeit zu ermöglichen [Fiebig 2004].

Im Gegensatz dazu steht die technische Änderungsfähigkeit. Diese fokussiert sich auf die operative, kurzfristige Anpassung technischer und organisatorischer Strukturen im Montagesystem. Zur Erzielung einer technischen Anpassungsfähigkeit müssen verschiedene Faktoren zusammenspielen, die sich aus der umgesetzten Flexibilität und Wandlungsfähigkeit des Montagesystems ableiten. Zum einen können rekonfigurierbare Maschinen und Anlagen eingesetzt werden, die aus austauschbaren und modularen Bausteinen aufgebaut sind und standardisierte Schnittstellen besitzen. Diese bieten das Potenzial, sich an ändernde funktionale und kapazitive Anforderungen anpassen zu können [Koren 2010] [Dashchenko 2006] [ElMaraghy 2009].

Zum anderen können die auf den Maschinen ablaufenden Prozesse skalierbar an die vorhandenen Produktionsanforderungen angepasst werden, um Volumen- und Variantenschwankungen beherrschen zu können. Dazu müssen vorausschauende und zeitoptimierte Instandhaltungsprozesse sowie skalierbare Materialflusssysteme eingesetzt werden [Westkämper 2009b]. Zudem ist der Einsatz rekonfigurierbare IKT-Systeme denkbar, die sich durch standardisierte Schnittstellen effizient an neue Umgebungen anpassen und somit den Produktionsprozess weiterhin unterstützen [Landherr et al. 2012]. Neben der technischen Anpassungsfähigkeit können organisatorische Methoden eingesetzt werden, die einen flexiblen Mitarbeiterinsatz ermöglichen. Derzeitige Ansätze verfolgen da-

bei flexible Arbeitszeitmodelle und einen Einsatz von Mitarbeitern über Kostenstellen hinweg [Stock 2013]. Die Voraussetzungen für eine technische Anpassungsfähigkeit sind in Abbildung 2.10 dargestellt.



**Abbildung 2.10:** Voraussetzungen für technische Anpassungsfähigkeit in Anlehnung an [Westkämper 2009b]

Für eine effiziente und situationsbasierte Adaption von Montagesystemen ist die technische Anpassungsfähigkeit als eine Schlüsselkomponente anzusehen, um auf schwankende Auftragszusammensetzungen und steigende Produktvarianten reagieren zu können. Daher muss dieser Komponente eine hohe Priorität bei der Entwicklung einer Methode zur Begegnung der dargestellten Problemstellung zugesprochen werden.

## 2.6 Zwischenfazit

Aus den Begriffseinordnungen und der Beschreibung des Umfelds, in dem moderne Montagesysteme operieren, kann folgendes Zwischenfazit gezogen werden:

- Die Produktion unterliegt turbulenten markt- und kundenseitigen Einflüssen.
- Die Montagesystemstruktur muss ganzheitlich betrachtet werden.
- Flexibilitäts- und Wandlungsfähigkeitsstrategien stellen mittel- bis langfristige Methoden zur Beherrschung der internen und externen Turbulenzen zur Verfügung.
- Die statische Planung und Steuerung von Aufträgen erzeugt hohe Turbulenzen im Betrieb von Montagesystemen.



- Montagesysteme benötigen eine hohe technische Anpassungsfähigkeit zur adäquaten Reaktion auf externe und interne Turbulenzen.
- Zeitlich kurzfristig wirkende, permanente Adaptionen sind ein Schlüssel zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und sollten stärker fokussiert werden.

Diesen Erkenntnissen wird bei der Entwicklung einer Methode zur situationsbasierten Adaption besondere Aufmerksamkeit entgegengebracht. Zudem werden Ansätze vorgestellt, die in diesem Themengebiete Gültigkeit besitzen.

## 2.7 Stand und Tendenzen in der Wissenschaft und Technik

Dieser Abschnitt beinhaltet die Aufarbeitung des Stands der Wissenschaft und der Technik. Zunächst wird auf die Relevanz der Adaptionfähigkeit und Methoden und Ansätze zur Steigerung dieser in Montagesystemen eingegangen, um die Reaktionsfähigkeit heutiger Montagesysteme zu beleuchten. Daraufhin werden Systematiken zur Planung, Optimierung und Absicherung der Produktionsfähigkeit von wandlungsfähigen Montagesystemen erläutert. Anschließend werden Maßnahmen und Vorgehensweisen zur Erzielung technischer Adaptionfähigkeit aufgearbeitet.

### 2.7.1 Relevanz der Wandlungsfähigkeit bei der Gestaltung von zukünftigen Montagesystemen

Die in Abschnitt 2.1 identifizierten und erläuterten Leitbilder führen zu Instabilitäten im Montagesystembetrieb, denen permanent und situationsbasiert mit Adaptionen entgegengewirkt werden muss. Die Konsequenz, die sich daraus ergibt, ist, dass die Relevanz für adaptionfähige Elemente, Wirkbeziehungen und Strukturen der Montagesysteme stark ansteigt. In der Literatur wurde dieser Forderung mit der Definition von Wandlungsbefähigern begegnet. Diese wurden von WIENDAHL, NYHUIS und HERNANDEZ im Rahmen der Forschungsarbeiten am Institut für Fabrikplanung und Logistik (IFA) herausgearbeitet [Wiendahl und Hernández 2000] [Nyhuis 2008a] [Wiendahl 2005] [Hernández 2003]. Wandlungsbefähiger stellen individuelle Eigenschaften von Fabrikobjekten, Wirkbeziehungen und der Organisation dar, die diese dazu befähigen, auf veränderte Anforderungen im sozio-technischen System durch Anpassung zu reagieren [Hernández 2003]. Diese werden im Folgenden kurz erläutert und in Abbildung 2.11 beispielbasiert dargestellt. **Mobilität** beschreibt die Fähigkeit zur örtlichen Veränderung von Elementen oder –modulen [Wiendahl 2005]. **Modularität** beschreibt den inneren Aufbau eines Elements. Zur Erreichung dieser sind standardisierte, funktionsfähige Einheiten notwendig, die einfach ausgetauscht werden können, ohne das System im

Ganzen zu beeinträchtigen [Hernández 2003]. **Kompatibilität** beschreibt die Vernetzungsfähigkeit von Elementen hinsichtlich der Anbindung an standardisierte Informations- und Kommunikationssysteme sowie Medienanschlüsse und Materialversorgungssysteme [Nyhuis 2008a]. **Skalierbarkeit** beschreibt die Erweiter- bzw. Reduzierbarkeit hinsichtlich eingesetzter technischer und räumlicher Elemente sowie organisatorischer Strukturen [Nyhuis 2008a]. **Universalität** beschreibt die Eigenschaft eines Elements, unterschiedliche Aufgaben, Anforderungen und Funktionen ausführen zu können. Diese Eigenschaft wird meist durch eine gewisse Überdimensionierung eines Elements erreicht [Wiendahl 2005], was jedoch aus wirtschaftlichen Gründen kritisch zu sehen ist.

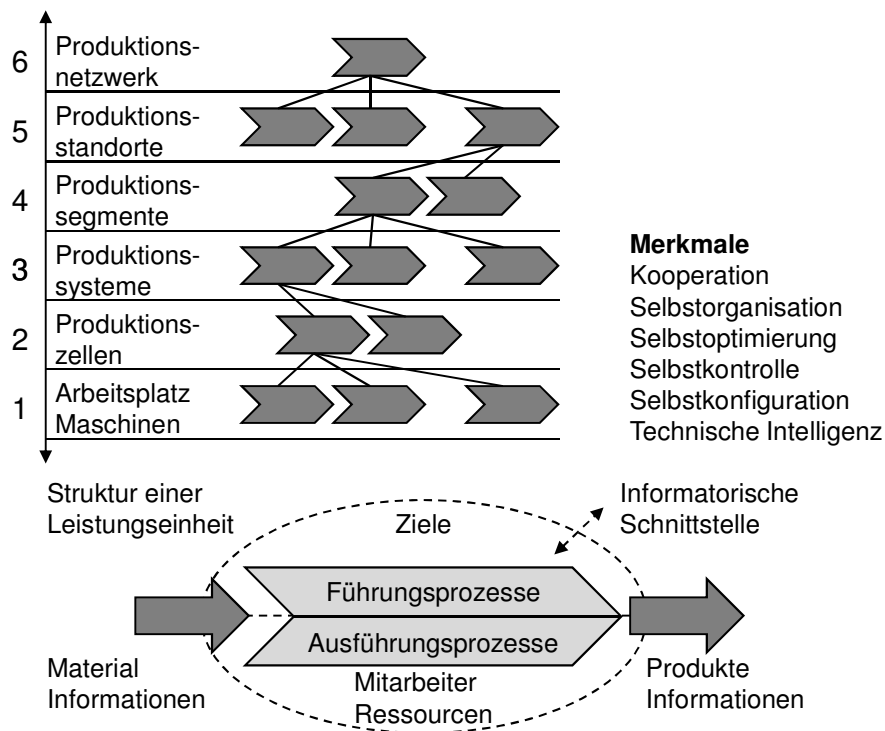
Wandlungsobjekt	Mobilität	Modularität	Kompatibilität	Skalierbarkeit	Universalität
Betriebsmittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fundament</li> <li>- Verzicht</li> <li>- Lösbar</li> <li>• Bewegbare Betriebsmittelgestaltung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Plug and Produce“</li> <li>• Rekonfigurierbar</li> <li>• Modulbasierte</li> <li>- Vorrichtung</li> <li>- Maschinen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Werkzeugneutralität</li> <li>• Standardisierte</li> <li>- Komponenten</li> <li>- Steuerung</li> <li>- Kommunikation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapazitätsflexibilität</li> <li>- Produktion</li> <li>- Nebenfunktionen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexible Schnittstellen</li> <li>• Autarke Steuerung</li> <li>• Funktionsflexibilität</li> </ul>
Logistikmittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montierbare bzw. demontierbare Fördereinrichtungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standardisierte Behältersysteme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Robuste Dimensionierung der Logistikmittel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapazitätserweiterung</li> <li>- Produkte</li> <li>- Rohstoffe</li> <li>- Einrichtung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapazitätserweiterung</li> <li>• Funktionsneutrale Logistikmittel</li> </ul>
Lagermittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rollenpuffer</li> <li>• Montierbare bzw. demontierbare Lagereinrichtungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standardisierte Lagermittel und -einrichtungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Robust dimensionierte Lagermittel und -einrichtungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapazitätserweiterung</li> <li>- Lagerdimension</li> <li>- Lager-einrichtung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapazitätserweiterung</li> <li>- Standardisierte Lagermittel</li> </ul>
Arbeitsplatz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transportkonzept</li> <li>- Rollen</li> <li>- Aufnahme-punkte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baukasten-system</li> <li>• Funktionsmodule</li> <li>• Vorrichtungsmodule</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Varianten-neutrale, mehrfunktionale Arbeitsplätze</li> <li>• Standardisiert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapazitäts- und Funktionserweiterung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Layoutflexibilität</li> <li>• Funktionsflexibel</li> <li>• Selbstregelung</li> </ul>

**Abbildung 2.11:** Ansätze zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen adaptiert von [Hernández 2003] und [Wiendahl 2005]

Zur adäquaten Implementierung der Wandlungsbefähiger in ein Montagesystem sind Methoden und Ansätze notwendig, die die systemtheoretische Einordnung des Montagesystems berücksichtigen, um das Verhalten durch interne und externe Einflüsse nachvollziehen zu können.

Eine wichtige Grundlage zur Strukturierung von Montagesystemen in der variantenreichen Serienfertigung wurde von WESTKÄMPER durch das Stuttgarter Unternehmensmodell (SUM) gelegt, das im Sonderforschungsbereich SFB 467 „Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die varian-

tenreiche Serienfertigung“ entwickelt und in der Lernfabrik für advanced Industrial Engineering umgesetzt wurde. Dabei wird das System Produktion als sozio-technisches System aufgefasst und in dezentral organisierte und teilautonome Leistungseinheiten untergliedert, um eine hohe Dynamik hinsichtlich schneller Adaptionen und Robustheit in Prozessen gegenüber Turbulenzen zu erreichen.



**Abbildung 2.12:** Skalierung der Produktion und Struktur der Leistungseinheiten adaptiert von [Westkämper und Zahn 2009]

Eine Leistungseinheit stellt eine organisatorische Einheit des Unternehmens dar, die unter Einbeziehung von Mitarbeitern, Betriebsmitteln, Informationen und Material abgestimmte Ziele verfolgt. Ein wichtiger Faktor einer Leistungseinheit ist der Mensch, dessen Qualifikation und Kreativität zu einer optimalen Problemlösungskompetenz beiträgt. Leistungseinheiten sind dabei horizontal über Prozessketten und vertikal über Systemebenen verknüpft. Somit ergibt sich die einzigartige Struktur der Leistungseinheiten im System Montage, die die Merkmale Kooperation, Selbstorganisation, Selbstkontrolle, Selbstkonfiguration und technische Intelligenz ermöglicht [Westkämper und Zahn 2009]. Abbildung 2.12 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Neben diesem Ansatz zur systemtheoretischen Strukturierung des Produktionssystems haben sich weitere Autoren mit diesem Themengebiet auseinandergesetzt. Dabei ist festzustellen, dass organisatorische und technische Ansätze entwickelt werden. Organisatorische Ansätze werden von

WILDEMANN mit der modularen Fabrik und von WARNECKE mit der fraktalen Fabrik verfolgt. Der Ansatz der modularen Fabrik verfolgt die Strukturierung der Fertigung in Fertigungssegmente, die jeweils spezifische Markt- und Produktkombinationen strategisch verfolgen und versorgen. Daraus resultiert eine geringe Fertigungsbreite mit einer hohen Fertigungstiefe. Die Segmente verfügen über eigenständige Kosten- und Ergebnisverantwortung und werden somit zu Leistungszentren [Wildemann 1994]. Warnecke teilt die Fabrik in selbstständige Fraktale ein, die sich durch die Merkmale der Selbstähnlichkeit, Selbstorganisation, Selbstoptimierung, gemeinsamer Zielorientierung und Dynamik kennzeichnen lassen. Diese Merkmale ermöglichen eine effiziente Anpassung an externe und interne Turbulenzen. Der Ansatz verfolgt eine Dezentralisierung der Strukturen und betrachtet die Optimierungs- und Verbesserungsprozesse in einer ganzheitlichen Sichtweise [Warnecke 1996].

Technische Ansätze sind das von UEDA entwickelte Bionic Manufacturing System, das von VAN BRUSSEL entwickelte Holonic Manufacturing System und das von GOLDMANN entwickelte Agile Manufacturing. Auf diesen Ansätzen basierend verfolgt KOREN einen Ansatz zur Erzielung von Reconfigurable Manufacturing Systems. UEDA stellt eine Analogie zwischen lebenden Organismen und technischen Systemen her und erreicht somit ein dynamisches und adaptives Verhalten gegenüber Umwelteinflüssen nach dem Vorbild der Evolution. [Ueda et al. 1997] [Ueda et al. 2000]. Das Holonic Manufacturing System zeichnet sich durch autonome Struktureinheiten, die als Holon definiert werden, aus. Diese werden ähnlich den Fraktalen in eine Hierarchie gebracht, die als Holarchie bezeichnet wird. Die Holarchie stellt die Grundlage für eine Kooperation dar und setzt die Grenzen der Autonomie fest [van Brussel et al. 1998]. Das Forschungsfeld der holonischen Fabrik fand bisher jedoch nur in konzeptioneller Art statt [Wiendahl et al. 2009]. Der Ansatz des Agile Manufacturing verfolgt ein reaktionsschnelles Agieren hinsichtlich der Kundenwünsche. Dabei wird hauptsächlich auf die Optimierung der Entwicklungsprozesse von Produkten eingegangen und die Fähigkeit der Agilität der Mitarbeiter hervorgehoben, die einen großen Einfluss auf die Problemlösung haben. Dies wird durch eine effiziente Informationspolitik und unterstützende Werkzeuge erreicht [Goldman 1996].

Die erläuterten Ansätze verfolgen das Ziel, mit geeigneten Methoden und Werkzeugen internen und externen Turbulenzen entgegenzuwirken und diese beherrschbar zu machen. Dabei wird von vorgeplanten Flexibilitätskorridoren Abstand genommen und die Wandlungsfähigkeit, mit der auf ungeplante Anforderungen reagiert werden kann, in den Mittelpunkt gestellt. Die Besonderheit des Stuttgarter Unternehmensmodells in diesem Kontext ist, dass sowohl die technische als auch die

organisatorische Wandlungsfähigkeit betrachtet wird, was aus dem sozio-technischen Betrachtungsrahmen resultiert. Zudem beinhaltet es die ausgeprägteste Form der Merkmale, die eine Einheit im System mitbringen muss, um auf Dynamiken im turbulenten Umfeld reagieren zu können. Dies ist in Abbildung 2.13 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

	Marktorientierung	Autonomie	Kooperation	Selbstoptimierung	Selbstorganisation	Dynamik
Modularisierung	●	●	○	○	○	○
Fraktale Produktion	○	●	○	●	●	○
Bionic Manufacturing	○	●	●	●	●	○
Agile Manufacturing	○	●	●	●	●	○
Holonic Manufacturing	○	○	●	●	●	○
Stuttgarter U-Modell	●	●	●	●	●	●

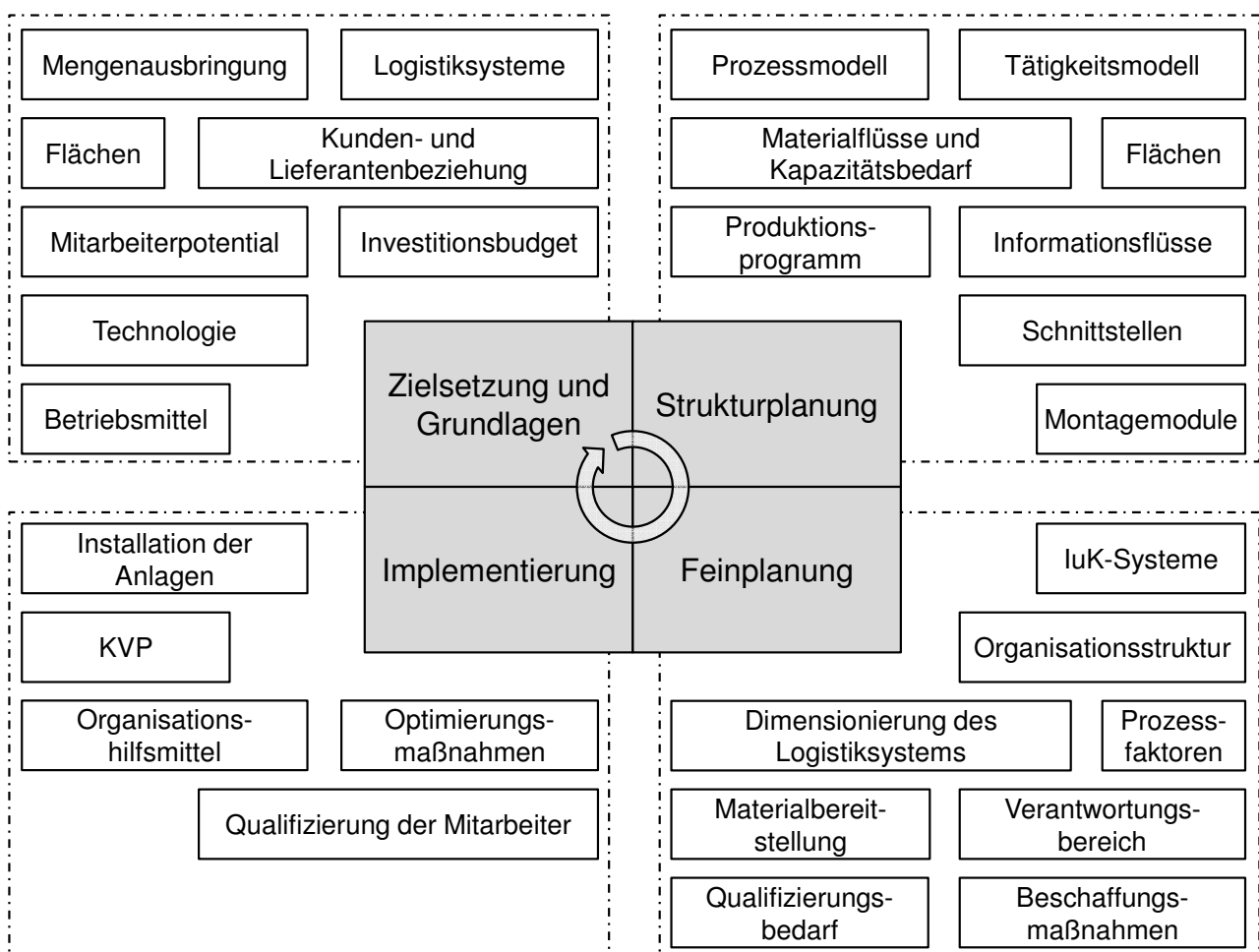
**Abbildung 2.13:** Merkmale der Produktionsstrukturierungen [Westkämper und Zahn 2009]

Die ständig steigende Komplexität in Montagesystemen erschwert jedoch zunehmend, Wirkbeziehungen vollständig zu erfassen, zu analysieren und dementsprechend die Montageplanung darauf abzustimmen. Oftmals fehlen auf der Montagesystemplanungsebene grundlegende Kenntnisse über gegenwärtige interne und externe Turbulenzen [Westkämper 2001]. Auf Basis der erläuterten Ansätze wird im Folgenden auf Systematiken zu Montageplanung eingegangen und die für diese Arbeit relevanten Methoden beschreiben.

## 2.7.2 Systematiken zur Montageplanung und -optimierung

Systematiken zur Planung und Optimierung von Montagesystemen wurden in den 80er Jahren verstärkt entwickelt und breit diskutiert, um die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens gegenüber der zunehmend globalen Produktion weiterhin gewährleisten zu können. Beispielhaft seien hier die Arbeiten von [Löhr 1977] [Vähning 1985] [Bullinger 1986] [Nolting und Feldmann 1989] [Friedmann 1989] und [Warnecke 1989] erwähnt. Diese Systematiken wurden in den 90er Jahren der industriellen Praxis vorgeschlagen und teilweise umgesetzt. Untersuchungen zeigen, dass sich die Montageplanung und -optimierung kaum vom generellen Ablauf vorhandener Fabrikplanungsme-

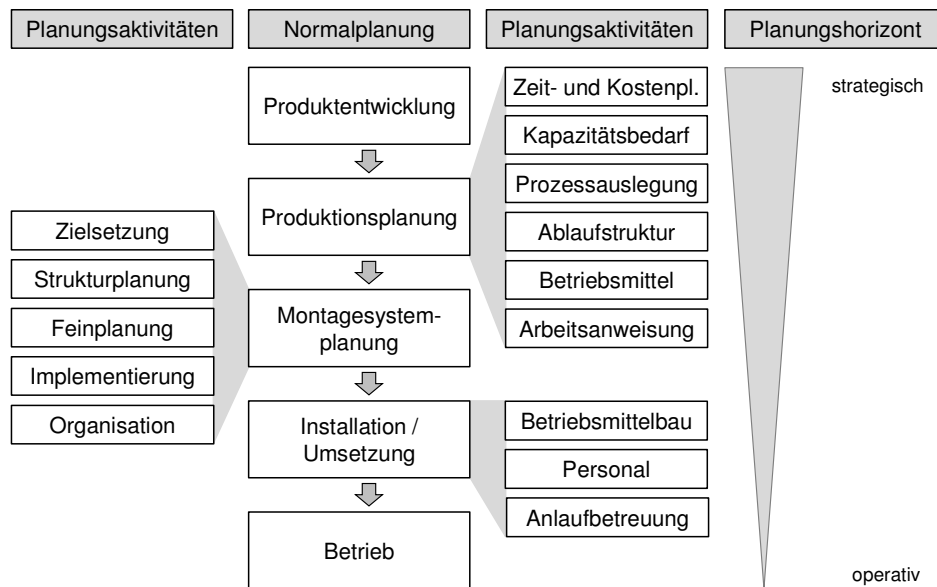
thoden unterscheidet [Lotter und Wiendahl 2006]. Diese beinhalten, gleichartig den Methoden und Ansätzen der Montageplanung, die Phasen der Zielsetzung und Untersuchung der Grundlagen, der Strukturplanung bzw. der Grobplanung, der Feinplanung und der Implementierung (Abbildung 2.14). Jedoch unterscheiden sich die Schritte innerhalb der Phasen, da ein stärkerer Fokus auf die Anforderung des Montagesystems gelegt wird. Die durchzuführenden Schritte sind in Abbildung 2.14 dargestellt. In der Phase der Zielsetzung und Grundlagen werden auf der Basis von Strategievorgaben sowie betrieblichen Rahmenbedingungen das benötigte Investitionsbudget, die zu verwendende Technologie zur Montage von Produkten sowie die benötigten Flächen und Logistiksysteme ausgelegt. Darauf folgend wird in der Strukturplanung eine Grobplanung des Montagesystems durchgeführt. Dabei werden Kapazitätsbedarfe, der Materialfluss, der Personalbedarf sowie die Prozesse, die an den jeweiligen Arbeitsstationen ausgeführt werden ausgelegt. Das Ergebnis dieser Phase ist ein ideales Montagesystem, das den Anforderungen aus der Zielsetzung gerecht wird.



**Abbildung 2.14:** Ablauf und Aktivitäten der Montagesystemplanung [Lotter und Wiendahl 2006] [Westkämper 2001]

In der anschließenden Phase der Feinplanung wird das ideale Montagesystem an reale Bedingungen angepasst und detailliert ausgelegt. Die Aufgaben, die diese Phase enthält, sind die detaillierte Dimensionierung des Logistiksystems, der Materialbereitstellung, der Organisationsstruktur und der Prozessfaktoren. Die Ergebnisse dieser Phase werden Abteilungen, wie dem Betriebsmittelbau- und der -beschaffung, der Fertigungsplanung, der Prozessplanung sowie der digitalen Fabrik zur Verfügung gestellt, um einen reibungslosen Anlauf des Montagesystems gewährleisten zu können. Wird das detaillierte Konzept des Montagesystems freigegeben, beginnt die Phase der Implementierung in der realen Fabrik. Während des Betriebs des implementierten Montagesystems werden kontinuierlich Verbesserungsmaßnahmen durchgeführt. Um einen strukturierten Ablauf der Montagesystemplanung gewährleisten zu können, wird in neueren Systematiken eine projektbasierte bzw. leitfadenorientierte Planung verfolgt. WESTKÄMPER zielt auf eine marktgerechte und integrative Systematik zur Montageplanung ab. Der Ablauf der Planung ist projektorientiert und berücksichtigt interne sowie externe Einflussgrößen. Diese sind in vier Blickwinkeln aufgeteilt: Markt und Kunde, Steuerung und Logistik, Personal und Ressourcen, Leistung und Kosten. Die Planung erfolgt integrativ, damit das System Montage ganzheitlich betrachtet wird und Synergieeffekte genutzt werden können [Westkämper 2001]. HELBING verfolgt ebenfalls einen projektorientierten Ansatz zur Fabrik- und darin integrierten Montageplanung. Dabei werden die Produktinformationen und Absatzplanungen als Ausgangspunkt der Planung gesehen und das System Montage darauf basierend ausgelegt [Helbing 2010]. LOTTER UND WIENDAHL betrachten eine leitfadenbasierte Planung der Montage, der eine 11-stufige Planungssystematik zugrunde gelegt wird. Diese berücksichtigt die Anforderungen, die vom Produkt an das Montagesystem gestellt werden in Form eines Pflichtenheftes und lässt diese in die Planung mit einfließen [Lotter und Wiendahl 2006]. Ebenso gehen SCHENK, WIRTH und MÜLLER auf die leitfadenbasierte Planung von Fabriken und darin enthaltenen Montagesysteme ein. Dabei wird ausgehend von den Kapazitätsanforderungen das Montagesystem ausgelegt [Schenk et al. 2010]. Die Besonderheit dieser neueren Ansätze ist, dass auf die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit des Montagesystems bei der Planung großen Wert gelegt wird, um auf zukünftige Änderungen effizient und schnell reagieren zu können. Diesen Systematiken liegt jedoch ein, durch die projekt- bzw.- leitfadenbasierte Struktur, sequenzielle Vorgehensweise zugrunde, die bei Änderungen durch interne und externe Einflüsse oder strukturellen Optimierungsvorhaben eine erneute Durchführung bedingen. Das erschwert eine permanente und situationsbasierte Adaption, da die benötigte Zeit zur Durchführung sehr hoch ist und viele Bereiche an der Planung beteiligt sind. Daher lässt sich für die heutige Montageplanung ableiten, dass auf Basis von Produktinformationen,

Absatzzielen und daraus abgeleiteten Kapazitätsbedarfen eine einmalige Auslegung des Montagesystems, in Form einer Normalplanung, erfolgt (Abbildung 2.15). Dabei werden Flexibilitätskorridore und Wandlungsfähigkeitsstrategien berücksichtigt, um in einem gewissen Rahmen auf Veränderungen reagieren zu können.



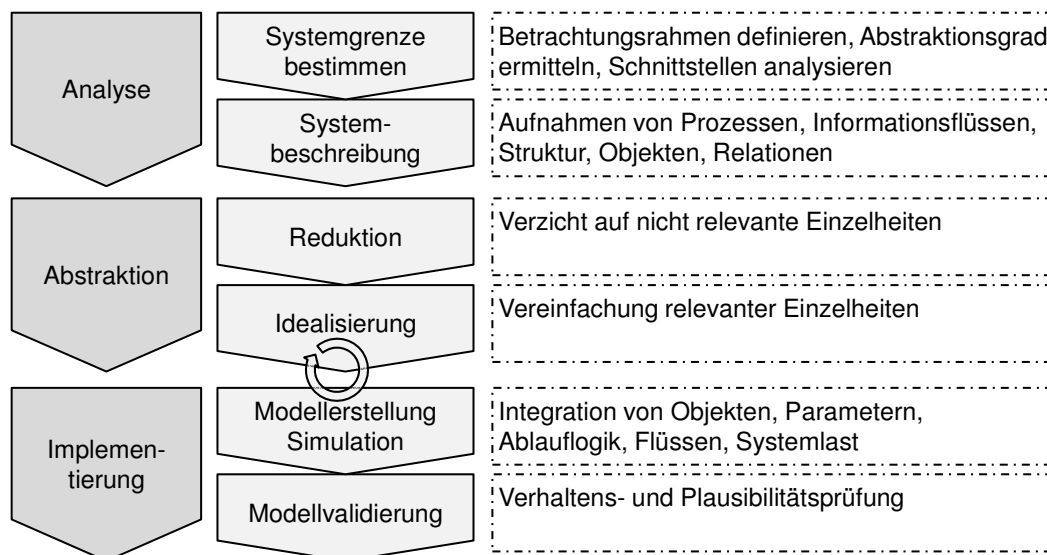
**Abbildung 2.15:** Ablauf der einmaligen Normalplanung und Einordnung der Montagesystemplanung

Zusätzlich zu den Systematiken zur Planung von Montagesystemen liegen Systematiken zur Optimierung bestehender Montagesysteme vor. Für eine ausführliche Beschreibung dieser, sei hier auf einschlägige Literatur verwiesen [Rother und Shook 2004] [Erlach 2010] [Rother 2013] [Ohno 2013]. Die Methoden, die in den Systematiken zum Einsatz kommen, können in dem Kontext des Lean-Managements zusammengefasst werden und beinhalten Werkzeuge wie beispielsweise die Wertstrommethode, Poka Yoke (Fehlervermeidung), Kanban (Produktionssteuerung) oder Rüstzeitoptimierung hin zu einer Minute (Single Minute Exchange of Die - SMED). Die Durchführung von Optimierungen erfolgt durch eine prozessorientierte Sicht auf das Produktionssystem und hat hauptsächlich das Ziel der stärkeren Orientierung der Produktion am Kunden sowie der Vermeidung von Verschwendung in allen Prozessen. Der Vorreiter ganzheitlicher Produktionssysteme ist das „Toyota-Produktionssystem“, das von vielen Firmen adaptiert und erfolgreich integriert wurde. Dies zeigt jedoch noch einmal, dass die Optimierung einzelner Prozesse oder Prozessketten nicht ausreicht, um wirtschaftliche Potenziale zu aktivieren. Vielmehr ist die Berücksichtigung und Optimierung des gesamten Systems mit allen Elementen, peripheren Bereichen und Wirkbeziehungen anzustreben. Erst damit wird es möglich Verluste und Verschwendungen zu vermeiden und die Produktion insgesamt zu verbessern [Westkämper und Zahn 2009].



### 2.7.3 Softwareunterstützende Methoden

Die Systematiken zur Montageplanung und -optimierung wurden im Zuge des Computer-Integrated-Manufacturing (CIM) in digitalen Werkzeugen umgesetzt, um den Planungsprozess zu beschleunigen und zu unterstützen. Der CIM-Ansatz verfolgte dabei eine automatisierte Produktion und eingebettete digitale Werkzeuge, welche die gesamte Steuerung der Produktion übernehmen [Jacobi 2013]. Die Zunahme der internen und externen Turbulenzen stellte diese Systeme jedoch vor die Herausforderung, sich schnell anpassen zu müssen. Dies wurde jedoch durch die damalige Softwaretechnik nur schwer ermöglicht. Außerdem waren Änderungen an automatisierten Systemen mit sehr hohen Kosten- und Zeitaufwänden verbunden. Daher wurde der CIM-Ansatz in seiner reinen Form nicht weiter verfolgt [Jacobi 2013]. Der Ansatz der Abbildung von Produktionssystemen in digitalen Werkzeugen wird jedoch weiterhin genutzt, da dieser großes Potenzial für die frühzeitige Fehlererkennung bietet und somit einen optimierten Anlauf, hinsichtlich der Zeit, den Kosten sowie der Nachjustierung des Produktionssystems darstellt. Heutige digitale Werkzeuge decken dabei die Modellierung, Planung, Simulation und Optimierung hinsichtlich Produkt, Prozess, Ressourcen und Fabrikstruktur ab, um eine Produktionsfähigkeit vom Beginn der Produktion zu gewährleisten [Westkämper 2006b]. Dieser Ansatz wird zusammenfassend unter dem Begriff der Digitalen Fabrik geführt [Landherr et al. 2013] [VDI 2008].

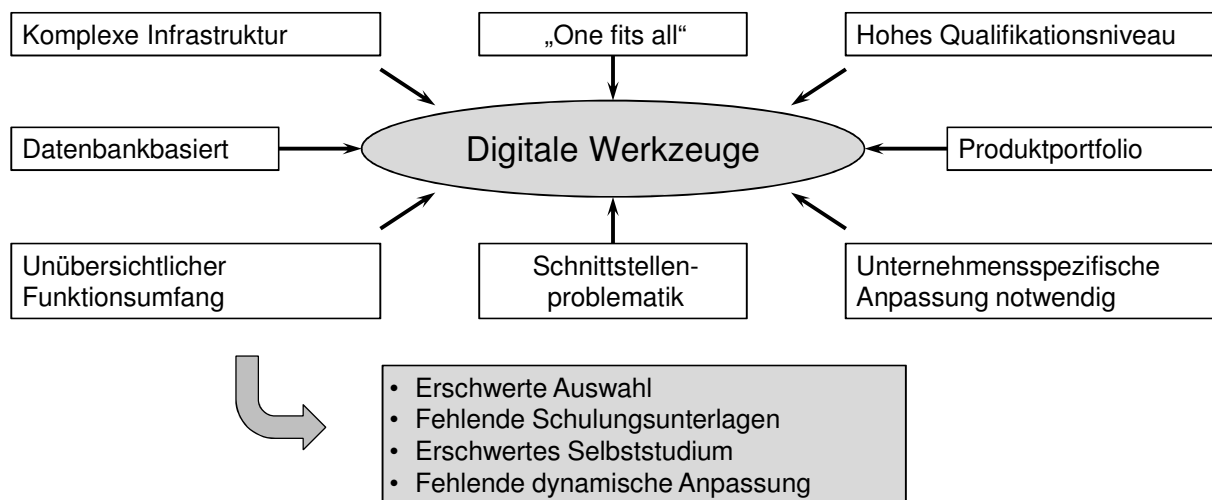


**Abbildung 2.16:** Modellerstellungssystematik digitaler Werkzeuge in Anlehnung an [VDI 1993]

Führende Anbieter sind die Siemens Industry Software GmbH & Co. KG, die Parametric Technology GmbH und Dassault Systemes, die mit umfangreichen und mächtigen Suiten den Modellierungs-, Planungs-, Simulations-, und Optimierungsprozess unterstützen [Westkämper 2006b]. Her-

ausforderungen in diesem Umfeld sind heutzutage durch Schnittstellenprobleme hinsichtlich des Daten- und Informationsaustauschs geprägt. Zudem benötigt die Anwendung der digitalen Werkzeuge ein hohes Qualifikationsniveau und erzeugt großen Aufwand bei der Erstellung und Anpassung von Simulationsmodellen [Bangsow 2008]. Das Vorgehen zur Erstellung digitaler Modelle von Produktionssystemen ist in Abbildung 2.16 dargestellt.

Ausgehend von erkannten Schwachstellen und Potenzialen werden Anforderungen an das zukünftige Produktionssystem abgeleitet. Anschließend werden der Ist-Zustand aufgenommen und notwendige Daten für die Planungsaufgabe analysiert. Daraufhin erfolgt die Erstellung eines Modells, das als Grundlage für etwaige Strukturauslegungen oder Simulationen dient. Abschließend werden die Ergebnisse validiert. Dies ist notwendig, da Informationen nicht immer vor Ort aufgenommen, sondern beispielsweise aus ERP-, MES-, BDE- und MDE-Systemen sowie Office-Auswertungen (Excel-Tabellen) gezogen werden. Dabei ist die Aktualität der Daten und Informationen nicht immer gewährleistet. Die Modelle sind zudem für einen Anwendungszweck erstellt und lassen sich nur mit hohem Aufwand an dynamisch wechselnde Systemgrenzen bzw. Anwendungszwecke anpassen [Geisberger et al. 2012].



**Abbildung 2.17:** Herausforderungen in der heutigen Anwendung von digitalen Werkzeugen

Diese eben genannten Herausforderungen sind in Abbildung 2.17 zusammengefasst. Der oft verbreitete „One fits all“-Gedanke hinsichtlich des Einsatzes von digitalen Werkzeugen erzeugt massive Anwendungsprobleme hinsichtlich des effizienten Einsatzes. Dabei werden enorme Mengen an Daten und Informationen in den Datenbanken der digitalen Werkzeuge abgelegt und versucht, diese in extensiven Modellen und Simulationen zu nutzen. Zudem werden diese Werkzeuge für Anwendungen genutzt, die ursprünglich nicht vorgesehen sind. Daraus ergeben sich Rückschläge bzw.

negative Ergebnisse, die den Nutzen dieser Werkzeuge in Managementebenen derzeit in Frage stellen. Daher sind Ansätze zu verfolgen, die eine anwendungsorientierte und schlanke Anwendung digitaler Werkzeuge erlauben.

#### 2.7.4 Ansätze zur technischen Adaptionfähigkeit

Aus der Erkenntnis, dass die Wandlungsfähigkeit von Fabriken einen wichtigen Faktor zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit ausmacht, werden Ansätze entwickelt, welche die technische Re- bzw. Konfigurierbarkeit von Maschinen und Anlagen erhöhen und eine effiziente Anpassung dieser Strukturen auf Turbulenzen ermöglichen. Dabei werden Modularisierungsstrategien verfolgt, die den Austausch von Systemkomponenten gestatten und funktionale sowie kapazitive Anpassungen erlauben. Dem Faktor Zeit wird in diesen Ansätzen eine hohe Relevanz zugesprochen, da dieser über die Effizienz des Anpassungsvorgangs entscheidet [Wiendahl 2005]. Der Begriff der Konfiguration bedeutet in diesem Kontext die erste Auslegung, Auswahl und das Zusammensetzen von Modulen zu einer Anlage oder Maschine. Der Begriff der Rekonfiguration, der in dieser Arbeit einen hohen Stellenwert erfährt, charakterisiert spätere Umbaumaßnahmen, Veränderungen an der Struktur, der Funktionalität, der technischen Kapazität und der Technologie, durch das Ersetzen, Ergänzen oder Entfernen eines oder mehrere Module [Westkämper 2006b]. Einzelne Module sind in spezifische Funktionsblöcke strukturiert und haben definierte Schnittstellen zur Umwelt (Abbildung 2.18).

Schnittstellen von Modulen in einem Produktionssystem				
elementgebunden	elementungebunden	Geometrie	Mechanik	tech. Leistung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Informationsfluss</li> <li>• Kommunikationsfluss</li> <li>• Materialfluss</li> <li>• Energiefluss</li> <li>• Medienfluss</li> <li>• Personalfluss</li> <li>• Wertefluss</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Belüftung</li> <li>• Beleuchtung</li> <li>• Lärm</li> <li>• Klima</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Länge</li> <li>• Breite</li> <li>• Höhe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewicht</li> <li>• Prozess</li> <li>• Steuerung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualität</li> <li>• Prozesssicherheit</li> </ul>

**Abbildung 2.18:** Schnittstellen von Modulen in einem Produktionssystem adaptiert von [Nofen 2006]

KOREN entwickelte den Ansatz der Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS) um die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Produktionssysteme zu erhöhen. Innerhalb dieser Systeme wird durch die Modularisierung von Betriebsmitteln, Werkzeugen, Vorrichtungen und Maschinen eine schnelle Rekonfiguration der Kapazität und Funktionalität verfolgt. Die RMS zeichnen sich durch sechs Charakteristika aus: Anpassung, Skalierbarkeit, Konvertierbarkeit, Modularität, Integration,

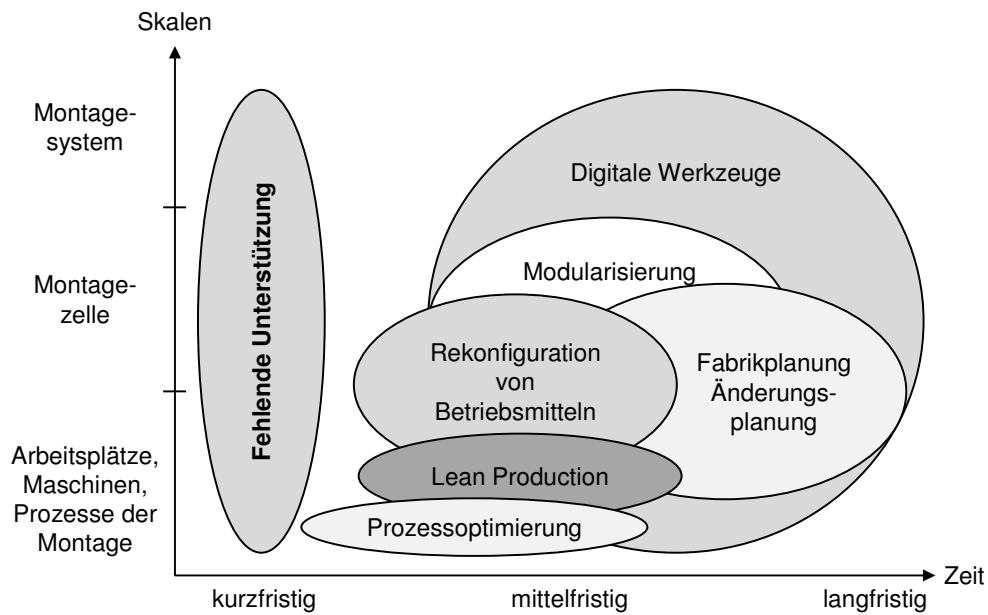
Monitoring [Koren 2010]. WIENDAHL hat ebenfalls die Betriebsmittel als Faktor zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit erkannt und projiziert das Konzept der Wandlungsbefähiger auf Maschinen, Anlagen und ganze Fertigungssysteme. Zudem wird eine Komponente „Wirtschaftliche Aspekte“ eingeführt, um Investitionskosten – Aufwand / Nutzen – abschätzen zu können. Dabei wird in eine Anwendersicht und in eine Herstellersicht unterschieden. Der Hersteller nutzt die Module als Baukastensystem, um schnell auf Kundenwünsche reagieren zu können. Die Anwendersicht erlaubt wiederum die bedarfsgerechte Adaption der Betriebsmittel [Wiendahl 2005]. WESTKÄMPER verdeutlicht ebenso die Wichtigkeit re- bzw. konfigurierbarer Produktionssysteme und fordert funktionsbasierte Module, die innerhalb kürzester Zeit austauschbar sind und geeignete, auf Richtlinien und Standards basierende, Adapter besitzen. In der wissenschaftlichen Literatur sind neben diesen Ansätzen weitere vorhanden, auf die hier verwiesen sein soll [Giusti et al. 1994] [Arai et al. 2000] [Feldmann und Slama 2001] [Shen et al. 2003] [ElMaraghy 2009]. Die erläuterten Ansätze wurden in der industriellen Praxis in Teilen erfolgreich implementiert. Beispielhaft seien hier die Firmen OTTO SUHNER AG, WaldrichSiegen Werkzeugmaschinen GmbH, EMAG Holding GmbH, INDEX-Werke GmbH & Co. KG, Festo AG & Co. KG, Pilz GmbH & Co. KG, PFUDERER Maschinenbau GmbH und Bosch Rexroth AG, genannt. Diese nutzen modulare Vorrichtungen und Baukastensysteme für Maschinen, Mechanismen zur Werkzeugkonfiguration und -wechsel, den Austausch von Bewegungsmodulen und/oder modulare, selbstadaptierende Steuerungssoftware, um eine technische Adaptionsfähigkeit zu erreichen [Westkämper 2006b] [Heisel und Stehle 2009]. Rekonfigurierbare Betriebsmittel und deren Potenziale zur Steigerung der Flexibilität eines Produktionssystems werden heutzutage in der industriellen Praxis jedoch nicht ganz ausgeschöpft, da das Wissen der Experten häufig verteilt ist und somit schwer in die Planung einfließen kann. Zudem treten Schnittstellenprobleme zwischen den Adaptern und der unterschiedlichen Steuerungssoftware auf [Westkämper 2009b] [ElMaraghy 2009].

## 2.8 Defizit hinsichtlich der Adaption von Montagesystemen

Die Erläuterungen des Untersuchungsbereichs (Kapitel 2) zeigen, dass keine expliziten bzw. ganzheitlichen Lösungen für eine permanente und kurzfristige Adaption von Montagesystemen zur Verfügung stehen. Deshalb wurden wesentliche Teilbereiche bestehender Arbeiten aus Forschung und Praxis vorgestellt, aus dem ein abschließendes Fazit gezogen werden soll, um daraus den Handlungsbedarf der vorliegenden Arbeit ableiten zu können.

Das Konzept der Wandlungsbefähiger konzentriert sich vorwiegend auf die systemische Auslegung von Fabriken, Betriebsmitteln und logistischen Systemen und erzielt ein mittel- bis langfristiges Potenzial, die Wandlungsfähigkeit zu steigern und vorgedachte Flexibilitätskorridore zu durchbrechen. Um in kurzfristigen Bereichen Adaptionen durchführen zu können, muss eine Montage jedoch systematisch strukturiert und analysiert werden können. Das SUM bietet dafür eine gute Grundlage. Dies bedingt jedoch eine Vertiefung des SUM auf das System Montage. Die darauf basierenden methodischen Ansätze zur Montageplanung und Optimierung haben in Bezug auf die Auslegung von Montagesystemen nicht an Gültigkeit verloren. Jedoch charakterisieren diese einen einmaligen Planungsvorgang – Normalplanung – auf strategischen kapazitiven Vorgaben. Hinsichtlich der Optimierung findet eine Konzentration auf Prozessparameter statt.

Diese Ansätze verfolgen somit die indirekte Integration von Wandlungsfähigkeit, um auf zukünftige Änderungen reagieren zu können, jedoch wird das Thema der kurzfristigen, situationsbasierten Adaption nicht adressiert. Die softwareseitige Unterstützung der Montageplanung und -optimierung begünstigt die Absicherung der Produktionsfähigkeit, doch steht diese den Herausforderungen der Schnittstellenprobleme beim Daten- und Informationsaustausch, dem hohen Qualifikationsniveau und dem enormen Aufwand zur Erstellung der Modelle entgegen. Hier müssen geeignete Werkzeuge zur effizienten Aufnahme des Ist-Zustands, der Durchführung von Anpassungsszenarien und der Absicherung der Produktionsfähigkeit entwickelt werden. Ansätze zur technischen Änderungsfähigkeit sind konzeptionell stark ausgeprägt und bieten geeignete Lösungsmöglichkeiten zur herstellerseitigen Auslegung von Maschinen und Anlagen mit Hilfe von Baukastensystemen. Jedoch treffen diese in der industriellen Praxis hinsichtlich der generellen Modulkompatibilität und dem zeitlichen Aufwand der Adaption auf Herausforderungen, die kaum beherrscht werden können, da diese nicht dafür ausgelegt sind. Vorhandene Ansätze aus der Wissenschaft wurden bisher nur partiell umgesetzt oder bewegen sich in einem konzeptionellen Stadium. Zusammenfassend ist der Stand der Wissenschaft und Technik in Abbildung 2.19 dargestellt.



**Abbildung 2.19:** Defizite in der heutigen Montageadaption in Anlehnung an [Westkämper und Zahn 2009] [Westkämper 2009a] [Kapp 2011]

In keiner der bisherigen Arbeiten ist ein methodischer Ansatz zu erkennen, der eine permanente und situationsbasierte Adaption sowie die Absicherung der Produktionsfähigkeit beinhaltet. Dies zeigt sich auch in der neueren Literatur. Exemplarisch sei die folgende Aussage hervorgehoben.

*„Zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit im kurzfristigen Bereich der Montage sind Konzeptionen zu entwickeln mit denen sich die heutigen Grenzen in andere Dimensionen verschieben lassen.“* [Löffler 2011]

Notwendig hierfür sind in der Planung und Steuerung sowohl die Einschränkung als auch die Erweiterung der kurzfristigen Handlungsspielräume sowie die aktive Unterstützung der Montagesystemadaption. Daher ist die Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zwingend erforderlich, die zu einer Zeit- und Aufwandsreduktion sowie einer Aufgabenvernetzung in der gesamten Adaptionkette führt.

### **3 Grundlagen zur situationsbasierten Adaption von Montagesystemen**

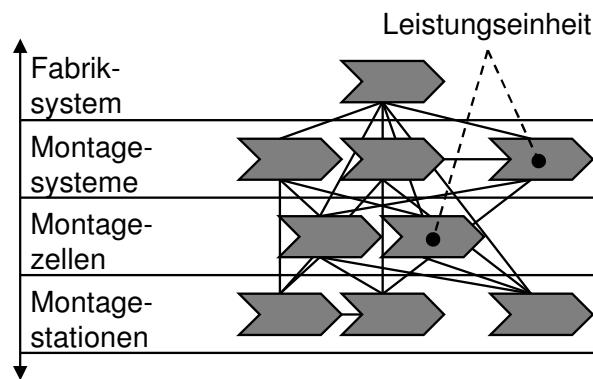
In diesem Kapitel werden die Grundlagen für eine situationsbasierte Adaption und die Absicherung der Produktionsfähigkeit von variantenreichen Serienmontagen geschaffen. Daraus werden Anforderungen an die zu entwickelnde Methode abgeleitet.

#### **3.1 Charakterisierung der Montagesystemstruktur**

Die Effizienz der Adaption von Montagesystemen hängt stark von einer strukturierten Sicht auf das System und einer systematischen Vorgehensweise ab. Daher wird in diesem Abschnitt das System Montage mit Hilfe eines geeigneten Ansatzes strukturiert. Zudem werden Einflüsse erläutert, die sich aus der Struktur von Montagesystemen in der variantenreichen Serienfertigung auf die Adaptionfähigkeit ergeben, sowie Handlungsspielräume identifiziert.

##### **3.1.1 Struktur existierender Montagesysteme**

Die Charakterisierung der Struktur von Montagesystemen erfolgt auf Basis des Stuttgarter Unternehmensmodells, das in Abschnitt 2.7.2 erläutert wurde. Dazu werden die Skalen auf den hier beschriebenen Anwendungszweck projiziert und somit eine Systematisierung des Montagesystems erreicht. Abbildung 3.1 stellt das hierarchische Grundmodell dar, das die direkten und indirekten Bereiche als Leistungseinheiten betrachtet und die horizontalen und vertikalen Wirkbeziehungen hervorhebt. Die hierarchische Struktur besteht aus den Skalen des Montagesystems, den Montagezellen und den Montagestationen (Arbeitsplatz) sowie den darin ablaufenden Prozessen. Die Leistungseinheit des Montagesystems beinhaltet neben den wertschöpfungsausführenden Montagezellen unterstützende Bereiche, beispielsweise in Form der Qualitätsprüfung oder des Werkzeug- und Vorrichtungsbau. Die Montagezellen, die wiederum aus Montagestationen zusammengesetzt sind, beinhalten die zur Ausführung der Montageaufgabe essenziellen Elemente. Dies sind beispielsweise Transportmittel, Logistikmittel und Anlagen. Eine Montagestation ist in diesem Kontext eine spezifische Einheit, die einen Prozess bzw. eine Funktion in der wertschöpfenden Prozesskette ausführt. Übertragen auf die funktionale Struktur eines Montagesystems ergibt sich der folgende Betrachtungsrahmen (Abbildung 3.2). Ausgehend von den Informationen aus den Bereichen der Produktentwicklung, dem Prototypen- bzw. Vorserienbau und dem strategischen Management – Absatzzahlen und Kapazitätsbedarf – wird das Montagesystem in einer Normalplanung ausgelegt.



**Abbildung 3.1:** Skalierung des Montagesystems und Vernetzung der Leistungseinheiten

Der Systemrahmen des ausgelegten Montagesystems beinhaltet die Gesamtheit der Funktionen der Informations- und Kommunikationssysteme. Diese sind die Fertigungsplanung, die Auftragssteuerung und die Verarbeitung von rückgemeldeten Daten und Informationen aus den direkten sowie den indirekten Bereichen. Die direkten Bereiche des Montagesystems stellen die Montagezellen mit deren untergeordneten Leistungseinheiten dar. In diesen werden hauptsächlich wertschöpfende Tätigkeiten unter Zuhilfenahme von Betriebsmitteln ausgeführt, die zur Fertigstellung des Produktes oder einer Baugruppe notwendig sind. Indirekte Bereiche unterstützen die direkten Bereiche bei der Durchführung ihrer Tätigkeiten. Darunter fallen der Werkzeug- und Vorrichtungsbau sowie die Lagerung der Werkzeuge und Vorrichtungen. Zudem enthalten diese Bereiche die Qualitätsprüfung und deren Messtechniklabore, die Instandhaltung, für die in den Montagezellen vorhandenen Betriebsmittel, und die Logistik, die für die Material- und Medienversorgung verantwortlich ist. Die Leistungseinheiten in den direkten und indirekten Bereichen sind durch komplexe Wirkbeziehungen in Form von Relationen (Prozessketten), Restriktionen (technisch, kapazitativ und räumlich), durch den Informationsaustausch (Rückmeldung, Aufträge) oder durch die Interaktionen (Material- und Medienfluss) miteinander verbunden.

Der strukturelle Aufbau eines Montagesystems in der variantenreichen Serienfertigung sowie die darin vorherrschenden Wirkbeziehungen begrenzen die Fähigkeit zu Adaption. Diese Begrenzung wird in Abbildung 3.3 hinsichtlich der möglichen Variantenvielfalt, Produktvielfalt, Stückzahlausbringung sowie der Wandlungsfähigkeit für verschiedene Montagesystemstrukturen qualitativ dargestellt. Es lässt sich schlussfolgern, dass je nach Struktur des Montagesystems unterschiedliche Begrenzungen vorherrschen. Eine stark manuell ausgeprägte Montage ist in der Lage eine hohe Variantenvielfalt abzubilden, da manuelle Tätigkeiten eine hohe Flexibilität ermöglichen, jedoch die Ausbringungsmenge eingeschränkt wird.



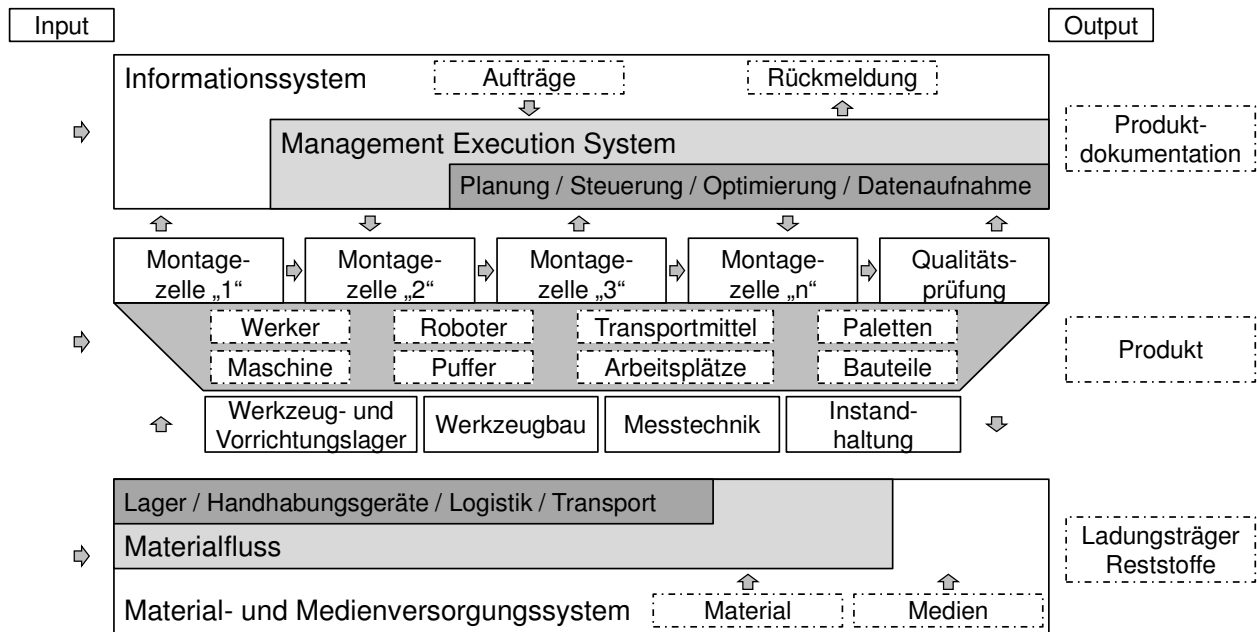


Abbildung 3.2: Montagesystemstruktur in Anlehnung an [Westkämper 2006b]

Zudem kann nur eine geringere Produktvielfalt realisiert werden, da Bearbeitungszeiten und Produktkomplexitäten begrenzende Faktoren darstellen. Im Gegensatz dazu stehen stark automatisierte Montagelinien. Diese sind auf spezifische Varianten eines Produktes ausgerichtet und ermöglichen somit eine hohe Ausbringungsmenge zu geringeren Kosten. Jedoch ist deren Flexibilität, um auf interne und externe Turbulenzen reagieren zu können, reglementiert. Unter der Berücksichtigung der in Abschnitt 2.1 herausgestellten Leitbilder für Produktionsunternehmen nimmt die Relevanz hybrider Montagesysteme zu. Diese sind in der Lage, unter wirtschaftlichen Bedingungen, komplexe Produkte in benötigten Stückzahlen auszubringen [Lotter und Wiendahl 2006]. Besonders hinsichtlich der variantenreichen Serienfertigung sind hybride Montagesysteme ein Schlüsselfaktor, kürzere Produktlebenszyklen, höhere Produktvarianten, variierende Auftragszusammensetzungen und technische Innovationen zu realisieren sowie kunden- sowie marktseitige Anforderungen zu erfüllen. Im Gegensatz zu manuellen Montagesystemen, die meist eine Baustellenstruktur aufweisen, ist die Adaptionfähigkeit geringer ausgeprägt, da teils starr verkettete Strukturen innerhalb eines Montagesystems vorherrschen und Maschinen auf spezifische Prozesse ausgerichtet sind. Dabei begrenzt die Umsetzung der Wandlungsfähigkeit die Anpassung eines hybriden Montagesystems. Je mehr diese umgesetzt ist, desto höher ist auch die Adaptionfähigkeit des Montagesystems, was wiederum eine effiziente Reaktion auf Turbulenzen ermöglicht (Abbildung 3.3). Somit ist die Adaptionfähigkeit theoretisch stark steigerbar, jedoch geht dies immer mit einer gewissen Überdi-

mensionierung bzw. Kosteneinsatz einher. Daher muss eine Abwägung zwischen Kosten und Nutzen bei der Priorisierung der Umsetzung von Wandlungsbefähigern stattfinden.

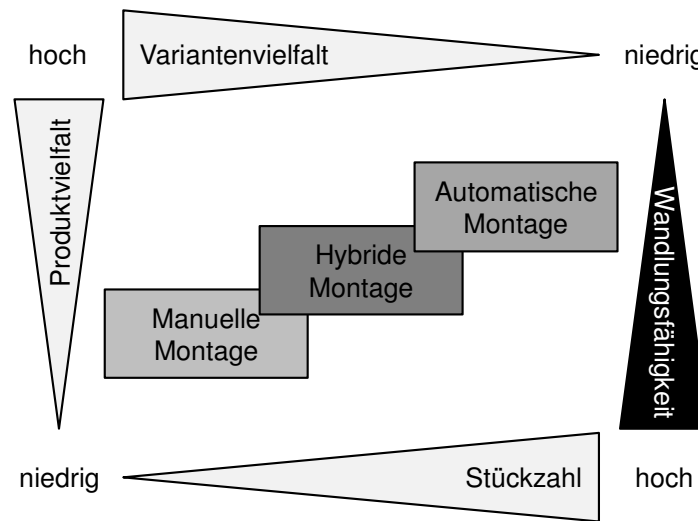


Abbildung 3.3: Eigenschaften und Restriktion eines Montagesystems in Anlehnung an [Lotter und Wiendahl 2006]

### 3.1.2 Einflussgrößen der heutigen Montageplanung und -optimierung

Wie bereits in Abschnitt 2.7.2 erläutert wird ein Montagesystem, ausgehend von Absatzprognosen und Kapazitätsanforderungen, durch eine einmalige Normalplanung ausgelegt. Zudem werden in neueren Planungen von Anfang an Prinzipien des Lean Managements berücksichtigt, die zum Beispiel Bestandssenkung an Einzelteilen bzw. Fertigwaren, Reduzierung des logistischen Aufwands, Erhöhung der Qualitätskennzahlen, Verbesserung der Lieferfähigkeit, Reduzierung von Fehlteilen oder Schnittstellenreduktionen verfolgen. Nach der Auslegung des Montagesystems wird das Montagesystem in Betrieb genommen. Darauffolgend werden prozessorientierte partielle Optimierungen auf Basis von Rückmeldungen durchgeführt, jedoch wird das Gesamtsystem in seiner Struktur belassen. Dieser Vorgang ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Annahme, dass eine einmalige Normalplanung ausreicht, um auf heutige Turbulenzen reagieren zu können, wurde in Kapitel 2 wiederlegt, da permanent Änderungen in Form von schwankenden Auftragszusammensetzungen, Produktvarianten und Last minute Changes sowie technischen Disruptionen auf das System einwirken (Abbildung 3.5). Die Auftragszusammensetzung schwankt dabei täglich, beispielsweise durch vorgezogene Aufträge, Losgrößenoptimierungen oder Eilaufträge, die für Schlüsselkunden eingeschoben werden.

Die nähere Bindung zum Kunden, basierend auf dem Wechsel von einer marktgetriebenen zu einer kundengetriebenen Produktion, lassen meist Änderungswünsche bis in die Fertigung bzw. Montage

eines Produkts zu. Dies geht mit der Erhöhung von Last Minute Changes an bereits bestellten und eingeplanten Produkten einher, die in der Montage situationsbasiert durch logistische und prozedurale Adaptionen berücksichtigt werden müssen.

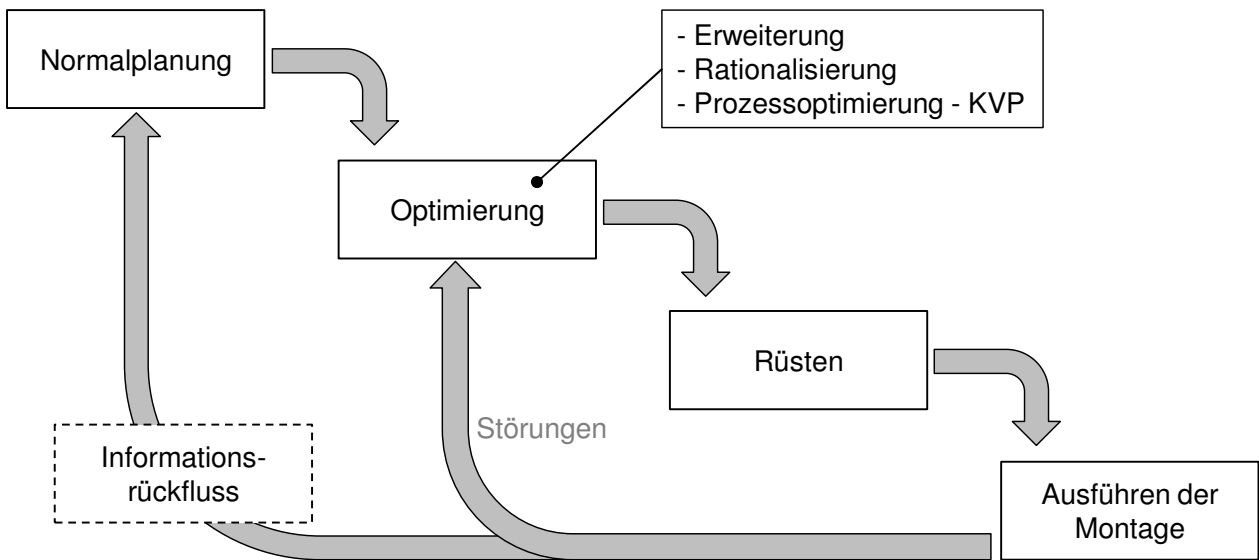


Abbildung 3.4: Ablauf der Inbetriebnahme und Optimierung von Montagesystemen

Zudem erzeugen immer kürzere Produktlebenszyklen, einen Anstieg an Produktvarianten, die meist mit technischen Innovationen einhergehen und somit neue Technologie bzw. Technik in Montagesystemen zum Einsatz kommt. Dies wird durch den Begriff der technischen Disruption abgedeckt, der sowohl den Bereich der Technologieveränderung als auch interne Störungen abdeckt.

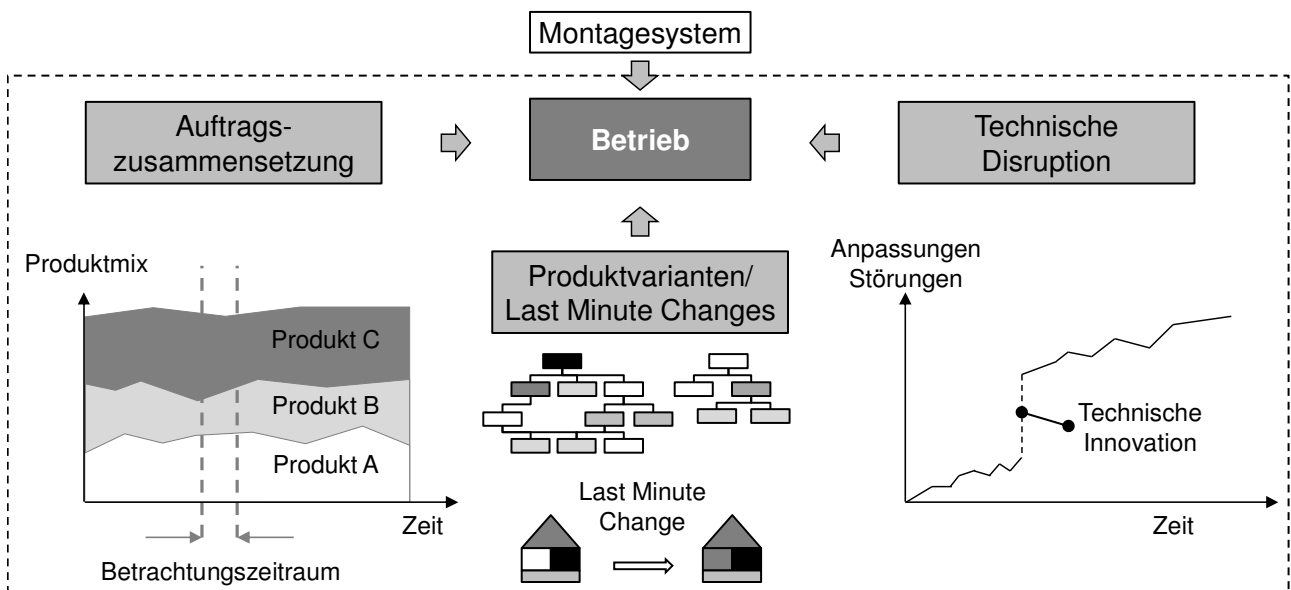
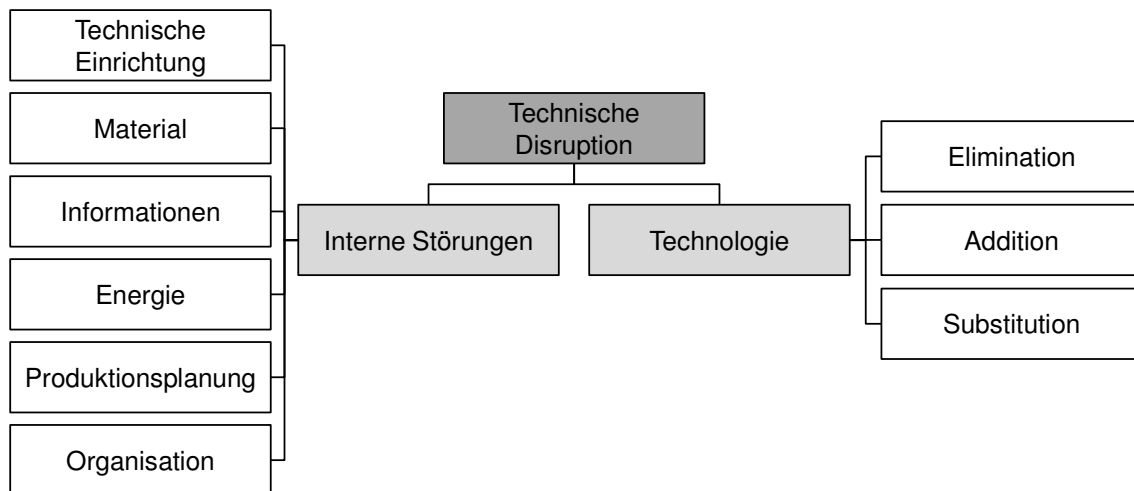


Abbildung 3.5: Kurzfristige Abweichungen hinsichtlich der durchgeführten Normalplanung

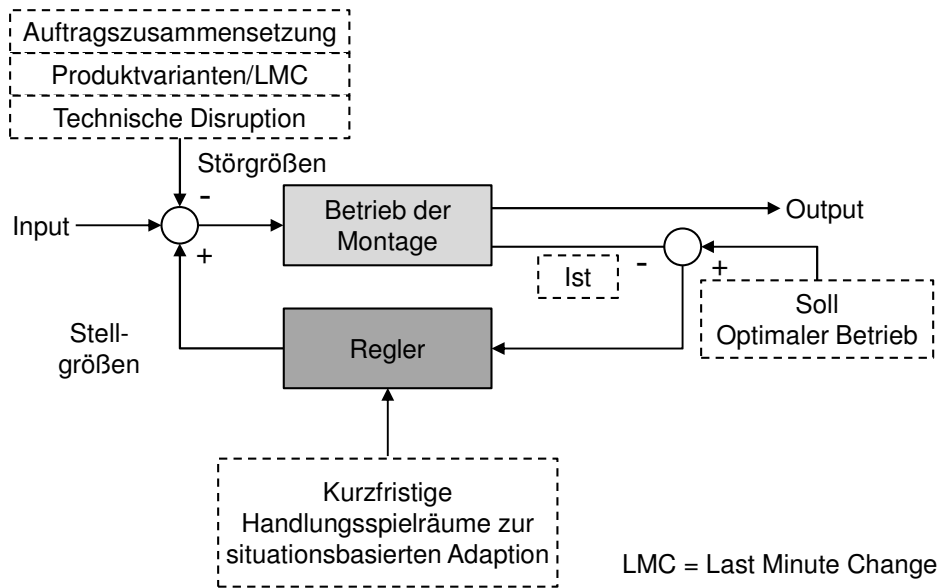


**Abbildung 3.6:** Technische Disruption im Produktionsumfeld (Warnecke und Jacobi 1991)

Technologieveränderungen betreffen die Elimination, Addition oder Substitution von Maschinen- und Anlagenmodulen oder einer Technologie. Interne Störungen hingegen betreffen organisatorische oder technische Abweichungen. Organisatorische Störungen zeichnen sich durch Abweichungen in den Auftrageinstellungen, dem Material- und Informationsfluss sowie der personalbezogenen Über- und Unterdeckung aus. Dies führt zu Mehrarbeit, Mehrschichtbetrieb, Leistungsabfall und qualitativ minderwertigen Bauteilen. Technische Störungen treten in Maschinen, Anlagen und Betriebsmitteln auf und führen zu Stillständen im Montagesystem. Der Betrachtungsrahmen der Technischen Disruption ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Internen Störungen kann vorausschauend durch Ersatzwerkzeuge, regelmäßige Instandsetzung und das Vorhalten von Ausweichanlagen, Mehrarbeit und Ausweicharbeitsplätzen entgegengewirkt werden. Den erläuterten Abweichungen und deren systematischen Begegnung muss gesonderte Aufmerksamkeit entgegengebracht werden, da diese permanent auf Montagesystemsstrukturen einwirken.

### 3.2 Das Montagesystem als Regelkreis

Eine situationsbasierte Adaption benötigt wie schon in Abschnitt 2.7.1 erläutert, eine systemische Sicht auf das Montagesystem. Der Anstoß für eine Adaption selbst kann durch die Wirkmechanismen eines Regelkreises beschrieben werden. Die Aufgabe eines Regelkreises ist es, ein vorhandenes dynamisches System, das Störungen ausgesetzt ist, konstant zu halten oder nach bestimmten Vorgaben anzupassen. Die Regelung selbst ist ein Vorgang, bei dem der Zustand der zu regelnden Größen fortlaufend erfasst und mit Führungsgrößen abgeglichen wird [DIN 19226]. Die grundlegende Struktur des in dieser Arbeit angenommenen Regelkreises wird im Folgenden erläutert (Abbildung 3.7).



**Abbildung 3.7:** Prinzip des Montagesystembetriebs als Regelkreis

Die gesamte Regelstrecke wird durch den Betrieb der Montage repräsentiert. Dieser führt wertschöpfende Tätigkeiten am Produkt bzw. den Produktgruppen auf Basis der im Voraus geplanten Input-Größen aus. Input-Größen definieren sich durch Produktionsprogramme, Auftragsfreigaben und –rückmeldungen, die einen geregelten Betrieb der Montage ermöglichen sollen. Die geordnete Montagetätigkeit wird durch Störgrößen beeinflusst, die sich in Form der drei identifizierten Leitbilder – schwankende Auftragszusammensetzung, unterschiedliche Produktvarianten und Last Minute Changes sowie technische Disruptionen – ausdrücken. Während des Betriebs unter den Input-Größen und den Störgrößen werden Output-Größen in Form von Stückzahlen, Qualitätskennzahlen und Effizienzkennzahlen erzeugt. Zudem ist der Ist-Zustand des Montagesystems charakterisierbar. Aus dem Vergleich des Ist-Zustands mit den definierten Zielvorgaben für einen „wirtschaftlichen Betrieb“ (Soll-Zustand) ergibt sich ein Handlungsdelta, das eine Anpassung beim Betreiben des Montagesystems erfordert. Den Regler stellen Handlungsspielräume dar, die eine kurzfristige und aufwandsarme Adaption der Betriebsmittel, der Prozesse und der Organisation ermöglichen. Daraus ergeben sich Stellgrößen, in Form von Adaptionen, die mit den Input-Größen und den Störgrößen in den erneuten Durchlauf des Regelkreises eingehen.

Die Schlussfolgerung daraus ist, dass ein Montagesystem als Regelkreis betrachtet werden kann, der Regelmechanismen beinhaltet, die eine mengen-, termin- und qualitätsgerechte Auslieferung der Ware zu den vereinbarten Terminen ermöglichen. Dafür muss die Regelung jedoch kurzfristig und situationsbasiert erfolgen, da die genannten Störgrößen und somit auch die Stellgrößen permanent auf das Montagesystem einwirken.

### 3.3 Adaptionfähigkeit von Montagesystemen

Dieser Abschnitt der Arbeit erläutert, welche Voraussetzung geschaffen werden muss, um die Adaptionfähigkeit eines Montagesystems zu erhöhen und in welchen Situationen eine kurzfristige Adaption benötigt wird. Dazu wird auf die Charakteristika der Adaptionfähigkeit und die Situationen, in denen eine Adaption notwendig ist, eingegangen.

#### 3.3.1 Charakterisierung der Adaptionfähigkeit

Unternehmen die in ihren Strukturen variantenreiche Serienfertigungen aufweisen, sind bei Adaptionen diversen Kostenrisiken ausgesetzt. Zum einen äußern sich diese in Produktivitäts- und Zeitverlusten bei der Durchführung von Adaptionen und zum anderen entstehen Kosten, wenn nicht genügend Erfahrungen vorhanden sind zu entscheiden, ob eine Adaption durchführbar ist oder nach einer Adaption die Produktionsfähigkeit gewährleistet werden kann [Westkämper 2006b]. Dies wiederum endet meist mit einem zeitweisen Stillstand des Montagesystems. Eine systematische Herangehensweise an Adaptionen kann die Kosten und die damit einhergehenden Verluste daher minimieren [Westkämper 2007].

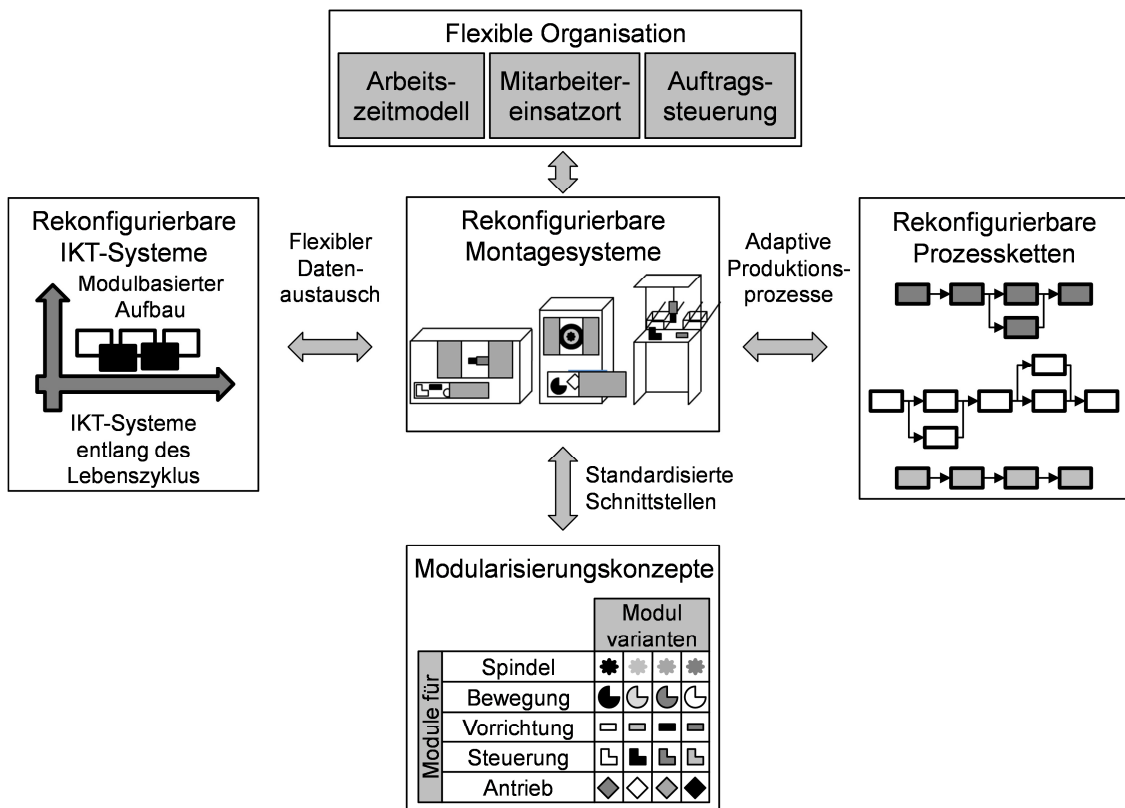
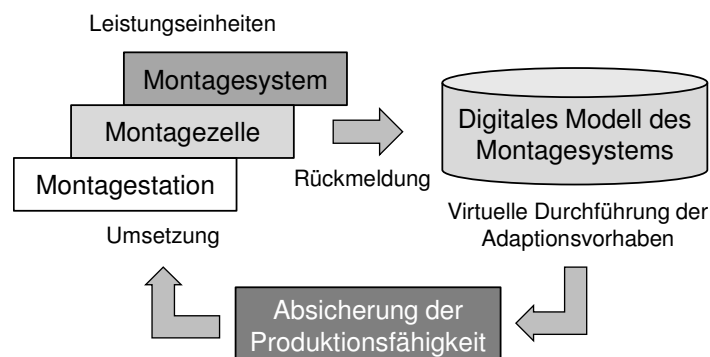


Abbildung 3.8: Einflussgrößen und Möglichkeiten zur Erhöhung der Adaptionfähigkeit von Montagesystemen

Dafür müssen jedoch die Handlungsspielräume, die eine Adaption von Montagesystemen ermöglichen, identifiziert werden. In diesem Zusammenhang können die Handlungsspielräume bei Adaptionen durch die Gestaltung der Betriebsmittel, der Softwaresysteme, der Organisationsprinzipien und der Prozessketten beeinflusst werden (Abbildung 3.8). Rekonfigurierbare Prozessketten erlauben eine schnelle Anpassung an veränderte Produktvarianten. Dazu werden Prozesspläne zur Fertigstellung eines Produktes mit neuen Prozessen abgeglichen und angepasst, anstatt diese neu zu erstellen. Die Ermöglichung solcher rekonfigurierbarer Prozesspläne hängt stark mit der Modularisierung und der Umsetzung von Wandlungsbefähigern zusammen. Zudem müssen die Montage- und die Prozessplanung einen strukturierten Austausch von Informationen, durch die Nutzung von Softwaresystemen und Datenbanken erlauben [ElMaraghy 2009].

Hinsichtlich der IKT-Systeme sind in der Software-Industrie modulbasierte Ansätze vorhanden, die einen Austausch vorhandener Software vollständig oder in Teilen erlauben, ohne das Gesamtsystem in deren Funktionen zu beeinträchtigen. Zum einen werden dazu app-basierte Ansätze verfolgt, die Planungsaufgaben maßgeschneidert unterstützen [Landherr et al. 2012]. Zum anderen wird der Ansatz der Softwaresuiten verfolgt, die es erlauben Teilsysteme auszutauschen [Landherr et al. 2013]. Diese digitalen Systeme unterstützen die Absicherung der Produktionsfähigkeit, da eine vorherige Modellierung und Simulation der geplanten Änderungen durchgeführt werden kann (Abbildung 3.9). Dabei können Prozessabfolgen, Zeitplanungen, Fabrikobjekte und Wirkbeziehungen abgebildet sowie Szenarien erstellt und diese miteinander in Bezug gesetzt werden, um eine optimale Adaptionlösung ausfindig zu machen. Die Funktionen der digitalen Werkzeuge basieren allerdings auf einem Modell des Ist-Zustand des Montagesystems. Die Nutzung dieser scheitert meist an der langen Erstellungsdauer, was eine kurzfristige Adaption verzögert bzw. verhindert [Westkämper 2009b].



**Abbildung 3.9:** Absicherung der Produktionsfähigkeit von Montagesystemen nach einer Adaption mit Hilfe von digitalen Modellen in Teilen adaptiert von [Westkämper 2006b]

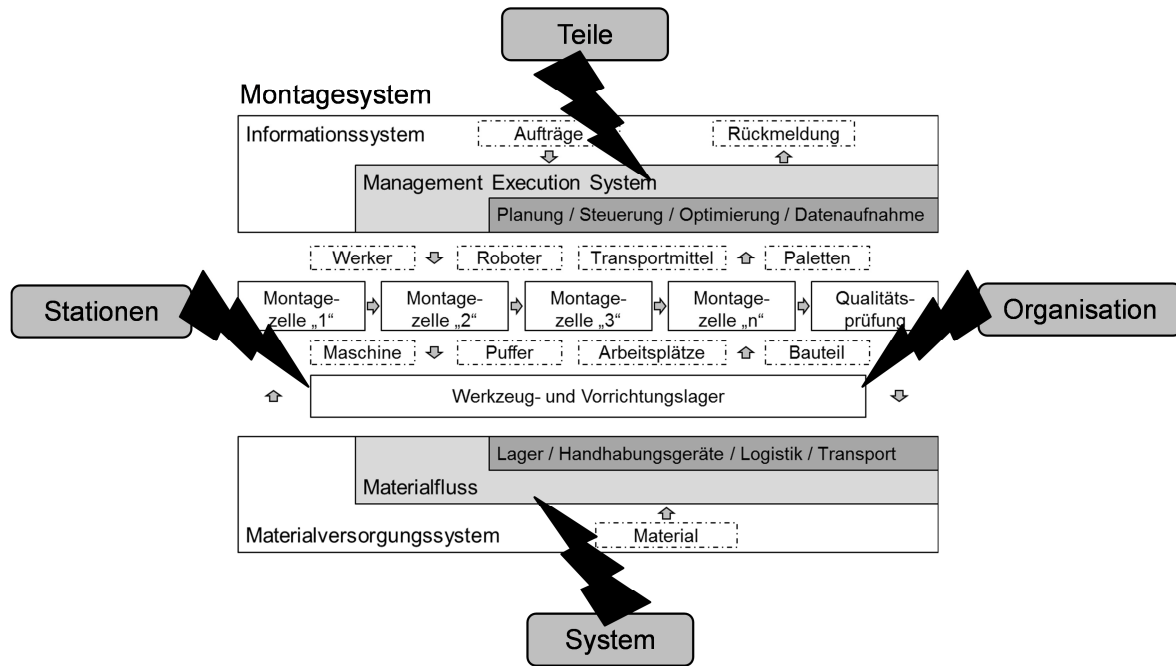
Eine flexible Organisation ist zudem von großer Bedeutung für die Ermöglichung von adaptionsfähigen Montagesystemen. In diesem Kontext spielen flexible Arbeitszeiten und Arbeitszeitmodelle eine entscheidende Rolle. Der flexible Einsatz von Mitarbeitern durch hohe Qualifikationsniveaus und flexible Strukturen hinsichtlich deren Einsatzorts sind jedoch Voraussetzung [Stock 2013]. Des Weiteren müssen Auftragsmanagementsysteme, die mit Eilaufträgen und Stornierungen umgehen können, im Einsatz sein.

Für eine situationsbasierte Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit muss den Wandlungsbefähigern, die eine effiziente Adaption der Montagestruktur hinsichtlich der Betriebsmittel und den damit zusammenhängenden Prozessketten ermöglichen, besondere Aufmerksamkeit entgegengebracht werden. Die digitale Abbildung des Ist-Zustands stellt eine Schlüsselfunktion dar, um Adaptionen im Vorhinein absichern zu können.

### **3.3.2 Situationen mit Bedarf zur operativen Adaption**

Wie schon in vorherigen Kapiteln ausgeführt, werden Turbulenzen aus allen direkten und indirekten Bereichen auf das Montagesystem induziert. Zudem besitzen diese Turbulenzen komplexe Wirkbeziehungen untereinander, die eine zielgerichtete Reaktion erschweren, da nicht immer ersichtlich ist, was eine Störung bzw. Abweichung vom wirtschaftlichen Betrieb hervorruft. Die Notwendigkeit und die Vorteile einer adaptionsfähigen Montagesystemstruktur werden daher in Abschnitt 3.1.2 detailliert erläutert. Dies zeigt deutlich, dass eine schnelle und effiziente Reaktion auf interne sowie externe Turbulenzen, in Form von steigenden Produktvarianten, schwankenden Auftragszusammensetzungen und technischen Disruptionen, einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil verschafft. Daher werden in diesem Abschnitt Abweichungen identifiziert, durch die eine Situation hervorgerufen wird, denen durch eine operative Adaption der Montagesystemstruktur- bzw. der –organisation begegnet werden muss. Dazu werden, in Anlehnung an wissenschaftliche Literatur, Haupteinflussfaktoren, die Abweichungen hervorrufen, identifiziert [Westkämper 2001] [Feldmann et al. 2004] [Lotter und Wiendahl 2006; Westkämper und Zahn 2009] [Westkämper und Zahn 2009]. Die Abweichungen wirken durch vier unterschiedliche Haupteinflusstreiber auf das Montagesystem ein (Abbildung 3.10). Einen bedeutenden Einflussfaktor stellen die zu montierenden „Teile“ dar, die sich in dem Montagesystem befinden und durch deren Charakteristika den Betrieb beeinträchtigen können. Wird beispielsweise eine Fremdfertigung von Teilen verfolgt, ist die Wirtschaftlichkeit des Montagesystems von der Qualität und der Liefertreue des Zulieferers abhängig. Zudem beeinflussen konstruktive Änderungen und die Art der Kommissionierung der Teile Abweichungen im Montagebetrieb.



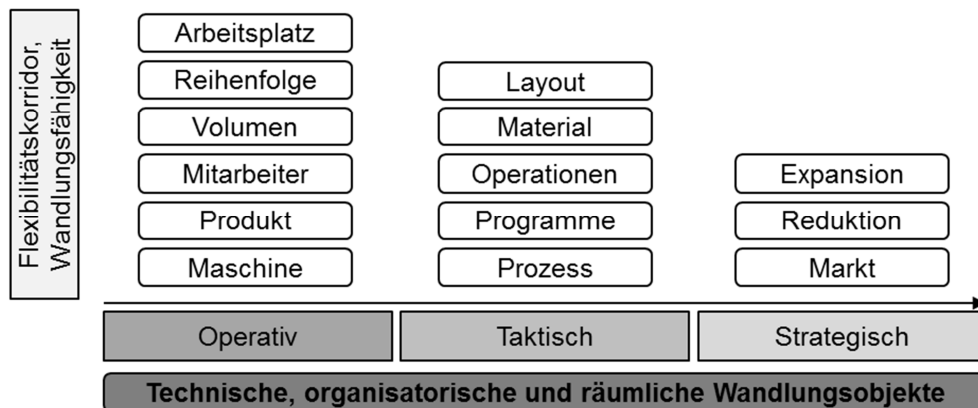


**Abbildung 3.10:** Quellen der Abweichung hinsichtlich des wirtschaftlichen Betriebs eines Montagesystems in Anlehnung an [Lotter und Wiendahl 2006]

Die Organisation des Montagesystems hat ebenfalls Auswirkungen auf dessen Wirtschaftlichkeit und ist somit als Abweichungsquelle identifizierbar. Diese umfasst die Aufstellung des Personals hinsichtlich deren Aufgaben und vorhandenen Qualifikationsniveau sowie deren zeitlichen Organisation hinsichtlich der Schichtpläne und der Auftragseinstuerung. Eine Unter- bzw. Überkapazität in der Personalaufstellung oder das Fehlen einer zur Ausführung benötigte Qualifikation lässt eine Situation entstehen, auf die reagiert werden muss. Zudem wirkt der Haupteinflussfaktor „Stationen“ auf den wirtschaftlichen Betrieb des Montagesystems. Darunter fallen Störungen oder Kapazitätsengpässe, denen situationsbasiert begegnet werden muss. Unter dem Haupteinflussfaktor „System“ fallen Einflüsse hinsichtlich des Layouts, der Technologie oder der Versorgung. Diese sind ebenfalls Keime von Turbulenzen und lassen Situationen mit der Notwendigkeit zur Adaption entstehen. Diesen Abweichungen muss konsequent begegnet werden, um einen wirtschaftlichen Betrieb gewährleisten zu können. Heutzutage wird diesen mit Optimierungsstrategien hinsichtlich des Toyota-Produktionssystems oder der Steuerung per Hand entgegen gewirkt. Eine strukturierte Einteilung der Abweichung fehlt allerdings und verhindert eine zeitlich adäquate Reaktion durch situationsbasierte Adaptionen. Zudem werden die Wirkbeziehungen, die unter diesen Haupteinflussfaktoren vorherrschen, nicht adäquat berücksichtigt. Im folgenden Abschnitt werden daher vorhandene Handlungsspielräume identifiziert, die eine Reaktion auf die erläuterten Abweichungen in Montagesystemen ermöglichen.

### 3.4 Handlungsspielräume zur Adaption

Wie bereits in Abschnitt 2.5 und 2.7.4 erläutert, sind in der Wissenschaft und der industriellen Praxis mehrere Ansätze und Konzepte vorhanden, um die Adaptionsfähigkeit in einem Produktionssystem zu erhöhen. Jedoch beziehen diese den Faktor Zeit nicht explizit mit ein und beschränken sich auf die Flexibilitätskorridore und Wandlungsfähigkeit (Abbildung 3.11).



**Abbildung 3.11:** Einteilung der Wandlungsobjekte in einen zeitlichen Rahmen in Teilen adaptiert von [Lotter und Wiendahl 2006]

Die in der Wissenschaft verbreitete Einteilung der Wandlungsobjekte betrachtet operative, taktische und strategische Zeithorizonte. Dabei wird die Entwicklung von Strukturen, wie beispielsweise den bestehenden Gebäude oder Märkte, in einem Zeitraum von 3-10 Jahren betrachtet. Die Veränderung und Weiterentwicklung von taktischen Wandlungsobjekten betrifft das Layout innerhalb bestehender Produktionsgebäude oder das zu verwendende Material. Diese Anpassungen werden in einem mittelfristigen Zeithorizont von 3-5 Jahren durchgeführt. Operative Veränderungen an Wandlungsobjekten, wie die Beschaffung von Maschinen oder die Einstellung bzw. Qualifizierung von Mitarbeitern wird aktuell in einem Zeitrahmen von einem Jahr geplant [Lotter und Wiendahl 2006] [Schuh 2006]. Um eine situationsbasierte Adaption durchführen zu können, muss eine Einteilung von Handlungsspielräumen in einen definierten zeitlichen Rahmen vorgenommen werden.

Dies bedingt die Identifikation von generellen Handlungsspielräumen und deren systematische Einteilung in Gruppen. Zur Einteilung der Handlungsspielräume werden in einem ersten Schritt die in Abschnitt 2.1 identifizierten Leitbilder herangezogen, um eine Strukturierung in Gruppen vorzunehmen. Die technische Änderungsfähigkeit bedingt die Gruppe „Betriebsmittel“ die Handlungsspielräume für Maschinen und Anlagen aufzeigt. Die schwankende Auftragszusammensetzung erfordert die Gruppe „Aufträge und Produkt“, der Handlungsspielräume zugeordnet werden können, mit denen kurzfristige Anpassungen durchgeführt werden können. Zudem werden die Gruppen

„Personal“ und „Technologie und Peripherie“ für die Personalorganisation, den Material- und Informationsfluss sowie technologische Einflussfaktoren eingeführt, um auf Produktvarianten und Last Minute Changes reagieren zu können.

In einem zweiten Schritt sind die Faktoren der jeweiligen Gruppen in qualitativ erfassbare und quantitativ beschreibbare Größen eingeteilt. Dazu sind die Faktoren, die sich durch Kennzahlen oder spezifische Werte ausdrücken lassen den quantitativen Größen zugeordnet. Diese sind zum Beispiel die Rüstzeit oder die Auslastung in der Gruppe „Betriebsmittel“ oder die Losgröße bzw. die Termintreue in der Gruppe „Aufträge und Produkt“. Faktoren die nicht oder nur unspezifisch mit Kennzahlen oder spezifischen Werten beschrieben werden können, sind den qualitativen Größen zugeordnet. Dabei handelt es sich beispielsweise um die Modularität oder Flexibilität in der Gruppe „Betriebsmittel“ oder der Eignung eines Mitarbeiters für bestimmte Tätigkeiten in der Gruppe „Personal“. Die generellen Handlungsspielräume, die eine Reaktion auf Turbulenzen ermöglichen, sind aus aktueller wissenschaftlicher Literatur und der industriellen Praxis abgeleitet [Lotter und Wiendahl 2006] [Westkämper 2001] [Hernández 2003] [Abels 1993] [Wulf 2011]. Die identifizierten Handlungsspielräume sind in Abbildung 3.12 dargestellt.

Betriebsmittel	Personal	Aufträge und Produkt	Technologie und Peripherie
<b>Quantitativ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kapazität</li> <li>- Taktzeit</li> <li>- Rüstzeiten</li> <li>- Verfügbarkeit</li> <li>- Auslastung</li> <li>- Durchlaufzeit</li> <li>- Zuverlässigkeit</li> </ul>	<b>Quantitativ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Schichtmodell</li> <li>- Arbeitszeitmodell</li> <li>- Tarifverträge</li> <li>- Austausch / Einstellung / Entlassung von Mitarbeitern</li> </ul>	<b>Quantitativ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufteilen der Losgrößen</li> <li>- Kosten pro Stück</li> <li>- Lieferzeit</li> <li>- Termintreue</li> </ul>	<b>Quantitativ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Liniendimension</li> <li>- Logistikflächen</li> <li>- Bestand/Puffer</li> <li>- Layout</li> <li>- Bodenbeschaffenheit</li> <li>- Tragfähigkeit</li> </ul>
<b>Qualitativ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilität</li> <li>- Standardisierung</li> <li>- Modularisierung</li> <li>- Automatisierung</li> <li>- Technologiesubstitution</li> <li>- Beschaffung</li> </ul>	<b>Qualitativ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufgabengebiete</li> <li>- Qualifikation</li> </ul>	<b>Qualitativ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auftrags-einsteuerung</li> <li>- Fremdvergabe</li> </ul>	<b>Qualitativ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Transportsteuerung</li> </ul>

**Abbildung 3.12:** Generelle Handlungsspielräume zur Anpassung eines Montagesystems

Durch eine systematische Einordnung der Faktoren in einen kurz-, mittel- und langfristigen Zeithorizont, können Handlungsspielräume für eine situationsbasierte Adaption identifiziert und definiert werden.

### 3.5 Produktionsfähigkeit in Montagesystemen

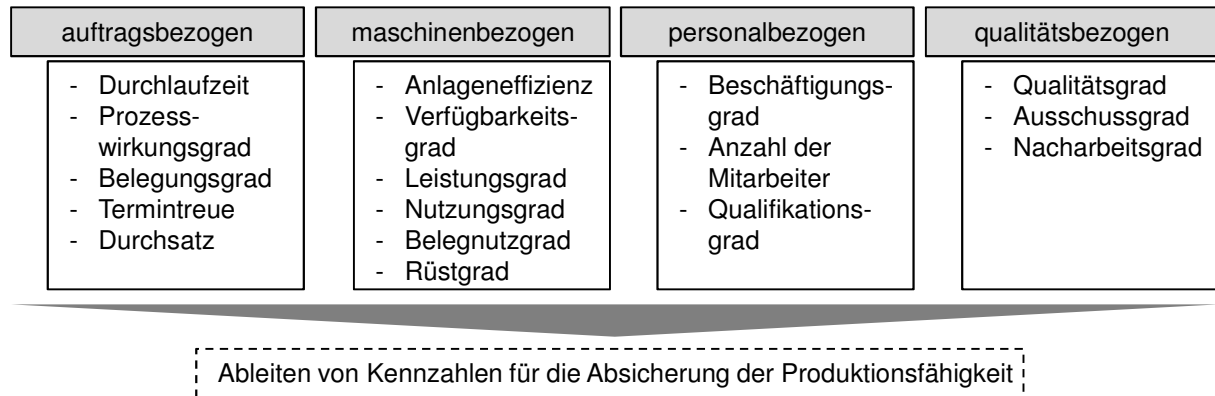
Wird eine Anpassung der Montagesystemstruktur im technischen oder organisatorischen Sinne durchgeführt, wird das System in einen veränderten Zustand versetzt. Dieser Zustand kann Charakteristika aufweisen, die einen nicht stabilen bzw. wirtschaftlichen Betrieb aufweisen. Daher muss während der Konzeption von Adaptionen die Absicherung der Produktionsfähigkeit eines Montagesystems betrachtet werden.

Unter der Absicherung der Produktionsfähigkeit werden Maßnahmen verstanden und durchgeführt, die eine Abweichung zwischen den aktuellen Planungsdaten und den Soll-Umsetzungsdaten vermeiden oder verringern. Die Produktionsfähigkeit (Abschnitt 2.2.4) hängt dabei stark von der langfristigen Produktionssicherheit ab, die im Wesentlichen von den folgenden Einflussfaktoren geprägt wird [Warnecke und Jacobi 1991].

- Mitarbeiter: Fähigkeit zur Ausführung von Aufgaben durch Schulungen und Informationsbereitstellung.
- Ablauforganisation: Informationsflüsse hinsichtlich Personal- und Ressourcendaten sowie der Produktionskapazität und dem Arbeitsfortschritt.
- Informationsflüsse: Systeme zur Bereitstellung von relevanten Informationen hinsichtlich der Auftragsbearbeitung und der Materialversorgung.
- Qualitätssicherung: Qualität nach jeder Produktionsstufe überprüfen, dokumentieren und weitermelden sowie das Vorhandensein von Messtechnik und Sensorik.
- Instandhaltung: Anlagenorientierte Instandhaltung sicherstellen durch robuste Instandhaltungsintervalle.

Neben den Maßnahmen zur Erzielung einer robusten Produktionssicherheit sind zur Absicherung der Produktionsfähigkeit zudem Kennzahlen anzuwenden, mit denen sich die Leistungsfähigkeit eines Montagesystems während des aktuellen Betriebs und nach einer Adaption ausdrücken lassen. Während des Betriebs eines Montagesystems sind produktionsspezifische Kennzahlen im Einsatz, die zum einen in der wissenschaftlichen Literatur und zum anderen unternehmensspezifisch definiert werden. Eingesetzte Kennzahlen werden aus Zielgrößen der Produktion abgeleitet und sind in unterschiedliche Kategorien - auftrags-, maschinen- und arbeitsplatz-, personal- und qualitätsbezogen – eingeteilt (Abbildung 3.13) [Kletti und Schumacher 2011]. Unternehmensinterne Informationssystemen stellen benötigte Daten und Informationen zur Verfügung, mit deren Hilfe die Ausprä-

gung der Kennzahlen beschrieben werden kann. Meist erfolgt eine automatisierte Berechnung der Kennzahlen, um die Leistungsfähigkeit des Montagesystems kontinuierlich zu überwachen.



**Abbildung 3.13:** Zielgrößen der Produktion nach [Kletti und Schumacher 2011]

Zur Bewertung geplanter Anpassungen werden heutzutage Kennzahlen herangezogen, die einen Vergleich der Ist- mit der Soll-Situation ermöglichen und Aufschluss über die zu erwartende Kosten- und Einsparungspotenziale geben [Feldmann et al. 2004]. Mit Hilfe von Kennzahlen wird beispielsweise die Anzahl der benötigten Mitarbeiter, der Handhabungsgeräte, der Maschinen und der Hilfsmittel im Vergleich zu der Ist-Situation bewertet. Zur Absicherung der Produktionsfähigkeit von situationsbasierten Adaptionen müssen aussagekräftigen Kennzahlen zur Charakterisierung von Montagesystemen ausgewählt werden. Die als geeignet erscheinenden Kennzahlen schaffen daraufhin die Bewertungsgrundlage, mit der Adaptionen bewertet und verglichen werden können.

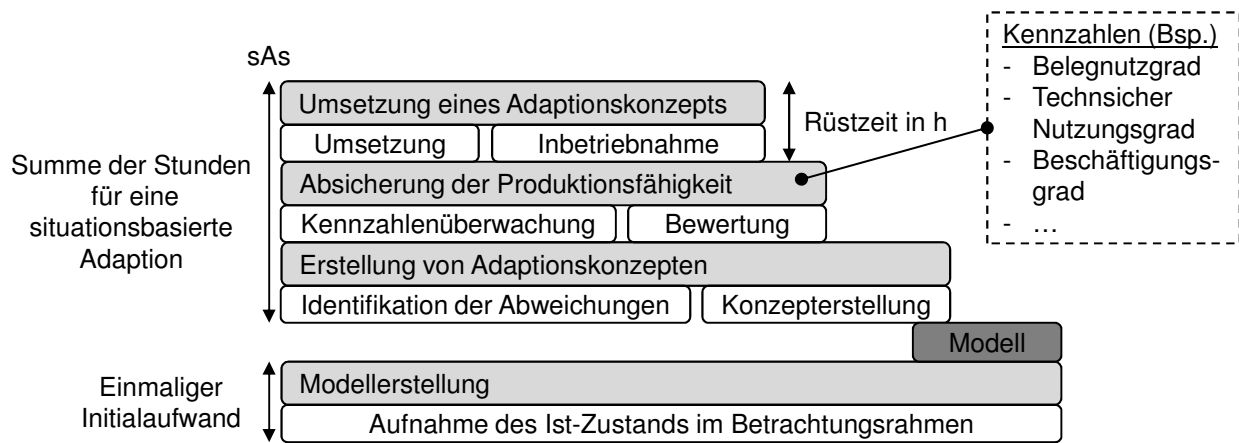
### 3.6 Bewertungsgrößen adaptionsfähiger Montagesysteme

Zur Durchführung, Bewertung und Absicherung situationsbasierter Adaptionen sind Bewertungsgrößen heranzuziehen, die in der industriellen Praxis Anwendung finden und belastbare Aussagen zulassen.

Bewertungsgrößen, die die situationsbasierte Adaptionenfähigkeit von Montagesystemen zulassen, drücken sich aktuell meist durch qualitative Faktoren in Form von Wandlungsbefähigern aus (Abschnitt 2.7.1). Diese beschreiben jedoch hauptsächlich Potenziale, mit denen zukünftig auf Einflüsse hinsichtlich der Produkt-, Produktions- und Gebäudestruktur reagiert werden kann. Zudem findet nur eine grobe Einordnung deren Zeithorizonte in operativ, taktisch und strategisch statt. Dies erschwert eine Identifikation von Faktoren, die eine quantitative Bewertung situationsbasierter Adaptionen eines Montagesystems ermöglichen. Der Zeithorizont einer situationsbasierten Adaption und deren Absicherung weicht jedoch stark von der bisherigen zeitlichen Einteilung ab, da dieser sich



Wirtschaftlichkeit des Betriebs der Montage durch den Abgleich der vorherigen und der resultierenden Kennzahlen sichergestellt [Feldmann et al. 2004].



**Abbildung 3.15:** Bewertungsgrundlage für situationsbasierte Adaptionen

Die Summe der Stunden für eine situationsbasierte Adaption (im folgenden sAs) ergibt sich dabei aus der benötigten Zeit für die Erstellung der Adaptioniskonzepte, der Absicherung der Produktionsfähigkeit inklusive der Überwachung durch Kennzahlen sowie der Umsetzung des optimalen Adaptioniskonzepts in der realen Fabrik. Die sAs stellt somit einen belastbaren Faktor für den zeitlichen und kostenmäßigen Aufwand dar und wird als Bewertung von Adaptionisdurchführungen herangezogen. Die Absicherung der Produktionsfähigkeit wird durch geeignete abzuleitende Kennzahlen durchgeführt.

### 3.7 Ableitung von Anforderungen

Aus den beschriebenen Grundlagen und den identifizierten Defiziten aus dem Stand der Technik und der Wissenschaft können abschließend Anforderungen an die zu entwickelnde Methode zur situationsbasierten Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit formuliert werden.

Die Methode muss in der Lage sein, Situationen zu adressieren, denen in einem kurzfristigen Zeitrahmen durch Adaption mit geeigneten Handlungsspielräumen begegnet werden kann. Dazu müssen Handlungsspielräume, die einen kurzfristigen Einfluss unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zulassen, identifiziert, definiert und integriert werden. Der Aufwand der Adaption, hinsichtlich der Zeit und den Kosten, wird durch die Summe der benötigten sAs ausgedrückt. Um diese zu verringern, muss den Anwendern der Methode ein Werkzeug zur Verfügung gestellt werden, mit dem der Ist-Zustand aufgenommen und permanent überwacht werden kann, um Abweichungen des wirtschaftlichen Betriebs eines Montagesystems zu erkennen und diesen effizient entgegenwirken zu

---

können. Die Abweichungen müssen dabei quantitativ ermittelbar sein, um den Zeitpunkt, ab dem ein Adaptionprozess angestoßen werden muss, bestimmen zu können. Die Absicherung der Produktionsfähigkeit muss durch geeignete Kennzahlen unterstützt werden, die eine belastbare Aussage hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit eines Montagesystems zulassen. Zudem dürfen diese sich nicht auf kurzfristige Zielerfüllungen konzentrieren, sondern müssen die gesamtsystemische Leistung erfassen und charakterisieren. Die Methode selbst ist dabei so zu gestalten, dass alle Planungsbeteiligten diese als intuitiv und praktikabel wahrnehmen. Dies bezieht zum einen die Fabrikplanung und zum anderen die Lean-Management-Abteilung mit ein. Zudem ist die Methode so zu gestalten, dass die Arbeitsplanung und der Werkzeug- und Vorrichtungsbau notwendige Informationen erhalten, da diese direkten Einfluss auf die Abläufe und die Strukturen der Montagesysteme haben.

Als Ergebnis soll die Methode die Wirkzusammenhänge und die Auswirkung der Adaption auf die Wirtschaftlichkeit des Montagesystems aufzeigen. Auf dieser Grundlage ist im Folgenden eine Methode zur situationsbasierten Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit zu konzipieren.



## 4 Methode zur situationsbasierten Adaption von Montagesystemen

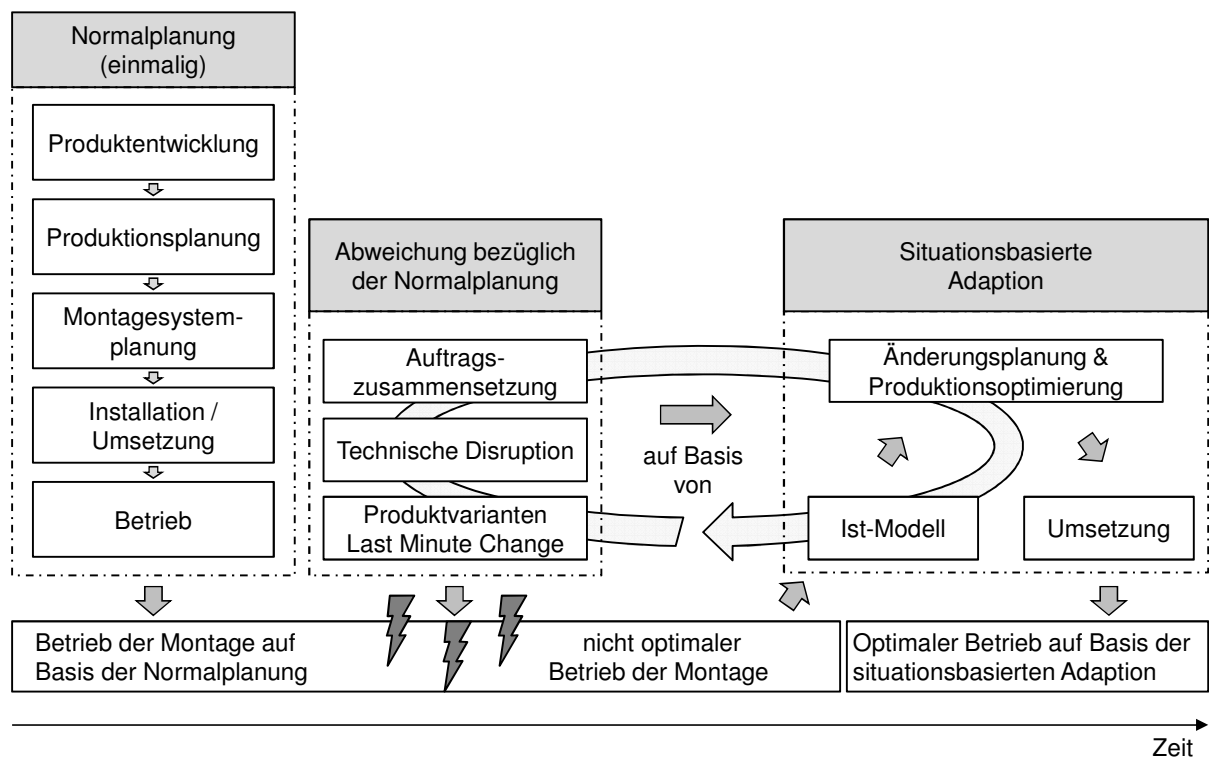
Auf Basis der identifizierten Defizite und abgeleiteten Anforderungen ist eine Methode zu konzipieren und so zu gestalten, dass sie im Rahmen einer kurzfristigen und operativen Planung unter Berücksichtigung aller erforderlichen Leistungseinheiten einer Montage kontinuierlich angewandt werden kann, um systematisch situationsbasierte Adaptionen eines Montagesystems durchführen und dessen Produktionsfähigkeit dabei sicherstellen zu können. Der Systemrahmen der Methode umfasst das gesamte Montagesystem und die Unternehmensbereiche, in denen kurzfristige Abweichungen auftreten, die sich auf den wirtschaftlichen Betrieb der Montage selbst auswirken.

Vor diesem Hintergrund wird nachfolgend eine Methode entwickelt. Diese ermöglicht einen kontinuierlichen Adaptionprozess und umfasst alle erforderlichen Bausteine von der situationsbasierten Abbildung eines Montagesystems mit relevanten Einflussgrößen bis zur Umsetzung eines Adaptionskonzepts für einen wirtschaftlichen Betrieb des Montagesystems. Der Systemrahmen ist dabei so gewählt, dass nicht nur Einzelprozesse, sondern das Montagesystem als Ganzes betrachtet werden kann. Dabei können variable Systemgrenzen bei der Analyse eines Montagesystems abgebildet werden. Folglich ist die Methode so ausgelegt, dass den jeweilig, auf die Montagesystemstruktur, einwirkenden Abweichungen, mit situationsbasierten Adaptionmöglichkeiten – Handlungsspielräumen – begegnet werden kann, um in einem zeitlich kurzfristigen Umsetzungszeitraum den Betriebspunkt in wirtschaftliche Bereiche verschieben zu können. Der Prozess der Adaption ist permanent durchzuführen. Um dies zu ermöglichen, wird ein regelkreisbasiertes System zum Auslösen des Adaptionprozesses verfolgt.

Die Methode umfasst, zur effizienten Durchführung einer situationsbasierten Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit grundsätzlich zwei Phasen (Abbildung 4.1) – die Analyse der Abweichungen bezüglich der Normalplanung und die anschließende situationsbasierte Adaption des Montagesystems. Ausgehend von einer in der Vergangenheit durchgeführten einmaligen Normalplanung, in der das Montagesystem optimal an die bestehenden Anforderungen ausgelegt wird, wirken kontinuierlich Abweichungen in Form von Auftragszusammensetzungen, Produktvarianten, Last Minute Changes und technischen Disruptionen auf das Montagesystem ein, was einen nicht wirtschaftlichen Betrieb nach sich zieht. Diese Abweichungen werden in der ersten Phase der Methode analysiert und in einem erstellten Ist-Modell der Montagesystemstruktur abgebildet.

In der zweiten Phase der Methode werden mit Hilfe des Ist-Modells und der identifizierten Abweichungen situationsbasierte Adaptionskonzepte entwickelt. Auf Basis der in der Methode enthalte-

nen situationsbasierten Handlungsspielräume erlangen diese Konzepte einen kurzfristigen Umsetzungscharakter.



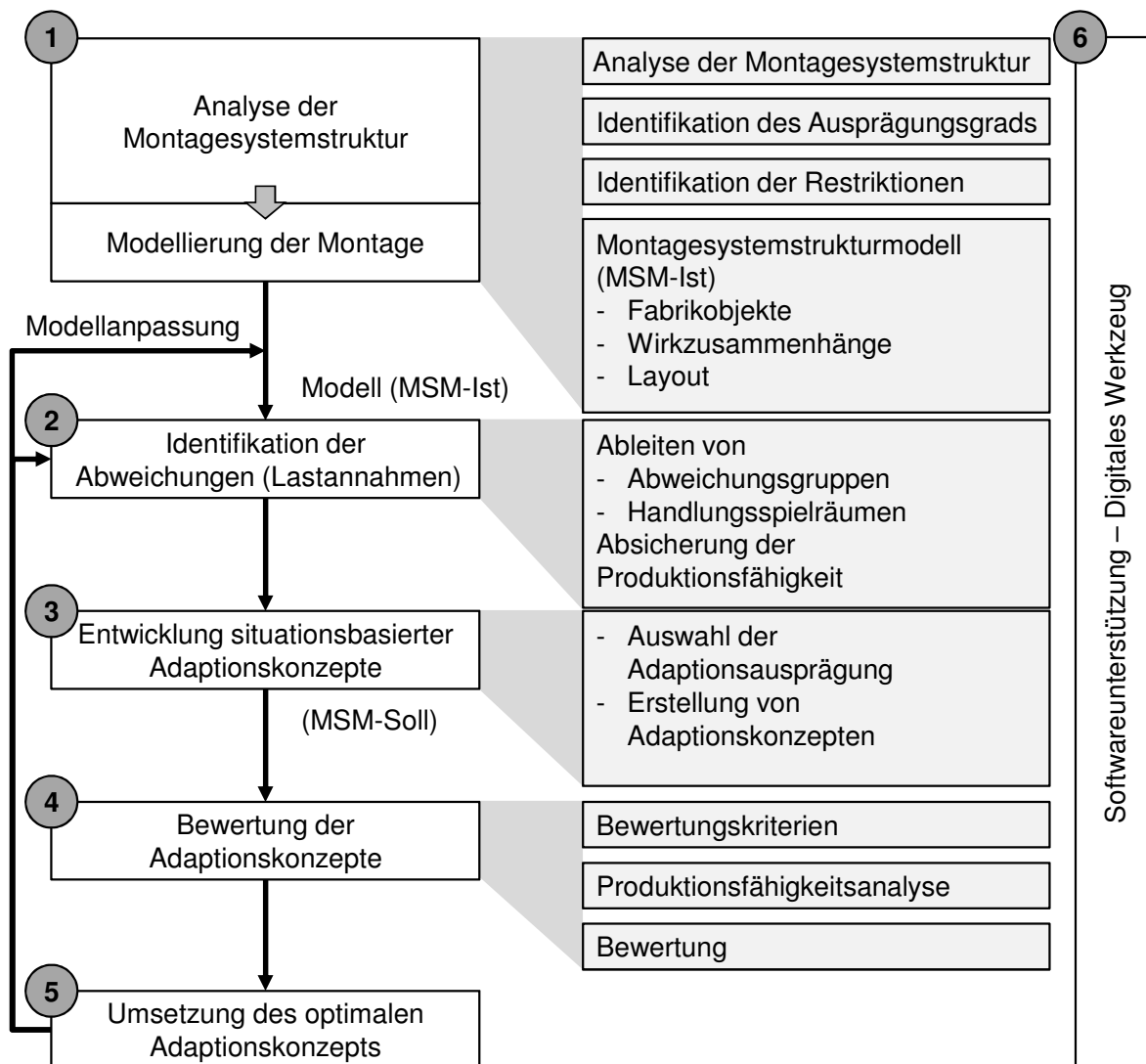
**Abbildung 4.1:** Gesamtkonzept der situationsbasierten Adaption

Dies ermöglicht eine situationsbasierte Reaktion auf die einwirkenden Abweichungen. Anschließend wird unter Berücksichtigung von Bewertungskriterien und der Absicherung der Produktionsfähigkeit ein Adaptionskonzept umgesetzt, das einen wirtschaftlichen Betrieb des Montagesystems sicherstellt.

Zur Gewährleistung der Anwendbarkeit der Methode, werden die Hauptphasen in überschaubare Schritte unterteilt. Dabei können einzelne Ergebnisse der Schritte wiederverwendet werden, um in einer weiteren Methodenanwendung den Aufwand deutlich zu reduzieren. Der detaillierte Aufbau der Methodenschritte ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

In dem ersten Schritt der Methode wird die Analyse der Montagesystemstruktur durchgeführt. Dieser Schritt wird benötigt, da vorangegangene Anpassungen der Montage und kontinuierliche Verbesserungsprozesse zu historisch gewachsenen Strukturen führen, die nicht immer ordnungsgemäß bzw. nachvollziehbar dokumentiert werden. Die Analyse der Montagesystemstruktur dient der darauf folgenden Abbildung des Montagesystems in einem Modell (MSM-Ist). Ausgehend von der Definition des Betrachtungsrahmens werden die Montagesegmente und Leistungseinheiten - direkte

und indirekte Bereiche der Produktion - analysiert. Die Montagesystemstruktur wird entlang der Prozesskette aufgenommen. Dabei werden relevante Fabrikobjekte, deren Parameter, Anordnung im Layout und Wirkbeziehungen sowie Restriktionen parametrisiert und modelliert. Zudem wird der aktuelle Adaptionitätsgrad ermittelt. Dieser drückt aus inwieweit das aktuelle Montagesystem Handlungsspielräume beinhaltet, die eine situationsbasiert Adaption ermöglichen. Die Analyse schließt mit einem umfassenden Modell der Montagesystemstruktur ab, welches die Ausgangssituation für eine situationsbasierte Adaption des Montagesystems darstellt.



**Abbildung 4.2:** Aufbau und Ablauf der Methode zur situationsbasierten Adaption

Im zweiten Schritt der Methode werden Abweichungen identifiziert, die hinsichtlich der einmaligen Normalplanung bzw. des wirtschaftlichen Betriebspunktes intern oder marktseitig auf das Montagesystem einwirken. Dabei wird die Auftragszusammensetzung aus der Produktionsprogrammplan-

nung, die individuellen Kundenwünsche, die zu Produktvarianten führen und die technischen Disruptionen, die interne Störungen oder Technologieänderungen abdecken, berücksichtigt. Den identifizierten Abweichungen werden situationsbasierte Handlungsspielräume in Form von kurzfristig durchführbaren Adaptionmöglichkeiten gegenübergestellt. Diese besitzen einen situationsbasierten Umsetzungszeitraum, der eine Schicht bis maximal einen Monat beträgt, um eine kurzfristige Reaktionsmöglichkeit sicherzustellen. Zudem wird eine Absicherung der Produktionsfähigkeit, basierend auf den geplanten Änderungen, durchgeführt. Dies wird durch das Auslesen des parametrisierten Ist-Modells erreicht, da somit spezifische leistungsorientierte Kennzahlen berechnet werden können.

Im dritten Schritt der Methode werden die Analyseergebnisse aus Schritt 1 sowie Schritt 2 zusammengeführt und situationsbasierte Adaptionkonzepte entwickelt. Um der Gefahr entgegenzuwirken, nicht funktionsfähige bzw. für eine Situation nicht effiziente Adaptionen zu erstellen, enthält die Methode unterschiedlich komplex ausgeprägte Adaptionausprägungsarten. Der Auswahlprozess einer Adaptionausprägungsart wird durch eine Vorgehensweise unterstützt, die auf dem identifizierten Adaptionfähigkeitsgrads des Montagesystems basiert. Mit Hilfe der identifizierten Handlungsspielräume werden Adaptionkonzepte erstellt und deren Auswirkungen auf das bisherige Montagesystem quantifiziert. Die Handlungsspielräume dienen als Regler, um den Betrieb des Montagesystems zu optimieren. Durch die Abhängigkeiten bzw. Ausschlüsse von Handlungsspielräumen können situationsbasierte Adaptionkonzepte (MSM-Soll) erstellt werden.

Diese werden im vierten Schritt der Methode systematisch bewertet. Zur Bewertung wird der Ausgangszustand der Montagesystemstruktur mit den erstellten Adaptionkonzepten quantitativ verglichen. Dazu werden neben den benötigten Aufwänden für eine Adaption Kennzahlen, die die Leistungsfähigkeit eines Montagesystems ausdrücken, eingesetzt. Somit ist neben der Berücksichtigung des Aufwands, der für ein Adaptionkonzept entsteht, die Absicherung der Produktionsfähigkeit gegeben.

Im letzten Schritt der Methode wird das optimale situationsbasierte Adaptionkonzept umgesetzt. Dabei wird nicht nur auf die Wirtschaftlichkeit der Adaptionkonzepts geachtet, sondern auch der zeitliche (sAs) sowie bei Bedarf der finanzielle Aufwand der Umrüstung betrachtet. Somit wird die wertschöpfende Komponente des Montagesystems nicht vernachlässigt. Wenn beispielsweise die langfristige Flexibilitätssteigerung des Montagesystems möglich und von der Strategie her gewünscht ist, um zukünftig effizienter Adaptionen durchführen zu können, kann ein Konzept einer kurzfristig zeitlich bzw. finanziell attraktiveren Lösung vorgezogen werden.

Um die effiziente Anwendung der Methode zu unterstützen wird ein EDV-Werkzeug konzipiert, das die Abbildung der Montagesystemstruktur in einem Modell, sowie die Entwicklung von situationsbasierten Adaptionskonzepten auf Basis der vorherrschenden Abweichungen und identifizierten Handlungsspielräume ermöglicht. Zudem wird die Bewertung der Adaptionskonzepte durch automatisierte Berechnung von leistungsbezogenen Kennzahlen unterstützt.

Damit kann folgendes Zwischenfazit gezogen werden. Mit der Durchführung einer Normalplanung, welche auf der Basis von zugesagten Stückzahlen, adäquaten Prozessen, passenden Technologien sowie abgeleiteten Kapazitäten beruht, kann eine ordnungsgemäße Planung und Inbetriebnahme des Montagesystems durchgeführt und dessen wirtschaftlicher Betrieb ermöglicht werden. Kurzfristig wirkende Abweichungen wirken jedoch stetig auf das Montagesystem ein und verursachen einen abweichenden Betriebspunkt, dessen Wirtschaftlichkeit nicht mehr als optimal angesehen werden kann. Diesen Abweichungen kann durch eine situationsbasierte Adaption entgegenge wirkt werden, welchem jedoch die Erstellung eines IST-Modells des Montagesystems voraussetzt. Mit Hilfe eines erstellten Modells wird eine Anpassung des Montagesystems ermöglicht, welche in einem weiteren Schritt umgesetzt werden kann.

Mit Hilfe des in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes, kann eine fünf-stufige Methode entwickelt werden. Diese ermöglicht die Umsetzung der inhärenten Gedanken des abgeleiteten Ansatzes. Innerhalb der Methode wird die Modellerstellung des Montagesystems systematisch und effizient unterstützt. Mit der Vorgehensweise zur Identifikation der Adaptionfähigkeit und der Nutzung der identifizierten Handlungsspielräume können Adaptionskonzepte erstellt werden. Diese müssen, um deren effiziente und zielgerichtete Umsetzbarkeit gewährleisten zu können, mit einem leistungsbezogenen und industrienahen Bewertungsschema priorisiert werden. Nach der Auswahl eines Adaptionskonzepts kann eine anschließende Umsetzung verfolgt werden. Um eine effiziente Umsetzung der Methode sicherstellen zu können, wird zudem ein digitales Werkzeug entwickelt, welches eine rasche Modellierung des Montagesystems und Adaptionskonzepterstellung ermöglicht.

Die Methode zur situationsbasierten Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit, deren Schritte grundsätzlich beschrieben wurden, wird im folgenden Kapitel detailliert erläutert und exemplarisch durchgeführt.

## **5 Detaillierte Darstellung der Methode zur situationsbasierten Adaption**

Die in Kapitel 4 grundsätzlich beschriebene Methode wird im Folgenden detailliert erläutert und exemplarisch durchgeführt. Damit wird die Vorgehensweise einer situationsbasierten Adaption eines Montagesystems der variantenreichen Serienfertigung auf Basis von vorherrschenden Abweichungen verdeutlicht.

### **5.1 Analyse des Montagesystems und Darstellung des Umfelds**

Die Durchführung situationsbasierter Veränderungsprozesse in laufenden Montagesystemen setzt Kenntnisse über die aktuelle Struktur und Abläufe voraus. Heutige Montagesysteme weisen jedoch komplexe und gewachsene Charakteristika auf. Ein aktuelles Modell dieser Struktur ist daher ein hilfreiches Instrument, um aktiv kontinuierliche Adaptionen durchführen zu können. Aufgrund des kurzfristigen Horizonts einer situationsbasierten Adaption müssen die Analyse und die Modellierung der Montagesystemstruktur effizient und systematisch unterstützt werden [Neumann et al. 2012].

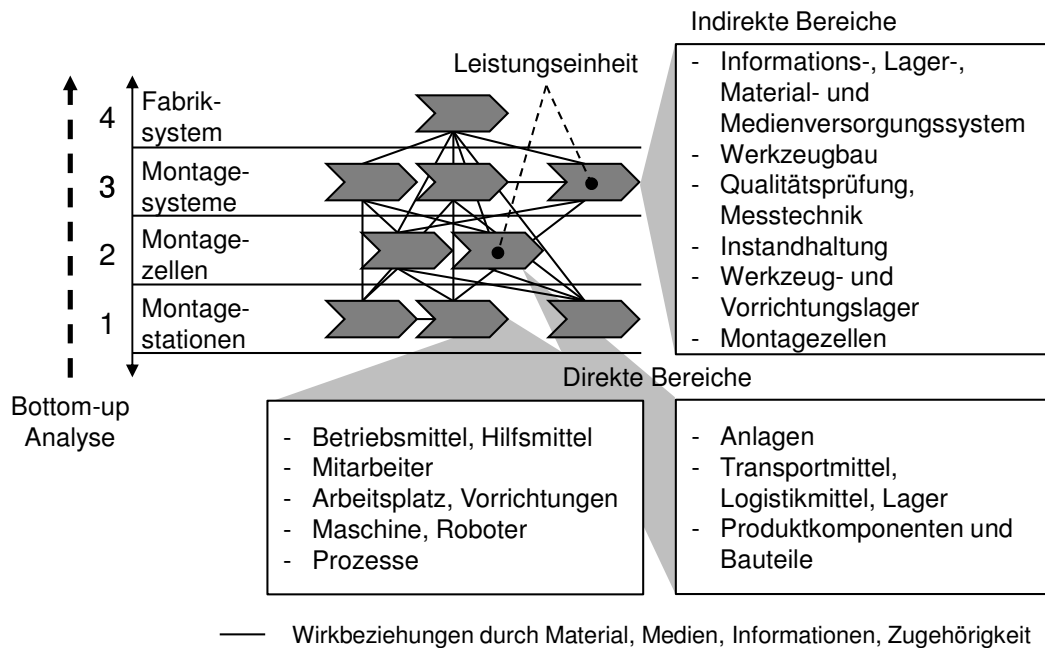
#### **5.1.1 Analyse der Montagesystemstruktur**

Die Abbildung des gesamten Montagesystems der variantenreichen Serienfertigung in einem Modell mit allen Elementen und Wirkbeziehungen ist weder möglich noch zweckmäßig, da der zeitliche Aufwand für diese Abbildung sehr schnell ansteigt und den zu erwartenden Nutzen meist übersteigt. Das Untersuchungsobjekt muss somit im Voraus strukturiert werden, um eine anwendungsorientierte Aufnahme gewährleisten zu können.

Dazu wird das Montagesystem in einem ersten Schritt, mit Hilfe der Systemtheorie, in Leistungseinheiten eingeteilt, die jeweils eine abgeschlossene Aufgabe besitzen und den Charakteristika einer Leistungseinheit, die in Abschnitt 2.7.1 und 3.1.1 erläutert wurden, entsprechen.

Diese Herangehensweise ermöglicht eine strukturierte Aufnahme der in die situationsbasierte Adaption involvierten Bereiche und Ressourcen. Abbildung 5.1 stellt die Strukturierung der Leistungseinheiten und die Einteilung der direkten sowie indirekten Bereiche zu den jeweiligen Skalen dar. Daraus ist abzuleiten, dass jedes Fabrikssystem mehrere Montagesysteme enthält, die wiederum aus Montagezellen und Montagestationen bestehen, in denen wertschöpfende Prozesse ausgeführt wer-

den. Die Leistungseinheiten sind skalenintern und -übergreifend durch komplexe Wirkbeziehungen miteinander verbunden, die sich durch Informations- und Güterauschbeziehungen definieren.



**Abbildung 5.1:** Definition der Montagesystemstruktur in einer variantenreichen Serienfertigung

Die Analyse für eine situationsbasierte Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit umfasst, ausgehend von den betroffenen Montagestationen, die Aufnahme der Montagezellen und den zugehörigen Montagesystemen. Zudem werden die vorherrschenden Wirkbeziehungen analysiert. Diese bilden die Ausgangsbasis für eine anschließende Modellierung. Dabei wird eine Bottom-up-Analyse angestrebt, da somit eine zielgerichtete Analyse, die für eine situationsbasierte Adaption wichtigen Bestandteile des Montagesystems, ermöglicht und die Gefahr der Aufnahme von nicht relevanten Elementen und Bereichen verringert wird.

Ausgehend von den direkten Bereichen, die die Ressourcen zur Ausführung der wertschöpfenden Prozesse und die dazu benötigten Hilfsprozesse beinhalten, werden die betreffenden indirekten Bereiche und deren Wirkbeziehungen aufgenommen.

Die direkten Bereiche der Skala Montagestationen umfassen Betriebsmittel, in Form von Maschinen und Arbeitsplätzen, an denen das Personal, mit Hilfe von Vorrichtungen, Werkzeugen, benötigten Bauteilen, Tertiärteilen sowie Hilfsstoffen, Fertig- bzw. Teilprodukte montieren und fertigstellen. Die Analyse erfolgt entlang der Prozesskette und beinhaltet zudem die Aufnahme des Layouts. Wirkbeziehungen innerhalb der Montagestationen werden in Form von Prozessabläufen, Prozessparametern und Organisationsstrukturen analysiert. Das Ergebnis dieses Analyseschrittes ist die

Grundstruktur der Montagezelle und deren Prozesse. Diese muss nun mit den für die Fertigstellung der Fertig- bzw. Teilprodukte benötigten Hilfsprozessen angereichert werden.

Diese Hilfsprozesse enthalten die Belieferung der Montagestationen mit Tertiärteilen und die dazu benötigten Transportmittel. Zudem werden die Belieferungslogik und der Abtransport von Teilprodukten bzw. Fertigprodukten aufgenommen. Das Ergebnis dieses Analyseschrittes ist die Identifikation der aktuellen Betriebsstruktur der betrachteten Montagezelle.

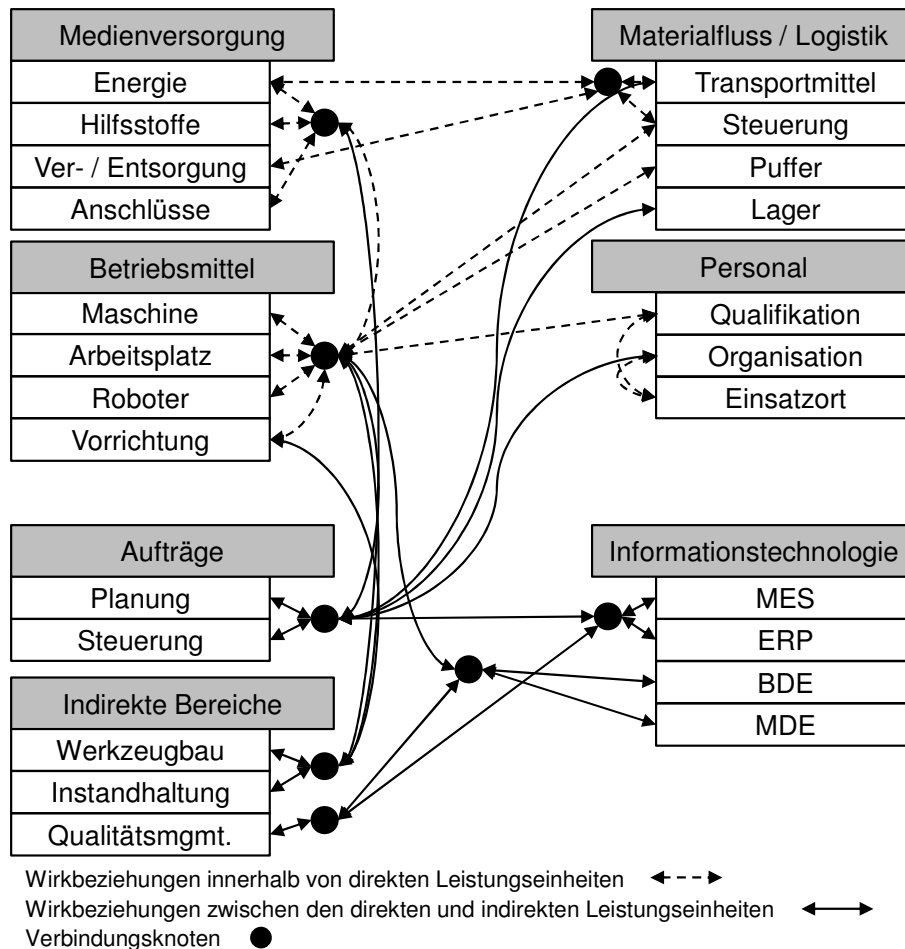
Anschließend werden die indirekten Bereiche, die die situationsbasierte Adaption betreffen, identifiziert und analysiert, um Wirkbeziehungen hinsichtlich der Steuerung und des Betriebs aufzunehmen. Indirekte Bereiche stellen die Material- und Medienversorgungssysteme, produktionsnahe Informationssysteme, das Lagerwesen, den Werkzeugbau, die Qualitätsprüfung, die Instandhaltung und den Werkzeug- und Vorrichtungsbau dar. Hinsichtlich der situationsbasierten Adaption haben diese Dienstleistungen Einfluss auf die Produktion, die durch Wirkbeziehungen ausgedrückt werden können. Erfordert beispielsweise eine Adaption eine Änderung an Vorrichtungen, da sich das Produkt auf einen „last minute change“ Wunsch des Kunden konstruktiv verändert hat, müssen dem Werkzeug- und Vorrichtungsbau Informationen hinsichtlich dieser Änderungen zur Verfügung gestellt werden, was wiederum den zeitlichen Aufwand für eine kurzfristige Adaption beeinflusst. Ein weiteres Beispiel für vorherrschende Wirkbeziehungen sind die vom Auftragsmanagement eingeplanten und –gesteuerten Aufträge. Das Auftreten von Eilaufträgen stört den geplanten Ablauf der Produktion, auf den kurzfristig, durch Rüsten oder Prozessänderungen in den Montagezellen reagiert werden muss. Die Aufnahme von vorherrschenden Wirkbeziehungen ist daher keine zu vernachlässigende Größe und wird im Folgenden detaillierter betrachtet.

Um ein strukturiertes Vorgehen zur Aufnahme der vorherrschenden Wirkbeziehungen im Betrachtungsrahmen gewährleisten zu können, werden diese von innen nach außen aufgenommen. Dieses Vorgehen gleicht der Bottom-up-Analyse zur Aufnahme der Bestandteile und Bereiche der Montagesystemstruktur. Jedoch werden zudem vorherrschende Restriktionen betrachtet, die bei der Analyse und anschließenden Modellierung des Montagesystems berücksichtigt werden müssen.

Die Analyse der Wirkbeziehungen konzentriert sich in einem ersten Schritt auf die internen Wirkbeziehungen der direkten Leistungseinheiten. Dabei werden die Reihenfolge der Prozessketten, die Steuerungsprinzipien und die Materialflüsse innerhalb dieser analysiert. Zudem werden Abhängigkeiten zwischen Fabrikobjekten und Restriktionen in Form von Anforderungen an Bodenbeschaffenheiten oder benötigten Qualifikationen betrachtet, die in den Leistungseinheiten vorherrschen. Darauffolgend werden ausgehend von den Wirkbeziehungen innerhalb der Leistungseinheiten die



Wirkbeziehungen zwischen den Leistungseinheiten in Form von Informations-, Steuerungs- und Materialflüssen untersucht. Analog zu der Analyse der Restriktionen innerhalb der direkten Leistungseinheiten werden Randbedingungen, beispielsweise in Form von Transportkonzepten, zwischen diesen analysiert. Abbildung 5.2 stellt die komplexe Vernetzung der Wirkbeziehungen in einem Montagesystem der variantenreichen Serienfertigung dar.



**Abbildung 5.2:** Wirkbeziehungen im Betrachtungsrahmen

Es ist zu erkennen, dass sich innerhalb der Montagezelle die Bereiche der Betriebsmittel, des Personals, der Medienversorgung und des Materialflusses gegenseitig beeinflussen. Zudem bestehen Abhängigkeiten zwischen den indirekten Bereichen, die sich durch das Auftragsmanagements, die vorhandene Informationstechnologie, den Werkzeugbau, die Instandhaltung und dem Qualitätsmanagement definieren. Hinsichtlich der Analyse von Wirkbeziehungen und Restriktionen ergeben sich daher folgende Zusammenhänge.

Innerhalb der Leistungseinheit Montagezelle sind Maschinen, Roboter und Arbeitsplätze im Einsatz, die spezifische Qualifikationen, Energie- und Medienversorgung sowie Vorrichtungen erfor-

dern. Beispielsweise kann eine Maschine spezifische infrastrukturelle Bedingungen in Form von pneumatischen Anschlüssen benötigen oder eine Vorrichtung bedingen, die nur mit einer geeigneten Transporteinheit bewegt werden kann. Ein Roboter, der aus sicherheitstechnischen Gründen eingezäunt werden muss und somit nicht beliebig positioniert werden kann, stellt ebenso eine starke Restriktion dar. Diese können eine situationsbasierte Adaption erheblich einschränken. Ein weiterer wesentlicher Faktor ist die Qualifikation des vorhandenen Personals, die situationsbasierten Adaptionmöglichkeiten hinsichtlich der Mitarbeiterflexibilität einschränken, da diese Arbeitsvorgänge nicht ausführen können bzw. dürfen.

In einem zweiten Schritt werden die Wirkbeziehungen zwischen den direkten und indirekten Leistungseinheiten analysiert. Diese zeichnen sich durch Material- und Informationsfluss- sowie Dienstleistungsbeziehungen aus. Beispielsweise kann eine Materialflussteuerung durch eine Kanbansteuerung charakterisiert sein, die sich nicht kurzfristig adaptieren lässt, da dies weitreichende Konsequenzen für den gesamten Beschaffungskreislauf bedeuten würde. Des Weiteren herrschen Wirkbeziehungen zwischen den Systemen zur Informationsbereitstellung und den Montagezellen vor. Innerhalb dieser Wirkbeziehungen werden die Auftragseinstellung, der Auftragsstatus und die Qualitätsrückmeldungen verwaltet. Die Adaptionfähigkeit dieser Systeme hängt stark von deren Modularisierung ab. Wenn proprietäre Systeme in das Montagesystem integriert sind, die spezifisch entwickelte Schnittstellen zur Verbindung der Systeme erfordern, schränkt das die kurzfristige Adaptionfähigkeit ein. Sind diese app-basiert und mit standardisierten Schnittstellen ausgerüstet, ist eine Adaption der Softwarelandschaft kurzfristiger durchführbar.

Produktionsnahe Dienstleistungen verursachen ebenfalls Wirkbeziehungen zwischen Montagezellen und indirekten Leistungseinheiten, welche durch die Instandhaltung und den Werkzeug- und Vorrichtungsbau charakterisiert sind.

Das Ergebnis der Analyse der Wirkbeziehungen enthält somit jegliche relevanten strukturellen Wirkbeziehungen des Betrachtungsrahmens, die durch vorangegangene Handlungen und Optimierungsvorgänge etabliert wurden. Diese werden mit dem Ergebnis der Analyse der Ist-Montagesystemstruktur als Basis für eine effiziente Abbildung des Ist-Montagesystems in einem Modell genutzt und können als Grundlage für nachfolgende situationsbasierte Adaptionvorhaben angewandt werden.

Neben der Analyse der Ist-Montagesystemstruktur und der vorherrschenden Wirkbeziehungen, muss herausgestellt werden, in welchem Maße das Montagesystem bereits adaptionsfähig ist. Dazu wird der Adaptionfähigkeitsgrad einer Montagesystemstruktur mit Hilfe eines morphologischen

Kastens bestimmt, um im weiteren Verlauf Adaptionen effizient konzipieren und auf die herausgestellten Einflussgrößen (Abschnitt 3.1.2) reagieren zu können.

Der morphologische Kasten selbst ist eine von ZWICKY entwickelte mehrdimensionale Methode zur systematischen und vorurteilslosen Beschreibung eines komplexen Problembereichs und der anschließenden Möglichkeit zur Lösungsableitung [Ritchey 2002]. In dieser Arbeit wird die Methode auf das sozio-technische System der Produktion angewandt. Innerhalb der hier angewandten Methode wird der Ansatz der „eindeutigen Konfiguration“ eines Systems verfolgt, was zum Ausdruck bringt, dass der Ausprägungsgrad eines Bestandteils des Montagesystems eindeutig bestimmt werden kann.

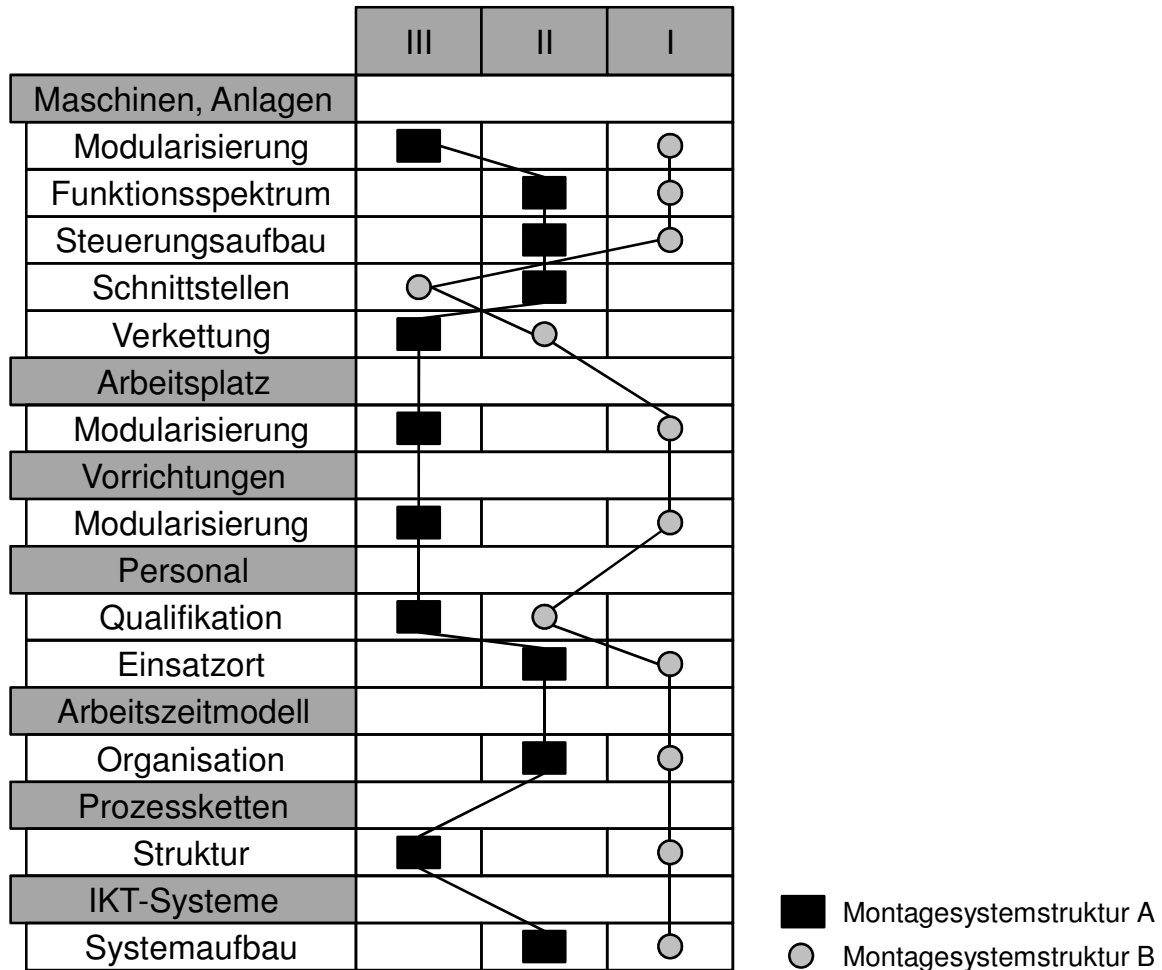
In einem ersten Schritt wird der Adaptionsfähigkeitsgrad eines Montagesystems in unterschiedliche Stufen eingeteilt (Abbildung 5.3). Der Grad der Adaptionsfähigkeit resultiert in diesem Zusammenhang aus der Beschaffenheit der Bestandteile eines Montagesystems. Hinsichtlich der Betriebsmittel hängt dieser von der Modularität, dem Funktionsspektrum, dem Steuerungsaufbau, der Schnittstellengestaltung und dem Verkettungsgrad ab. Zudem bestimmt die Struktur der Vorrichtungen die Möglichkeit zur kurzfristigen Adaption. Organisatorische Einflussfaktoren werden von der Struktur des vorhandenen Personals – Qualifikation und Einsatzort – sowie den angewandten Arbeitszeitmodellen beeinflusst. Hinsichtlich der Prozesse wird die Adaptionsfähigkeit von der Prozesskettenstruktur beeinflusst. Zudem spielt der Aufbau der Softwarelandschaft eine entscheidende Rolle inwieweit kurzfristig auf interne als auch externe Turbulenzen reagiert werden kann.

Der Adaptionsfähigkeitsgrad bezüglich der erläuterten Faktoren wird in die Stufen „III“, „II“ und „I“ untergliedert. Der Adaptionsfähigkeitsgrad „III“ umfasst überdurchschnittliche Voraussetzungen, die für eine effiziente situationsbasierte Adaption notwendig sind. Dieser Grad stellt eine ideale Voraussetzung zur situationsbasierten Adaption dar und gilt als richtungsweisend, um auch zukünftig die Wettbewerbsfähigkeit eines Montagesystems sicherstellen zu können. Die Stufe „II“ bündelt den Stand der Wissenschaft hinsichtlich der Struktur und der Organisation wandlungsfähiger Montagesystemstrukturen und stellt einen ökonomisch sinnvollen Umsetzungsgrad dar. Der Adaptionsfähigkeitsgrad „I“ fasst die heutige Situation des Stands der Technik in Unternehmen zusammen. Die Klassifizierung des Adaptionsfähigkeitsgrades einer Ist-Montagesystemstruktur ermöglicht die Abschätzung inwieweit und in welchen Bereichen auf Einflussfaktoren durch eine situationsbasierte Adaption reagiert werden kann. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.4 anhand von Beispielen dargestellt.

Betriebsmittel	Adaptionsfähigkeitsgrad		
	III	II	I
Maschinen, Anlagen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funktionale Module</li> <li>• Multifunktional</li> <li>• Selbstadaptive Steuerung</li> <li>• Standardisierte Schnittstellen</li> <li>• Rekonfigurierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modulbasiert</li> <li>• Multiwerkzeugbasiert</li> <li>• Offene Steuerung</li> <li>• Teilstandardisierte Schnittstellen</li> <li>• Lose verkettet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systembasiert</li> <li>• Spezifische Funktion</li> <li>• Starre Steuerung</li> <li>• Geschlossene Schnittstellen</li> <li>• Starr verkettet</li> </ul>
Arbeitsplatz	• Modulbasiert	• Multifunktional	• Starr
Vorrichtungen	• Modulbasiert	• Multifunktional	• Starr
Organisation	III	II	I
Personal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selbstlernende Organisation</li> <li>• Einsatzort über Kostenstellen hinweg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mehrfache Qualifikation</li> <li>• Flexibler Einsatzort</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anwendungsspezifische Qualifikation</li> <li>• Starrer Einsatzort</li> </ul>
Arbeitszeitmodell	• selbstorganisiert	• Skalierbarer Personalbedarf	• Schichtmodell
Prozesse	III	II	I
Prozessketten	• Rekonfigurierbare funktionsbasierte Prozesskette	• Flexible Prozessketten	• Starre Prozessketten
Software	III	II	I
IKT-Systeme	• Rekonfigurierbare app-basierte Software	• Modulbasierte Softwaresysteme	• Systemlandschaft

**Abbildung 5.3:** Ausprägungsgrad der Adaptionsfähigkeit in einem Montagesystem

Die Montagesystemstruktur A zeigt ein hohes Potenzial schon vorhandener Adaptionsfähigkeit auf. Dies drückt sich durch die Einteilung des Adaptionsfähigkeitsgrad in die Stufen II bzw. III aus. Diese Tatsache lässt die Schlussfolgerung zu, dass den in Abschnitt 3.1.2 beschriebenen Einflussgrößen mit einer weiten Maßnahmenbandbreite begegnet werden kann. Die Montagesystemstruktur B hingegen besitzt die Ausprägung der Adaptionsfähigkeit Stufe I. Dies schränkt die Maßnahmenbandbreite für eine situationsbasierte Adaption stark ein, da essenzielle Mechanismen der Bestandteile des Montagesystems nicht für eine situationsbasierte Anpassung ausgelegt sind. Die Identifikation des Adaptionsfähigkeitsgrads einer Montagesystemstruktur mit Hilfe der strukturierten Vorgehensweise des morphologischen Kastens ermöglicht es, Maßnahmen effizient zu identifizieren, mit denen situationsbasiert auf Abweichungen reagiert werden kann. Gleichzeitig wird das Risiko verringert, Maßnahmen zu verfolgen, die innerhalb der vorhandenen Montagesystemstruktur nicht greifen und somit zu Zeit- und Qualitätsverlusten führen würden.

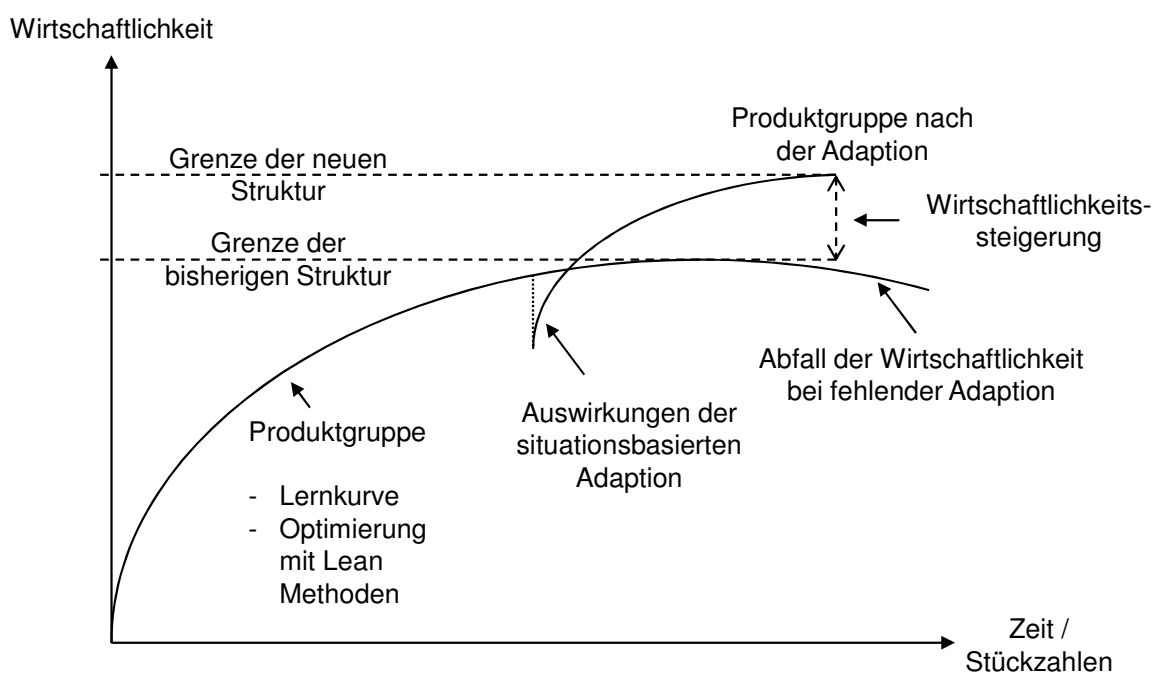


**Abbildung 5.4:** Klassifizierung der Adaptionfähigkeit in einem Montagesystem mit Hilfe des morphologischen Kastens

### 5.1.2 Potenzial der Wirtschaftlichkeitssteigerung

Fehlende Anpassungen der Montagesystemstruktur führen unweigerlich zu einem Abfall der Wirtschaftlichkeit. Diese Erkenntnis hat sich spätestens mit dem Erfolg des „Toyota Produktionssystems“ durchgesetzt. Wie in Abschnitt 2.7.2 und 2.7.3 erläutert, werden Montagesysteme regelmäßig mit Hilfe der Lean Methoden analysiert und optimiert. Zudem werden größere Anpassungen im Voraus digital abgebildet, um das Risiko einer Fehlplanung zu verringern und einen effizienten Anlauf zu ermöglichen. Diese Methoden betrachten die mittel- bis langfristigen Leistungsverluste, konzentrieren sich jedoch nicht auf die situationsbasierten Abweichungen hinsichtlich der Normalplanung, die ebenso einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit bzw. Wirtschaftlichkeit eines Montagesystems haben.

Jede Anpassung der Struktur oder der Organisation eines Montagesystems geht jedoch mit einem temporären Leistungsabfall und somit einem Wirtschaftlichkeitsabfall einher. Dieser bedingt sich aus dem Stillstand der Maschinen und Arbeitsplätze sowie durch Rüstvorgänge oder der benötigten Belieferung mit neuen Tertiärteilen bei Änderung der Auftragsabwicklung. Bei aufwendigeren Änderungen wie der Substitution einer Technologie oder der Integration einer neuen Produktvariante bzw. einer Produktänderung muss zudem die Steuerung der Maschinen und Anlagen angepasst werden. Demgegenüber steht jedoch eine Wirtschaftlichkeitssteigerung nach einer Adaption durch die Anpassung der Struktur des Montagesystems hinsichtlich der Kapazität, der Technologie, der Prozesse oder der Organisation. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.5 dargestellt.



**Abbildung 5.5:** Potentielle Wirtschaftlichkeitssteigerung nach der situationsbasierten Adaption (qualitativ)

Dargestellt ist der Verlauf der Montage einer Produktgruppe. Die Wirtschaftlichkeit steigt stetig an, was mit den Effekten der Lernkurve und den durchgeführten Optimierungen hinsichtlich der Lean-Methoden zusammenhängt. Der Effekt der Lernkurve wurde von dem Amerikaner WRIGHT formuliert und besagt, dass die Zeit zur Herstellung eines Produktes mit der Zunahme der hergestellten Stückzahlen sinkt [Wright 1936]. HENDERSON erweiterte diese Definition und beschrieb eine Erfahrungskurve, die eine Reduzierung des Herstellungsaufwands bei Verdoppelung der hergestellten Stückzahl hinsichtlich Qualität, Kosten und Zeit beschreibt [Henderson und Gälweiler 1984].

Die Wirtschaftlichkeit der Produktgruppe nähert sich jedoch unaufhaltsam einer Grenze an, die durch die bisherige Struktur des Montagesystems gegeben ist. Kurzfristige Einflüsse, wie die Auf-

tragszusammensetzung, die Integration neuer Produktvarianten bzw. Last minute Changes sowie technische Disruptionen führen jedoch zu einer Abnahme der Wirtschaftlichkeit. Diesen muss mit situationsbasierten Adaptionen begegnet werden, nicht nur, um das aktuelle Wirtschaftlichkeitsniveau halten zu können, sondern dieses, wie dargestellt, in optimale Bereiche zu verschieben.

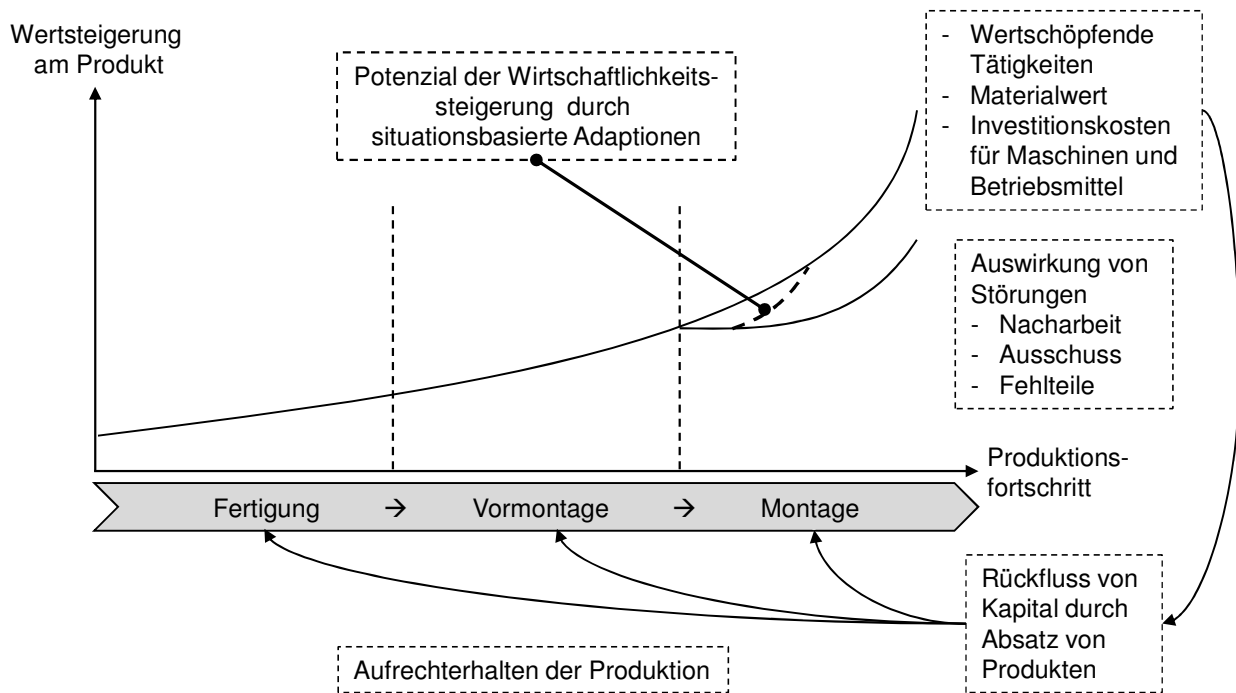
Die Adaption selbst verringert, aus den zuvor erläuterten Gründen, kurzzeitig die Wirtschaftlichkeit und damit die Leistungsfähigkeit des Montagesystems. Jedoch ermöglicht diese nachfolgend einen wirtschaftlicheren Betrieb der Montage an sich. Zur Bewertung der Auswirkungen, die eine situationsbasierte Adaption hervorruft, werden die Stunden der Planung und der Umsetzung herangezogen. Diese sind mit Hilfe der in Unternehmen vorhandenen Stundensätze für Mitarbeiter und Tätigkeiten nachvollziehbar und somit auch in Kosten darstellbar. Zudem kann die Dauer für eine situationsbasierte Adaption beschrieben werden. Historiendaten aus der Instandhaltung und dem Werkzeug- und Vorrichtungsbau können Zeiten für bestimmte Anpassungen bzw. Umstrukturierungen ermittelt werden. Ist der zeitliche Aufwand dieser zu hoch, kann eine Anpassung der Struktur nicht mehr als situationsbasiert gewertet werden und fällt in den mittel- bis langfristigen Bereich der Montageplanung und -optimierung.

Eine entscheidende Feststellung ist zudem, dass eine situationsbasierte Adaption nicht nur der Leistungssteigerung dient, sondern auch der Sicherstellung des wirtschaftlichen Betriebs eines Montagesystems. Dies beinhaltet beispielsweise neben Kapazitätserweiterungen auch die Verringerung der Kapazität oder die Anpassung der Personalstruktur an gegebene Auftragsvolumen.

Situationsbasierte Adaptionen zielen auf eine permanente Anpassung der Montagesystemstruktur ab. Diese Tatsache führt unweigerlich zu Leistungsverlusten und somit zu Wirtschaftlichkeitseinbußen. Daher muss der zeitliche Aufwand der Adaptionen so gewählt werden, dass die Kosten für eine Anpassung den wirtschaftlichen Zugewinn nicht zunichtemachen.

Ein weiterer Vorteil der situationsbasierten Adaption des Montagesystems ist das Aufrechterhalten der nachfolgenden Produktion. Diese ergibt sich aus der ausreichenden Finanzierung der Wertschöpfungskette. Bleibt diese aus kann es trotz vorhandener Aufträge im Unternehmen zu einem Erliegen der Produktion kommen.

Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass die Maschinen und Anlagen sowie Arbeitsplätze Investitionen erfordern, welche instandgehalten bzw. über einen gewissen Zeitraum abgeschrieben werden. Zudem müssen die wertschöpfenden Tätigkeiten der Mitarbeiter finanziert werden, bis die Produkte am Ende der Wertschöpfungskette ausgeliefert werden.



**Abbildung 5.6:** Aufrechterhalten der Produktion durch situationsbasierte Adaption

Ist dies geschehen fließt Kapital in das Unternehmen, mit dem wiederum die nachfolgende Produktion finanziert werden kann. Dieser Zusammenhang ist, entlang der Wertschöpfungskette, in Abbildung 5.6 dargestellt.

Zudem steigt der Wert der Produkte entlang der Wertschöpfungskette, was eine Beeinträchtigung eines Produktes durch Störungen oder Nacharbeit am Ende dieser stärker in Gewicht fallen lässt.

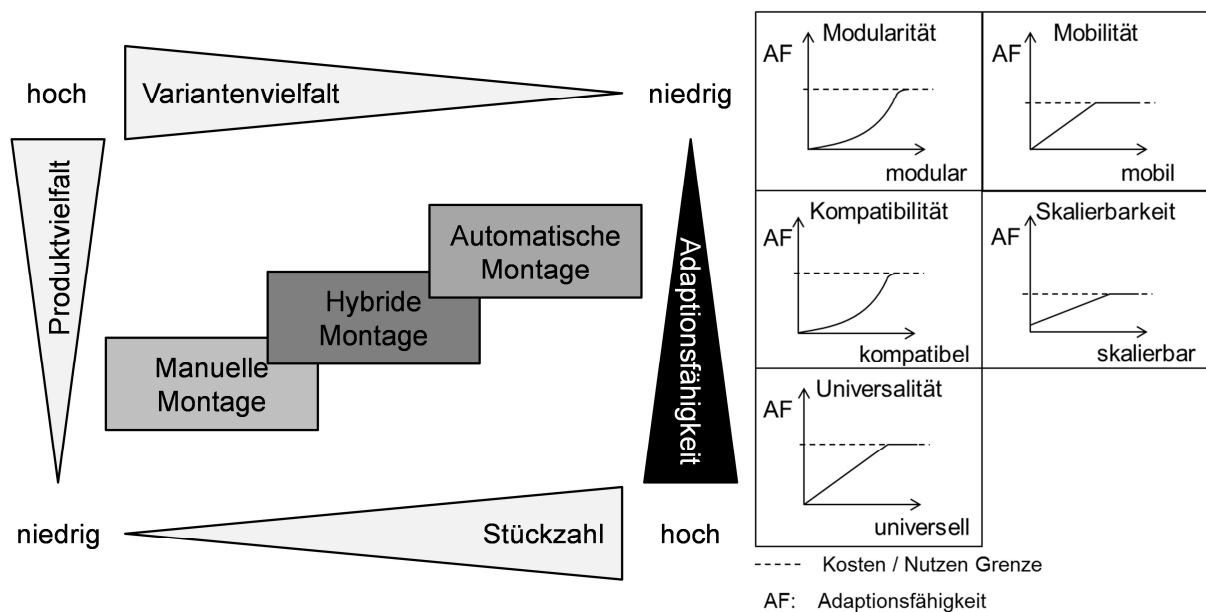
Mit Hilfe der Methode zur situationsbasierten Adaption kann dem Verlust, den eine Störung (Nacharbeit, Fehlteile, Ausschuss) hervorruft, effizient entgegengewirkt werden. Somit wird der Rückfluss von Kapital, durch die schnellere Bearbeitung der Aufträge, beschleunigt, was wiederum die Bearbeitung von Aufträgen, welche sich am Anfang der Wertschöpfungskette befinden, ermöglicht und somit den Bestand des Unternehmens sichert.

### 5.1.3 Adaptionenrestriktionen in variantenreichen Serienmontagen

Die situationsbasierten Adaptionmöglichkeiten werden durch die systemimmanente Wandlungsfähigkeit eines Montagesystems beeinflusst. Dieser Zusammenhang wurde in den vorherigen Abschnitten durch den Begriff des Adaptionfähigkeitsgrads erläutert, bedarf jedoch einer detaillierten Betrachtung, um eine strukturierte Vorgehensweise bei einer situationsbasierten Adaption gewährleisten zu können. Nur so ist gewährleistet, dass geeignete Maßnahmen aus der Klassifizierung des Adaptionfähigkeitsgrads des aktuellen Montagesystems abgeleitet werden können.



Innerhalb einer variantenreichen Serienmontage sind meist hybride Montagesysteme vertreten in Form einer Reihen- oder Fließmontage. Diese zeichnen sich durch die Kombination von manuellen und automatisierten Vorgängen aus, die zur Erzeugung der Wertschöpfung genutzt werden. Daher sind solche System durch hohe Stückzahlen, eine damit einhergehende hohe Produktivität und eine mittlere bis niedrige Variantenvielfalt geprägt [Westkämper 2006b]. Die Adaptionfähigkeit eines variantenreichen Montagesystems ist dabei stark von der spezifischen Ausprägung des Systems abhängig (Abbildung 5.7).



**Abbildung 5.7:** Restriktionen hinsichtlich der Adaptionfähigkeit von Montagesystemstrukturen

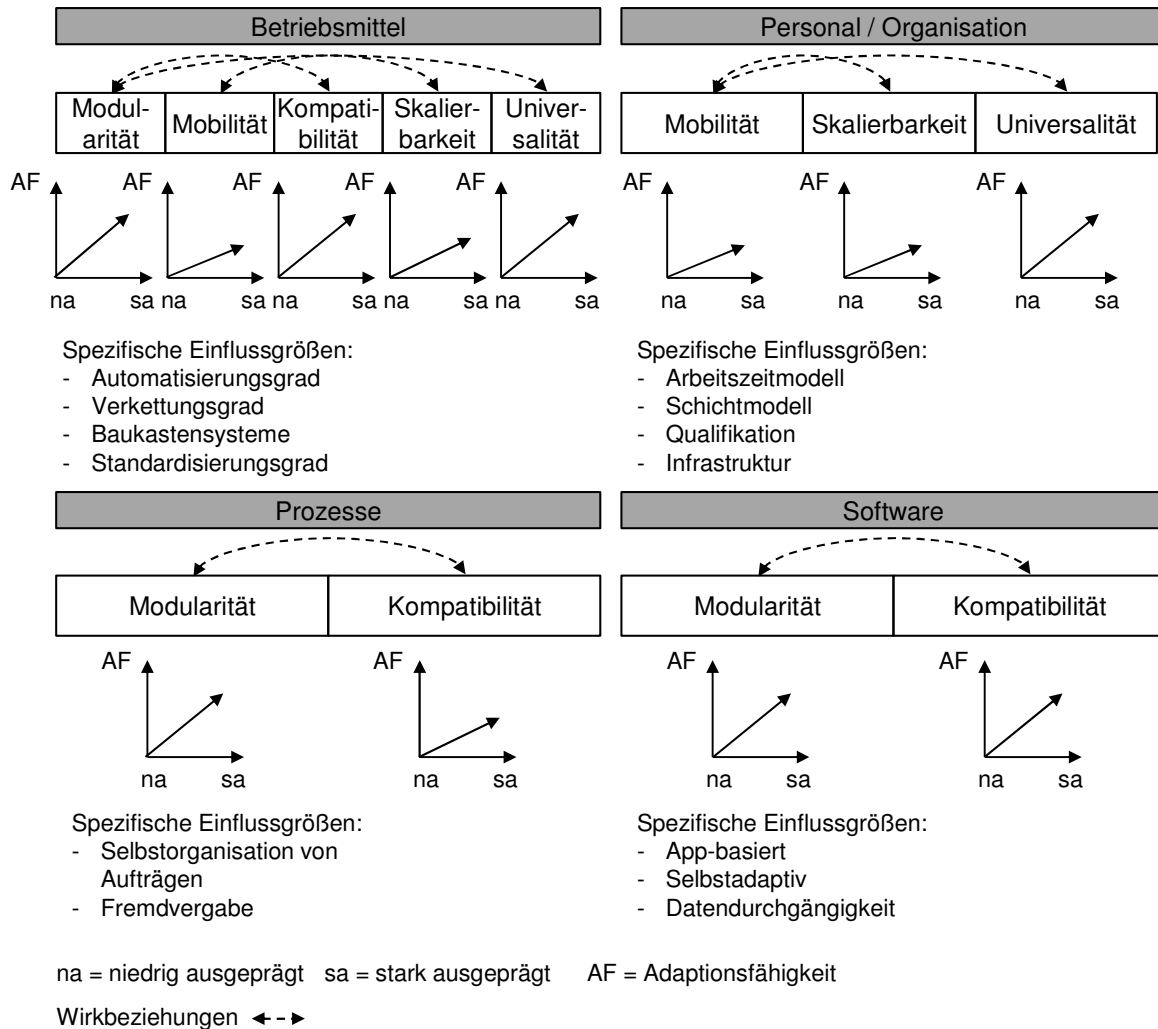
Je nach Ausprägung des Montagesystems – manuell, hybrid, automatisch – steigt bzw. sinkt die Adaptionfähigkeit. Diese wird in diesem Kontext durch die Ausprägung der systemimmanenten Wandlungsfähigkeit beeinflusst, die sich wiederum durch die Umsetzung der Wandlungsbefähiger Modularität, Mobilität, Kompatibilität, Skalierbarkeit und Universalität in den betrachteten Montagesystem ausdrücken lässt. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass mit steigender Wandlungsfähigkeit eines Montagesystems mehr situationsbasierte Adaptionmöglichkeiten zu Verfügung stehen um auf Abweichungen, hinsichtlich des wirtschaftlichen Betriebs reagieren zu können. Ist ein Montagesystem jedoch weniger wandlungsfähig ausgerichtet, das heißt das der Adaptionfähigkeitsgrad überwiegend der Stufe I zugeordnet werden kann, ist die Bandbreite der Maßnahmen hinsichtlich einer situationsbasierten Reaktion eingeschränkt. Die Wandlungsbefähiger wirken sich jedoch unterschiedlich auf die Bestandteile eines Montagesystems aus und enthalten Wirkbeziehungen untereinander (Abbildung 5.8).

Die Adaptionfähigkeit der Betriebsmittel wird von allen Wandlungsbefähigern beeinflusst. Zum einen wurden diese für die Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikelementen entwickelt (Abschnitt 2.7.1). Zum anderen stehen diese im direkten Zusammenhang mit der kurzfristigen Anpassung, da sich das Potenzial der Adaptionfähigkeit aus der Wandlungsfähigkeit ableitet und somit wandlungsfähige Strukturen voraussetzt (Abschnitt 2.2). Spezifische Einflussgrößen hinsichtlich der Adaptionsrestriktion von Betriebsmittel sind beispielsweise der Automatisierungs-, Standardisierungs- und Verkettungsgrad (Mobilität, Universalität, Skalierbarkeit, Kompatibilität) sowie das Maß, in dem eine Maschine oder ein Arbeitsplatz baukastensystembasiert (Modularität) ist. Zudem hängen die Wandlungsbefähiger der Betriebsmittel voneinander ab. Wenn beispielsweise eine hohe Modularität der Betriebsmittel gewünscht ist, müssen die Einzelkomponenten die Wandlungsbefähiger Universalität und Kompatibilität systemimmanent bereitstellen. Ist eine Skalierbarkeit des Montagesystems erforderlich, sollten die Betriebsmittel mobil sein, da so ein aufwandsarmer Austausch ermöglicht werden kann.

Die Adaptionfähigkeit des Personals bzw. der Organisation wird durch die Wandlungsbefähiger Mobilität, Skalierbarkeit und Universalität beeinflusst. Restriktionen hinsichtlich der situationsbasierten Reaktion auf Turbulenzen sind beispielsweise durch die Organisation der Montage hinsichtlich der Arbeitszeitmodelle und der Schichtmodelle charakterisierbar (Skalierbarkeit). Personelle Restriktionen drücken sich durch die Qualifikation und die Fähigkeiten aus (Universalität), was sich wiederum auf den potenziellen Einsatzort auswirkt (Mobilität). Dabei hat die Universalität des Personals bedeutenden Einfluss auf die Mobilität. Die Skalierbarkeit der Organisation hängt ebenfalls stark von der Mobilität ab.

Hinsichtlich der Adaptionfähigkeit der Prozesse und der Software nehmen die Wandlungsbefähiger Modularität und Kompatibilität einen hohen Stellenwert ein. Beispielhafte Einflussgrößen stellen die Organisation der Aufträge, die Eigen- und Fremdmontage, der Aufbau der Systemlandschaft und die Datendurchgängigkeit dar. Hinsichtlich der Wirkbeziehungen hängt die Modularität stark von der Kompatibilität ab, da diese die Vernetzungsfähigkeit der Prozesse bzw. der Softwarekomponenten bestimmt.

Mit Hilfe dieses Schritts kann das Adaptionspotenzial einer vorhandenen Ist-Montagesystemstruktur durch die Berücksichtigung vorhandener Restriktionen identifiziert werden. Dies ermöglicht im Folgenden eine effiziente Adaption des Montagesystems, da somit eine zielführende Adaptionskonzepterstellung durchgeführt werden kann.



**Abbildung 5.8:** Qualitativer Einfluss auf die situationsbasierte Adaptionfähigkeit von Bestandteilen eines Montagesystems

## 5.2 Identifikation vorherrschender Abweichungen

Mit der Kenntnis über den Ist-Zustand des Montagesystems ist eine geeignete Grundlage zur Reaktion auf situationsbasierte Abweichungen gelegt. Zudem ist durch die Identifikation des Adaptionfähigkeitsgrads die Reichweite der potenziellen Eingriffsmaßnahmen definiert. Dies schließt den ersten Schritt der Methode „Analyse der Montagesystemstruktur“ ab. Im zweiten Schritt der Methode „Identifikation der Abweichungen“ werden den identifizierten Abweichungen Handlungsspielräume gegenübergestellt, mit denen in einem kurzfristigen Rahmen reagiert werden kann. Zudem wird das Montagesystem mit Kennzahlen charakterisiert, um eine Produktionsfähigkeitsanalyse nach einer situationsbasierten Adaption durchführen zu können. Diese Vorgehensweisen werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

### 5.2.1 Situationsbasierte Änderungsdynamik

Turbulenzen wirken aus allen direkten und indirekten Bereichen auf Montagesysteme in der Regel komprimiert ein. Zudem besitzen diese Turbulenzen komplexe Wirkbeziehungen untereinander, die eine zielgerichtete Reaktion erschweren, da nicht immer ersichtlich ist, was eine Störung bzw. Abweichung vom wirtschaftlichen Betrieb hervorruft. Zur eindeutigen Identifizierung von Abweichungen, die eine neue Situation hervorrufen, in der eine Adaption der Montagesystemstruktur bzw. -organisation von Nöten ist, ist eine Gruppierung von Abweichungsquellen zwingend erforderlich. Den die Gruppierung ermöglicht zu einem, eine zielgerichtete Induktion von Maßnahmen, da die Art und die Quelle der Abweichungen eindeutig spezifiziert werden können und zum anderen ermöglicht es die Nachvollziehbarkeit von komplexen Wirkbeziehungen zwischen den identifizierten Abweichungsquellen.

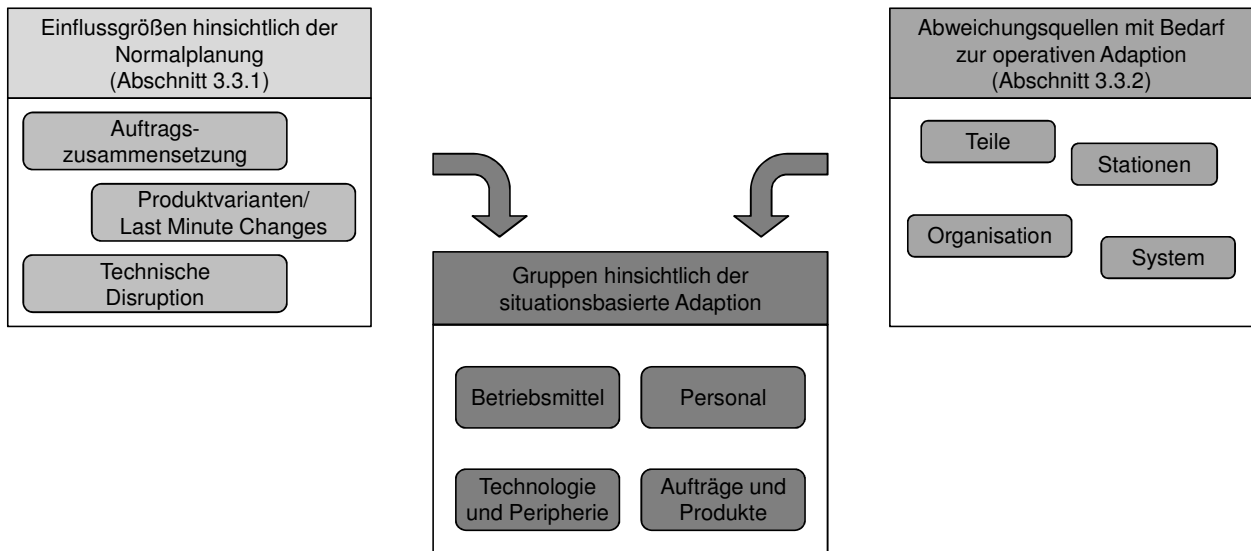
Um eine strukturierte Gruppierung von Abweichungen zu ermöglichen, werden die auf die Montageplanung wirkenden, in Abschnitt 3.1.2 identifizierten Einflussgrößen hinsichtlich der Normalplanung und die in Abschnitt 3.3.2 identifizieren Abweichungen, die spezifische Situationen zur Adaption bedingen, zusammengeführt (Abbildung 5.9).

Diese sind die Einflüsse hinsichtlich der Gruppen der Betriebsmittel, des Personals, der Produkte und Aufträge sowie der Technologie und Peripherie (Abbildung 5.10). Durch die Strukturierung ist sichergestellt, dass sowohl die organisatorischen als auch die technischen Einflussfaktoren berücksichtigt und diese in definierten Gruppen darstellbar sind, die mit dem Gedanken des Stuttgarter Unternehmensmodells übereinstimmen.

In der Gruppe der „Betriebsmittel“ sind alle Charakteristika von Maschinen, Anlagen und Arbeitsplätzen sowie Werkzeugen und Vorrichtungen enthalten, die eine Abweichung vom wirtschaftlichen Betrieb betreffen. Innerhalb dieser Gruppe können Abweichungsquellen wie beispielsweise eine nicht zur Verfügung gestellte Funktion einer Vorrichtung bzw. eines Werkzeugs oder ein fehlender Produktionsprozess für die Fertigstellung eines Produktes, auftreten. Zudem umfasst diese Gruppe den Ausfall bzw. die Störung von Maschinen oder Anlagen, die den Wertschöpfungsprozess beeinträchtigen und somit Situationen für eine kurzfristige Adaption hervorrufen. Eine weitere Abweichungsquelle kann die zur Verfügung gestellte geplante Bearbeitungszeit sein, die nicht ausreicht, um eine gewisse Menge an Produkten in der benötigten Zeit herzustellen.

Die Gruppe Personal beinhaltet jegliches Abweichungspotenzial hinsichtlich der Mitarbeiter und deren Organisation. Dies wird anhand benötigter Kapazitäten vorausgeplant, welche auf freigegebenen Produktionsprogrammen basieren. Da Turbulenzen permanent auf die Montage eines Unter-

nehmens einwirken, verlieren die freigegebenen Produktionsprogramme und damit zusammenhängenden Kapazitätsplanungen an Aktualität. Dies führt zu Über- bzw. Unterdeckung an Personal. Zudem wirken sich nicht planbare Einflüsse wie Krankheit oder Arbeitsunfälle auf die Personalkapazität aus. Diesen muss mit situationsbasierten Adaptionen entgegengewirkt werden

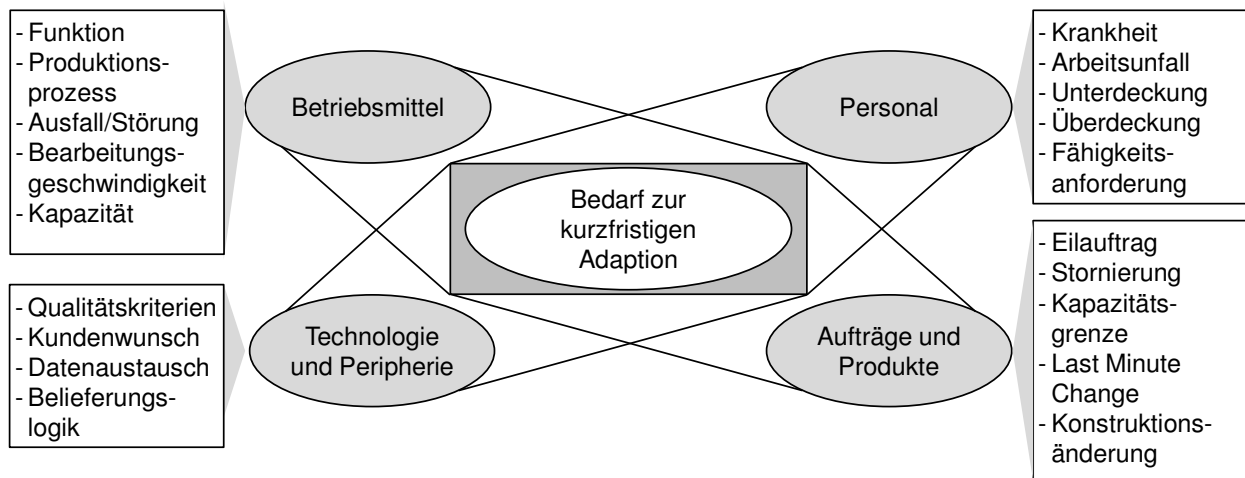


**Abbildung 5.9:** Ableitung der Gruppen hinsichtlich der Abweichungen für eine situationsbasierte Adaption

Die Gruppe Technologie und Peripherie vereint Informations- und Materialflusssysteme sowie die vorhandenen fertigungsnahe und –steuernde Softwaresysteme. Dies begünstigt eine Identifizierung der Abweichungen, die in dieser Gruppe entstehen und Maßnahmen zur Gegensteuerung. Abweichungen hinsichtlich der Qualitätsrückmeldung sowie der Informations- und Materialbereitstellung werden somit in dieser Gruppe vereint. Kurzfristige Kundenwünsche sind ebenfalls in diese Gruppe einzuordnen, da Informationen über die fertigungsnahen Softwaresysteme eingesteuert werden.

Eine weitere Gruppe umfasst jegliche Abweichungen hinsichtlich der Auftragsabwicklung und der Produktänderungen. Dies umfasst beispielsweise Eilaufträge oder Stornierungen sowie Last Minute Changes am Produkt, die sich in der Auftragsabwicklung widerspiegeln. Neben den Abweichungen innerhalb der definierten Gruppen, hängen diese Gruppen durch Wirkbeziehungen voneinander ab. Durch Eilaufträge bzw. Stornierungen von Aufträgen treten Abweichungsquellen auf, die sich wiederum auf die Personalkapazität (Über- bzw. Unterdeckung) und die Betriebsmittel (Funktionen) auswirken. Zudem wirken Abweichungen hinsichtlich der Produkte auf das Montagesystem ein. Dies lässt sich durch kundenseitige Last Minute Changes am Produkt oder durch konstruktive Än-

derungen beschreiben. Beide Änderungsquellen haben damit Einfluss auf die Wahl der Betriebsmittel (Werkzeuge, Vorrichtungen, Funktionen) und des Personals (Fähigkeiten).



**Abbildung 5.10:** Situationen die einen Bedarf zur kurzfristigen Adaption hervorrufen

Die Gruppe der Technologie ist stark mit der Gruppe Betriebsmittel verbunden, da in dieser Gruppe kundenseitige Abweichungen auftreten, die sich durch bestimmte Fertigungstechnologien, die am Produkt zum Einsatz kommen oder nicht zum Einsatz kommen sollen, ausdrücken. Zudem werden aus dieser Gruppe Qualitätsverfehlungen rückgemeldet, die Auswirkungen auf das Personal in Form Aufwand für Nacharbeit haben.

Den erläuterten Abweichungen muss konsequent begegnet werden, um einen wirtschaftlichen Betrieb eines Montagesystems gewährleisten zu können. Innerhalb der Methode wird diesen mit situationsbasierten Handlungsspielräumen begegnet, die eine kurzfristige Reaktion, im Kontext der in dieser Arbeit definierten Zeithorizonte, auf die vorherrschende Situation ermöglicht.

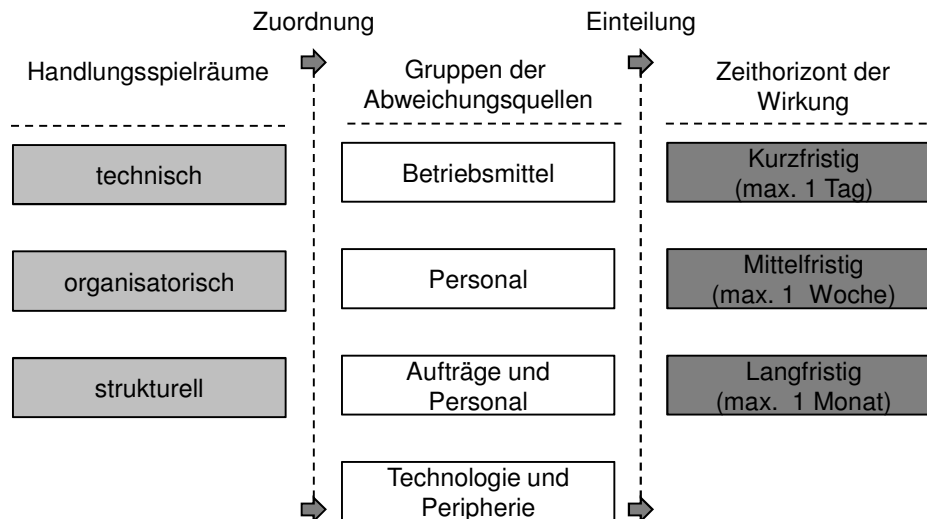
### 5.2.2 Situationsbasierte Handlungsspielräume zur Adaption

Mit Hilfe des erstellten Ist-Zustands des Montagesystems und der identifizierten strukturierten Abweichungen, können Maßnahmen ergriffen werden, die einen wirtschaftlichen Betrieb des Montagesystems ermöglichen. Diese Maßnahmen hängen jedoch bedeutend von deren Umsetzungszeiträumen ab. Daher müssen potenzielle Handlungsspielräume, den in dieser Arbeit definierten Zeithorizonten (Abschnitt 3.5) zugeordnet werden, um eine situationsbasierte Adaption sicherstellen zu können.

Bisherige Anpassungen der Montagesystemstruktur bzw. -organisation sind durch Prozessoptimierungen und Neu- bzw. Umplanungen charakterisiert. Dies begründet auch den Erfolg des Toyota Produktionssystems, welches in der industriellen Praxis zu Produktivitätssteigerungen, durch kon-

sequentes Vermeiden von Prozessen, die nicht zur Wertschöpfungssteigerung beitragen, führt. Die Konzentration auf Prozesse und Abläufe reicht jedoch nicht mehr aus, weitere Produktivitätssteigerungen zu erzeugen [Westkämper und Zahn 2009]. Es muss sich daher auf das System im Ganzen konzentriert werden, in dessen Rahmen eine größere Reichweite an Maßnahmen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit zur Verfügung steht.

Systemische Handlungsspielräume werden durch den Austausch oder die Restrukturierung von Betriebsmitteln und Systemkomponenten über organisatorische Änderungen sowie der Anpassung peripherer Systeme und Bereiche gekennzeichnet. Die Fülle an potenziellen Handlungsspielräumen spielt sich in unterschiedlichen Zeithorizonten ab und verursacht unterschiedliche Aufwände. Um Handlungsspielräume herauszustellen, die einen situationsbasierten Bezug aufweisen, müssen diese untersucht und strukturiert werden.



**Abbildung 5.11:** Vorgehen zur Einteilung der Handlungsspielräume

Dazu sind die in Abschnitt 3.4 identifizierten Handlungsspielräume, in einem ersten Schritt, in die definierten Gruppen der Abweichungen einzuordnen und diesen, in einem zweiten Schritt, ein Zeithorizont, in der sich deren Wirkung ausprägt, zugeordnet (Abbildung 5.11).

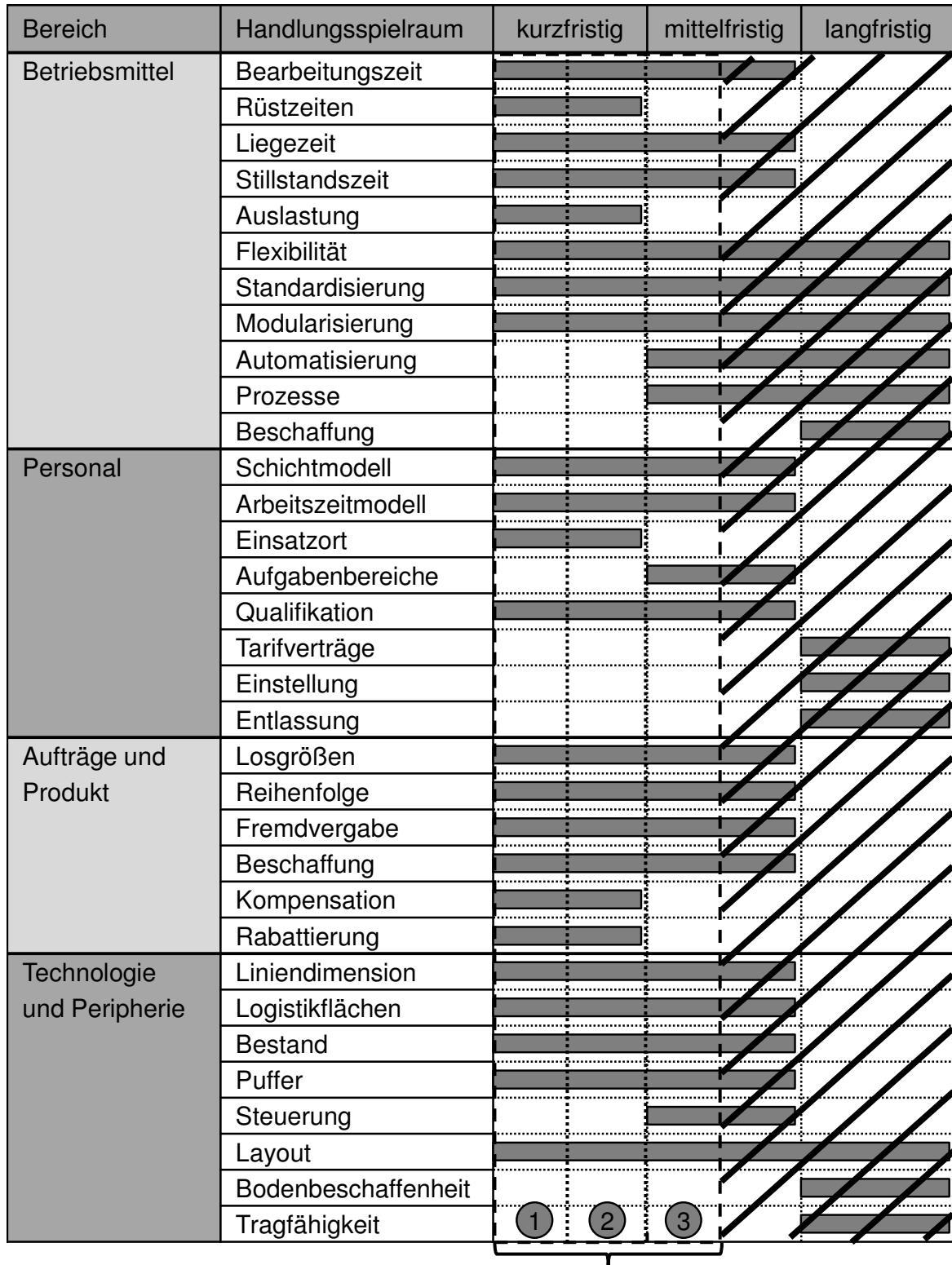
Die Einteilung der Handlungsspielräume und deren konventionellen Wirkungszeithorizonte sind in Abbildung 5.12 für die jeweiligen Gruppen der Abweichungsquellen dargestellt. Zudem werden die eingeteilten Handlungsspielräume den in dieser Arbeit definierten situationsbasierten Zeithorizonten zugeordnet. Dies ermöglicht die Identifikation von situationsbasierten Handlungsspielräumen innerhalb der jeweiligen Abweichungsgruppen und das Ableiten von zielführenden Maßnahmen, die bei der Durchführung einer situationsbasierten Adaption eingesetzt werden können. Der situati-

onsbasierte Zeithorizont reicht dabei bis zu einem Monat Umsetzungszeit, was jedoch bereits einen situationsbasiert langfristigen Zeithorizont darstellt. Daher sind Handlungsspielräume, die über einen Monat an Umsetzungszeit benötigen, nicht relevant für diese Arbeit.

Hinsichtlich der Gruppe der Betriebsmittel sind die Handlungsspielräume von Interesse, die den direkten Betrieb dieser beeinflussen. Dies betrifft vor allem die Zeiten, die eine Maschine, ein Arbeitsplatz oder ein Werkzeug benötigt, einen Prozess auszuführen. Zudem stellt der Standardisierungs- und Modularisierungsgrad der Betriebsmittelstruktur einen wichtigen Faktor hinsichtlich der situationsbasierten Adaption dar. Ist dieser stark ausgeprägt, können innerhalb situationsbasiert kurzfristigen Zeithorizonten Adaptionen durchgeführt werden. Ist dieser weniger stark ausgeprägt, stehen kaum Handlungsspielräume zur Verfügung, um auf Abweichungen reagieren zu können. Die Steigerung der Automatisierung und die Substitution technologischer Prozesse fallen in den situationsbasiert langfristigen Zeithorizont, da für deren Umsetzung komplexere Planungsvorgänge ausgeführt werden müssen. Hinsichtlich des Personals stehen in den situationsbasierten Zeithorizonten weniger Handlungsspielräume zur Verfügung. Dies sind die Anpassung des Schichtmodells bei auftretender Über- und Unterkapazität und die Anpassung des Arbeitszeitmodells hinsichtlich der Anwesenheitszeit. Der Einsatzort des Personals hängt von dem aktuellen Qualifikationsniveau ab, das jedoch innerhalb der situationsbasierten Zeithorizonte anpassbar ist. Die vorherige Implementierung einer flexiblen Organisation im Unternehmen ist jedoch Voraussetzung. Anpassungen hinsichtlich der Tarifverträge sowie der Mitarbeiterentlassung oder -einstellung sind außerhalb des Zeithorizonts dieser Arbeit und können daher nicht als situationsbasierte Handlungsspielräume identifiziert werden.

Hinsichtlich der Abweichungen der Gruppe „Aufträge und Produkte“ fallen mehrere Handlungsspielräume in den situationsbasierten Zeithorizont. Dabei kommen die Anpassung der Losgrößen und die Reihenfolge der Auftragseinstellung in Frage. Zudem kann eine Fremdvergabe oder die Beschaffung von fehlenden Teilen durch deren Zukauf durchgeführt werden, um Engpässe zu verringern. Hinsichtlich der Produkte kann bei fehlenden Bauteilen eine Kompensation angestrebt werden. Muss beispielsweise ein Auftrag fertiggestellt werden, obwohl Komponenten nicht zur Verfügung stehen, können hochwertigere Komponenten verbaut werden, um die Kundenzufriedenheit und somit folgende Aufträge zu sichern. Dies muss jedoch durch eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des Vorhabens abgesichert werden. Ein weiterer Handlungsspielraum in solch einer Situation stellt die Rabattierung dar, die einen Rabatt bei nicht halten des Liefertermins durch Fehlteile vorsieht.





Zeithorizonte situationsbasierter Adaptionen

- Situationsbasiert kurzfristig ①
- Situationsbasiert mittelfristig ②
- Situationsbasiert langfristig ③

Abbildung 5.12: Zugeordnete und zeitlich charakterisierte Handlungsspielräume

Aufgrund der Komplexität struktureller und technologischer Eingriffe stehen den Abweichungen, die in der Gruppe „Technologie und Peripherie“ auftreten, weniger situationsbasierte Handlungsoptionen zur Verfügung. Je nach Adaptionfähigkeitsgrad können innerhalb der situationsbasierten Zeithorizonte die Liniendimensionen und Logistikflächen angepasst werden. Dies setzt jedoch eine hohe Mobilität und Universalität der Montagesystemstruktur voraus. Zudem können Puffergrößen und somit der Bestand in einem Montagesystem angepasst werden, um einen wirtschaftlichen Betrieb eines Montagesystems gewährleisten zu können. Die Umsetzungsfähigkeit dieser Handlungsspielräume hat Einfluss auf die Adaptionfähigkeit des Layouts, das bei einer Adaption zwangsläufig strukturell angepasst wird. Die Bodenbeschaffenheit und die damit zusammenhängende Tragfähigkeit greifen tief in die Struktur des Gebäudes ein und fallen somit für eine situationsbasierte Adaption aus.

Die identifizierten und zeitlich eingeordneten Handlungsspielräume dienen als maßgebliche Einflussgrößen, um auf vorherrschende Abweichungen durch die zielgerichtete Erstellung situationsbasierter Adaptionskonzepte zu reagieren. Mit Hilfe der situationsbasierten Zeithorizonte wird zudem eine Bewertung der erstellten Adaptionskonzepte in Sinne der sAs und somit der Wirtschaftlichkeit ermöglicht.

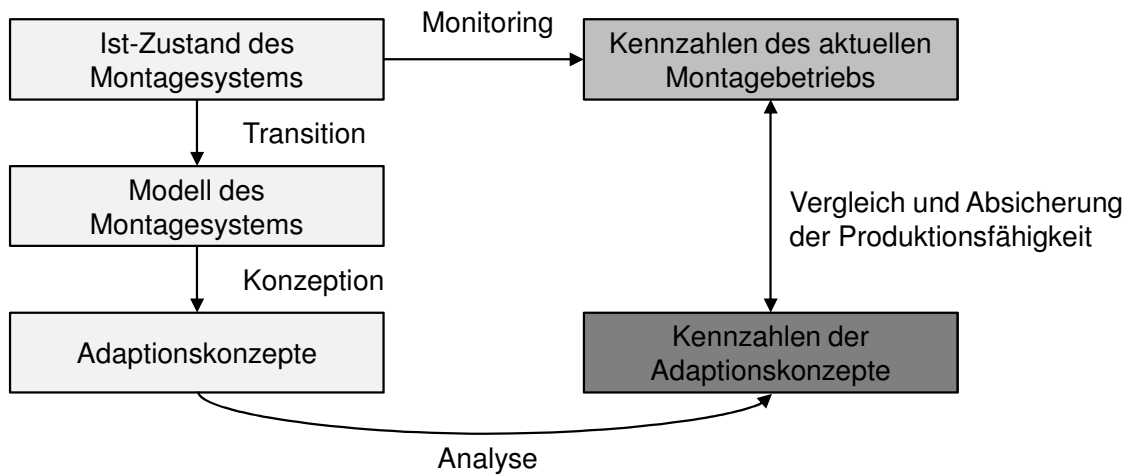
### **5.2.3 Absicherung der Produktionsfähigkeit**

Neben einer effizienten und kurzfristigen Adaption von Montagesystemen ist die Sicherstellung der Produktionsfähigkeit von großer Bedeutung. Daher wird in diesem Schritt der Methode, das Montagesystem mit Hilfe von Kennzahlen, die in der industriellen Praxis Anwendung finden, charakterisiert und somit ein Ausgangszustand definiert. Dieses Vorgehen ermöglicht es, Auswirkungen einer situationsbasierten Adaption auf ein vorhandenes Montagesystem darstellen und bewerten zu können.

Ausgehend vom analysierten Ist-Zustand des Montagesystems, wird in der Vorgehensweise der Methode zum einen eine Transition in ein Modell des Montagesystems vorgenommen und zum anderen das aktuelle Montagesystem durch Kennzahlen charakterisiert, die über die Eingabe von Prozessparametern berechnet werden.

Auf Basis des erstellten Montagesystemmodells werden wiederum Adaptionskonzepte entwickelt. Die damit einhergehende Variation der Kennzahlen ermöglicht die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Adaptionskonzepte hinsichtlich der Leistungserbringung und die Absicherung der Produktionsfähigkeit, da mit Hilfe der Kennzahlen das Leistungspotenzial der Adaptionskonzepte im Vo-

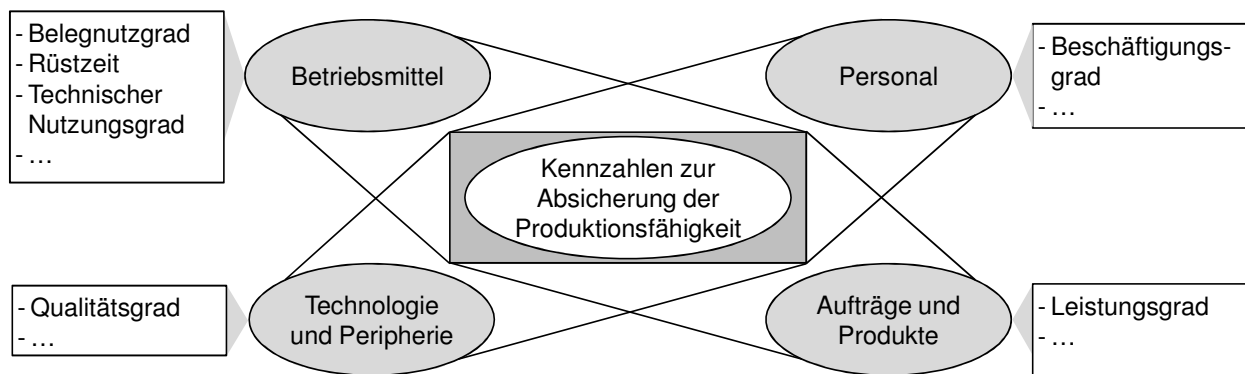
raus betrachtet werden kann und Fehlplanungen direkt erkannt werden. Die Vorgehensweise zur Absicherung der Produktionsfähigkeit ist in Abbildung 5.13 dargestellt.



**Abbildung 5.13:** Vorgehensweise zur Absicherung der Produktionsfähigkeit nach einer Adaption

Die Produktionsfähigkeit wird durch leistungsbezogene Kennzahlen ausgedrückt, die den Betrieb des Montagesystems hinsichtlich der Fähigkeit zur Produktausbringung beschreiben. Daher werden die in Abschnitt 3.5 identifizierten produktionsspezifischen Kennzahlen analysiert und die für eine Absicherung der Produktionsfähigkeit geeigneten Kennzahlen in die Methode integriert.

Die in diese Methode integrierten Kennzahlen basieren dabei nicht nur auf der spezifischen Leistungsbewertung von Teilaspekten, sondern betrachten die gesamtsystemische Leistungsfähigkeit. Damit wird einer nicht nachhaltigen Adaption, die nur auf der Ausbringungsmenge des Montagesystems basiert, entgegengewirkt. Die Kennzahlen werden wiederum den vorhandenen Gruppen hinsichtlich der Abweichungsquellen zugeordnet, um eine strukturierte Analyse dieser zu ermöglichen (Abbildung 5.14).



**Abbildung 5.14:** Kennzahlen zur Absicherung der Produktionsfähigkeit situationsbasierter Adaptionskonzepte

Kennzahlen zur Bewertung der Betriebsmittel, die geeignet sind, um eine Absicherung der Produktionsfähigkeit durchzuführen, sind der Belegnutzgrad, der technische Nutzungsgrad und die benötigte Rüstzeit. Der Belegnutzgrad ist ein Maß für Verluste die durch einen Auftragsausfall und Rüstverluste, also Stillstände, entstehen. Daten für die Berechnung dieser Kennzahl sind in produktionsnahen Informationssystemen abrufbar und somit verfügbar. Der technische Nutzungsgrad beschreibt hingegen die tatsächliche Einsatzzeit einer Ressource. Damit können Abschätzungen hinsichtlich deren Wirtschaftlichkeit durchgeführt werden. Diese sind wesentlich, um den Zielkonflikt der Adaptionsfähigkeit mit der Wirtschaftlichkeit zu begegnen (Abschnitt 5.4.1). Die Rüstzeit gibt Aufschluss über die benötigte Zeit einer Adaption und ist somit für die Bewertung eines Adaptionskonzepts von Bedeutung. Hinsichtlich des Personals wird der Beschäftigungsgrad zur Absicherung der Produktionsfähigkeit herangezogen. Diese beschreibt das Verhältnis der geplanten Betriebszeit zur Auftragszeit. Zudem spielt der Qualitätsgrad eine entscheidende Rolle, der die Effizienz der Produktion hinsichtlich des erzeugten Ausschusses und der Nacharbeit im internen Wertschöpfungsprozess beschreibt. Weiterhin wird der Leistungsgrad des adaptierten Montagesystems analysiert, da diese Auskunft über die Fähigkeit zur Bearbeitung von Auftragsvolumen gibt. Die Berechnung der Kennzahlen lehnt sich an REFA an. Die Ausprägung der integrierten Kennzahlen ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Die entwickelte Methode ist so konzipiert, dass sie neben den erläuterten Kennzahlen auch die in der wissenschaftlichen Literatur definierten Kennzahlen (Abschnitt 3.5) sowie unternehmensspezifische Kennzahlen integrieren, berücksichtigen und somit anwenden kann.

<p><u>Belegnutzgrad</u></p> $\text{Belegnutzgrad} = \frac{\text{Belegungszeit}}{\text{geplante Betriebszeit}}$	<p><u>Beschäftigungsgrad</u></p> $\text{Beschäftigungsgrad} = \frac{\text{Auftragszeit (T)}}{\text{geplante Betriebszeit}}$
<p><u>Technischer Nutzungsgrad</u></p> $\text{Tech. Nutzungsgrad} = \frac{\text{Betriebsmittellaufzeit}}{\text{Belegungszeit}}$	<p><u>Qualitätsgrad</u></p> $\text{Qualitätsgrad} = \frac{\text{Gutmenge (Stk.)}}{\text{Gesamtmenge (Stk.)}}$
<p><u>Rüstgrad</u></p> $\text{Rüstgrad} = \frac{\text{Rüstzeit}^1 (T_r)}{\text{Auftragszeit (T)}}$	<p><u>Leistungsgrad</u></p> $\text{Leistungsgrad} = \frac{\text{Ist}}{\text{Soll}} = \frac{\text{Ist Kapazität}}{\text{Plankapazität (T_e * Stk.)}}$

<sup>1</sup> Rüstzeit enthält alle zum Variantenwechsel benötigten Ausführungszeiten

**Abbildung 5.15:** Ausprägung der Kennzahlen zur Absicherung der Produktionsfähigkeit in Anlehnung an [Kletti und Schumacher 2011] [REFA 1993]

Zudem ist die Integration vergleichender Kennzahlen (Abschnitt 3.5) in die Methode möglich. Dies erlaubt eine hohe Varianz hinsichtlich der Kennzahlenbewertung, was zum einen den Anwendungs-

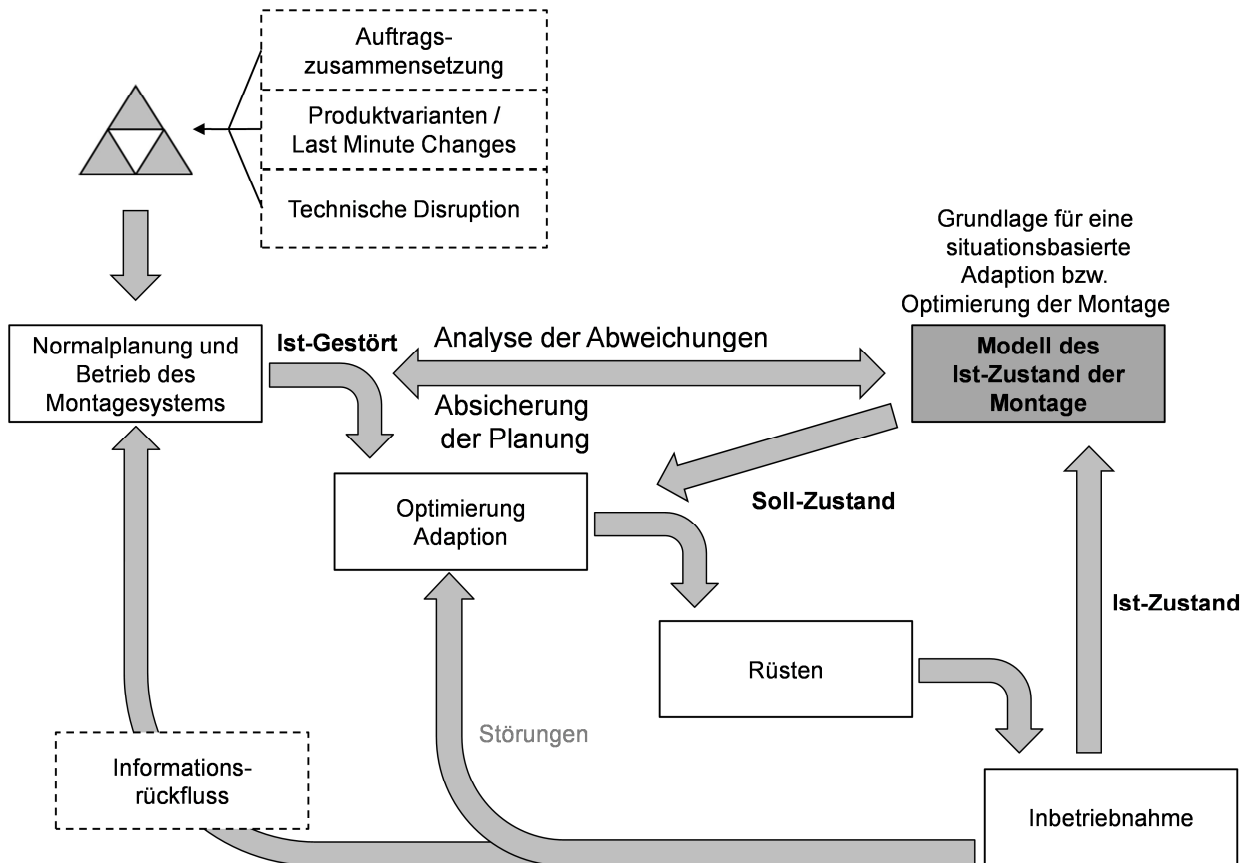
rahmen der Methode erhöht und zum anderen Nachteile vorhandener kennzahlenbasierter Steuerungen (Abschnitt 3.6) abschwächt. Die Vorgehensweise zur Berücksichtigung nicht erläuteter Kennzahlen muss unternehmensspezifisch erfolgen.

### **5.3 Entwicklung situationsbasierter Adaptionskonzepte**

Im dritten Schritt der Methode „Entwicklung von situationsbasierten Adaptionskonzepten“ liegt der Fokus auf dem wirtschaftlichen Betrieb des Montagesystems und dessen Sicherstellung. Hierzu werden die in dem ersten Schritt der Methode identifizierten Informationen hinsichtlich der Ist-Situation des Montagesystems und den systemimmanenten Adaptionsrestriktionen mit den in dem zweiten Schritt identifizierten vorherrschenden Abweichungen und den situationsbasierten Handlungsspielräumen zusammengeführt. Die Vorgehensweise umfasst somit die intern und extern induzierten Abweichungen, die auf die aktuelle Montagesystemstruktur einwirken und Maßnahmen mit denen diesen situationsbasiert, unter den Randbedingungen des Adaptionsfähigkeitsgrads, begegnet werden kann.

Einflüsse hinsichtlich der Abweichung vom wirtschaftlichen Betrieb des Montagesystems wirken sich marktseitig und produktionsseitig aus. Marktseitige Einflüsse spiegeln sich quantitativ durch die Zusammensetzung des Auftragspektrums wieder. Die Varianz der Ausprägung begründet sich durch schwankende Auftragsvolumen und Beauftragungsrhythmen, was zur Verfälschung von Produktionsprogrammplanungen, Auftragseinstellungen und zu Turbulenzen im Produktionsablauf sowie der Steuerung des Montagesystems führt. Die marktseitigen Einflussfaktoren bewirken zudem produktionsseitige Turbulenzen. Technische Störungen, Rüstvorgänge und das Einbringen von technologischen Innovationen beeinträchtigen eine wirtschaftliche Ausführung montageseitiger Prozesse und bedingen Ausfälle sowie temporäre Stillstände. Entstehende Kapazitätsverluste müssen folgend durch Mehrarbeit oder Produktivitätssteigerungen aufgefangen werden. Eilaufträge, Stornierungen und Last minute changes an Produkten führen ebenfalls zu Störungen des Montagesystembetriebs, die durch kurzfristige Adaptionen begegnet werden muss. Werden diese jedoch unstrukturiert ausgeführt, kann es zu weiteren Einbußen der Wirtschaftlichkeit kommen, da komplexe Wirkbeziehungen innerhalb des Systems außer Acht gelassen werden.

Zusammenfassend können somit drei Haupteinflusstreiber (vgl. Abschnitt 3.1.2) identifiziert werden, die situationsbasierte Auswirkungen auf den Betrieb eines Montagesystems aufweisen. Diese sind die Zusammensetzung der Aufträge, die Produktvarianten/Last Minute Changes sowie die technischen Disruptionen.



**Abbildung 5.16:** Vorgehen zur situationsbasierten Konzeption von Adaptionen und der Absicherung der Produktionsfähigkeit

Ausgehend von einer einmalig durchgeführten Normalplanung, die auf vorausgeplanten Kapazitäten und Produktvolumina basiert, wird das Montagesystem in Betrieb genommen (Ist-Zustand). Auf dieses wirken Abweichungen ein, denen durch geeignete Maßnahmen begegnet werden muss. Der bisherige Ablauf der Optimierung reicht dafür jedoch nicht aus, da dieser einmalig ausgeführt wird, das heißt, in einem zu langen Zeitraum agiert und unzureichende Unterstützung durch aktuelle Modelle aufweist.

Daher umfasst die Methode zur situationsbasierten Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit die Analyse des Ist-Zustands der Montagesystemstruktur und deren Abbildung in einem Modell. Anschließend wird mit Hilfe der Methode des morphologischen Kastens zur Adaptionfähigkeitsanalyse der Grad der Adaptionfähigkeit ermittelt. Dieser gibt Aufschluss inwieweit die vorhandene Struktur des Montagesystems anpassbar ist. Den identifizierten Abweichungssituationen (Ist-Gestört), die komplexe Wirkbeziehungen aufweisen, kann durch die Strukturierung der Abweichungen in Gruppen mit definierten Handlungsspielräumen begegnet werden. Zudem ist die Abschätzung des Aufwands in Stunden möglich und notwendig, da zum einen den situationsbasier-

ten Handlungsspielräumen Zeithorizonte zugeordnet sind und zum anderen dies eine Bewertung der Adaptionkonzepte auf Basis des sAs ermöglicht.

Auf dieser Basis können Adaptionkonzepte erstellt werden, die eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Montagesystembetriebs ermöglichen (Soll-Zustand). Je nach gefordertem oder geplantem Umsetzungszeitraum der Adaptionkonzepte ist zudem zu prüfen, ob eine Steigerung der zukünftigen Adaptionfähigkeit der gesamten Montagesystemstruktur gewünscht ist. Ist dies der Fall, bedingt dies jedoch höhere Investitionskosten und einen längeren Umsetzungszeitraum der Adaption, da die Ausprägung der Wandlungsbefähiger (Abschnitt 5.1.3) in diesem Montagesystem erhöht werden muss.

Der Prozess der Modellierung, der Kennzahlanalyse und der Erstellung von Adaptionkonzepten muss dabei strukturiert unterstützt werden. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist eine effiziente, nachvollziehbare und reproduzierbare Erstellung und Bewertung von Adaptionkonzepten. Daher wird innerhalb des dritten Schritts der Methode ein digitales Werkzeug konzipiert, mit dem die erläuterten Schritte unterstützt werden. Das Konzept des digitalen Werkzeugs wird anschließend in eine Softwareumgebung eingebunden.

### **5.3.1 Prämissen zur situationsbasierten Adaption**

Die in den vorherigen Abschnitten getroffenen Aussagen hinsichtlich der Analyse und der Restriktionen innerhalb eines Montagesystems in der variantenreichen Serienfertigung bedingt die Beschreibung von Prämissen, die die Methode voraussetzt, um effizient angewandt werden zu können. Für eine effiziente Nutzung der Methode muss ein Montagesystem vorhanden sein, das sich eindeutig in die definierten Skalen einteilen lässt. Ohne dies wird eine Analyse der Wirkbeziehungen zwischen und innerhalb der Leistungseinheiten erschwert. Des Weiteren müssen die Konzepte der Flexibilität und der Wandlungsfähigkeit innerhalb des Unternehmens integriert sein, da die Adaptionfähigkeit auf diesen basiert. Dies drückt sich vor allem durch die Berücksichtigung der Umsetzung der theoretischen Wandlungsbefähiger aus.

Zudem müssen Informationssysteme, digitaler oder konventioneller Art, innerhalb des Montagesystems vorhanden sein, die Daten und Informationen bereitstellen, mit denen Kennzahlen berechnet werden können. Ohne diese ist die Leistungsfähigkeit eines Montagesystems nur mit großem Aufwand darstellbar.

Daraus lassen sich zwei grundsätzliche Prämissen ableiten.

- Zeitliche Historiendaten hinsichtlich des Aufwands vorheriger Optimierungs- und Anpassungsvorgänge müssen vorhanden sein.

- Die Wirtschaftlichkeit des Montagesystems darf nicht ausschließlich durch das ausgebrachte Produktvolumina charakterisiert bzw. der Erzielung einer Umsatzmaximierung abhängen. Die Wirtschaftlichkeit ist daher auf den ressourcenbasierten Aufwand zum erbrachten Nutzen zu betrachten.

Diese Prämissen stellen Grundlagen dar, die während der Konzeption eines digitalen Werkzeuges zur Unterstützung des Adaptionprozesses berücksichtigt werden. Zudem ermöglicht die Beachtung der Voraussetzungen eine möglichst effiziente Durchführung der Methode, da fehlende Historien- und Leistungsdaten zu einer Verzögerung des geordneten Ablaufs führen.

### **5.3.2 Konzeption eines digitalen Werkzeuges zur Adaptionserstellungsunterstützung**

Die Konzeption des digitalen Werkzeuges zur Unterstützung der Adaptionvorhaben wird im Folgenden beschrieben. Dabei wird auf die einzelnen Bestandteile des Werkzeuges eingegangen. Zudem wird die EDV-Struktur des Werkzeuges erläutert. Abschließend wird auf die Umsetzung der Konzeption durch ein app-basiertes Werkzeug eingegangen. Das Werkzeug, dessen Kern die entwickelte Methode darstellt, besteht aus fünf wesentlichen Bausteinen.

Diese stellen das Basismodell „Montage“ dar, das als grundlegendes Datenmodell dient, die Ressourcenbibliothek, in der vorhandene Fabrikelemente des Montagesystems abgelegt werden, der Produktionsfähigkeitsbaustein, mit dem die Absicherung der Produktion durchgeführt wird, der Baustein des generellen Modellierungsvorgehens, mit dem ein strukturierter und somit effizienter Modellerstellungsprozess gewährleistet wird und eine Benutzeroberfläche, über die Daten eingegeben sowie visualisiert werden (Abbildung 5.17). Das Basismodell „Montage“ stellt den zentralen Baustein des digitalen Werkzeuges dar. Dies ist ein speziell für die Montage erstelltes Datenmodell, welches relevante Fabrikobjekte hinsichtlich der Montagesystemstruktur enthält. Fabrikobjekte sind in diesem Kontext leistungseinheitenspezifische Ressourcen, in Form von Arbeitsplätzen, Maschinen, Anlagen, Robotern und Puffereinheiten. Jedes dieser Fabrikobjekte ist Leistungseinheiten zugeordnet, in denen diese vorrangig vorhanden sind. Das erlaubt eine aufwandsarme Suche während der Modellierung und beschleunigt somit den Modellerstellungsprozess. Der Prozess der Parametrisierung ermöglicht zudem eine automatisierte Berechnung der Leistungskennzahlen. Veränderungen hinsichtlich der Aktualisierung, Erweiterung oder Reduktion der Fabrikobjektstruktur erfolgt direkt im Datenmodell. Dadurch wird eine einfache Anpassung des Datenmodells an unternehmensspezifische Strukturen ermöglicht.



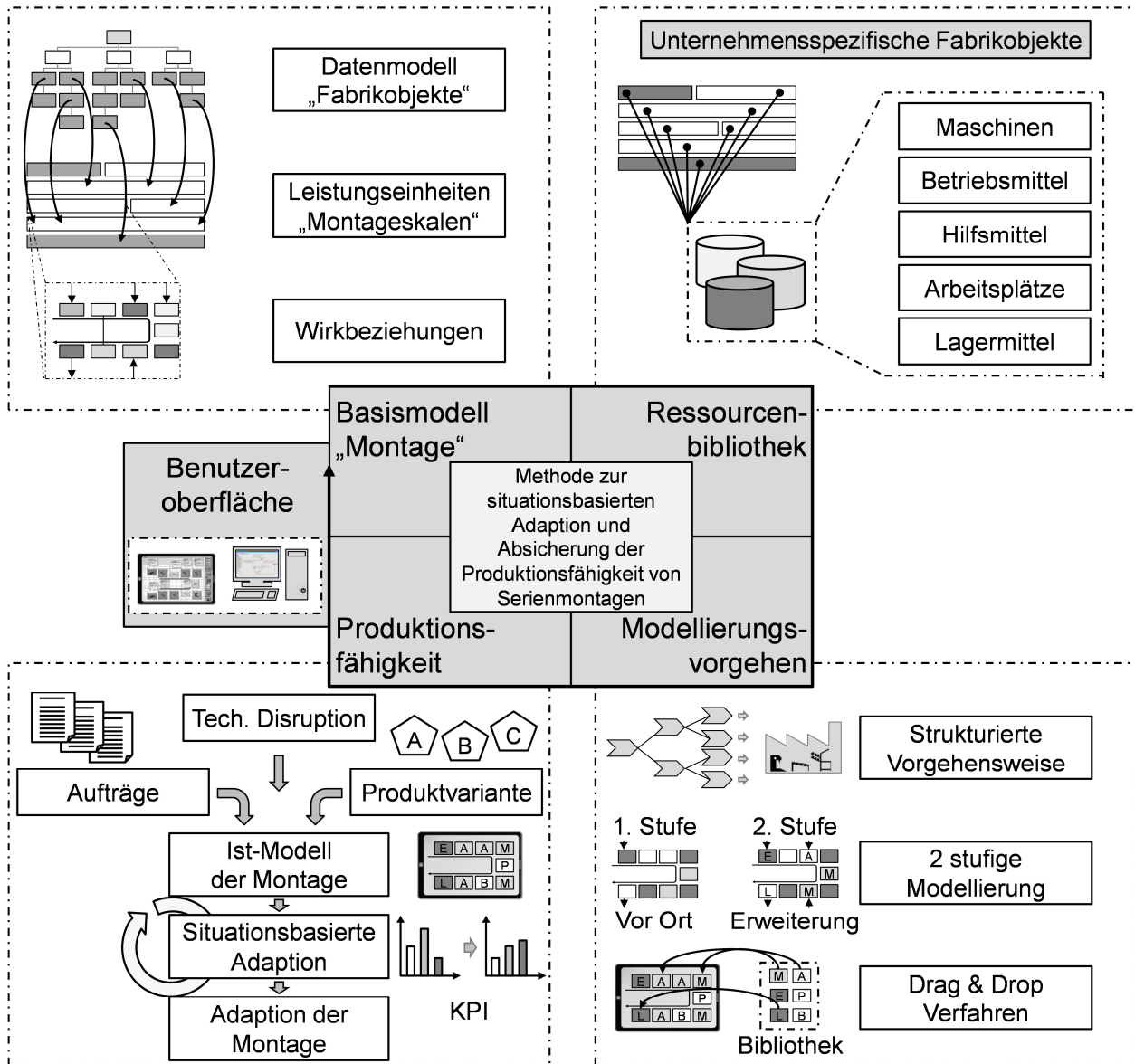


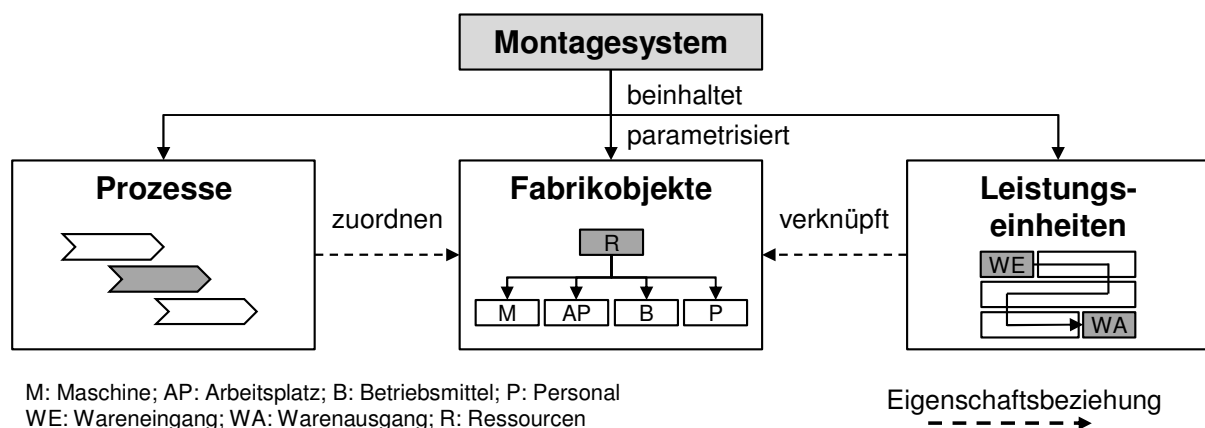
Abbildung 5.17: Bestandteile des digitalen Werkzeugs

Den zweiten Baustein stellt die Ressourcenbibliothek dar und lässt die Ablage spezifischer, im Montagesystem vorhandener, Fabrikobjekte zu. Dies ermöglicht zum einen die Wiederverwendung von Ressourcen während der Erstellung eines Adaptionskonzepts, was zu einer Verringerung der Modellerstellungszeit führt. Zum anderen ist für den Anwender klar ersichtlich, welche Ressourcen im Unternehmen vorhanden sind, die bei einer situationsbasierten Adaption zum Einsatz kommen können. Jedem Fabrikobjekt innerhalb der Ressourcenbibliothek kann ein Status zugeordnet werden. Dieser kann durch den Status „in Nutzung“, „in Lager“ oder „in Beschaffung“ beschrieben werden. Damit wird die Gefahr der Erstellung einer nicht realisierbaren Adaption verringert. Zudem

ist die Ressourcenbibliothek nach Fabrikobjektklassen strukturiert, um eine effiziente Suche nach spezifischen Ressourcen zu ermöglichen.

Ein weiterer Baustein ist die Vorgehensweise zur Modellerstellung. Diese ist zweistufig angelegt, um den Modellerstellungsprozess effizienten zu ermöglichen. In einen ersten Schritt wird bedingt durch vorherig durchgeführte Optimierungen des Montagesystems entstandenen gewachsenen Strukturen, eine Aufnahme der Ist-Situation direkt vor Ort im Shopfloor vorgenommen. Anschließend kann das aufgenommene Modell, das unter Umständen nicht vollständig spezifiziert ist, mit weiteren Informationen aus Informationssystemen angereichert werden. Zudem stellt diese Vorgehensweise sicher, dass vorherig erstellte Modelle wiederverwendet werden können, was den Aufwand für weitere Adaptionvorhaben verringert. Eine zwei-dimensionale modulbasierte Modellierungsvorgehensweise sichert zusätzlich ab, dass der Aufwand für eine Modellierung des Montagesystems in einem vertretbaren Rahmen durchgeführt werden kann.

Die Absicherung der Produktionsfähigkeit baut auf den erläuterten Bausteinen auf. Dieser nutzt eingegebene Daten und Informationen hinsichtlich des Ablaufs und der Parametrisierung der Fabrikobjekte zur Berechnung von leistungscharakterisierenden Kennzahlen. Damit ist zum einen die Leistung des vorhandenen Montagesystems charakterisiert und zum anderen kann deren Entwicklung, bei der Durchführung einer situationsbasierten Adaption, nachvollzogen und die Produktionsfähigkeit nach einer Adaption abgesichert werden. Fehlplanungen und Stillstände bei der Umsetzung können so vermieden bzw. verringert werden.



**Abbildung 5.18:** Fabrikobjekte und deren Charakterisierungsvorgehen innerhalb des digitalen Werkzeugs

Die Parametrisierung des Montagesystems wird durch die folgende Logik ermöglicht (Abbildung 5.18). Fabrikobjekte sind innerhalb des digitalen Werkzeugs einem Montagesystem zugeordnet. Bei deren Aufnahme werden diese Fabrikobjekte mit Prozessen und Parametern angereichert. Zudem

sind die Fabrikobjekte einer Leistungseinheit zugeteilt, was den Vorgang der Modellierung stark verkürzt, da der Anwender nicht jedes vorhandene Fabrikobjekt angezeigt bekommt, sondern nur die für ihn bei der Modellerstellung relevanten.

### **5.3.3 Realisierung des digitalen Werkzeugs**

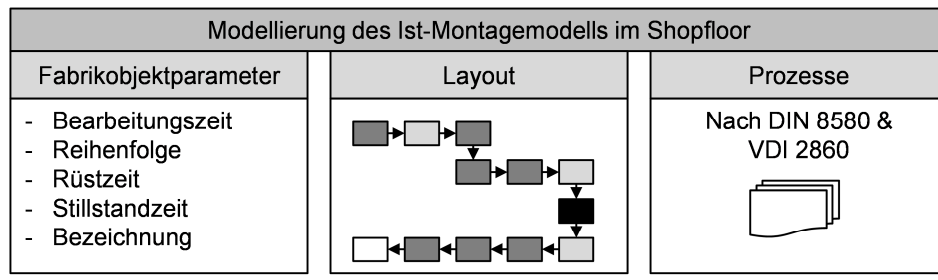
Mit Hilfe des erstellten Konzepts erfolgt nun die Umsetzung in einem digitalen Werkzeug, mit dem eine Adaption des vorhandenen Montagesystems erfolgen kann. Die Grundlagen der Informationsbeschaffung und die Funktionen des digitalen Werkzeugs sind in Abbildung 5.19 dargestellt.

Die Ausgangsdaten, die für eine situationsbasierten Adaption benötigt werden, können direkt im Shopfloor aufgenommen werden. Dabei wird entlang der Wertschöpfung mit Hilfe des app-basierten Werkzeugs der Ist-Zustand des Montagesystems hinsichtlich der vorhandenen Fabrikobjekte, Prozesse und Wirkbeziehungen aufgenommen. Das so gewonnene Modell bildet die Basis für die Erstellung von Adaptionskonzepten.

Die Modellierung der Fabrikobjekte selbst wird durch das entwickelte Datenmodell unterstützt, in dem generische, nicht parametrisierte Fabrikobjekte abgelegt sind. Diese werden über die Benutzeroberfläche parametrisiert und miteinander in Verbindung gebracht. Die Gestaltung der grafischen Benutzeroberfläche orientiert sich an gängigen Eingabeschemen – Drag&Drop sowie Touchfunktion – und ermöglicht somit eine intuitive Anwendung des digitalen Werkzeugs.

Die Eingabe der Fabrikobjektparameter erfolgt über eine Eingabemaske, die eine strukturierte Aufnahme der Informationen ermöglicht (Abbildung 5.20). Eine Anreicherung der Parameter kann, wenn nicht alle Daten vor Ort erhoben werden können, in einem zweiten Schritt unter Zuhilfenahme vorhandener Informationssysteme am Arbeitsplatz durchgeführt werden. Um eine effiziente zukünftige Modellierung zu gewährleisten, werden parametrisierte Fabrikobjekte in einer strukturierten Ressourcenbibliothek abgelegt und stehen somit bei folgenden Adaptionsvorgängen zur Verfügung. Ein initialer Aufwand ist dabei nicht vermeidbar.

Gleichzeitig werden im Hintergrund des digitalen Werkzeugs Kennzahlen berechnet, die den Leistungsgrad des aktuellen Montagesystems berechnen und ausdrücken. Dieser Mechanismus wird durch das Auslesen der eingegebenen Prozessparameter und Leistungsspezifika ermöglicht. Die Kennzahlen können anschließend über die Benutzeroberfläche aufgerufen und visualisiert werden. Das Ist-Montagesystem, das sich aus dem Layout, den parametrisierten Fabrikobjekten, den Wirkbeziehungen und den Prozessen zusammensetzt, kann abgespeichert werden. Diese Funktion ermöglicht es, Adaptionskonzepte miteinander und mit dem Ist-Zustand zu vergleichen. Abbildung 5.21 stellt die erläuterten Funktionen und deren Umsetzung im digitalen Werkzeug im Detail dar.



Kombination der Informationen und Abbildung im digitalen Werkzeug sowie Erstellung von Adaptionskonzepten hinsichtlich der vorherrschenden Abweichungen

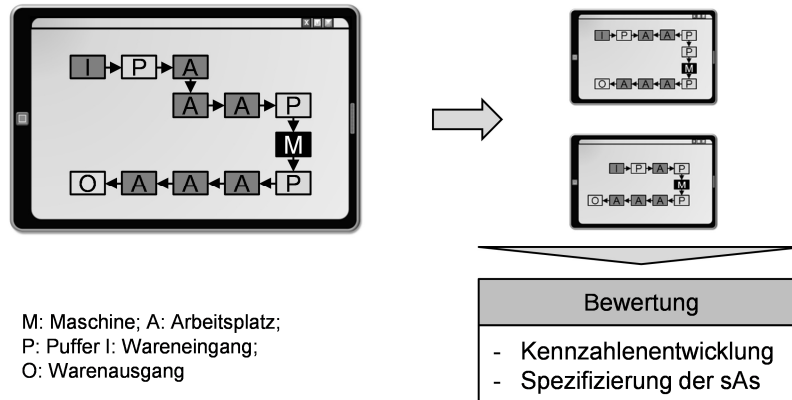


Abbildung 5.19: Digitales Werkzeug zur situationsbasierten Adaption der Montagesystemstruktur - schematisch

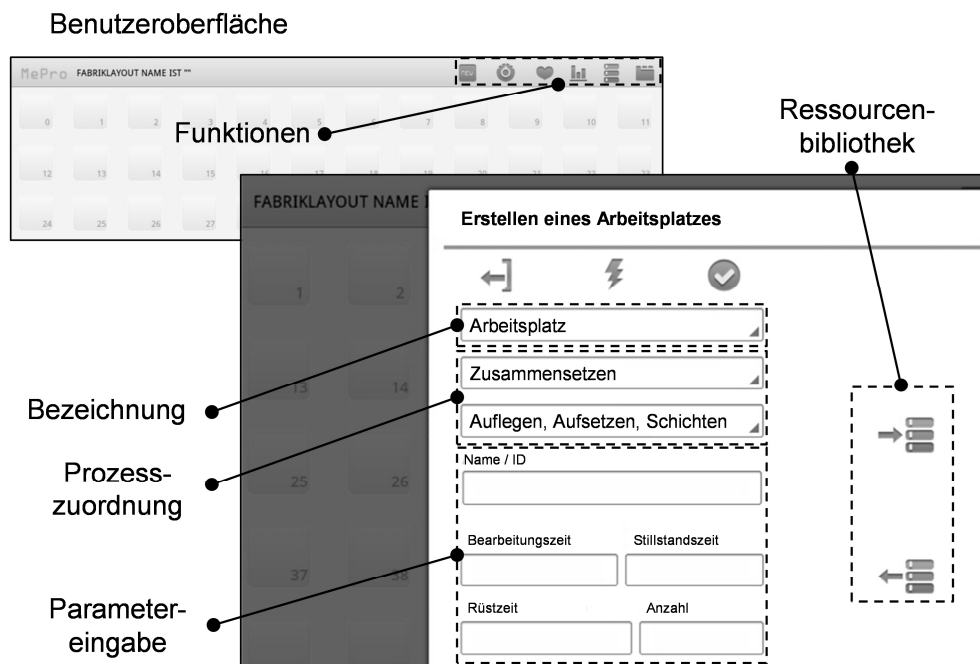
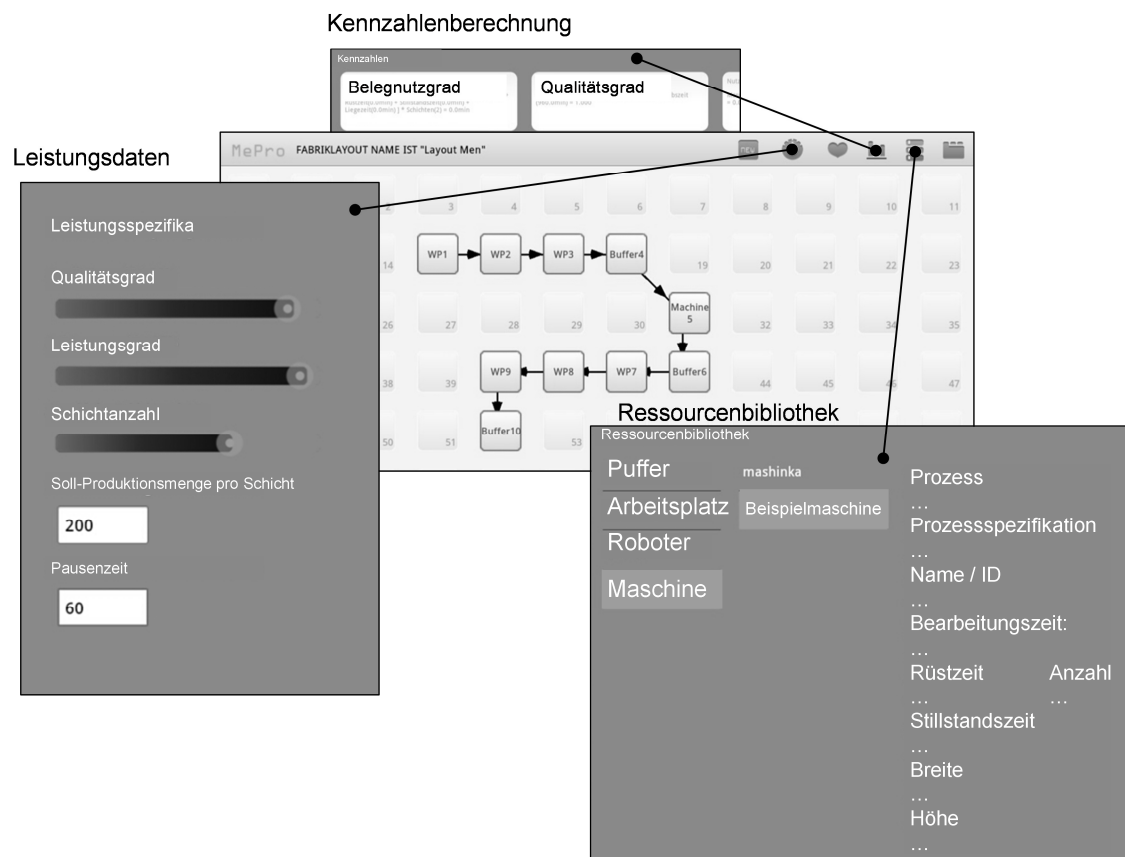


Abbildung 5.20: Benutzeroberfläche und Funktionen des digitalen Werkzeugs

Die Adaption des Montagesystems erfolgt ebenfalls, wie die eigentliche Modellierung des Ist-Zustands, über die Benutzeroberfläche. Adaptionskonzepte werden hinsichtlich der identifizierten

einwirkenden Abweichungen erstellt. Dabei können einzelne Fabrikobjekte ausgetauscht, das Layout verändert, Prozessinformationen und Leistungsdaten des Montagesystems angepasst werden. Innerhalb jedes erstellten Adaptionskonzepts werden ebenfalls Kennzahlen berechnet, die einen Vergleich mit der vorherigen Ist-Situation ermöglichen. Somit ist die Absicherung der Produktionsfähigkeit möglich und die Wirtschaftlichkeit des Montagesystemkonzepts analysierbar.

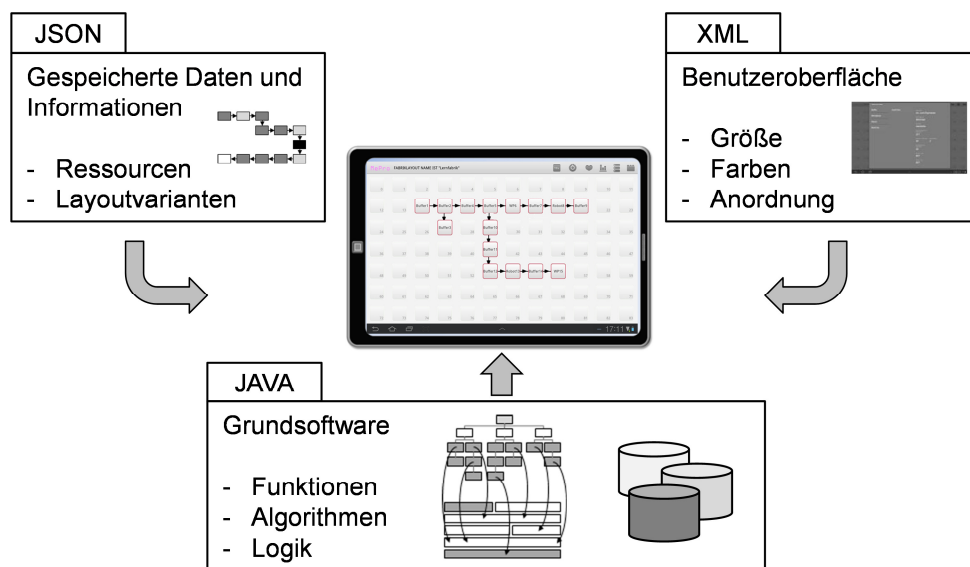
Die Konzeption der Adaptionen erfolgt unter Berücksichtigung des identifizierten Adaptionfähigkeitsgrads des Montagesystems. Dieser schränkt, je nach Ausprägungsgrad, die Handlungsspielräume, die für eine Adaption zur Verfügung stehen, ein. Restriktionen hinsichtlich der Handlungsspielräume sind jedoch nicht fest hinterlegt, da der Kreativität der menschlichen Lösungsfindung keine Grenzen gesetzt werden sollen. Diese spielt bei der Begegnung von Abweichungen eine entscheidende Rolle und darf nicht eingeschränkt werden. Das digitale Werkzeug dient zusätzlich der kreativen Entwicklung von Szenarien und stellt somit nicht nur eine restriktive Umgebung dar, mit der unumstößliche Lösungen erzeugt werden können.



**Abbildung 5.21:** Detaillierung des digitalen Werkzeugs

Es ist app-basiert gestaltet und ist in der Programmiersprache JAVA umgesetzt. Die Benutzeroberfläche, das heißt jegliche Information, die der Benutzer visuell aufnimmt, ist mit der Auszeich-

nungssprache XML (Extensible Mark-up Language) beschrieben. Die Daten und Informationen, die bei der Nutzung des digitalen Werkzeugs erzeugt werden, werden in dem Format JSON (JavaScript Object Notation) abgelegt (Abbildung 5.22). JSON reduziert im Vergleich zu XML die Komplexität und Größe des Codes, was die Ressourcennutzung, hinsichtlich der Speicherbelegung und CPU-Leistung positiv beeinflusst. Der Vorteil, der sich daraus ableitet ist, dass das digitale Werkzeug auf Tablets und auf Desktop PCs lauffähig ist. Zudem unterstützt JSON den Datenaustausch zwischen digitalen Werkzeugen und Informationssystemen [Miller et al. 2009].



**Abbildung 5.22:** Datenformate und Programmiersprache des digitalen Werkzeugs

## 5.4 Situationsbasierte Adaption von Montagesystemstrukturen

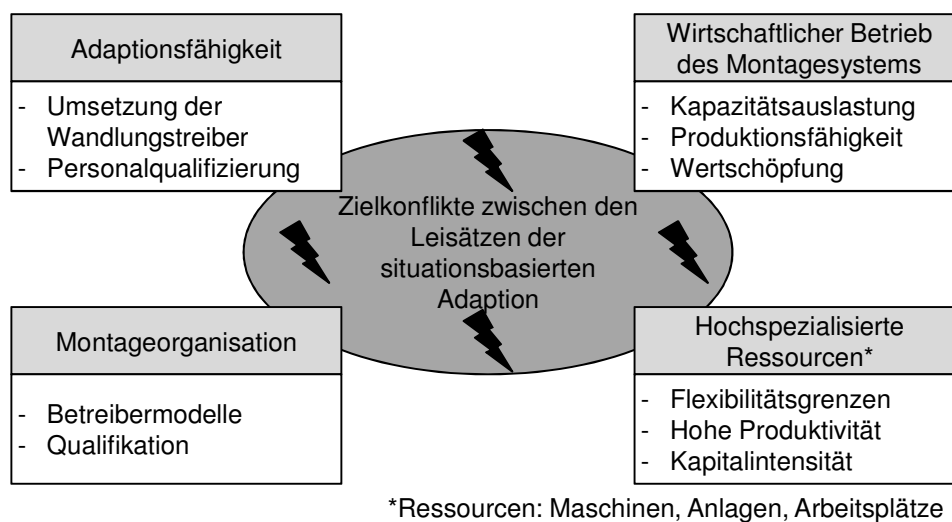
Die Durchführung von situationsbasierten Adaptionen wird durch unterschiedlichste Ausprägungen und Leitsätze in der Adaptionskonzepterstellungphase beeinflusst. Diese müssen jedoch vor der Erstellung einer Adaption klar definiert werden, um Zusatzaufwände bei der Umsetzung zu vermeiden. Daher wird in diesem Kapitel auf die Leitsätze und Ausprägungen eingegangen, die während der Konzepterstellung zu berücksichtigen sind und bedeutenden Einfluss auf das Adaptionsergebnis haben.

### 5.4.1 Leitsätze zur Adaption

Hinsichtlich der situationsbasierten Adaption von Montagesystemen ist es erforderlich Leitsätze zur Verfügung zu stellen, an denen sich im Vorfeld einer Anpassung orientiert werden kann. Diese ermöglichen eine effiziente und zielgerichtete Anpassung der Strukturen und eliminieren die Gefahr, sich gegenseitig ausschließende Faktoren zu verfolgen, die bei der Entwicklung von Adaptionskon-

zepten bzw. bei deren Umsetzung zu Komplikationen führen können. Gesamtsystemisch legen Leitsätze eine Basis, die einen wirtschaftlichen Betrieb eines Montagesystems ermöglichen (Abbildung 5.23).

Innerhalb der Montagesystemstruktur wird ein hohes Maß an Wandlungsfähigkeit bzw. Adaptionfähigkeit benötigt. Dieses Maß drückt die Fähigkeit aus, reaktionsschnell auf einwirkende Abweichungen hinsichtlich der Produktstruktur, der Auftragszusammensetzung, der Prozesse und der Kapazität reagieren zu können. Damit ist sichergestellt, dass eine große Bandbreite an Produkten und Produktvolumina hergestellt und technologische Änderungen effizient implementiert werden können.



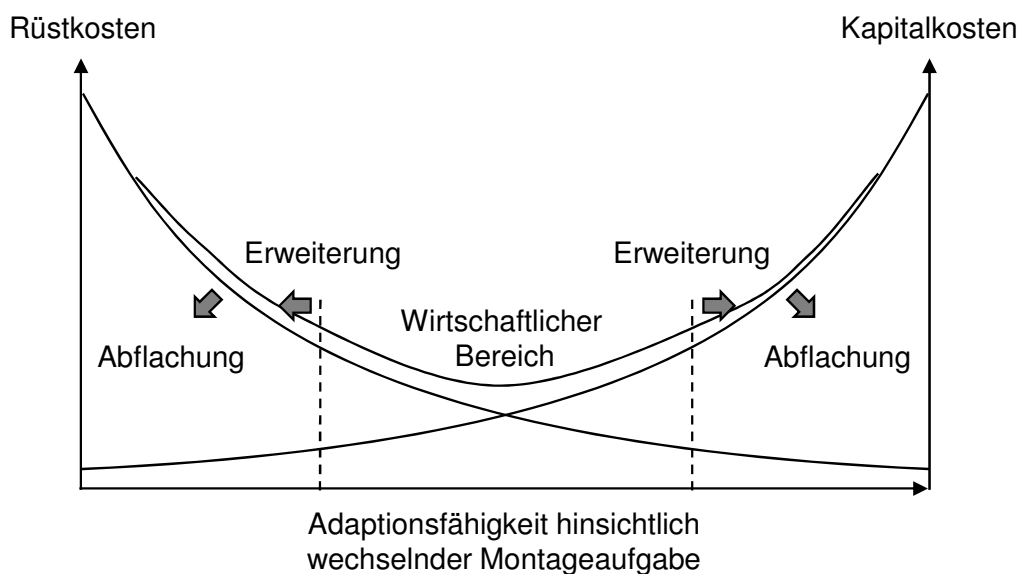
**Abbildung 5.23:** Leitsätze zur Adaption und deren gegenseitige Beeinflussung

Zudem wirkt sich ein hohes Maß an Wandlungsfähigkeit positiv auf die für eine Adaption benötigten Stunden (sAs) aus, da Wandlungsbefähiger, wie beispielsweise die Modularisierung oder die Mobilität, einen effizienten Austausch von Maschinenmodulen unterschiedlicher Funktion oder den Austausch kompletter Arbeitsplätze erleichtern und beschleunigen. Die negativen Aspekte bei der Umsetzung eines Montagesystems, die mit einer hohen Integration der Wandlungsfähigkeit einhergehen, sind jedoch höhere Kapitalkosten beispielsweise in Form von gebundenem Kapital oder Investitionskosten. Dies ergibt sich aus der Multifunktionalität von Maschinen und Arbeitsplätzen sowie aus den zu lagernden Modulen.

Anzumerken ist allerdings, dass ein zu niedriges Maß an Adaptionfähigkeit ebenfalls Verluste in Form von hohen Rüstkosten bzw. Wirtschaftlichkeitseinbußen mit sich bringt. Wenn wenig oder keine Maßnahmen zur Adaption zur Verfügung stehen, kann das Montagesystem nicht effizient an einwirkende Einflüsse angepasst werden und operiert somit nicht mehr im für eine Situation opti-

malen Betriebspunkt. Daher ist eine Abwägung des zu integrierenden Maßes an Adaptionfähigkeit ein wichtiger Leitsatz, der bei der Erstellung von Adaptionskonzepten berücksichtigt werden muss. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.24 dargestellt

Neben der Integration eines ausreichenden Maßes an Adaptionfähigkeit ist die Produktionsfähigkeit ein bedeutender Leitsatz. Ein Montagesystem sollte nicht nur nach seiner Adaptionfähigkeit bewertet und ausgelegt werden, da damit der eigentliche Sinn eines Montagesystems missachtet wird. Der Prozess der Wertschöpfungserzielung muss immer gesichert sein, da dieser den wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens beschreibt. Dieser steht jedoch in einem konträren Verhältnis zur Adaptionfähigkeit, da die Umsetzung dieser temporär wirtschaftliche Einbußen erzeugt. Es ist somit festzuhalten, dass die aufgestellten Leitsätze sich gegenseitig beeinträchtigen und die Struktur eines Montagesystems sowie die zukünftigen Adaptionen stark beeinflussen. Um den wirtschaftlichen Bereich innerhalb des Zielkonflikts zu erhöhen, müssen daher Maßnahmen verfolgt werden, die eine Abflachung der Kurven bewirken. Lösungsansätze dafür sind die gezielte Implementierung von Adaptionbefähigern, die im Folgenden beschrieben werden.



**Abbildung 5.24:** Zielkonflikt der Wirtschaftlichkeit des Betriebs und der Adaptionfähigkeit

Kapitalintensiven sowie technologisch stark fokussierten Maschinen, Anlagen oder Arbeitsplätzen muss bei der Erstellung von Adaptionskonzepten eine höhere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Diese sollten, wenn schon im Unternehmen vorhanden, stetig ausgelastet sein, um deren wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten. Damit stellen diese Ressourcen jedoch hinsichtlich der situationsbasierten Adaption Restriktionen dar. Um die restriktiven Charakteristika dieser Ressourcen zu verringern, müssen außerhalb der situationsbasierten Adaptionvorgänge Lösungen entwickelt werden,



die eine höhere Flexibilität dieser Ressourcen erlauben. Sind die entwickelten Lösungen implementiert, können diese Ressourcen in zukünftigen Adaptionen berücksichtigt werden. Wird eine derartige Ressource erst beschafft, sollte vorab deren Flexibilität nicht außer Acht gelassen werden, um der Gefahr entgegenzuwirken, eine zu starre Struktur in einem Montagesystem zu erzeugen. Dieser Zusammenhang kann ebenfalls als Leitsatz herausgestellt werden.

Einen weiteren Leitsatz stellt die Restrukturierung der Montagesystemorganisation dar. Darunter fällt nicht nur das Personal, das möglichst universell qualifiziert sein muss, sondern auch die Versorgung der Montagesystemressourcen mit Werkzeugen und funktionsdiversen Modulen. Hinsichtlich des Personals ist, gleich der Implementierung des Wandlungsfähigkeitsgrades, abzuwägen, inwieweit sich die entstehenden Kosten durch die Qualifizierung mit der damit erreichten Flexibilität ausgleichen. Bezüglich der Versorgung mit Modulen und Werkzeugen können Betreibermodelle implementiert werden, die eine bedarfsorientierte Bereitstellung ermöglichen. Somit werden Kosten für die Lagerhaltung reduziert und gleichzeitig die Adaptionfähigkeit erhöht.

Diese Leitsätze, die sich in Teilen gegenseitig beeinflussen bzw. deren konzentrierte Umsetzung sich gegenseitig ausschließen, sind wichtige Anhaltspunkte, die bei der Konzeption von Adaptionen berücksichtigt werden müssen. Zudem leiten sich aus diesen Ausprägungen ab, denen innerhalb eines Unternehmens bei der Durchführung von situationsbasierten Adaptionen gefolgt werden kann. Diese werden in den folgenden Abschnitten detailliert erläutert.

### **5.4.2 Ausprägungsarten**

Die permanent einwirkenden Abweichungen hinsichtlich der Produktstruktur, der Auftragszusammensetzung und der technischen Disruptionen zwingen Unternehmen kontinuierlich Adaptionen durchzuführen, um einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb des Montagesystems jederzeit gewährleisten zu können. Diese bedürfen jedoch einer klaren strategischen Ausrichtung, um eine maximale Effizienz zu erreichen.

Situationsbasierte Adaptionen betreffen, im Gegensatz zu vereinzelt durchgeführten Prozessoptimierungen, das gesamte System der Montage und greifen tief gehend in vernetzte Wirkbeziehungen ein, die ohne ein strukturiertes Vorgehen Skaleneffekte nach sich ziehen, die die Produktionsfähigkeit stark beeinträchtigen können. Daher ist vorab klar abzutrennen in welchem Gebiet des Montagesystems und welchem Ausmaß Adaptionen durchzuführen sind und wie diese die bisherigen Abläufe beeinflussen.

Der Fokus kann zum einen auf technischen Adaptionen liegen. Diese betreffen Maschinen, Arbeitsplätze und Anlagen hinsichtlich deren Prozessfunktionalität und –zeit. Werkzeuge und Vorrichtun-

gen fallen ebenfalls unter diesen Gesichtspunkt. Derartige Adaptionen haben jedoch Auswirkungen auf die indirekten Bereiche, da sie für die Umsetzung von Adaptionen unterstützend benötigt werden. Zudem können rein organisatorische Adaptionen verfolgt werden, die sich auf den Ablauf der Montagesteuerung hinsichtlich der Aufträge, des Schichtmodells und des Personaleinsatzes konzentrieren. Dies kann durch Selbstorganisation nach dem Vorbild der Leistungseinheiten des Stuttgarter Unternehmensmodells oder durch vorausgeplante Steuerung erfolgen. Des Weiteren können rein strukturelle Adaptionen durchgeführt werden, die die Flächenbelegung, die Anordnung des Layouts und den Materialfluss betreffen. Dabei werden ebenfalls fertigungsnahe indirekte Bereiche benötigt, die einen strukturierten Ablauf der Adaptionen überwachen.

Falls diese Adaptionsumfelder im Gesamtsystem betrachtet werden, ergeben sich Synergieeffekte, die zu einer effizienteren situationsbasierten Adaption des Montagesystems führen. Dies resultiert aus der Tatsache, dass Möglichkeiten geschaffen werden, das System mit Maßnahmen zu optimieren, die die jeweiligen spezifischen Adaptionen nicht zulassen. Da diese Arbeit eine ganzheitliche Sicht auf das System Montage verfolgt, ergeben sich hinsichtlich dieser Betrachtung diverse Faktoren zur Steigerung der situationsbasierten Adaptionfähigkeit.

- Steigerung der Wandlungsbefähiger
  - Modularität, Mobilität, Kompatibilität, Skalierbarkeit, Universalität
- Innovative Betreibermodelle für Werkzeuge und Module
- Qualifikationsniveau der Mitarbeiter
- Flexibilisierung der Organisation
- Implementierung einer Selbstorganisation

Diese Stellhebel ermöglichen die Bestimmung von Ausprägungen, die unterschiedliche Zeithorizonte innerhalb der situationsbasierten Adaption einnehmen. Zudem lässt sich eine Ausprägung identifizieren, die außerhalb der definierten Zeithorizonte agiert.

- Ausprägung der situationsbasiert kurzfristigen Adaption (1 Schicht – 1 Tag)
- Ausprägung der vorausschauenden Adaption (1 Tag – 1 Woche)
- Ausprägung der strukturellen Adaption (1 Woche – 1 Monat)
- Ausprägung der Steigerung der Adaptionfähigkeit (< 1 Monat)

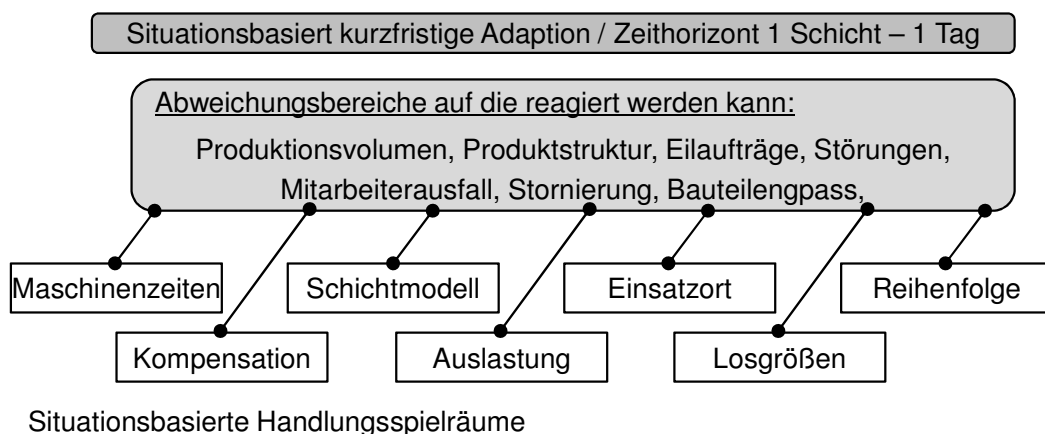
Die Handlungsspielräume und Anwendungsgebiete der identifizierten Ausprägung sollen im Folgenden detailliert erläutert werden. Zudem wird die Vorgehensweise zur Auswahl eine Adaptionsausprägungsart nachfolgend beschrieben.

### 5.4.2.1 Situationsbasiert kurzfristige Adaption

Die situationsbasierte Adaption, wie schon in Abschnitt 3.6 beschrieben, zielt auf einen Umsetzungszeitraum von einer Schicht bis zu einem Monat ab. Die situationsbasiert kurzfristige Adaption jedoch konzentriert sich auf einen Umsetzungszeitraum von einer Schicht bis zu einem Tag. Dadurch wird die Reichweite der identifizierten Handlungsspielräume spürbar eingeschränkt. Zur Reaktion auf Änderungen hinsichtlich der Auftragszusammensetzung oder dem Auftreten technischer Disruption in Sinne von Stillständen benötigt es jedoch einer Ausprägung, den wirtschaftlichen Betrieb, ohne weitreichende Aufwände und Strukturänderungen durchführen zu können.

Die Ausprägung der situationsbasiert kurzfristigen Adaption konzentriert sich auf die vorhandenen Flexibilitätskorridore und implementierte Wandlungsfähigkeit und agiert in deren Wirkungsbereichen. Anpassungen des organisatorischen Ablaufs und der Technologie sind außerhalb des betrachteten Zeithorizonts. Das bedeutet, dass keine Maßnahmen ergriffen werden, die Adaptionfähigkeit des aktuellen Montagesystems zu erhöhen. Gleichzeitig bedingt diese Tatsache, dass Investitionsvorhaben in dieser Ausprägung der situationsbasierten Adaption nicht berücksichtigt oder eingeplant werden.

Abweichungen, die mit der Ausprägung der situationsbasierten Adaption begegnet werden können, sind die Anpassung der Montagesystemstruktur auf schwankende Produktionsvolumen, Eilaufträge und Stornierungen, technische Störungen, Bauteilengpässe und Mitarbeiterausfälle (Abbildung 5.25).



**Abbildung 5.25:** Ausprägung der situationsbasiert kurzfristigen Adaption

Den Abweichungen hinsichtlich des Personals wird mit der Umstrukturierung der Mitarbeiter bei Schichtbeginn begegnet. Dabei werden Mitarbeiter mit der benötigten Qualifikation an Arbeitsstationen eingesetzt, an denen deren Fähigkeit von Nöten ist. Der Personaltransfer kann zudem über

Kostenstellen hinweg ausgeführt werden, wenn das Unternehmen diese organisatorische Maßnahme bereits implementiert hat. Beim Auftreten von Über- oder Unterkapazitäten, hervorgerufen durch Eilaufträge oder Stornierung sowie Mitarbeiterausfällen, kann das Schichtmodell bedarfsgerecht angepasst werden, um reaktionsschnell einen wirtschaftlichen Betrieb sicherzustellen. Der Vorgang der Anpassung drückt sich durch die Einplanung von Schichten bzw. dem Ausfall von geplanten Schichten aus. Zudem kann Eilaufträgen mit einer Reihenfolgenänderung hinsichtlich der geplanten Auftragseinstellung begegnet werden, was zum einen über zentrale fertigungsnahe Bereiche, wie der Fertigungsplanung erfolgen kann oder bei einer implementierten Selbstorganisation innerhalb der spezifischen Leistungseinheit. Die Anpassung der Losgrößen ist ein weiterer Handlungsspielraum, der die Ausbringungsmenge an Produkten signifikant beeinflusst und somit situationsbasierte Schwankungen im Produktmix berücksichtigt.

Hinsichtlich der Maschinen und Anlagen können Bearbeitungszeiten, Rüstzeiten und Stillstandszeiten verstärkt betrachtet werden, um bekannte Defizite hinsichtlich der Anlageneffizienz zu senken. Dies ermöglicht es, die Ausbringungsmenge innerhalb einer Schicht zu steigern. Eine reaktionsschnelle Instandhaltung ist dabei genauso Voraussetzung wie robuste Prozesse und kurze Rüstzeiten. Zudem sind bei technischen Änderungen am Produkt, soweit vorhanden, folgende Handlungsspielräume hinsichtlich Maschinen und Anlagen anwendbar. Sind in einem Montagesystem modulbasierte Ressourcen vorhanden, kann eine effiziente Anpassung der Leistungsparameter hinsichtlich der Maschinenzeiten erreicht werden. Dies setzt jedoch zudem eine ausreichende Kompatibilität und Standardisierung voraus. Ohne diese ist ein zeitarmer Austausch von Modulen nicht realisierbar. Werkzeuge, deren Flexibilitätskorridor eine Anpassung der Funktionen erlauben, beispielsweise die Anpassung des Schraubdrehmoments, stellen ebenfalls Handlungsspielräume dar, um Abweichungen hinsichtlich der Produktstruktur begegnen zu können. Modulbasierte Vorrichtungen sind von Vorteil, wenn eine kurzfristige Änderung konstruktiver Art an Produkten durchgeführt wird. Zum einen reduzieren modulbasierte Vorrichtungen den beanspruchten Lagerplatz und zum anderen kann eine situationsbasierte Adaption dieser effizient durchgeführt werden, ohne die Wirtschaftlichkeit des gesamten Montagesystems zu beeinflussen.

Abweichungen hinsichtlich der Teilebereitstellung kann ebenfalls situationsbasiert kurzfristig begegnet werden. Treten beispielsweise Lieferengpässe bei einer Bauteilkomponente auf, kann eine Kompensation durch ein höherwertiges gleichartiges Bauteil, das im Lager vorhanden ist, erfolgen. Diese Maßnahme sollte jedoch nur zum Einsatz kommen, wenn es sich um einen Schlüsselkunden handelt, da temporäre wirtschaftliche Einbußen mit dieser Maßnahme einhergehen. Ist dies nicht

der Fall, sollten diverse Handlungsspielräume, wie zusätzliche Schichten am Folgetag eingeplant werden.

Schlussfolgernd lässt sich für die Ausprägung der kurzfristig situationsbasierten Adaption feststellen, dass die situationsbasierten Handlungsspielräume stark von der schon implementierten Adaptionfähigkeit in dem betrachteten Montagesystem abhängen. Je stärker diese ausgeprägt ist, desto mehr Handlungsspielräume stehen zur Verfügung, um Abweichungen zu begegnen. Die Komplexität der Handlungsspielräume ist ebenfalls als gering einzustufen, da in diesem Zeithorizont keine komplexen strukturellen Änderungen durchführbar sind. Synergieeffekte, die durch die Betrachtung von Wirkbeziehungen zwischen den Handlungsspielraumgruppen entstehen, können somit nur in Maßen erzeugt bzw. genutzt werden. Die Ausprägung der situationsbasierten Adaption stellt sich als die am wenigsten komplexe Ausprägung heraus, eignet sich jedoch überdurchschnittlich, um auf permanent einwirkende Abweichungen reagieren zu können und einen wirtschaftlichen Betrieb des Montagesystems sicherzustellen.

#### **5.4.2.2 Vorausschauende Adaption**

Die Ausprägung der vorausschauenden Adaption ermöglicht es Adaptionskonzepte zu entwickeln, die einen vorausschauenden Charakter aufweisen. Dies bedingt sich aus der Tatsache, dass sich der verfolgte Zeithorizont innerhalb von einer Schicht bis eine Wochen abspielt. Somit kann komplexeren Abweichungen begegnet und Lösungen entwickelt werden, die eine Steigerung der zukünftigen Adaptionfähigkeit erlauben. Zusätzlich können innerhalb dieser Ausprägung, basierend auf dem erweiterten Zeithorizont, weitere Handlungsspielräume berücksichtigt werden. Diese sind die Qualifikation des Personals, die Standardisierung einzelner Vorgänge, die Fremdvergabe von Auftragsbestandteilen, die Beschaffung von Fehlteilen und die Flexibilisierung der Ressourcen (Abbildung 5.26).

Neben den schon erwähnten Adaptionmöglichkeiten, der situationsbasiert kurzfristigen Adaption, besteht die Möglichkeit tiefgreifendere Adaptionen innerhalb des Montagesystems durchzuführen. Zum einen steigt der Handlungsspielraum hinsichtlich der Personalorganisation. Bedingt durch den erweiterten Zeithorizont können Schulungen durchgeführt werden, mit denen das Personal in die Lage versetzt wird, Fähigkeiten aufzubauen, die deren potenziellen Einsatzorte ansteigen lassen. Dies erhöht die zukünftige Adaptionfähigkeit, da das vorhandene Personal flexibler eingesetzt und somit auf Turbulenzen effizienter reagiert werden kann.

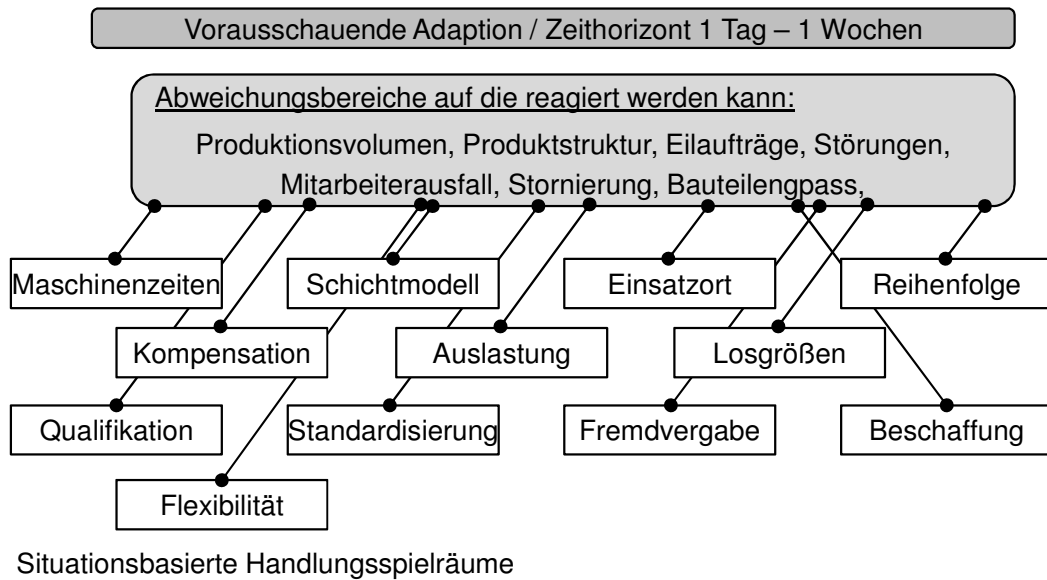


Abbildung 5.26: Ausprägung der vorausschauenden Adaption

Die Maschinen- und Anlageneffizienz ist ebenfalls mit dieser Ausprägung der Adaption steigerungsfähig. Durch Standardisierungsstrategien hinsichtlich der Rüstvorgänge können Potenziale gehoben werden, mit denen diese schneller durchgeführt werden können. Dadurch wird eine effiziente Reaktion auf schwankende Produktionsvolumen und Eilaufträge erreicht. Hierzu sind die indirekten Bereiche des Betriebsmittelbaus und der Instandhaltung einzubeziehen, was jedoch durch den erweiterten Zeithorizont ermöglicht ist. Zudem ist die Bearbeitung kleinerer Losgrößen möglich, da Rüstvorgänge die Gesamtmontagesystemeffizienz nicht mehr essenziell beeinflussen. Um Abweichungen hinsichtlich der Teilebereitstellung effizienter begegnen zu können, besteht die Möglichkeit zur Fremdvergabe oder der Beschaffung von Bauteilen. Ist ein Lieferengpass von einem Bauteil identifiziert, kann innerhalb der situationsbasiert kurzfristigen Adaption nur durch eine Kompensation oder einer Rabattierung reagiert werden. Innerhalb dieser Ausprägung können Zulieferer identifiziert werden, die reaktionsschnell passende Komponenten liefern können. Wird nun ein Engpass an Bauteilkomponenten vor Beginn der Montagetätigkeiten identifiziert, wird der Zulieferer kontaktiert. Bis die Komponenten angeliefert sind, werden Folgeaufträge bearbeitet. Anschließend erfolgt die Bearbeitung des zurückgestellten Auftrags. Im Zusammenspiel mit den Handlungsspielräumen aus den Gruppen „Personal“ und „Aufträge und Produkte“ ist eine Flexibilisierung erreicht, die zukünftige Adaptionen erleichtert.

Schlussfolgernd lässt sich für die Ausprägung der vorausschauenden Adaption zusammenfassen, dass diese nicht nur einzelne Handlungsspielraumgruppen betrachtet, sondern aktiv deren Kombination fördert. Zudem implementiert diese Ausprägung Maßnahmen, die innerhalb der permanent

durchführbaren situationsbasiert kurzfristigen Adaption zur Verfügung stehen. Dieses Vorgehen setzt Synergieeffekte frei, die sich aus der Kombination der Handlungsspielräume und der Steigerung der Adaptionfähigkeit der Montagesystemstruktur ergeben. Die Ausprägung ist somit komplementär zur situationsbasiert kurzfristigen Adaption.

Der einmalige Zusatzaufwand kann parallel zu dem laufenden Montagesystembetrieb durchgeführt werden und stört somit nur minimal den wirtschaftlichen Betrieb. Allerdings sind Investitionen bezüglich der betreffenden indirekten Bereiche und bei der Planung und Umsetzung der Maßnahmen notwendig.

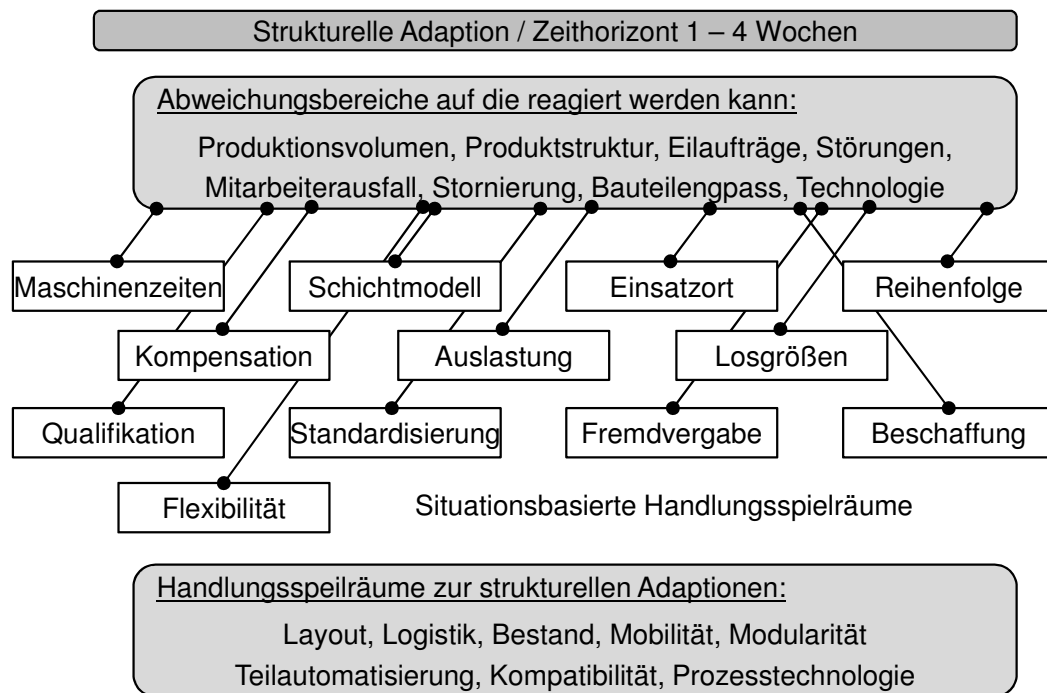
### **5.4.2.3 Strukturelle Adaption**

Die Ausprägung der strukturellen Adaption ermöglicht es die Adaptionfähigkeit eines Montagesystems strukturell zu steigern. Dies wird durch den Zeithorizont erreicht, der eine Schicht bis vier Wochen beträgt. Somit stehen nicht nur Handlungsspielräume zur Verfügung, die eine situationsbasierte Reaktion auf einwirkende Turbulenzen ermöglichen zur Verfügung, sondern auch Handlungsspielräume die strukturelle und technische Gegebenheiten, die bisher als Restriktionen hinsichtlich der situationsbasierten Adaption wahrgenommen werden mussten. Die zusätzlichen, zur strukturellen Adaption in Frage kommenden, Handlungsspielräume sind die Anpassung des Layouts, der Materialbereitstellung und damit einhergehend die Skalierung des Bestands sowie die Integration von teilautomatisierten Prozessschritten, die Modularisierung von Werkzeugen und Vorrichtungen und die Anpassung der Prozesstechnologie. Die Handlungsspielräume der strukturellen Adaption sind in Abbildung 5.27 dargestellt.

Strukturelle Adaptionen ermöglichen es, die gesamte Struktur des Montagesystems adaptionsfähiger zu gestalten. Diese Ausprägung stellt somit einen Befähiger zur Steigerung der Adaptionfähigkeit des Gesamtsystems dar. Resultierend daraus muss festgestellt werden, dass dies nicht ohne Investitionen bezüglich der Betriebsmittel und der Organisation durchgeführt werden.

Hinsichtlich der Adaptionfähigkeit von Maschinen und Arbeitsplätzen können Mobilitätsstrategien verfolgt werden, die einen unkomplizierten Austausch von Funktionseinheiten ermöglichen. Dies begünstigt wiederum eine effiziente Adaption des Montagesystems. Mit Hilfe qualifizierter Mitarbeiter können Adaptionen durchgeführt werden, ohne Produktivitätsverluste verzeichnen zu müssen. Zudem lassen sich Werkzeuge modularisieren. Dies setzt jedoch eine hohe Standardisierung dieser voraus, die innerhalb einer vorausschauenden Adaption umgesetzt werden können. Werkzeuge lassen sich somit innerhalb kürzester Zeit an veränderte Auftragsituationen oder Produktstrukturen adaptieren. Dies gilt gleichzeitig für die Modularisierung von Vorrichtungen. Modulbasierte

Vorrichtungen können innerhalb einer situationsbasiert kurzfristigen Adaption angepasst werden und sind somit hochflexibel hinsichtlich der Aufnahme von Produkten. Dabei werden beispielsweise Ansätze verfolgt, die Basisträgerplatten mit aufsteckbaren Modulen nutzen, um effizient auf Produktänderungen reagieren zu können. Diese Adaptionen setzt jedoch eine starke Verflechtung der Montage mit der Instandhaltung und dem Betriebsmittelbau voraus, die organisatorisch sehr nah an der Montage angegliedert sein müssen, um diese Änderungen schnell und kompetent umzusetzen.



**Abbildung 5.27:** Ausprägung der strukturellen Adaption

Des Weiteren können innerhalb dieser Ausprägung die Organisationsprinzipien der Logistik angepasst werden. Dies ermöglicht es zum einen, dass Bauteile aus der Fremdfertigung direkt Just in time an die Linie geliefert werden, wenn ein unternehmensinterner Engpass an spezifischen Bauteilen vorherrscht. Zum anderen können Belieferungsstrategien entwickelt werden, die einen unverzüglichen Wechsel von Produktvarianten unterstützen. Somit ist die Reihenfolge der Auftragsbearbeitung situationsbasiert anpassbar.

Der Austausch von Prozesstechnologien wird durch die Implementierung von Mobilitäts- und Modularisierungsstrategien hinsichtlich der Betriebsmittel in einer situationsbasiert kurzfristigen Adaption ermöglicht, da Technologien teilautomatisiert in Modulen organisiert und entsprechend ausgetauscht werden können. Ein weiterer Vorteil bei der Durchführung von strukturellen Adaptionen ist die Flexibilisierung des Layouts. Dies lässt Erweiterungen bzw. Reduktionen von Liniendimensionen zu. Resultierend können Ressourcen aus einer Linie entfernt bzw. hinzugefügt werden. Tritt



beispielsweise ein Engpass an einer Station auf, kann beispielsweise eine zweite Station mit derselben Funktion hinzugefügt werden. Dabei müssen jedoch die Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems innerhalb einer situationsbasiert kurzfristigen Adaption, bewertet werden. Diese Ausprägung eignet sich zur Durchführung struktureller Anpassungen. Implementierte Maßnahmen bilden die Grundlage für situationsbasiert kurzfristige sowie vorausschauende Adaptionen und erweitern systemimmanente Handlungsspielräume. Bei der Durchführung dieser Adaption sind höhere Investitionskosten einzuplanen, die sich jedoch durch die gesteigerte Fähigkeit zur permanenten Adaption nivellieren.

#### **5.4.2.4 Steigerung der Adaptionfähigkeit**

Neben den drei Ausprägungen, die innerhalb des definierten situationsbasierten Zeithorizonts agieren, konnte in Abschnitt 5.4.2 eine Ausprägung identifiziert werden, deren Umsetzungszeitraum außerhalb des aufgestellten Zeithorizonts liegt. Diese dient hauptsächlich der Steigerung der Adaptionfähigkeit einer Montagesystemstruktur und greift sehr tief in die vorhandenen organisatorischen Abläufe und technischen Elemente ein. Der Umsetzungszeitraum der Maßnahmen betrifft einen Zeitraum, der einem Monat übersteigt und benötigt eine hohe zum investieren. Die Maßnahmen und deren Auswirkungen auf die situationsbasierte Adaptionfähigkeit sind in Abbildung 5.28 dargestellt.

Der Kerninhalt dieser Ausprägung definiert sich durch die Umsetzung von Wandlungsbefähigern (Abschnitt 2.7.1) in den vorhandenen Montagesystemstrukturen, um eine Adaptionfähigkeit zu erreichen, die bisher außerhalb der systemimmanenten Reichweite lag. Möglichkeiten, wie ein System wandlungsfähig gestaltet werden kann, wurden in der vorhandenen Literatur ausführlich betrachtet [Wiendahl 2005] [Westkämper und Zahn 2009]. Die Vorteile für eine situationsbasierte kurzfristige Adaption werden an dieser Stelle jedoch detailliert erläutert, um die Wichtigkeit dieser Ausprägung zu verdeutlichen. Hinsichtlich der situationsbasierten Adaption zeigt eine verstärkte Implementierung von Wandlungsbefähigern folgende Auswirkungen.

#### **Betriebsmittel**

Durch die verstärkte Modularisierung und damit einhergehenden Standardisierung sowie Kompatibilität der Ressourcen wird ein effizientes Austauschen von Modulen erreicht. Dies schafft die Möglichkeit, Leistungsparameter und Funktionen kurzfristig anzupassen. Damit verstärkt sich zudem die Universalität der Ressourcen, was eine weitere Produktvariabilität zulässt und die Produktionsprogrammplanung erleichtert. Gleichzeitig können durch die Umsetzung des Leistungseinheitengedankens, die Selbstorganisation und Selbstkonfiguration innerhalb von Montagesystemen

verstärkt werden. Dies flexibilisiert zudem die Auftragsbearbeitung, da basierend auf täglichen Zielen eine selbstgesteuerte, auf Wissen der Mitarbeiter basierte, Organisation erreicht wird. Um die Wirtschaftlichkeit des Montagesystems zu gewährleisten, müssen Flexibilisierungsstrategien angewandt und Betreibermodelle gefunden werden, die eine bedarfsgerechte Abrechnung der zu nutzenden Module ermöglicht. Dies reduziert die Kosten der Lagerhaltung und des gebundenen Kapitals für die Module.



**Abbildung 5.28:** Steigerung der systemimmanenten Adaptionfähigkeit

**Personal**

Mit der Einführung von flexiblen Tarifverträgen und Arbeitszeitmodellen wird eine adaptionfähige Personalstruktur erreicht, die je nach Auslastung aktiviert bzw. reduziert werden kann. Damit sind Maßnahmen zur Begegnung von Über- bzw. Unterkapazitäten effizient realisierbar. Die Selbstorganisation und Selbstkontrolle, die durch die Implementierung der Leistungseinheiten erreicht wird, ist das Personal zugleich ein wichtiger Wissensträger und sichert die Wirtschaftlichkeit des Montagesystems, da Anpassungen im Personalbedarf und bei dem benötigten Qualifikationsniveaus direkt aus der Leistungseinheit gesteuert werden. Kooperationen über Kostenstellen hinweg sind ebenfalls Optionen, mit denen gearbeitet werden kann. Maßnahmen die dies ermöglichen, werden in folgender Literatur erläutert [Stock 2013].

### **Aufträge und Produkte**

Auftragsschwankungen und Last Minute Changes an Produkten kann ebenfalls durch die Implementierung von Wandlungsbefähigern und der Einführung von Leistungseinheiten effizienter innerhalb einer kurzfristigen Adaption begegnet werden. Die Fähigkeit zur Selbstoptimierung lässt eine variable Auftragsbearbeitung zu. Damit können Eilaufträge, Stornierungen oder Änderungen an Produkten, die kurzfristig vom Kunden gewünscht werden, in das Produktionsprogramm integriert werden, ohne zeitintensive Planungsschleifen anzustoßen. Dies setzt allerdings hoch qualifizierte Mitarbeiter in den Leistungseinheiten voraus.

### **Technologie und Peripherie**

Störungen und technologischen Anpassungen können durch die Implementierung der Wandlungsbefähigern ebenfalls kurzfristig begegnet werden, da modulbasierte Ressourcen einen effizienten Wechsel an Technologien ermöglicht. Zudem sind durch hoch qualifizierte Mitarbeiter Voraussetzungen geschaffen, die eine Reaktion auf kleinere Störungen vereinfacht. Die Restrukturierung der indirekten Bereiche, bei denen Mitarbeiter der Instandhaltung und des Betriebsmittel- und Werkzeugbaus direkt Leistungseinheiten zugeordnet sind, erhöht die technische Intelligenz und verkürzt somit die Reaktionsfähigkeit hinsichtlich Anpassungen und größeren Störungen.

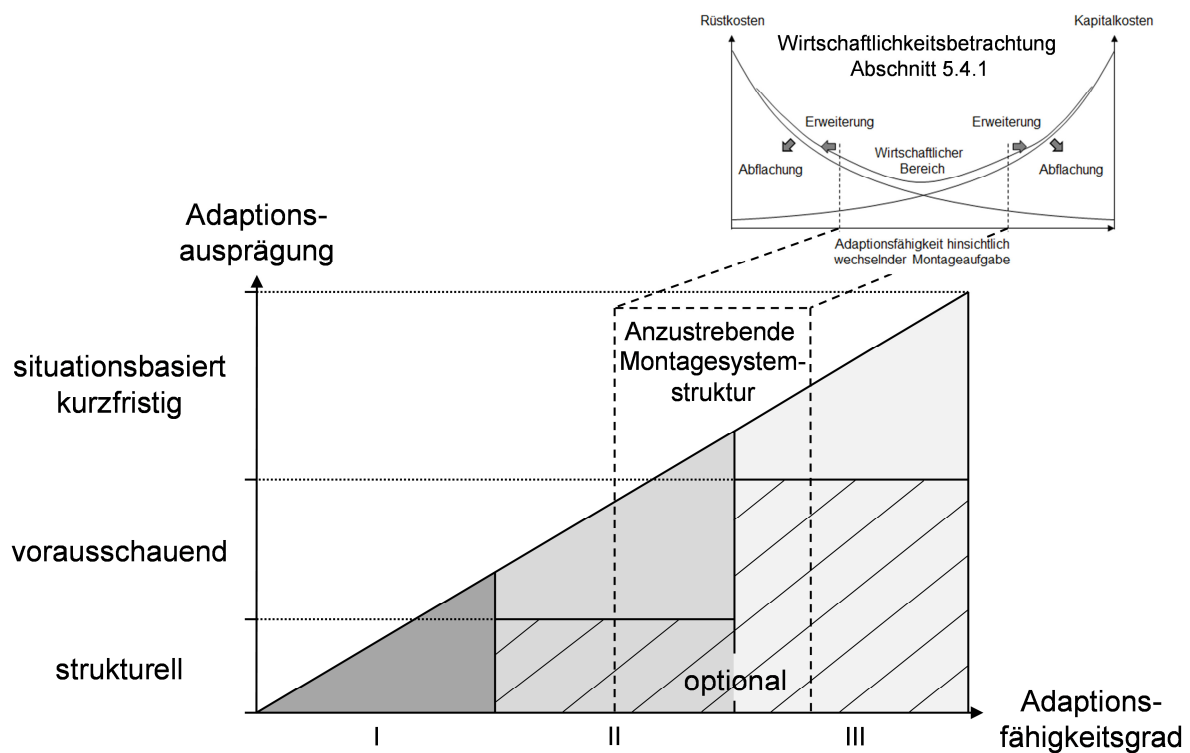
Das Ziel dieser Ausprägung fokussiert sich stark auf die Steigerung der Adaptionsfähigkeit und das Potenzial zur Reduktion benötigter Stunden für eine situationsbasierte Adaption (sAs). Da diese Maßnahmen Bereiche im Unternehmen einbeziehen, wie beispielsweise das Controlling und die Fabrikplanung, die außerhalb des Fokus dieser Arbeit agieren, wird auf die direkte Umsetzung dieser Maßnahmen innerhalb dieser Arbeit nicht eingegangen. Die Vorteile, die sich aus dieser Ausprägung ergeben, sind allerdings nicht zu vernachlässigen und werden daher erläutert.

#### **5.4.2.5 Auswahl der Adaptionsausprägungen**

Die Wahl einer Adaptionsausprägung hat gravierenden Einfluss auf den Aufwand und den temporären Wirtschaftlichkeitsabfall des Montagesystems. Es muss eindeutig geklärt werden, zu welchem Zeitpunkt, welche Ausprägung angestoßen werden muss. Somit kann der Gefahr entgegengewirkt werden, interne Turbulenzen zu erzeugen, die wiederum einen Stillstand des Montagesystems oder eine negative Beeinflussung der Wirtschaftlichkeit hervorrufen.

Mit Hilfe des morphologischen Kastens wird der Adaptionsfähigkeitsgrad identifiziert (Abschnitt 5.1.1). Dieser gibt Aufschluss, welche Ausprägung der Adaption durchgeführt werden kann bzw. ob Bedarf besteht, die Adaptionsfähigkeit eines Montagesystems durch geringfügige oder weitreichende Strukturänderungen zu steigern. Abbildung 5.29 stellt den Auswahlprozess für eine Adaptions-

ausprägung in Abhängigkeit des identifizierten Adaptionfähigungsgrads einer Montagesystemstruktur dar. Ist ein Montagesystem hauptsächlich der Stufe I zuzuordnen, sollte, neben der Option eine stark stringente situationsbasiert kurzfristige Adaption durchzuführen, die Anpassung der gesamten Montagestruktur aufzugreifen und somit die Adaptionausprägung „strukturelle Adaption“ zu forcieren. Wird ein Montagesystem in die Stufe III eingeordnet, ist die Nutzung der situationsbasiert kurzfristigen Adaption zweckmäßig, da genügend Maßnahmen hinsichtlich der situationsbasierten Handlungsspielräume zur Verfügung stehen. Optional stehen jedoch auch die vorausschauende und strukturelle Adaption zur Verfügung.



**Abbildung 5.29:** Auswahl der ordnungsgemäßen Adaptionausprägung hinsichtlich des identifizierten Adaptionfähigungsgrads

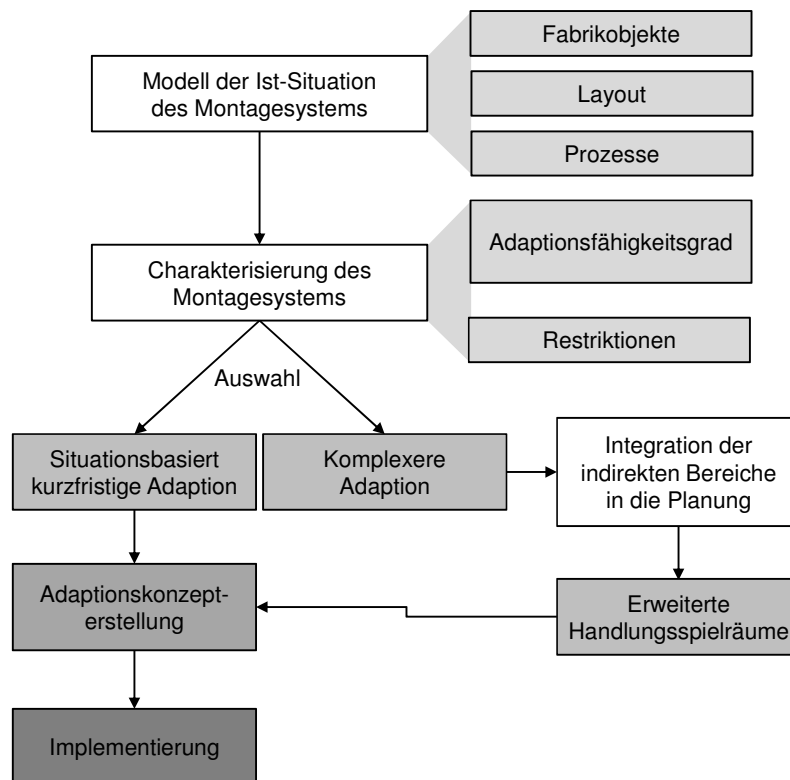
Das Vorgehen zu Auswahl ist so konzipiert, dass es die graduelle Entwicklung des Adaptionfähigungsgrads berücksichtigt. Dies ist in der Tatsache begründet, dass der morphologische Kasten Schwachpunkte in der vorhandenen Adaptionfähigkeit aufzeigt. Diesen kann mit der nächst komplexeren Adaptionausprägung begegnet werden. Die Option zur Auswahl der in der Zeitdauer höheren Adaptionausprägungen ist gewollt und stellt einen Mechanismus dar, der eine permanente Verbesserung zulässt.

Die Methode zur Auswahl von Adaptionausprägungen ermöglicht eine effiziente und zielgerichtete Adaption der Montage auf Basis der analysierten Ist-Situation. Somit ist sichergestellt, dass Auf-

wände in Form von Mannstunden und Kosten sowie der temporäre potenzielle Stillstand des Montagesystems, minimal sind.

### 5.4.3 Erstellung von Adaptionskonzepten

Mit der abgeschlossenen Analyse des Montagesystems und dessen Umfeld wird unter Zuhilfenahme des digitalen Werkzeugs ein Modell aufgebaut, das die Ausgangsbasis für die Erstellung von Adaptionskonzepten darstellt. Die Zeit, die zur Erstellung des Istzustand-Modells benötigt wird, fließt dabei nicht in die Stunden für eine situationsbasierte Adaption mit ein, da diese als einmaliger Aufwand angesehen wird, der für darauffolgenden Adaptionen nicht mehr in diesem Maße anfällt. Durch die Parametrisierung der Fabrikobjekte innerhalb des Modells werden leistungsorientierte Kennzahlen berechnet, die den Ausgangszustand charakterisieren.



**Abbildung 5.30:** Ablauf der Adaptionskonzepterstellung

Basierend auf der Identifikation des Adaptionsfähigkeitsgrads (Abschnitt 5.1.1) und den identifizierten Restriktionen (Abschnitt 5.1.3) kann eine Auswahl hinsichtlich der Ausprägung der Adaption (Abschnitt 5.4.2) erfolgen. Der nun bekannte Spielraum zur Handlung hinsichtlich der vorherrschenden Abweichungen dient der Erstellung von Adaptionskonzepten. Handelt es sich bei der Adaption um eine situationsbasiert kurzfristige Adaption, kann dieses mit Unterstützung des digita-

len Werkzeug effizient abgebildet werden. Komplexere Adaptionen hinsichtlich der Struktur müssen mit den betreffenden indirekten Bereichen konzipiert und abgeklärt werden. Sind diese implementiert, kann die Änderung der vorhandenen Ressourcen innerhalb des digitalen Werkzeugs umgesetzt werden und steht somit für die folgenden situationsbasiert kurzfristigen Adaptionen zur Verfügung. Zudem können Montageorganisationsabläufe innerhalb des digitalen Werkzeuges simuliert werden, was sich beispielsweise durch die Menge der herzustellenden Produkte und die Anzahl der auszuführenden Schichten ausdrückt. Innerhalb der jeweilig erstellten Adaptionen werden automatisch, durch die Veränderung der Struktur des Montagesystems und den damit verbundenen Parameteränderungen, leistungsorientierte Kennzahlen berechnet. Diese ermöglichen den Vergleich mit der Ausgangssituation und sichern die Produktionsfähigkeit ab.

Das erstellte Adaptionskonzept muss, bevor diese in einer Montagelinie implementiert werden kann, bewertet werden, um deren Wirtschaftlichkeit gewährleisten und die Produktionsfähigkeit der Adaptionen absichern zu können. Dafür werden im folgenden Kapitel Bewertungskriterien erläutert, die die Umsetzung eines geeigneten Adaptionskonzepts ermöglichen.

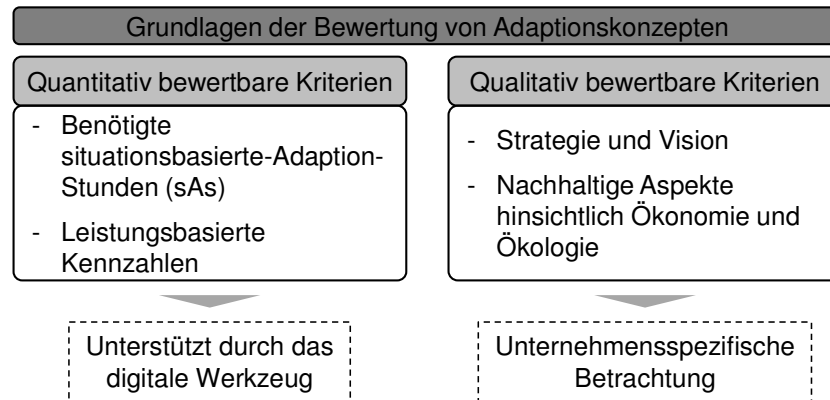
## **5.5 Bewertung der Adaptionskonzepte**

Den abschließenden Schritt der Methode stellt die Bewertung der erstellten Adaptionskonzepte dar. Dies ermöglicht die Umsetzung eines Konzepts, das einen wirtschaftlichen Betrieb des Montagesystems gewährleistet. Die Umsetzung des Adaptionskonzepts muss jedoch zeitnah erfolgen, da dieses, durch permanent wirkende Einflüsse, rasch an Aktualität verlieren. Die Konsequenz daraus ist, dass eine erneute Erstellung von Adaptionskonzepten angestoßen werden muss. In den folgenden Abschnitten werden die Bewertungsgrundlagen und das Bewertungsvorgehen erläutert.

### **5.5.1 Bewertungsgrundlagen**

Zur Bewertung der Adaptionskonzepte müssen Kriterien herangezogen werden, mit denen die Vorteile hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Montagebetriebszustands klar herausgestellt werden können. Die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens zeichnet sich dabei vor allem durch die ökonomische Effizienz aus. Diese besteht jedoch nicht nur in der Maximierung des Umsatzes bzw. der Minimierung der Kosten, um den Anteil des Gewinns zu steigern [Westkämper et al. 2013]. Vielmehr sind die Effizienz und der Aufwand, mit dem ein wirtschaftlicher Betrieb des Montagesystems erzielt werden kann, von Bedeutung. Diese sind jedoch stark von den Faktoren Zeit und Qualität abhängig ist.

Die Bewertung der Adaptionkonzepte erfolgt daher auf Basis von quantitativen Faktoren. Qualitative Faktoren, wie beispielsweise die Unternehmensstrategie und –vision, haben zwar entscheidenden Einfluss auf die Investitionsbereitschaft und letztendlich auf die Ausprägung der Adaption, deren Quantifizierung ist jedoch nicht mehr Bestandteil dieser Vorgehensweise. Die zugrunde gelegten Bewertungsfaktoren dieser Arbeit sind in Abbildung 5.31 dargestellt. Deren Berücksichtigung in der Methode wird im Folgenden erläutert.



**Abbildung 5.31:** Bewertungsgrundlage für Adaptionkonzepte

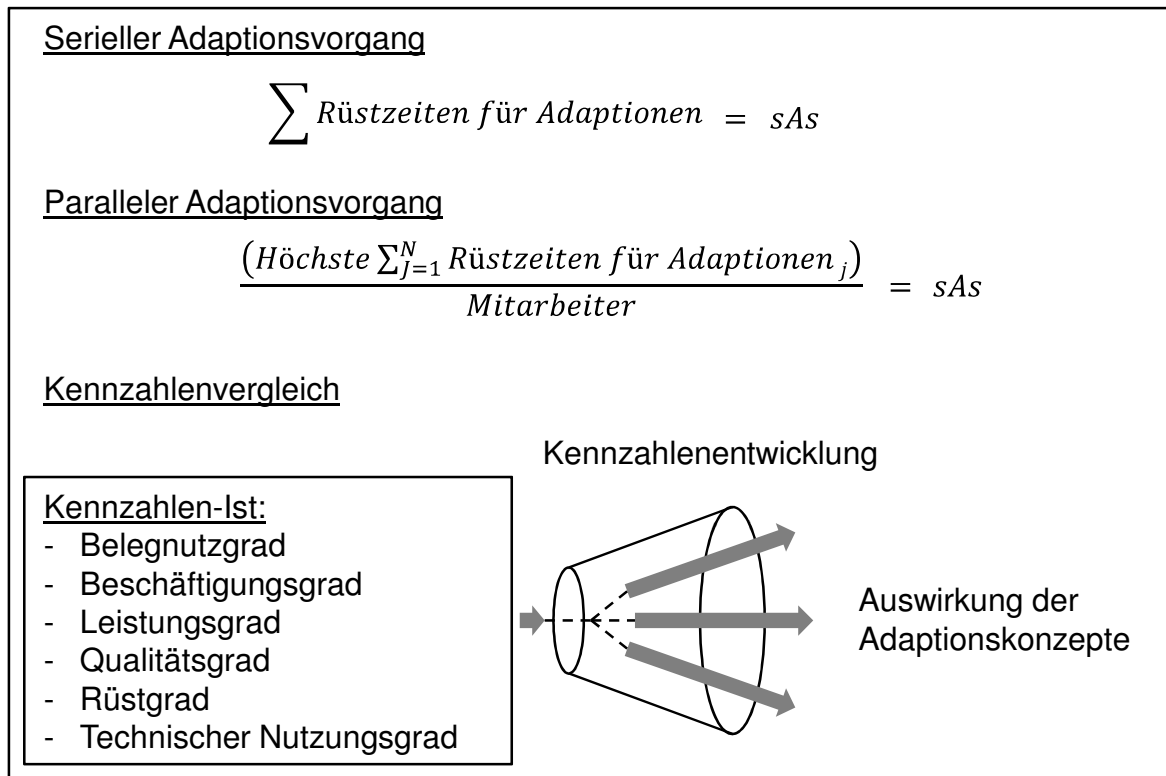
Für eine verlässliche quantitative Bewertung der Adaptionkonzepte werden zwei quantitativ messbare und industriell verbreitete Kriterien angewandt. Dies sind die benötigten Stunden, die für eine situationsbasierte Adaption anfallen und die Bewertung des Montagesystems durch leistungsbasierte Kennzahlen (Abbildung 5.32).

Die benötigten Stunden, die bei der Umsetzung einer situationsbasierten Adaption anfallen, stellen die maßgebliche Größe zur Bewertung der Adaptionkonzepte dar. Zum einen sind Zeiten, die für Rüstvorgänge innerhalb von Montagesystemen anfallen in Unternehmen mit variantenreicher Serienfertigung vorhanden und abrufbar.

Die Stunden, die für eine situationsbasierte Adaption benötigt werden, richten sich zudem an der Organisation der indirekten Bereiche aus. Ist die Kapazität hoch genug und die Bearbeitung der Rüstvorgänge kann parallel erfolgen, kann die Zeit für eine situationsbasierte Adaption reduziert werden, da Rüstaufgaben auf mehrere Mitarbeiter der Instandhaltung verteilt werden können. Ist dies nicht der Fall, muss eine Addition der Rüstzeiten erfolgen. Es stellt sich somit ein serieller Adaptionvorgang ein. Die Stunden die für eine Adaption (sAs) benötigt werden stellen eine entscheidende Maßgröße für die ökonomische Effizienz von Adaptionvorgängen dar.

Ein weiterer Vorteil hinsichtlich dieses Bewertungsmaßes ist, dass die Kosten, wenn diese von Interesse sind, nachvollzogen werden können, da unternehmensinterne Personalkosten für unterschied-

liche Personalarten vorhanden sind. Somit können Kostenaufwände, die bei einer situationsbasierten Adaption anfallen ermittelt werden. Die Bewertung der Kosten spielt jedoch hinsichtlich der Konzentration auf die Effizienzsteigerung des Montagesystems eine weniger bedeutende Rolle und ist somit unternehmensspezifisch abzuwägen.



**Abbildung 5.32:** Bewertungskriterien für Adaptionskonzepte

Die zweite Maßgröße mit der die Adaptionskonzepte quantitativ bewertet werden sind leistungsspezifische Kennzahlen (eingeführt, erläutert und ausgewählt in Abschnitt 5.2.3). Deren Berechnung wird durch das Auslesen der eingegebenen Fabrikobjektparameter ermöglicht und lässt die Bestimmung des Leistungsniveaus des aktuellen Montagesystems hinsichtlich dessen Effizienz zu. Die Bewertung umfasst neben produktionsrelevanten Kennzahlen zur Bestimmung der Effizienz, die Ausprägung der Qualität hinsichtlich der Produkte und des Montagesystems. Zudem werden Kennzahlen zur Bestimmung der kapazitiven Ausprägung des Montagesystems betrachtet und verglichen.

Innerhalb der erstellten Adaptionskonzepte werden dieselben leistungs-basierten Kennzahlen berechnet. Somit kann die Leistungs- und Kapazitätsausprägung dieser dargestellt werden.

Gleichzeitig wird durch deren Berechnung die Absicherung der Produktionsfähigkeit durchgeführt, da Kapazitäts- und Qualitätscharakteristika für die jeweiligen Adaptionskonzepte abgebildet wer-



den. Diese Vorgehensweise erlaubt den Vergleich mit der Ist-Situation, was Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit des Betriebs des angepassten Montagesystems ermöglicht.

Mit diesen Kriterien ist eine Bewertung der Adaptionskonzepte durchführbar. Die Vorgehensweise zur Bewertung vorhandener Adaptionskonzepte wird im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

### **5.5.2 Bewertungsvorgehen**

Mit Hilfe der entwickelten und erläuterten Kriterien kann eine Bewertung der Adaptionskonzepte durchgeführt werden. Die maßgebliche Größe der Bewertung stellt die Zeit, die für eine situationsbasierte Adaption benötigt werden, dar, da sie den Aufwand für eine Adaption geeignet ausdrückt. Zudem zeigen diese indirekt den Stand der Adaptionsfähigkeit auf. Je niedriger sich der Aufwand der Adaption ausdrückt, desto höher ist der Adaptionsfähigkeitsgrad. Dies begründet sich durch die aufwandsarmen Maßnahmen zu Anpassung des Montagesystems.

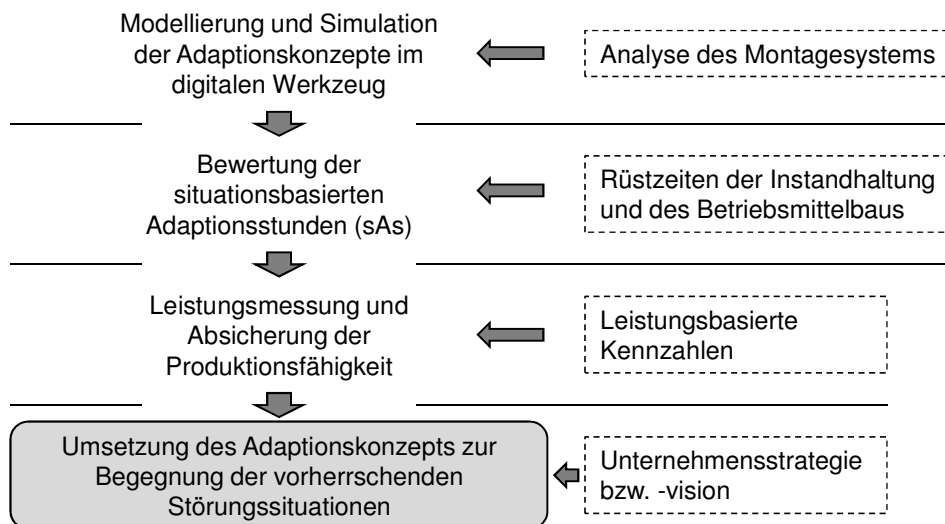
Die leistungsorientierten Kennzahlen spielen hinsichtlich der Bewertung eine unterstützende Rolle. Sie stellen eine Kontrollinstanz dar, mit der die Leistungsfähigkeit ausgedrückt und die Produktionsfähigkeit sichergestellt werden können.

Die Simulation basiert auf den im Unternehmen aufgenommenen Parametern und Informationen und bietet somit eine belastbare Aussage über die potenzielle Wirtschaftlichkeitsentwicklung. Die Zeit, die ein Adaptionskonzept zur Umsetzung benötigt, ergibt sich aus der Rüstzeit der einzelnen Elemente, die für die Integration und Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen anfällt. Das digitale Werkzeug stellt zudem eine Versuchsumgebung dar, mit der Adaptionskonzepte weiterführend angepasst werden können, um beispielsweise die benötigten sAs auf Basis der zur Verfügung stehenden Handlungsspielräume zu verringern. Je nach Organisation der Anpassungsvorgänge – sequenziell, parallel oder teilweise parallel – ist es möglich die sAs zusätzlich zu reduzieren.

Auf Basis der strukturierten bzw. geordneten Adaptionskonzepte wird in einem zweiten Schritt, der Vergleich der leistungsorientierten Kennzahlen durchgeführt. Die Kennzahlen werden automatisch aus den Parametern der Ressourcen und Fabrikobjekte berechnet und ermöglichen belastbare Aussagen hinsichtlich der Produktionsfähigkeit. Zudem geben sie Aufschluss darüber, inwieweit die Leistungsfähigkeit des Montagesystems beeinflusst wird.

Die systematische Vorgehensweise zur Bewertung der erstellten Adaptionskonzepte, ermöglicht die Priorisierung und den Vergleich dieser, auf Basis aussagekräftiger und aufwandsdeterminierender Kriterien. Zudem erhöht sie die Transparenz der Entscheidungen, lässt zielgerichtete Adaptionen zu und zeigt Alternativen auf, um die Adaptionsfähigkeit des Gesamtsystems zu steigern. Dies ermöglicht eine permanente Anpassung der Strukturen, die nachvollziehbar sind und den wirtschaftlichen

Betrieb des Montagesystems gewährleisten sowie die Wettbewerbsfähigkeit in einem turbulenten Umfeld aufrechterhalten. Durch die permanente Wirkung der Einflussfaktoren und die damit einhergehende Anpassung bzw. Steigerung der Adaptionfähigkeit der Montagesystemstruktur, ist eine permanente Anwendung der Methode notwendig.



**Abbildung 5.33:** Vorgehensweise zur systematischen Bewertung der Adaptionskonzepte

Die Umsetzung eines Adaptionskonzepts basiert auf der durchgeführten Bewertung der Adaptionskonzepte. Dabei darf jedoch der Einfluss der Unternehmensstrategie bzw. -vision nicht vernachlässigt werden. Ist diese beispielsweise ökonomisch nachhaltig ausgerichtet, hat diese Auswirkungen auf die endgültige Umsetzung eines Adaptionskonzepts. Wird eine Wandlungsfähigkeitssteigerung in dieser gefordert, sind Adaptionskonzepte umzusetzen, die von der sAs her höher liegen, die Adaptionfähigkeit jedoch nachhaltig steigern. Qualitative Faktoren sind daher nicht zu vernachlässigen, sondern unternehmensspezifisch zu berücksichtigen.

Mit Hilfe des in Kapitel 4 abgeleiteten Ansatzes konnte eine fünfstufige Methode entwickelt werden, die eine situationsbasierte Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit sicherstellt. Folgendes Zwischenfazit kann daraus gezogen werden.

Die Vorgehensweise der Methode deckt in einem ersten Schritt die Erstellung eines Modells des Montagesystems vor Ort ab. Dies ermöglicht die Planung von Adaptionskonzepten auf dem tatsächlichen Stand des zu betrachtenden Montagesystems. Neben der Erstellung des Ist-Modells ermöglicht die Methode die Identifikation des Adaptionfähigkeitsgrades des aufgenommenen Montagesystems. Dieser wird durch die Anwendung eines eindeutigen morphologischen Kastens ermittelt und zeigt auf in welchen Bereichen auf kurzfristig wirkende Abweichungen reagiert werden kann.

Der zweite Schritt der Methode zeigt daraufhin dem Anwender welche Handlungsspielräume in welchen Bereichen, in Abhängigkeit des Adaptionfähigungsgrads, zur Verfügung stehen, um auf Abweichungen hinsichtlich des wirtschaftlichen Betriebs reagieren zu können. Nach der Identifikation der anwendbaren Handlungsspielräume können Adaptionskonzepte erstellt und Adaptionen durchgeführt werden.

Neben der Durchführung einer situationsbasierten Adaption besteht die Möglichkeit strukturelle Adaptionen zu planen, um den zukünftigen Adaptionfähigungsgrad des Montagesystems zu erhöhen. Somit kann in folgenden Adaptionen Abweichungen mit einer höheren Anzahl an Handlungsspielräumen begegnet werden.

Das integrierte industrienah und leistungsorientierte Bewertungssystem ermöglicht die Priorisierung und anschließende Auswahl eines erstellten Adaptionskonzepts. Das entwickelte app-basierte digitale Werkzeug ermöglicht eine effiziente Anwendung der Methode vor Ort und beschleunigt die Adaptionskonzepterstellung sowie deren Bewertung.

Im Folgenden Kapitel wird die entwickelte Methode anhand von zwei Beispielen validiert, um deren Logik und Anwendbarkeit auf den Prüfstand zu stellen.

## **6 Validierung der Methode am Beispiel der Lernfabrik und eines Montagesystems**

Die Methode zur situationsbasierten Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit von Serienmontagen wurde in zwei Anwendungsszenarien validiert. Zum einen wurde eine alpha - Validierung der Methode in der Lernfabrik „advanced Industrial Engineering“ (aIE) des Instituts für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) durchgeführt, im Folgenden Lernfabrik genannt. Anschließend, in einer beta-Validierung größeren Umfangs, wurde die Methode in der Maschinenbaubranche angewandt und die einzelnen Planungsschritte anhand von praxisbasierten Daten validiert.

Das Kapitel schließt mit einem Fazit hinsichtlich der praxisbasierten Anwendung der Methode zur situationsbasierten Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit ab.

### **6.1 Lernfabrik „advanced Industrial Engineering“ (aIE)**

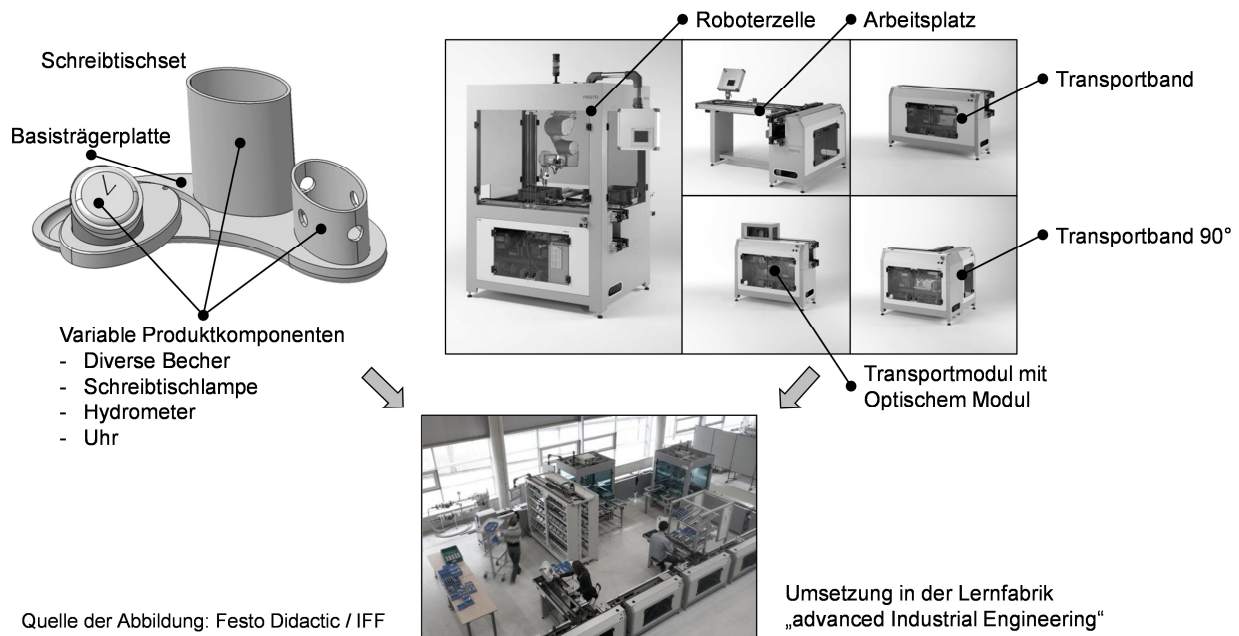
In der alpha-Validierung der entwickelten Methode wurden der Schritt der Modellierung und der Schritt der Adaptionfähigkeitsgradermittlung auf ihre ordnungsgemäße Funktion und intuitive Bedienbarkeit getestet. Zudem wurden Handlungsspielräume aufgezeigt, um die Adaptionfähigkeit der Lernfabrik zu steigern.

#### **6.1.1 Darstellung des Untersuchungsbereichs**

Die Lernfabrik am IFF besteht aus iFactory Modulen [Festo Didactic 2014] der Festo Didactic GmbH & Co. KG. Diese zeichnen sich durch einen modularen Aufbau sowie eine dezentrale Steuerung aus und erreichen ein sehr hohes Maß an Wandlungsfähigkeit [Dinkelmann 2011].

Innerhalb der Lernfabrik sind Module im Einsatz, die Aufgaben der manuellen bzw. robotergestützten Montage und Fertigung von Bauteilen übernehmen. Des Weiteren sind Module zum Transport und der Lagerung von Produkten bzw. Produktkomponenten vorhanden. Zur Überprüfung der Qualität innerhalb bzw. nach kritischen Arbeitsprozessen sind optische Inspektionsmodule, in Form von Kameras, installiert. Diese prüfen, ob die gewünschte Qualität erreicht oder die gewünschte Produktvariante produziert wird. Jedes Modul ist mit einem zweistöckigen Transportband ausgestattet, um einen effizienten kreislaufbasierten Materialfluss zu ermöglichen. Die Module selbst besitzen standardisierte Schnittstellen hinsichtlich der Mechanik, der Steuerung und der Medien- und Informationsversorgung. Dieser „Plug and Produce“-Mechanismus ermöglicht die Veränderung des

Layouts und somit der Arbeitsinhalte in kürzester Zeit. Innerhalb der Module sind standardisierte Steuerungs- und Schnittstelleneinheiten verbaut, die einfach und systematisch ausgetauscht werden können. [Westkämper 2013a]. Abbildung 6.1 gibt einen Überblick hinsichtlich des Untersuchungsobjekt und des Produkts.



**Abbildung 6.1:** Komponenten der Lernfabrik „advanced Industrial Engineering“

Das stark wandlungsfähige Gesamtsystem Lernfabrik stellt ein stark variantenreiches Produkt her. Dieses manifestiert sich in einem Schreibtischset, welches aus einer Basisplatte und diversen Aufbauteilen – diverse Becher, Schreibtischlampe, Hydrometer, Uhr – besteht. Das Produkt erreicht damit eine Zahl von über 10.000 möglichen Varianten [Dinkelmann 2011].

## 6.1.2 Bestimmung des Adaptionfähigkeitsgrads

Die Bestimmung des Adaptionfähigkeitsgrads bedingte die Aufnahme des Ist-Zustands der Lernfabrik. Dafür wurde entlang der Prozesskette die Ist-Situation des Layouts der Lernfabrik aufgenommen und die Module vor Ort im Shopfloor parametrisiert. Exemplarisch ist die Parametrisierung des Arbeitsplatzes „Montage Becher 1 und Uhr“ dargestellt (links in der Abbildung 6.2).

Zudem sind die Leistungsdaten der Montagelinie visualisiert (rechts in der Abbildung 6.2) Das Ergebnis der Modellierung ist in Abbildung 6.2 dargestellt und bildete mit den identifizierten Wirkbeziehungen den Ausgangszustand für die Analyse des Adaptionfähigkeitsgrads.

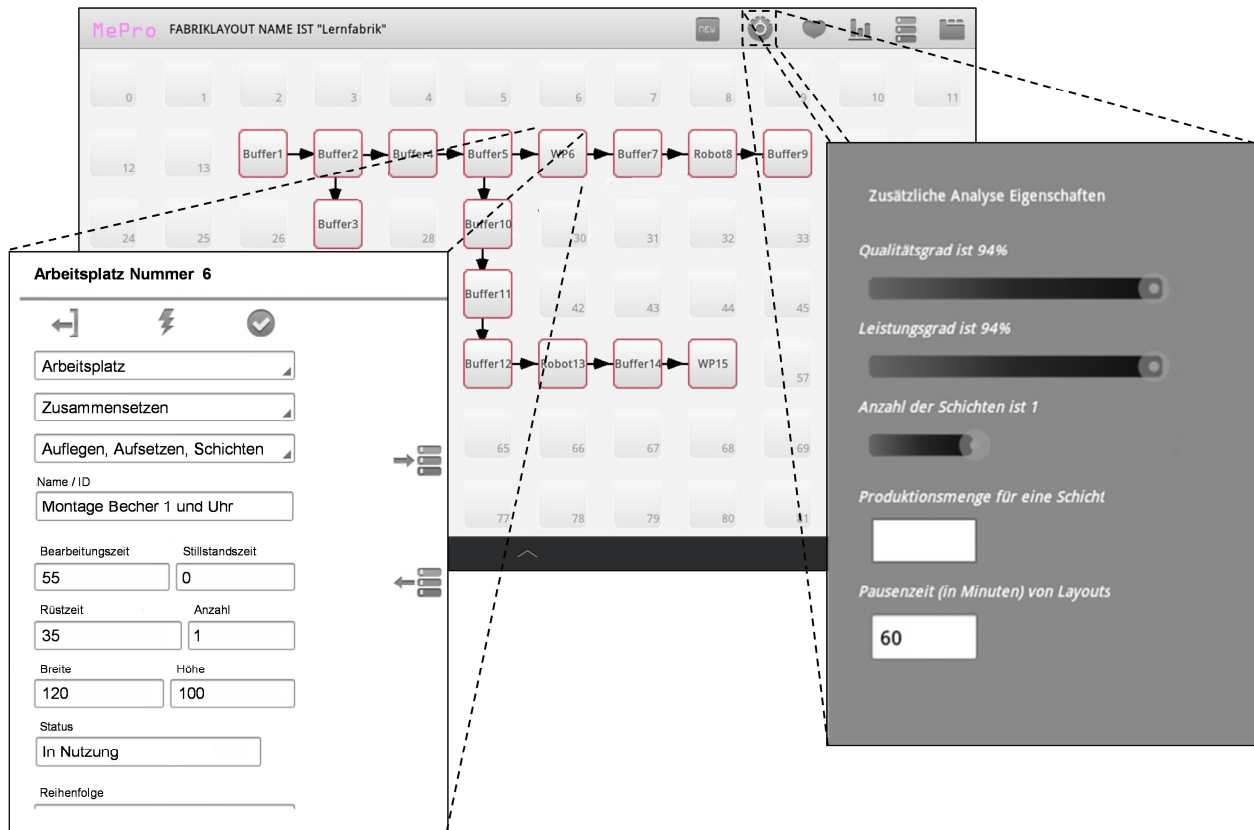


Abbildung 6.2: Modell der Lernfabrik

Neben der Modellerstellung wurden die vorherrschenden Wirkbeziehungen, Abschnitt 5.1.1, innerhalb des aufgenommenen Modells der Lernfabrik analysiert, um auf potenziell vorhandene Restriktionen reagieren zu können. Die Wirkbeziehungsanalyse zeigte auf, dass durch die integrierte Materialflusssteuerung, den standardisierten, modulbasierten Aufbau der Schnittstellen der Module und die dezentrale Steuerung keine Restriktionen hinsichtlich der Anordnung bzw. Ansteuerung der Maschinen und Roboter erkannt werden konnte. Zudem wurden keine räumlichen Randbedingungen, in Form von tragenden Säulen oder der Tragfähigkeit des Bodens identifiziert. Der kurzfristige Austausch der IKT-Systeme stellte jedoch eine Restriktion dar, da diese systemimmanent für die Steuerung der Module und somit der Betriebsaufrechterhaltung verantwortlich sind.

Der aktuelle Adaptionfähigkeitsgrad der Montagelinie wurde mit dem morphologischen Kasten, Abschnitt 5.1.1, analysiert, um zum einen die Ist-Situation vollständig darzustellen und zum anderen die potenziellen Handlungsspielräume aufzeigen zu können. Das Ergebnis der Analyse des Adaptionfähigkeitsgrads ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Adaptionfähigkeit der Lernfabrik im Bereich der Stufe III, hinsichtlich der Maschinen, Anlagen und Arbeitsplatzgestaltung befindet. Die Adaptionfähigkeit der Prozessketten und der IKT-Systeme wurde der Stufe II zugeordnet, da zum einen das Funktionsspektrum der Betriebsmittel, die

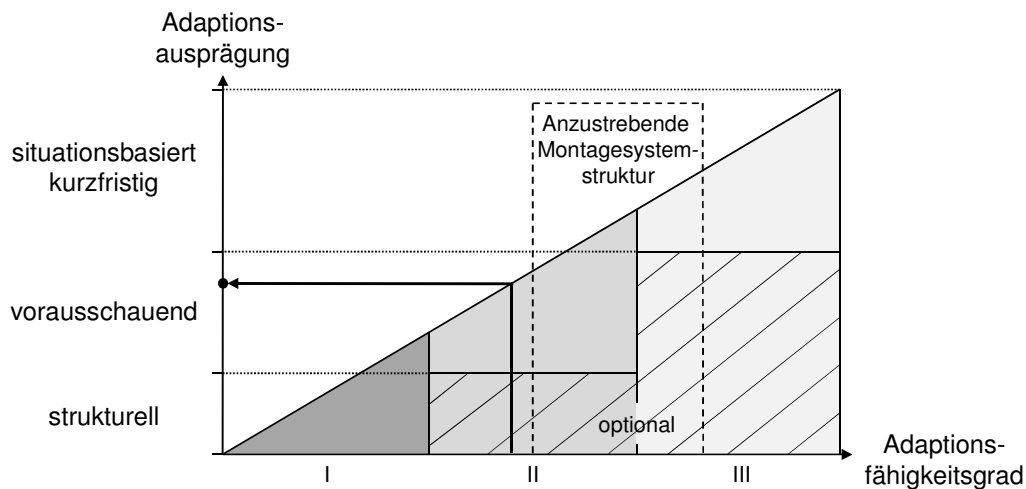
Restrukturierung der Prozessketten beeinträchtigt und zum anderen die Software aus kommerziellen [Dinkelmann 2011] Systemen besteht. Die Qualifikation des Personals sowie das Arbeitszeitmodell konnten nicht bewertet werden, da die Lernfabrik keinen ständigen Betrieb im klassischen Sinne aufweist.

	III	II	I
<b>Maschinen, Anlagen</b>			
Modularisierung	●		
Funktionsspektrum			●
Steuerungsaufbau	●		
Schnittstellen	●		
Verkettung	●		
<b>Arbeitsplatz</b>			
Modularisierung	●		
<b>Vorrichtungen</b>			
Modularisierung	●		
<b>Personal</b>			
<b>Arbeitszeitmodell</b>			
<b>Prozessketten</b>			
Struktur		●	
<b>IKT-Systeme</b>			
Systemaufbau		●	

**Abbildung 6.3:** Adaptionenfähigkeitsgrad der Lernfabrik

Mit der Erkenntnis des Adaptionenfähigkeitsgrads wurde die Ausprägungsart der Adaption determiniert (Abbildung 6.4). Diese zeigte, dass der Bedarf für eine vorausschauende Adaptionausprägung gegeben ist, in welcher die Themengebiete Prozessketten sowie das Funktionsspektrum der Module näher betrachtet werden sollten. Zudem war zu erkennen, dass Abweichungen im Betrieb mit situationsbasiert kurzfristigen Adaptionen begegnet werden kann, da die Betriebsmittel, bedingt durch die starke Modularisierung und Standardisierung und somit erreichte Kompatibilität, innerhalb kürzester Zeit ausgetauscht werden können. Somit fällt das in die Stufe I eingeordnete Funktionsspektrum nicht stark ins Gewicht. Jedoch müssen daher für jede Funktionserfüllung Module bereitgestellt bzw. vorrätig gehalten werden. Damit eröffnen sich Handlungsspielräume hinsichtlich der multifunktionalen Ausrichtung der Module, um eine Reduktion der Austauschvorgänge und eine Erhö-

hung der Flexibilität zu erreichen. Diese Maßnahmen erhöhen gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit, da eine Modulreduktion und einhergehende Skaleneffekte hinsichtlich der Lagerraumnutzung sowie der Instandhaltung erreicht werden.



**Abbildung 6.4:** Ermittlung der Adaptionausprägung basierend auf dem Adaptionfähigkeitsgrad

### 6.1.3 Fazit der alpha-Validierung

Mit Hilfe der alpha-Validierung konnte gezeigt werden, dass die einzelnen Bausteine der Methode logisch aufeinander aufbauen und den gestellten Anforderungen entsprechen. Dies zeigte sich zum einen in dem funktionalen und effizienten Modellerstellungsprozess. Dabei konnte validiert werden, dass die verschiedenen Module der Lernfabrik vor Ort aufgenommen und parametrisiert werden konnten. Zum anderen konnte die ordnungsgemäße Funktion der Bausteine zur Bestimmung des Adaptionfähigkeitsgrads und der darauf aufbauenden Auswahl der Art der Adaptionausprägung validiert werden. Dies drückte sich in der ordentlichen Kategorisierung der Wandlungs- und Adaptionfähigkeit der Lernfabrik aus. Diese besitzt überwiegend Stufe III Charakteristika. Dies bestätigte, das schon in diversen Veröffentlichungen nachgewiesene Fähigkeit der starken systemimmanenten Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Lernfabrik und zeigte, dass die entwickelte Methode zu ordnungsgemäßen und nachvollziehbaren Ergebnissen bei deren Anwendung kommt. Des Weiteren konnten mit Hilfe der Methode die Grenzen der Adaptionfähigkeit der Lernfabrik aufgezeigt und Handlungsspielräume aufgedeckt werden, mit denen diesen begegnet werden kann. Ebenso konnten die vorhandenen Restriktionen der Lernfabrik identifiziert werden, welche darauf folgend in den Methodenschritten ordnungsgemäß berücksichtigt wurden.



## **6.2 Situationsbasierte Adaption eines Montagesystems in der Maschinenbaubranche**

Anschließend an die alpha-Validierung wurde die entwickelte Methode anhand eines Montagesystems der Maschinenbaubranche im mittelständischen Unternehmen validiert (beta-Validierung). Dabei wurde entsprechend der entwickelten Vorgehensweise (Kapitel 5.4) zur Erstellung, Bewertung und Umsetzung von Adaptionskonzepten ein Montagesystem betrachtet und unterschiedliche Lastannahmen induziert. Die Bewertungsgrößen sind die zur Adaption benötigten Stunden (sAs) und die definierten leistungsbasierten Kennzahlen (Kapitel 5.5.1).

### **6.2.1 Darstellung der Montagelinie der variantenreichen Serienfertigung**

Den Gegenstandsbereich der Validierung stellte eine Montagelinie der variantenreichen Serienfertigung in der Maschinenbauindustrie dar. Die Darstellung des Ist-Zustands ermöglichte den anschließenden Vergleich mit den erstellten Adaptionskonzepten. Sie lieferte wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Schwachstellen der Montagelinie und wie diesen mit geeigneten Adaptionsausprägungsarten und Handlungsspielräumen begegnet werden kann.

Die Montagelinie wurde 2009 in Betrieb genommen und nach derzeitigen Erkenntnissen der Wandlungsfähigkeit ausgelegt. Dies ermöglicht eine effiziente Reaktion auf externe und interne Einflussfaktoren, in Form von Produktionsvolumenschwankungen und Produktvarianten. Auf der Montagelinie werden drei Ausprägungsarten einer Produktvariante von Elektrogeräte montiert. Diese unterscheiden sich nach Leistung und Länderspezifika. Die Montagelinie setzt sich aus den folgenden Bestandteilen zusammen:

- 4 Montagearbeitsplätze
- 1 Puffer
- 1 Fertigmontage- und Prüfmaschine
- 1 QS Arbeitsplatz
- 1 Verpackungsarbeitsplatz
- Max. 6 Mitarbeiter in der Montagelinie

Innerhalb der Montagearbeitsplätze werden unterschiedliche Arbeitsinhalte zur Montage der Elektrogeräte durchgeführt. Die Fertigmontage sowie die Prüfung der Elektrogeräte wird mit Hilfe einer Maschine automatisiert durchgeführt. Nach der Prüfung werden die Elektrogeräte an einem Qualitätssicherungsarbeitsplatz überprüft und mit den notwendigen Labeln und Gefahrenhinweisen versehen. Abschließend werden die fertiggestellten Elektrogeräte verpackt.

Jegliche Arbeitsplätze und Zuführungen der Montagelinie sind mit Komponenten der Creform Technik GmbH erstellt worden [Creform 2014]. Das Rohrstecksystem erlaubt eine einfache Anpassung der Arbeitsplätze im Bedarfsfall und erhöht somit das Potenzial der Wandlungsfähigkeit. Der Transport innerhalb der Montagelinie ist durch ein Rollenband realisiert, auf dem die Vorrichtungen manuell von den Mitarbeitern weitergeschoben werden. Der Puffer steht vor der Maschine und ist mit einer Kapazität von sechs Elektrogeräten ausgelegt, um einen kostenintensiven Stillstand der Maschine bei Fehlern bei den Montagevorgängen auszuschließen. Die Anzahl der Mitarbeiter in der Montagelinie ist auf maximal sechs Mitarbeiter beschränkt, kann jedoch flexibel reduziert werden, da jeder Mitarbeiter die gesamten Montageprozesse ausführen kann.

Der relative Anteile der Zeit, welcher zur Montage eines Elektrogerätes benötigt wird und das Layout der Montagelinie sind in Abbildung 6.5 dargestellt. Die Zeitanteile der Tätigkeiten sind auf die Basis „Montieren“ normiert, welche mit einem Zeitanteil von 10 angesetzt ist. Die Kapazität, welche die zu produzierende Stückzahl pro Schicht angibt, ist auf die Zahl 100 gesetzt. Die Daten zur Berechnung der Tätigkeitszeitanteile, wurden während der Modellierung der Bestandteile der Montagelinie hinterlegt.

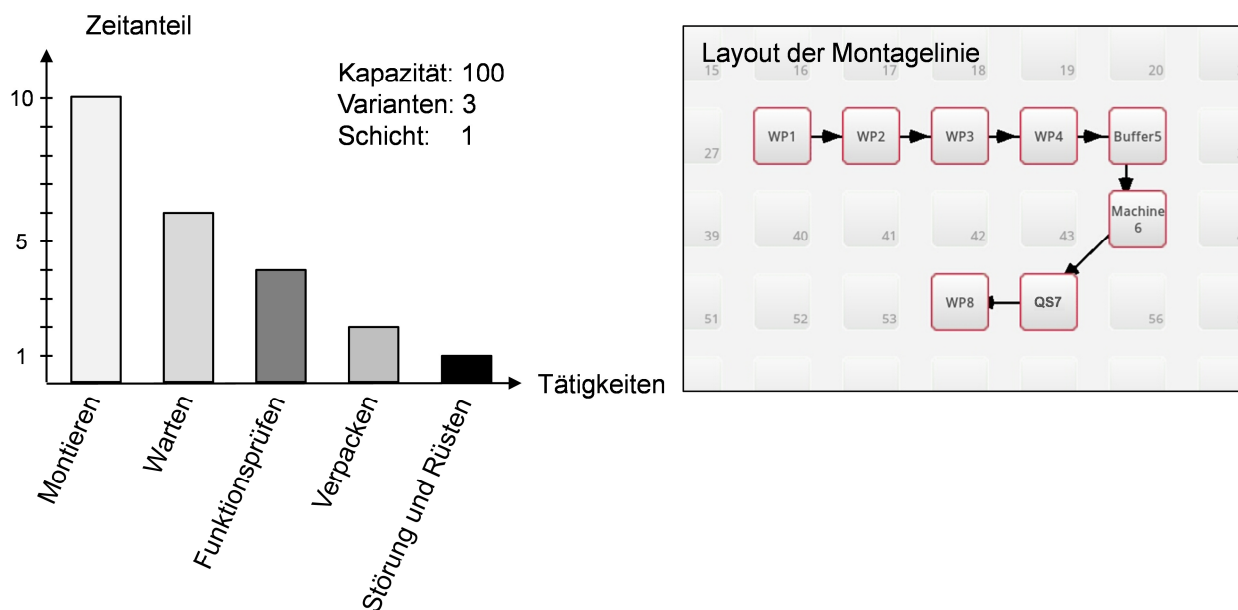


Abbildung 6.5: Darstellung des Untersuchungsbereichs

## 6.2.2 Durchführung situationsbasierter Adaptionen

Mit Hilfe des modellierten Ist-Zustands der Montagelinie kann auf interne sowie externe Störungen durch situationsbasierte Adaptionen reagiert werden. Zur Validierung der Methode wurden zwei

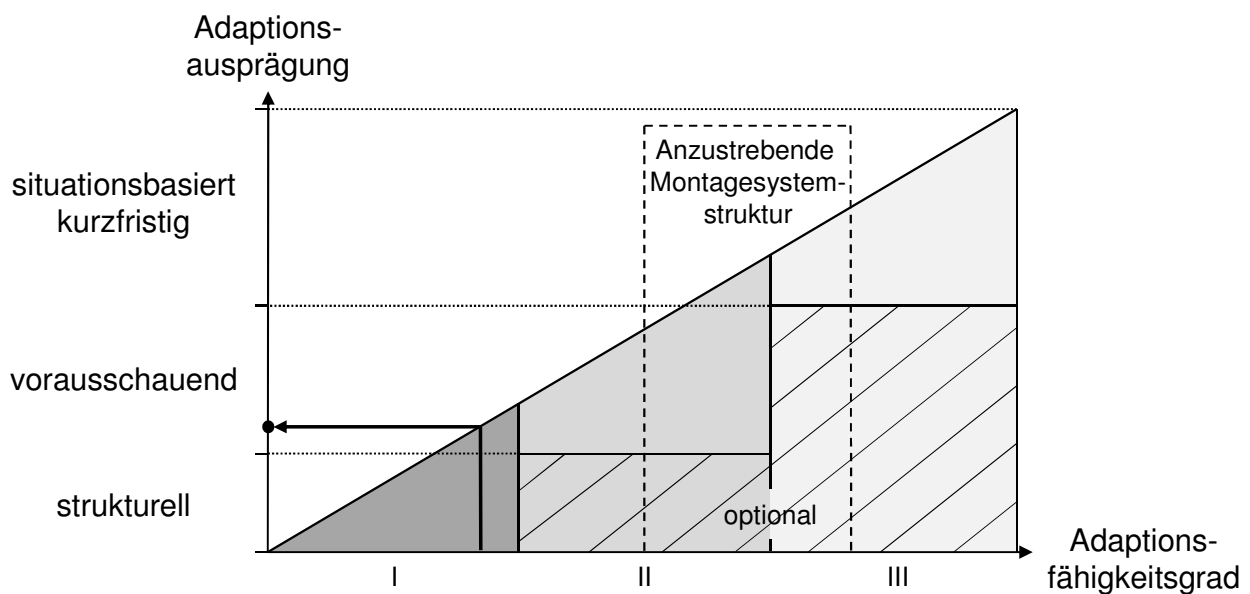
unterschiedliche Lastannahmen auf die Montagelinie induziert. Diese stellen Belastungen aus dem Markt bzw. dem Unternehmen dar, die zum einen eine situationsbasierte Adaption und zum anderen eine vorausschauende Adaption bedingen. Ausgehend von der Beschreibung der Ist-Situation und der Abbildung im Modell, war der erste Schritt die Ermittlung des aktuellen Adaptionsfähigkeitsgrads. Dazu wurden die Arbeitsplätze, die Maschine, die Vorrichtungen, das Personal, das Arbeitszeitmodell, die Prozessketten und der IKT System-Aufbau mit Hilfe des morphologischen Kastens untersucht und die Adaptionsfähigkeit determiniert.

	III	II	I
<b>Maschinen, Anlagen</b>			
Modularisierung			●
Funktionsspektrum			●
Steuerungsaufbau			●
Schnittstellen			●
Verkettung			●
<b>Arbeitsplatz</b>			
Modularisierung	●		
<b>Vorrichtungen</b>			
Modularisierung		●	
<b>Personal</b>			
Qualifikation		●	
Einsatzort		●	
<b>Arbeitszeitmodell</b>			
Organisation		●	
<b>Prozessketten</b>			
Struktur			●
<b>IKT-Systeme</b>			
Systemaufbau			●

**Abbildung 6.6:** Ermittlung des Adaptionsfähigkeitsgrads der Montagelinie zur Montage von Elektrogeräten

Die Analyse des Adaptionsfähigkeitsgrads zeigte auf, dass sich die betrachtete Montagelinie hinsichtlich der Arbeitsplätze, dem Personal und der Vorrichtungen in der Stufe III bis II befindet. Dies ergibt sich durch die Multifunktionalität der Arbeitsplätze, welche durch das Rohrstecksystem zudem stark anpassbar sind. Der Personaleinsatz in der Montagelinie ist variabel skalierbar. Dies ergibt sich aus deren Qualifikationsniveau, jeden Prozess innerhalb der Montagelinie ausführen zu können. Die eingesetzte Maschine (systembasiert, spezifische Funktion) und der Aufbau der Pro-

zessketten mussten der Stufe I zugeordnet werden. Da keine direkte Anbindung der Montagelinie, in digitaler Form, an die IKT-Landschaft vorherrschte, ist diese ebenfalls der Stufe I zugeordnet. Der ermittelte Adaptionfähigkeitsgrad ermöglichte zudem die Identifizierung des Bedarfs an weiterführenden über die situationsbasiert kurzfristige Adaption hinausgehende Adaptionen, um die Maßnahmenbreite der Handlungsspielräume zu erhöhen (Abbildung 6.7). Es ist zu erkennen, dass auf Abweichungen durch situationsbasiert kurzfristige Adaptionen reagiert werden kann, eine vorausschauende Adaption jedoch zur Steigerung der Handlungsspielräume in Erwägung zu ziehen ist.



**Abbildung 6.7:** Ermittlung der Adaptionausprägung der Montagelinie

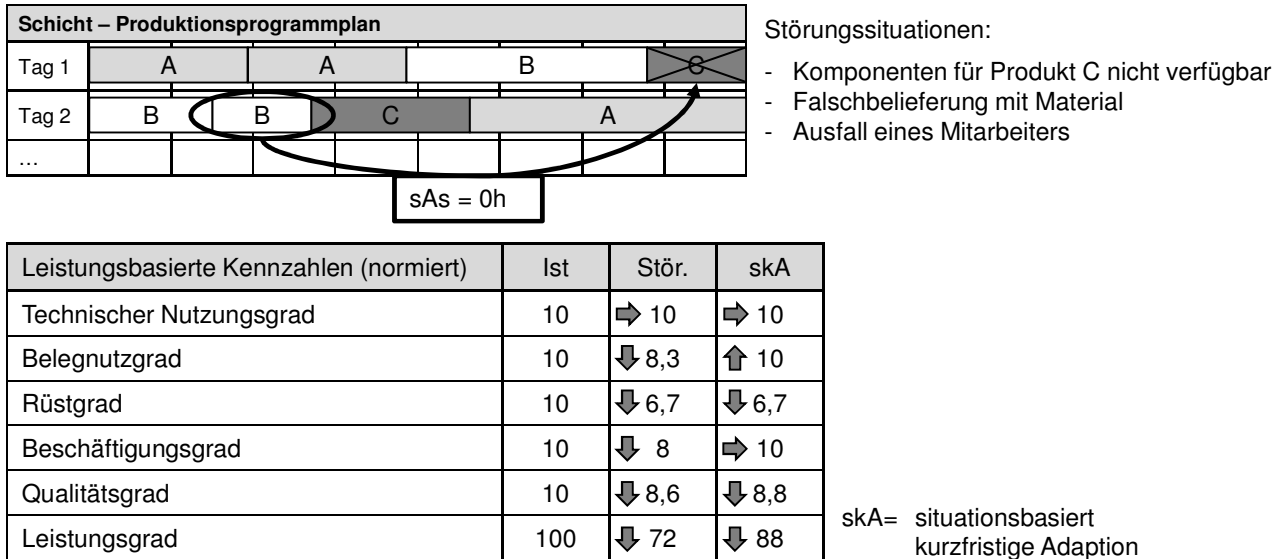
Auf die Ist-Situation wurden nun Lastannahmen induziert. Die Lastannahmen stellen dabei interne sowie externe Störungsquellen der Bereiche der Material-, Betriebsmittel- und Personalverfügbarkeit sowie Schwankungen im Absatzprogramm dar. Hinsichtlich der Materialversorgung werden während des Betriebs Produktkomponenten nicht zur Verfügung gestellt, die zur Montage der Elektrogerätvariante benötigt werden. Während der Schicht fällt zudem ein Mitarbeiter verletzungsbedingt aus. Hinzukommt das Fehlen von Komponenten eines Auftrags, der an diesem Tag in dieser Schicht montiert werden sollte. Im Folgenden wird aufgezeigt, inwieweit diesen Störungen mit der Nutzung des aktuellen Adaptionfähigkeitsgrads begegnet werden kann und wie sich eine vorausschauende Adaption auf die Reaktionsfähigkeit, im Vergleich zur aktuellen Situation, auswirkt.

### **Situationsbasiert kurzfristige Adaption**

Die Störungen welche als Lastannahmen auf die Linie induziert wurden, wirken sich negativ auf den wirtschaftlichen Betrieb der Montagelinie aus. Deren Auswirkungen werden quantifiziert und erläutert, um anschließend die sich aus einer situationbasiert kurzfristige Adaption ergebenden Verbesserungen der Situation verdeutlichen zu können. Die resultierenden Entwicklungen und deren zuvor genannten Auslöser sind in Abbildung 6.8 (Spalte „Stör.“) dargestellt. Die leistungsbasierten Kennzahlen der Ist-Situation, welche mit Hilfe des Modells berechnet wurden, sind im Rahmen des Ist-Zustand auf die Zahl 10 bzw. 100 für die Kapazität normiert. Deren Entwicklung, aufgrund der einwirkenden Störungen, wird im Folgenden erläutert.

Der technische Nutzungsgrad der in der Montagelinie vorhandenen Maschine bleibt bei den auftretenden Störungen konstant, da die durchschnittliche Zeit in der die Maschine Stillstände meldet nicht von den Abweichungen betroffen ist. Der Belegnutzgrad der Linie jedoch sinkt um 17 %, da sich durch die Auftragsrückstellung eine Reduktion der Belegungszeit ergibt. Dies führt zu einer Reduktion des Ausgangswertes des Belegnutzgrads von 10 auf den Störungswert 8,3. Durch das Fehlen der Produktkomponente für einen Auftrag, sind statt drei Rüstvorgängen an diesem Tag nur 2 Rüstvorgänge durchzuführen, was sich in der Reduktion des geplanten Werts von 10 auf den Wert 6,7 ausdrückt. Generell kann dies als Verbesserung der Wirtschaftlichkeit gesehen werden, da weniger Zeit auf nicht wertschöpfende Rüstvorgänge verteilt wird. Jedoch ist anzumerken, dass die frei werdende Zeit durch die Auftragsrückstellung, nicht genutzt wird, um andere Produkte fertigzustellen. Daher ist diese als wertschöpfungsfreie Zeit anzusehen. Dies bedingt damit gleichzeitig die Reduktion des Beschäftigungsgrads um 20 %, da das Personal zwar die gesamte Schicht vor Ort ist, jedoch keine wertschöpfenden Tätigkeiten ausführen kann (Ausgangswert 10 → Störungswert 8). Des Weiteren wirkt sich die fehlerhafte Materialbelieferung auf den Qualitätsgrad der Linie aus, da dies zu einer Fehlteilmontage führt, bevor dies vom Folgearbeitsplatz prozessbedingt bemerkt wird. Diese Störung wird durch die Ablage des Kleinladungsträgers mit den fehlerhaften Teilen in die Rückführung erreicht. Durch die fehlerhafte Materialbelieferung sinkt zudem der Qualitätsgrad der Montagelinie um 14 % vom Ausgangswert 10 hin zu dem Wert 8,6. Die Gesamtheit der Störungsauswirkungen lässt den Leistungsgrad der Montagelinie um 28 % sinken. Dies zeigt sich in der Reduktion des Ausgangswertes 100 zu einem Störungswert von 72. Der verletzungsbedingte Ausfall des Mitarbeiters schlägt sich nicht in der Kapazität wieder, da dieser den Rest der Schicht durch einen Springer ersetzt werden kann. Mit Hilfe einer situationsbasiert kurzfristigen Adaption, im Rahmen des aktuellen Adaptionfähigkeitsgrads und den sich daraus ableitenden Handlungsspiel-

räumen der Montagelinie, konnte den Auswirkungen der Störungen durch geeignete Maßnahmen begegnet werden und diese letztendlich abschwächen (Abbildung 6.8 Spalte „skA“). Diese manifestierte sich in dem Vorziehen eines Auftrags der Produktvariante B.



**Abbildung 6.8:** Auswirkungen der Störungen und der situationsbasiert kurzfristigen Adaption auf die Montagelinie

Die Umsetzung dieser Maßnahme erfordert, da keine zusätzliche Umrüstung notwendig ist, eine sAs von 0. Dies ermöglicht die Steigerung des Belegnutzgrads auf den Ausgangswert 10, da die zur Verfügung stehende Zeit der Schicht voll genutzt werden kann, um Produkte fertigzustellen. Der fehlerhaften Materialbelieferung kann jedoch nicht innerhalb der situationsbasierten Adaption begegnet werden, da keine Mechanismen zur Vermeidung von Teilverwechslungen in die Linie integriert sind. Dadurch verringert sich der Qualitätsgrad der Montagelinie in dieser Schicht auf den Wert 8,8. Da durch die Adaption mehr Produkte hergestellt werden können – im Vergleich zur Störung – wirken sich die fehlerhaften Teilprodukte jedoch nicht so stark auf den Qualitätsgrad aus. Gleichzeitig wirkt sich die Adaption positiv auf den Beschäftigungsgrad aus. Die Mitarbeiter können für die komplette Zeit der Schicht produktive Tätigkeiten ausführen. Damit erreicht diese das Ausgangsniveau des Wertes 10. Das entspricht einer Steigerung des Beschäftigungsgrads von 20% durch die Durchführung der situationsbasierten Adaption.

Des Weiteren kann trotz der Integration eines Auftrags, der Rüstgrad auf einem Wert von 6,7 reduziert werden. Dies ergibt sich aus der Integration eines Auftrags, der die Montage der Produktvariante B verfolgt. Durch das Ergreifen der Maßnahme „Vorziehen eines Auftrags“ kann der Leistungsgrad der Montagelinie auf den Wert 88, im Vergleich zu dem Wert 72 bei nicht eingreifen, gesteigert werden. Dies entspricht einer Steigerung von 16%. Anzumerken ist, dass das Produkti-

onsprogramm des Folgetages zentral neu geplant werden muss, um am Folgetag wiederum einen Leistungsgrad von 100 erreichen zu können. Des Weiteren ist anzumerken, dass keine technischen Änderungen in der Linie durchgeführt wurden, um den Störungssituationen zu begegnen.

### **Vorausschauende Adaption**

Die Analyse der Montagelinie hat zudem ergeben, dass eine vorausschauende Adaption durchgeführt werden sollte, um die Adaptionfähigkeit der Montagelinie zu erhöhen und somit weitere Handlungsspielräume für eine situationsbasierte Adaption zur Verfügung zu stellen.

Die größte Auswirkung zeigte sich durch das Fehlen einer Produktkomponente des Produktes C. Dies führte allein zu einer Reduktion des Belegungsgrads um 17 % und des Leistungsgrads von 11 %. Produktgruppe C stellt jedoch ein für einen Schlüsselkunden speziell angepasstes Produkt dar, welches höchste Priorität bei der Auslieferung besitzt. Das Fehlen dieser Produktkomponente kommt jedoch häufiger vor, da der Zulieferer, der auch diese Komponente in höherwertiger Form für die Produktvariante A liefert, dies finanziell bedingt zukünftig aus dem Sortiment nimmt.

Daher soll innerhalb dieser vorausschauenden Adaption die Maßnahme ergriffen werden, die Entscheidungskompetenz des Montagelinienpersonals hinsichtlich der Kompensation von Komponenten zu erhöhen, bis ein neuer Zulieferer für die Produktkomponente C gefunden wurde. Damit kann eine eigentlich höherwertige Komponente aus der Produktvariante A in die Produktkomponente C verbaut werden. Gleichzeitig soll den Mitarbeitern, um zukünftig effizienter aus solche Situationen reagieren zu können, die Reihenfolge der Bearbeitung der Aufträge in einem Zeitraum von drei Tagen freigestellt werden. Damit können Rüstvorgänge reduziert und eine höhere Flexibilität hinsichtlich einwirkender Störungen erreicht werden.

Des Weiteren wird eine Markierung der Kleinladungsträger vorgeschlagen, die verwechslungsfährdeten Bauteile beinhalten. Damit wird der Einbau von falschen Komponenten vermieden und der Qualitätsgrad gehoben bzw. robuster gestaltet. Dies bedingt jedoch die Restrukturierung der Kommissionierung und die Qualifikation der Logistikmitarbeiter, welche der Belieferung dieser Montagelinie zugeordnet sind. Zudem soll die Maschine analysiert werden, um den Tätigkeitsanteil der Störung und des Rüstens zu reduzieren. Die Reduzierung dieses Anteils um die Hälfte ermöglicht die systemimmanente Steigerung der Kapazität auf den Wert 102.

### 6.3 Steigerung der systemimmanenten Adaptionfähigkeit

Zudem soll die im vorherigen Abschnitt am praktischen Beispiel der situationsbasierten und vorausschauenden Adaption validierte Methode zur Steigerung der Adaptionfähigkeit (Abschnitt 5.4.2.4) angewandt werden. Deren Umsetzungszeitraum liegt außerhalb des in der Arbeit definierten Zeithorizonts, ermöglicht jedoch eine starke Steigerung des Adaptionfähigkeitspotenzials. Dies skizziert, dass die Methode nicht nur für kurzfristige, situationsbasierte Adaptionen Gültigkeit besitzt, sondern auch langfristig die Wettbewerbsfähigkeit absichern kann.

Basierend auf der Analyse der Montagelinie (Abschnitt 6.2.1) ist eine Steigerung der Adaptionfähigkeit angedacht, um effizienter auf interne und externe Störungen reagieren zu können. Daher können zeitaufwendige und kostenintensive Maßnahmen geplant und integriert werden, die die identifizierten Schwachstellen und Restriktionen abschwächen und zukünftig eine größere Anzahl an Handlungsspielräumen ermöglichen. Aufgrund der Ist-Situation (Abschnitt 6.2.1) kommen für die Adaption die folgenden Montagelinienbestandteile in Frage:

- Fertigmontage- und Prüfmaschine
- Personalorganisation
- IKT-Anbindung

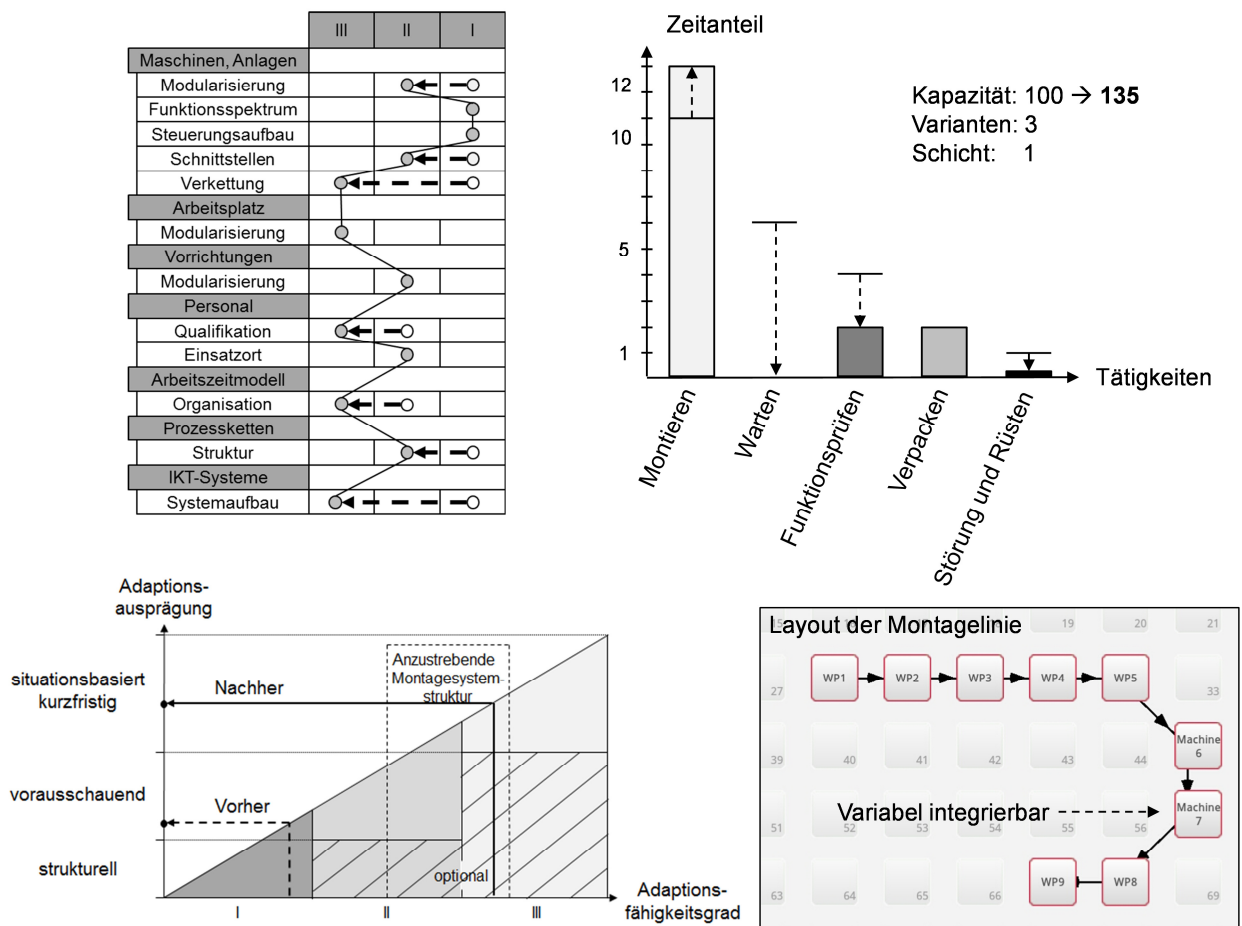
Wie in Abschnitt 5.4.2.4 beschrieben, wird diese Adaptionsform dazu genutzt Synergieeffekte zwischen den Handlungsspielraumgruppen zu heben. Daher werden die drei identifizierten Bestandteile nicht getrennt, sondern einheitlich in einem Szenario betrachtet.

Durch die Integration von Leistungseinheiten, im Gedanken des SUM, funktionieren die Mitarbeiter der Montagelinie als eine Einheit mit Führungs- und Ausführungsprozessen und -kompetenzen. Damit können die Mitarbeiter selbst steuern, in welcher Reihenfolge die Aufträge abgearbeitet werden und wann, wie viele Mitarbeiter benötigt werden. Zudem ist die Planung und Ausführung von Extraschichten möglich, falls durch Störungen oder krankheitsbedingtem Ausfall Mehrarbeit notwendig wird. Diese Dezentralisierung der Personalorganisation erhöht die Handlungsspielräume, um auf externe Störungen wie schwankende Kapazitätsbedarfe und Lieferengpässe reagieren zu können. Gleichzeitig soll die Linie an die vorhandenen IKT-Systeme angebunden werden. Dies versorgt die Mitarbeiter gezielt mit Informationen und ermöglicht ein reaktionsschnelles Handeln auf Störungen, wie beispielsweise der Materialverfügbarkeit, des Auftragspektrums oder der Personalverfügbarkeit. Realisiert wird dies durch einen Leitstand in Form eines mobilen Endgerätes, welches Informationen empfängt, verarbeitet und anwendungsorientiert visualisiert. Zudem ist die Rückmeldung von Fertigungsfortschritten oder die Beauftragung von Instandsetzungsaufträgen



möglich. Durch die Integration des modulbasierten digitalen Werkzeugs ist die zukünftige Anpassbarkeit gewährleistet und die Mitarbeiter sind in der Lage das gesamte Potenzial der Leistungseinheitenorganisation auszuschöpfen.

Neben den organisatorischen Änderungen, wird die Maschine, welche das höchste Störungspotenzial aufweist, durch eine neues strukturelles Konzept ersetzt. Dieses zeichnet sich durch die Trennung der Fertigmontage und dem Prüfvorgang aus. Der Prozess der Fertigmontage soll an einem hybriden Arbeitsplatz durchgeführt werden. Dieser wird in die Montagelinie integriert und stellt somit einen weiteren Arbeitsplatz dar. Anschließend werden mobile Prüfkammern genutzt, welche je nach Kapazitätsauslastung der Montagelinie in diese integriert bzw. herausgenommen werden können. Dies entschärft die starre Verkettung und steigert das Adaptionspotenzial und führt bei weiteren Adaption zu geringen sAs. Die Ergebnisse dieser Änderungen sind in Abbildung 6.9 dargestellt.



**Abbildung 6.9:** Ergebnis der Steigerung der Adaptionfähigkeit der Montagelinie

Es ist zu erkennen, dass durch diese Maßnahmen der Adaptionfähigkeitsgrad gesteigert werden kann (Abbildung 6.9 links oben und links unten). Dies ergibt sich aus der Integration der erwähnten

Maßnahmen und spiegelt sich zudem in zusätzlichen Handlungsspielräumen für situationsbasiert kurzfristige Adaptionen wieder. Durch die Reorganisation der Maschine, der Puffer und der Arbeitsplätze (Abbildung 6.9 rechts unten) kann eine Erhöhung der Produktionskapazität (Wert 100 → Wert 135) erreicht werden. Die Kapazitätssteigerung ergibt sich aus der Reduzierung der Durchlaufzeit um 35 % innerhalb dieser Variante, da die Wartezeiten und Störungszeiten drastisch reduziert werden können (Abbildung 6.9 rechts oben). Zudem ist ersichtlich, dass bei der erneuten Durchführung der Adaptionausprägungsanalyse die Montagesystemstruktur in dem anzustrebenden Bereich befindet und somit sowohl die situationsbasiert kurzfristige Adaption genutzt werden kann als auch eine Adaptionfähigssteigerung erfolgte, die wettbewerbsfähige Strukturen implementierte und einen wirtschaftlichen Betrieb der Montagelinie ermöglicht.

## 6.4 Fazit aus der Validierung

Aus der Anwendung der Methode zur situationsbasierten Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit am praktischen Beispiel einer variantenreichen Serienfertigung von Elektrogeräten ist zu erkennen, dass diese zur einem die Anforderungen, welche in Abschnitt 3.7 identifiziert wurden, erfüllt und zum anderen für eine industrielle und praktische Anwendung im Bereich der kurzfristigen jedoch systematischen Montagesystemadaption und somit –optimierung geeignet ist.

Durch die Erstellung der Adaptionskonzepte konnte das Potenzial der Steigerung der Wirtschaftlichkeit hinsichtlich der Ist-Situation und den darauf einwirkenden Störungssituationen dargestellt werden. Den Störungssituationen wurde proaktiv mit Handlungsspielräumen begegnet, welche einen situationsbasiert kurzfristigen quantitativen Einfluss auf die technischen und organisatorischen Strukturen des betrachteten Montagesystems haben. Die Berücksichtigung des situationsbasierten Zeithorizonts zeigte auf, dass geeignete Maßnahmen durch die Methode identifiziert werden können und das Leistungsniveau und somit der wirtschaftliche Betrieb des Montagesystems innerhalb des Zeithorizonts gesteigert werden kann.

Zudem wurde in einer vorausschauenden Adaption gezeigt, dass die Methode innerhalb kurzer Zeit in der Lage ist, Potenziale hinsichtlich der Identifikation und Integration neuer Handlungsspielräume zu erzeugen. Diese stehen dann wiederum in folgende situationsbasiert kurzfristigen Adaptionen zur Verfügung und erhöhen somit das Potenzial wirtschaftlich zu produzieren. Die entwickelte Bewertungsmethode, auf Basis der sAs und den leistungs-basierten Kennzahlen hat eine systematische, nachvollziehbare und belastbare Bewertung der Adaptionskonzepte zugelassen und ermöglicht die Umsetzung eines, für eine Situation, optimalen Adaptionskonzepts.

In Abschnitt 6.3 konnte zudem skizziert werden, dass die entwickelte Methode nicht nur in einem situationsbasierten Anwendungsrahmen Gültigkeit besitzt, sondern auch dafür geeignet ist die organisatorische und technische Struktur so anzupassen, dass eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Montagesystems möglich ist. Zudem können somit Synergieeffekte aktiviert werden, die zwischen den Gruppen der Handlungsspielräume vorherrschen und innerhalb situationsbasiert kurzfristiger Adaptionen in Form von erweiterten Handlungsspielräumen angewandt werden können.

## 7 Fazit und Ausblick

In diesem Kapitel wird ein Fazit gezogen und zukünftiger Forschungsbedarf ermittelt.

### 7.1 Fazit

Die Erläuterung der Ausgangssituation und die Analyse heutiger Methoden und Ansätze hat die Identifikation von Defiziten hinsichtlich der kurzfristigen Adaption von Montagesystemen ermöglicht. Diese zeigten sich in der eher langfristig ausgelegten Steigerung der Wandlungsfähigkeit durch die Implementierung von Wandlungsbefähigern bei gleichzeitiger Durchführung von Lean-Methoden, die eine Optimierung von Prozessen verfolgt. Eine gesamtsystemische Sicht, die eine kurzfristige Anpassung der Strukturen verfolgt, ist bisher jedoch nicht ausreichend verfolgt worden. Probleme zeigten sich daher erst bei der Implementierung von Optimierungsvorhaben, welchen mit Steuerung per Hand oder Umgehungen begegnet wurden. Dies führte zu zunehmend gewachsenen Strukturen. Daraus konnte abgeleitet werden, dass Methoden für kurzfristige Änderungen von Montagesystemen fehlen. In dieser Arbeit wurde daher eine Methode zur situationsbasierten Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit von Serienmontagen entwickelt. Diese ermöglicht die situationsbasierte Anpassung eines Montagesystems hinsichtlich der organisatorischen und technischen Struktur und erweitert somit den Handlungsspielraum einen wirtschaftlichen Betrieb zu halten bzw. zu erreichen. Um dies zu ermöglichen, wurden eine Vorgehensweise und ein digitales Werkzeug zur Analyse von Montagesystemen entwickelt, die eine effiziente Erstellung von Adaptionskonzepten zulassen. Die identifizierten Handlungsspielräume, welche den situationsbasierten Zeithorizonten zugeordnet wurden, ermöglichen zudem eine zielgerichtete Anpassung der Strukturen. Der Prozess der situationsbasierten Adaption wurde systematisiert und mit strukturierten Vorgehensweisen unterstützt. Die Bewertung von Adaptionskonzepten, wurde implementiert, da dies als ein wichtiger Punkt hinsichtlich der Anforderungen an solch eine Methode identifiziert werden konnte. Durch die Entwicklung der Methode zur situationsbasierten Adaption ist ein entscheidender Beitrag geleistet worden, den heutigen Stand der Technik und der Wissenschaft hinsichtlich der erkannten Defizite zu erweitern und somit die zeitlichen Grenzen von Anpassungsvorgängen zu verschieben. Es ist jedoch anzumerken, dass mit der Entwicklung der Methode das Forschungsfeld nicht als abgeschlossen angesehen werden kann, sondern einen Ausgangspunkt für weitere Entwicklungsprozesse darstellt. Daher wird im Ausblick auf weiterführende potenzielle Forschungsfragen eingegangen.

## 7.2 Ausblick

Die Methode zur situationsbasierten Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit von Serienmontagen bezieht sich auf die kurzfristige Anpassung organisatorischer und technischer Strukturen von Montagesystemen und bietet somit Ansatzpunkte für zukünftige darauf aufbauende Forschungsarbeiten.

Erweiterungsmöglichkeiten bestehen in der verstärkten Betrachtung der situationsbasiert kurzfristigen Adaption. Dabei sind eine detaillierte Betrachtung und Erweiterung der Handlungsspielräume von Interesse. Forschungsarbeiten mit dem Fokus auf der Entwicklung weiterer Gruppen oder der Erweiterung der Vorhandenen sind ebenfalls denkbar. Zudem ist die Analyse der Wirkbeziehungen zwischen den Handlungsspielräumen der Gruppen noch tief gehender zu untersuchen.

Eine Vorgehensweise zur detaillierten Identifikation von vorhandenen kurzfristigen Abweichungen kann ebenfalls Stoßrichtung weiterer Forschungsarbeiten sein. Mit der Kenntnis, die Abweichungen genau vorliegen, kann effektiver auf Abweichungen hinsichtlich des wirtschaftlichen Betriebs reagiert werden. In diesem Zuge kann eine Priorisierung der Abweichungen erfolgen, welche den größten Einfluss auf den wirtschaftlichen Betrieb des Montagesystems ausüben.

Der Prozess der Implementierung eines Adaptionskonzepts ist ebenfalls als weiteres Forschungsfeld vorzuschlagen. Dabei sind die Fragen der Lernkurveneffekte und dem verlustfreien Produktionsanlauf sowie die Organisation der Umsetzung zu untersuchen.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung können Kostenmodelle entwickelt werden, die eine Berechnung der anfallenden Investitionskosten für eine Adaptionkonzeptimplementierung ermöglichen. Diese müssen in der Lage sein, mit den in Unternehmen vorhandenen Daten und Informationen zuverlässige und belastbare Aussagen hinsichtlich der zu erwartenden Kosten für eine Adaption treffen zu können. Eine quantitative Nutzenkalkulation zur Gegenüberstellung ist in diesem Zuge ebenfalls zu entwickeln.

Diese Aspekte sind Forschungsfragen, die sich aus dem jetzigen Stand der Methode ableiten und somit weiterzuentwickeln sind.

## Literaturverzeichnis

- Abele und Reinhart 2011 Abele, Eberhard und Reinhart, G. 2011. *Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Hanser. ISBN 3-446-42595-0.
- Abels 1993 Abels, Stephanie. 1993. *Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem*. . München: Hanser. Fertigungstechnik - Erlangen 37. ISBN 3446177310. Nürnberg, Univ., Diss., 1993.
- Arai et al. 2000 Arai, Takero et al., 2000. Agile Assembly System by “Plug and Produce”. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **49**(1) S. 1-4. DOI 10.16/S0007-8506(07)62883-2
- Balve 2002 Balve, Patrick, 2002. *Ein Rahmenkonzept zur Gestaltung wandlungsfähiger Auftragsmanagementsysteme*. Heimsheim: Jost-Jetter. IPA-IAO-Forschung und Praxis. Nr. 343 ISBN 3931388700 Stuttgart, Univ., Diss., 2002.
- Bangsow 2008 Bangsow, Steffen, 2008. *Fertigungssimulationen mit Plant Simulation und SimTalk. Anwendung und Programmierung mit Beispielen und Lösungen*. München: Hanser. Edition CAD.de. ISBN 9783446414907.
- Bauer 2008 Bauer, Joa, 2008. *Industrielle Ökologie. Theoretische Annäherung an ein Konzept nachhaltiger Produktionsweisen*. Stuttgart, Univ., Diss. Verfügbar: urn:nbn:de:bsz:93-opus-36109. Zugriff: 10.10.2013

- BDI 2005 Bundesverband der Deutschen Industrie e.V., Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (FhG), Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) 2005. *Intelligenter produzieren - 32 Thesen zur Forschung für die Zukunft der industriellen Produktion*. Frankfurt am Main: VDMA Verlag.
- Beierle und Kern-Isberner 2006 Beierle, Christoph und Kern-Isberner, G. 2006. *Methoden wissensbasierter Systeme. Grundlagen - Algorithmen - Anwendungen*. 3., erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg. Computational Intelligence. ISBN 9783834800107.
- BMBF 2007 Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2007. IKT 2020. Forschung für Innovationen. Bonn, Berlin: Raabe. Verfügbar: <http://www.bmbf.de/pub/ikt2020.pdf>. Zugriff: 27.03.2014.
- Bullinger 1986 Bullinger, Hans-Jörg, 1986. *Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis*. München: Hanser. ISBN 9783446146068.
- Bullinger 2002 Bullinger, Hans-Jörg, 2002. *Technologiemanagement. Forschungen und Arbeiten in einer vernetzten Welt*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 9783540418917.
- Bullinger u.a. 2009 Bullinger, Hans-Jörg, Spath, Dieter, Warnecke, Hans-Jürgen und Westkämper, Engelbert, 2008. *Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung*. 3., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer VDI. ISBN 3540875956.

- 
- Chryssolouris et al. 2012                      Chryssolouris, Georg et al., 2012. *Proceedings of 45th CIRP CMS Conference on Manufacturing Systems*. University of Patras / Dept. of Mechanical Engineering and Aeronautics / Laboratory for Manufacturing Systems and Automation. Athen, 12. – 16. Mai 2012.
- Cunha et al 2007                                      Cunha, Paulo Ferreira et al., 2007. *Digital enterprise technology. Perspectives and future challenges*. New York: Springer. ISBN 038749863X.
- Creform 2014    Creform Technik Gmbh, 2014. *Creform Katalog*. Verfügbar: <http://www.creform.de/service/multimedia/creform-katalog>. Zugriff .27.03.2014
- Dashchenko 2006                                      Dashchenko, A. I., 2006. *Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories*. Berlin: Springer. ISBN 9783540293910.
- DIN 1994    DIN 19226 Blatt 1 Teil 1 1994-02 Leittechnik, Regelungstechnik und Steuerungstechnik - Allgemeine Grundbegriffe
- Dinkelmann et al. 2011                              Dinkelmann, Max, 2011. Training concept and structure of the Learning Factory advanced Industrial Engineering. In: *4<sup>th</sup> International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2011)*, 2. – 5. Oktober 2011, Montreal: CIRP, S. 624-629.  
DOI 10.1007/978-3-642-23860-4\_102
- ElMaraghy 2009    ElMaraghy, Hoda A., 2009. *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. London: Springer. Springer series in advanced manufacturing. ISBN 1848820674.



- Erlach 2010 Erlach, Klaus, 2010. *Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik*. 2., bearb. und erweiterte Aufl. Berlin, New York: Springer. VDI-Buch. ISBN 9783540898672.
- Eurostat 2012 Eurostat, 2012. *Europa in Zahlen. Eurostat Jahrbuch 2012*. Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union. Verfügbar: [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Europe\\_in\\_figures\\_-Eurostat\\_year-book/de](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Europe_in_figures_-Eurostat_year-book/de). Zugriff: 23.05.2013
- Eversheim 2002 Eversheim, Walter, 2002. *Organisation in der Produktionstechnik*. 4., bearbeitete und korrigierte Aufl. Berlin: Springer VDI. ISBN 9783540420163.
- Eversheim et al. 2002 Eversheim, Walter, 2002. Wandlungsfähigkeit durch mobile Fabriken. *wt Werkstattstechnik online* **92**(4) S. 169-170. ISSN: 1436-4980
- Eversheim und Neuhausen 2001 Eversheim, Walter und Neuhausen, Jörn, 2001. Modular Plant Architecture. An approach towards Agility and Reconfigurability. *wt Werkstattstechnik online* **91**(10) S. 654-657. ISSN: 1436-4980
- Eversheim und Schuh 1996 Eversheim, Walter und Schuh, Günther, 1996. *Produktion und Management "Betriebshütte"*. 7. völlig neu bearb. Aufl. / hrsg. von Walter Eversheim, Günther Schuh. Berlin: Springer.. ISBN 3540593608.
- Feldmann und Slama 2001 Feldmann, Klaus und Slama, Stefan, 2001. Highly Flexible Assembly - Scope and Justification. *Annals of the CIRP* **50**(2) S. 489-498. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62987-4

- 
- Feldmann et al. 2004                      Feldmann, Klaus, 2004. *Montage strategisch ausrichten - Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen*. Berlin u.a: Springer. Engineering online library. ISBN 3-540-40304-3.
- Festo Didactic 2014                      Festo Didactic, 2014. *Katalog Lernsysteme 2014 – Technik für Bildung und Wissenschaft*. Verfügbar: <http://www.festo-didactic.com/de-de/lernsysteme/mehr..katalog-festo-didactic-2014.htm?fbid=ZGUuZGUuNTQ0LjEzLjE4LjYxOC4zMtI0>. Zugriff: 27.03.2014
- Fiebig 2004                                  Fiebig, Christian, 2004. *Synchronisation von Fabrik- und Technologieplanung*. Düsseldorf: VDI-Verl, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft. 165. ISBN 9783183165162. Düsseldorf, Univ.,-Diss., 2004.
- FIR e. V. 2013                              FIR, 2013. *Untersuchung 2013. Produktion am Standort Deutschland*. Verfügbar: <http://www.fir.rwth-aachen.de/ueberuns/publikationen/editionen-und-studien>. Zugriff: 27.03.2014.
- Frese 1999                                  Frese, Peter, 1999. Organisationsstrukturen und Managementsysteme. In: Walter, Eversheim, Günther, Schuh, Hrsg. *Produktion und Management*. Berlin: Springer, S. 1–93. ISBN 3540593608.
- Friedmann 1989                          Friedmann, Thomas, 1989. *Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue, rechnerunterstützte Verfahren*. Karlsruhe: Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe 25 Karlsruhe, Univ., Diss., 1989.

- Gausemeier und Wiendahl 2011      Gausemeier, Jürgen und Wiendahl, H.-P., 2011. *Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland*. Acatech WORK-SHOP, Hannover, 14. September 2010. Berlin, Heidelberg: Springer. acatech Diskutiert. ISBN 9783642202032.
- Geisberger et al. 2012                Geisberger, Eva et al., 2012. *agendaCPS. Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer. acatech STUDIE, März 2012. 1. ISBN 9783642290985.
- Giusti et al.                              Giusti, Franco, 1994. A reconfigurable assembly cell for mechanical Products. *CIRP annals : manufacturing technology ;* **43**(1) S. 1-4. DOI 10.1007/3-540-29397-3\_9.
- Gleich et al. 2012                      Gleich, Robert et al., 2012. *Innovationsmanagement in der Investitionsgüterindustrie treffsicher voranbringen. Konzepte und Lösungen*. 2., völlig neu bearb. Aufl. Frankfurt am Main: VDMA-Verl. ISBN 9783816306238.
- Goldman 1996                            Goldman, Steven L., 1996. *Agil im Wettbewerb. Die Strategie der virtuellen Organisation zum Nutzen des Kunden*. Berlin u.a: Springer. ISBN 3-540-60644-0.
- Grunwald 2002                          Grunwald, Stefan, 2002. *Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung*. Techn. München: Utz, Forschungsberichte IWB. Bd. 159. ISBN 3831600953. München, Univ., Diss., 2001.
- Hackstein 1989                          Hackstein, Rolf, 1989. *Produktionsplanung und -steuerung (PPS)*. Ein Handbuch für die Betriebspraxis. 2., überarb. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. ISBN 3184009246.

- 
- Helbing 2010 Helbing, Kurt W., 2010. *Handbuch Fabrikprojektierung*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 9783642016172.
- Henderson und Gälweiler 1984 Henderson, Bruce D. und Gälweiler, A., 1984. *Die Erfahrungskurve in der Unternehmensstrategie*. 2., überarb. Aufl. Frankfurt/Main: Campus-Verl. ISBN 359332086X.
- Hernández 2003 Hernández Morales, Roberto, 2003. *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. Düsseldorf: VDI-Verl. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft. 149. ISBN 3183149168. Hannover, Univ., Diss., 2002.
- Herrmann 2010 Herrmann, Christoph, 2010. *Ganzheitliches Life Cycle Management. Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen*. 2008. Berlin: Springer. VDI. ISBN 9783642014215.
- Hillmer 1987 Hillmer, Hans-Jürgen, 1987. *Planung der Unternehmensflexibilität. Eine allgemeine theoretische Konzeption und deren Anwendung zur Bewältigung strategischer Flexibilitätsprobleme*. Frankfurt a.M.: P. Lang. Schriften zur Unternehmensplanung 7. ISBN 382040161X.
- Jacobi 2013 Jacobi, Hans-Friedrich, 2013. Computer Integrated Manufacturing. In: Westkämper, Engelbert, Spath, Dieter und Constantinescu, Carmen, 2013. *Digitale Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. S. 51-93. ISBN 978-3-642-20259-9.
- Jonas 2000 Jonas, Christian und Reinhart, Gunther, 2000. *Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen*. München: Utz . Forschungsberichte / IWB. Bd. 145 ISBN 3896758705. München, Techn. Univ., Diss., 2000.

- Jovane et al. 2009 Jovane, Francesco, Westkämper, Engelbert und Williams, David, 2009. *The manufuture road. Towards competitive and sustainable high-adding-value manufacturing*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN 9783642095733.
- Kaluza und Behrens 2005 Kaluza, Bernd und Behrens, Stefan, 2005. *Erfolgsfaktor Flexibilität. Strategien und Konzepte für wandlungsfähige Unternehmen*. Berlin: Schmidt. Technological economics, 60. ISBN 9783503083671.
- Kapp 2011 Kapp, Ralf, 2011. *Ein betriebsbegleitendes Fabriksimulations-system zur durchgängigen Unterstützung der kontinuierlichen Fabrikadaption*. Heimsheim: Jost-Jetter. IPA-IAO Forschung und Praxis 504. ISBN 3939890707. Stuttgart,. Univ., Diss., 2011.
- Kletti und Schumacher 2011 Kletti, Jürgen und Schumacher, Jochen, 2011. *Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT)*. Berlin: Springer. ISBN 9783642138454.
- Kolodner 1997 Kolodner, Janet, 1997. *Case-based reasoning*. [Nachdr.]. San Mateo, Calif: Kaufmann. ISBN 1558602372.
- Koren 2010 Koren, Yoram, 2010. *The global manufacturing revolution. Product-process-business integration and reconfigurable systems*. Hoboken, NJ: Wiley. Wiley series in systems engineering and management. ISBN 9780470583777.
- Kühn 2006 Kühn, Wolfgang, 2006. *Digitale Fabrik. Fabriksimulation für Produktionsplaner*. München: Hanser. ISBN 3-446-40619-0
- .

- 
- Landherr et al. 2013                      Landherr, Martin, Neumann, Michael, Volkmann, Johannes, 2013. Digitale Fabrik In: Westkämper, Engelbert, Spath, Dieter und Constantinescu, Carmen, 2013. *Digitale Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer. S. 107-132. ISBN 978-3-642-20259-9.
- Landherr et al. 2012                      Landherr, Martin et al., 2012. Individuelle Softwareunterstützung für jeden Ingenieur. Advanced Engineering Platform for Production. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **107**(9) S. 628-631. ISSN: 0947-0085
- Laube 2009                                      Laube, Thorsten, 2009. *Methodik des interorganisationalen Technologietransfers. Ein Technologie-Roadmap-basiertes Verfahren für kleine und mittlere technologieorientierte Unternehmen*. Heimsheim. Jost-Jetter. IPA-IAO Forschung und Praxis. 483. ISBN 9783939890447. Stuttgart, Univ., Diss., 2009.
- Löffler 2011                                      Löffler, Carina, 2011. *Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung* Heimsheim. Jost-Jetter. IPA-IAO Forschung und Praxis. 519. ISBN 3939890901. Stuttgart. Univ., Diss., 2011.
- Löhr1977    Löhr, Hans-Günter, 1977. *Eine Planungsmethode für automatische Montagesysteme*. Mainz: Krausskopf. Forschung und Praxis. ISBN 3-7830-0120-X. Stuttgart, Univ., Diss., 1976.
- Lotter und Wiendahl 2006                      Lotter, Bruno und Wiendahl, Hans-Peter, 2006. *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin: Springer. VDI-Buch. ISBN 3540366695.

- Luczak und Eversheim 1999      Luczak, Holger und Eversheim, Walter, 1999. *Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 2., korr. Aufl. Berlin: Springer. ISBN 9783540655596.
- Miller et al. 2009                Miller, Frederic, Vandome, Agnes und McBrewster, John, 2009. *JSON. Computer, human-readable medium, data structure, associative array, Douglas Crockford, Internet media type, serialization, Ajax (programming), XML, JavaScript, Ecma International*. Mauritius: Alphascript. ISBN 6130264364.
- Müller 2013                        Müller, Egon, 2013. *Wie werden wir morgen produzieren? Zentrale Trends und Antworten für den ostdeutschen Maschinen- und Anlagenbau*. Chemnitz. 25.04.2013 Verfügbar: [http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Themen/Politik\\_Gesellschaft/DeutscheEinheit/studie\\_ostdeutscher%20maschinenbau.html](http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Themen/Politik_Gesellschaft/DeutscheEinheit/studie_ostdeutscher%20maschinenbau.html). Zugriff: 08.10.2013
- Nachtwey et al. 2009              Nachtwey, Alexander et al. 2009. Entwicklung einer Methode zur Ableitung von Flexibilitätsklassen in der Produktion: Development of a methodology for the determination of flexibility classes in production. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **104**(4) S. 224-228. ISSN 0932-0482
- Narain et al. 2000                 Narain, Rakesh et al. 2000, The strategic implications of flexibility in manufacturing systems. *International Journal of Agile Management Systems* **2**(3) S. 202-213. ISSN: 1465-4652

- Neumann et al. 2012  
Neumann, Michael, 2012. Method for Multi-Scale Modeling and Simulation of Assembly Systems. In: *45th CIRP CMS Conference on Manufacturing Systems*. 16. – 18. Mai 2012. Athen: Proceedings, S. 459–462.  
DOI: 10.1016/j.procir. 2012.07.070
- Nofen 2006  
Nofen, Dirk, 2006. *Regelkreisbasierte Wandlungsprozesse der modularen Fabrik*. Garbsen: PZH, Produktionstechn. Zentrum. Berichte aus dem IFA. 2006, Bd. 1 ISBN 3939026204. Hannover, Univ., Diss., 2006.
- Nolting und Feldmann 1989  
Nolting, Friedrich-Wilhelm und Feldmann, Klaus, 1989. *Projektierung von Montagesystemen*. München: Hanser. Fertigungstechnik - Erlangen Bd. 3. ISBN 3446155414. Nürnberg, Univ., Diss., 1988.
- Nyhuis 2008a  
Nyhuis, Peter, 2008. *Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten*. Garbsen: PZH, Produktionstechn. Zentrum. ISBN 3939026964.
- Nyhuis 2008b  
Nyhuis, Peter, 2008. *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin: Springer. ISBN 9783540756422.
- Nyhuis et al. 2008  
Nyhuis, Peter et al., 2008. Wandlungsfähige Produktionssysteme. *wt Werkstattstechnik online*, **98**(1/2) S. 85-91. ISSN: 1436-4980
- Nyhuis et al. 2011  
Nyhuis, Peter et al., 2011. Standardisierung im wandlungsfähigen Produktionssystem. Einfluss der Prozess- und Ressourcenstandardisierung auf die Wandlungsfähigkeit. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **106**(12) S. 912-917.  
ISSN: 0947-0085



- Ohno 2013 Ohno, Taiichi, 2005. *Das Toyota-Produktionssystem*. Frankfurt/Main: Campus-Verl. ISBN 3593378019.
- Pritschow und Brinzer 2002 Pritschow, Günther und Brinzer, Boris, 2002. Produktionsregelung für die variantenreiche Serienfertigung. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **95**(12) S. 627–632.  
ISSN 0932-0482
- QFD 2011 QFD-Institut Deutschland, 2011. *17th International QFD Symposium, ISQFD 2011. Achieving Sustainability with QFD*. 21. – 23. September 2011, Stuttgart, Germany
- REFA 1993 REFA – Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung, 1993. *Lexikon der Betriebsorganisation*. München: Hanser. ISBN 3-446-17523-7.
- REFA 2014 REFA – Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung, 2014. *REFA Lexikon – REVA Bundesverband e.V.* Verfügbar unter: <http://www.refa-lexikon.de/artikel/338/ruesten>. Zugriff: 05.10.2014
- Reinhart et al. 1999 Reinhart, Gunther et al., 1999, Reaktionsfähigkeit. Eine Antwort auf turbulente Märkte. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. **94**(1/2) S. 21-24.  
ISSN: 0947—0085
- Ritchey 2002 Ritchey, Tom, 2002. *Modelling complex socio-technical systems using morphological analysis*. Stockholm: Swedish Morphological Society. Verfügbar: <http://www.swemorph.com/pdf/it-webart.pdf>. Zugriff: 13.08.2013

- 
- Ropohl 2009 Ropohl, Günter, 2009. *Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik*. Univ., Habil.-Schr.-Karlsruhe, 1978. 3., überarb. Aufl. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe. ISBN 9783866443747.
- Rother 2013 Rother, Mike, 2013. *Die Kata des Weltmarktführers. Toyotas Erfolgsmethoden*. 2., erw. Auflage. Frankfurt am Main u.a: Campus-Verl. ISBN 3-593-39937-7.
- Rother und Shook 2004 Rother, Mike und Shook, John, 2006. *Sehen lernen. Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen*. Aachen: Lean-Management-Inst. Workbooks für Lean Management. ISBN 3-9809521-1-8.
- Schaltegger et al. 2012 Schaltegger, Stefan et al., 2012. Praxisstand und Fortschritt des Nachhaltigkeitsmanagements in den größten Unternehmen Deutschlands. Lüneburg: CSM Centre for Sustainability Management. Verfügbar: <http://www2.leuphana.de/csm/CorporateSustainabilityBarometer2012.pdf>. Zugriff: 25.07.2013
- Scheer et al. 2006 Scheer, August-Wilhelm et al., 2006. *Prozessorientiertes Product Lifecycle Management*. Mit 3 Tabellen. Berlin u.a: Springer, 2006. ISBN 3-540-28402-8.
- Schenk et al. 2010 Schenk, Michael, Wirth, Siegfried und Müller, Egon, 2010. *Factory planning manual. Situation-driven production facility planning*. Heidelberg: Springer. ISBN 364203635X.
- Schmigalla 1995 Schmigalla, Hans, 1995. *Fabrikplanung. Begriffe und Zusammenhänge*. München: Hanser. REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation. ISBN 9783446185722.

- Schönsleben 2011                      Schönsleben, Paul, 2011. *Integrales Logistikmanagement. Operations- und Supply-Chain-Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend*. 6., bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer. ISBN 3-642-20380-9.
- Schotten 1998                          Schotten, Martin, 1998. Aachener PPS-Modell, Das Prozessmodell. In: Luczak, Holger und Eversheim, Walter, 1999. *Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 2., korr. Aufl. Berlin: Springer. S. 9-28. ISBN 9783540655596.
- Schuh 1996                              Schuh, Günther, 1996. Strategisches Produktionsmanagement. In: Eversheim, Walter und G. Schuh, 1996. *Produktion und Management "Betriebshütte"*. 7. völlig neu bearb. Aufl.. Berlin: Springer. S. 99-119. ISBN 3540593608.
- Schuh 2005                              Schuh, Günther, 2005. *Produktkomplexität managen. Strategien - Methoden - Tools*. 2., überarb. und erw. Aufl. München: Hanser. ISBN 978-3-446-40043-6.
- Schuh 2006                              Schuh, Günther, 2006. *Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 3., völlig neu bearbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. VDI-Buch. ISBN 9783540338550.
- Schuh et al. 2008                      Schuh, Günther et al., 2008. Strategien und Trends in der Montagetechnik und -organisation. Lösungsansätze aus der Praxis zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der Montage am Standort Deutschland. *wt Werkstattstechnik online* **98**(9) S. 670-674. ISSN: 1436-4980

- 
- Sethi und Sethi 1990                      Sethi, Andrea Krasa und Sethi, Suresh, Pal, 1990. Flexibility in manufacturing: A survey. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* **2**(4) S. 289-328.  
DOI 10.1007/ BF00186471
- Shen et al. 2003                              Shen, Chun-Hsia, et al. 2003. Reconfigurable fixtures for automotive engine machining and assembly applications. In: 2nd International Conference on Reconfigurable Manufacturing. 20. 21. August 2003. Michigan: NST Engineering Research Center for Reconfigurable Manufacturing Systems, S. 20–21. DOI 10.1007/3-540-29397-3
- Spath et al. 2002                              Spath, Dieter et al., 2002. Wandlungsfähigkeit und Planung von Fabriken. Ein Ansatz durch Fabriktypologisierung und unterstützenden Strukturbaukasten. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **97**(1/2) S. 28-32.  
ISSN: 0947-0085
- Specht und Möhrle 2002                      Specht, Dieter und M.G. Möhrle, 2002. *Gabler Lexikon Technologiemanagement. Management von Innovationen und neuen Technologien im Unternehmen*. Wiesbaden: Gabler.  
ISBN 3409118225
- Stock 2013                                        Stock, Torsten, 2013. *Ein Verfahren zur Personalplanung und -steuerung und Restrukturierung der Aufbauorganisation für eine bedarfsorientierte und wandlungsfähige Produktion*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. 9 ISBN 978-3-8396-0532-5. Stuttgart, Univ., Diss., 2013.

- Toni und Tonchia 1998                      Toni, Alberto und Tonchia, Stefano, 1998. Manufacturing flexibility. A literature review. *International Journal of Production Research* **36**(6) S. 1587-1617. DOI 10.1080/002075498193183
- Heisel und Stehle 2009                      Heisel, Uwe und Stehle, Thomas, 2009. Konfiguration und Rekonfiguration von Produktionssystemen. In: Bullinger, Hans-Jörg, Spath, Dieter, Warnecke, Hans-Jürgen und Westkämper, Engelbert, 2008. *Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung*. 3., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer Berlin. VDI S. 431–471. ISBN 3540875956.
- Ueda et al. 2000                                Ueda, Kazunori et al., 2000. Reinforcement Learning approaches to Biological Manufacturing Systems. *Annals of the CIRP* **49**(1) S. 343-346.  
DOI 10.1016/S0007-8506(07)62960-6
- Ueda et al. 1997                                Ueda, Kazunori, 1997. Modeling of Biological Manufacturing Systems for Dynamic Reconfiguration. *Annals of the CIRP* **46**(1) S. 343-346. DOI 10.1016/S0007-8506(07)60839-7
- Vähning 1985                                  Vähning, Heinrich, 1985. *Flexibilität von personalintensiven Montagesystemen bei Serienfertigung*. Berlin u.a: Springer. IPA-IAO-Forschung und Praxis 82. ISBN 3-540-15093-5. Stuttgart, Univ., Diss., 1985.
- van Brussel et al. 1998                      von Brussel, Hendrik, 1998. Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA. *Computers in Industry* **37**(3) S. 255-274. DOI: 10.1016/S0166-3615(98)00102-X

- 
- VDI 1992 Verein Deutscher Ingenieure, 1992. *Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung. Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen*. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI. ISBN 9783184010065.
- VDMA 2013 Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e.V. (2013): *Maschinenbau in Zahl und Bild. Mechanical Engineering - Figures and Charts*. Frankfurt am Main: VDMA. 03.2013  
Verfügbar: [http://www.vdma.org/documents/105628/805395/MbauinZuB\\_2013.pdf/5de48924-6257-41d2-aef0-d4d356eb2b1f](http://www.vdma.org/documents/105628/805395/MbauinZuB_2013.pdf/5de48924-6257-41d2-aef0-d4d356eb2b1f). Zugriff: 25.06.2013
- VDI 1990 VDI 2860 Blatt 1 1990-05. *Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*.
- VDI 2008 VDI 3633 Blatt 1 2008-12. *Simulation in der Produktion*.
- VDI 2008 VDI 4499 Blatt 1 Part 1. 2008-02. *Digitale Fabrik*.
- Volling 2009 Volling, Thomas, 2009. *Auftragsbezogene Planung bei variantenreicher Serienproduktion. Eine Untersuchung mit Fallstudien aus der Automobilindustrie*. Wiesbaden: Gabler. Gabler Edition Wissenschaft. Produktion und Logistik. ISBN 3834914770.
- Warnecke 1984 Warnecke, Hans-Jürgen, 1984. *Der Produktionsbetrieb. Eine Industriebetriebslehre für Ingenieure*. Berlin: Springer. ISBN 038713574X.

- Warnecke 1989                      Warnecke, Hans-Jürgen, 1989. *Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb: Ergebnisbericht (1987-1989) : Ergebnisbericht für den Forschungszeitraum 1987-1989*. Hrsg. v. Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). Sonderforschungsbereich (SFB 158). Stuttgart.
- Warnecke 1996                      Warnecke, Hans-Jürgen, 1996. *Die fraktale Fabrik. Revolution der Unternehmenskultur*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt. rororo science. 9708. ISBN 3499197081.
- Warnecke und Jacobi 1991              Warnecke, Hans-Jürgen, 1991. *Produktionssicherung. Sichere Prozesse, zuverlässige Informationen, Qualifizierung, Zeit : Tagungsband 1991*, [6. und 7. Juni 1991, Sindelfingen]. München: gfmt, Ges. für Management und Technologie ISBN 9783894150266.
- Weimer 2010                      Weimer, Tobias, 2010. *Informationsmodell für die durchgängige Datennutzung in Fabrikplanung und -betrieb*. Heimsheim: Jost-Jetter. ISW/IPA Forschung und Praxis 176. ISBN 3939890626 Stuttgart, Univ., Diss., 2010.
- Weiß 2000                      Weiß, Cornelius, 2000. *Methodengestützte Planung und Analyse von Endmontagelinien in der Automobilindustrie*. Karlsruhe: Inst. für Fördertechnik und Logistiksysteme. Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe (TH) 51. Karlsruhe, Univ., Diss., 2000.
- Westkämper 2001                      Westkämper, Engelbert, 2001. *Montageplanung - effizient und marktgerecht*. Berlin: Springer. VDI-Buch. ISBN 3540666478.

- 
- Westkämper 2006a Westkämper, Engelbert, 2006. *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin: Springer. Springer-Lehrbuch. ISBN 9783540260394.
- Westkämper 2006b Westkämper, Engelbert, 2006. Research for Adaptive Assembly. In: *First CIRP International Seminar on Assembly Systems*. 15. – 17. November 2006, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. ISBN: 3-8167-7213-7.
- Westkämper 2006c Westkämper, Engelbert, 2006. *Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion – Abschlussbericht 1997-2005*: Sonderforschungsbereich 467. Universität Stuttgart. Stuttgart: Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF)
- Westkämper 2007 Westkämper, Engelbert, 2007. Digital Manufacturing in the Global Era. In: Cunha, Paulo, Ferreira, et al. 2007. *Digital enterprise technology. Perspectives and future challenges*. New York: Springer. S. 3-14. ISBN 038749863X.
- Westkämper 2008a Westkämper, Engelbert, 2008. Fabriken sind komplexe langlebige Systeme. In: Nyhuis, Peter, 2008. *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin: Springer S. 85–107. ISBN 9783540756422.
- Westkämper 2008b Westkämper, Engelbert, 2008. Fabrikplanung vom Standort bis zum Prozess. In: 8. *Deutscher Fachkongress Fabrikplanung*.: 28. und 29. Oktober 2008. Ludwigsburg.



- Westkämper 2009a Westkämper, Engelbert, 2009. Digitale Produktion. Herausforderungen und Nutzen. In: Bullinger, Hans-Jörg, Spath, Dieter, Warnecke Hans-Jürgen und Westkämper, Engelbert 2008. *Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung*. 3., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer. VDI. S. 431–471. S. 515–567. ISBN 3540875956.
- Westkämper 2009b Westkämper, Engelbert, 2009. Wandlungsfähige Organisation und Fertigung in dynamischen Umfeld. In: Bullinger, Hans-Jörg, Spath, Dieter, Warnecke Hans-Jürgen und Westkämper, Engelbert 2008. *Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung*. 3., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer. VDI. S. 431–471. S. 26-37. ISBN 3540875956.
- Westkämper 2011 Westkämper, Engelbert, 2011. New paradigms of Advanced Manufacturing Engineering. In QFD-Institut Deutschland, 2011. *17th International QFD Symposium, ISQFD 2011. Achieving Sustainability with QFD*. 21. – 23. September 2011, Stuttgart, Germany.
- Westkämper 2012 Westkämper, Engelbert, 2012. Innovationsmanagement mit dem Technologiekalender. In: Gleich, Robert et al., 2012. *Innovationsmanagement in der Investitionsgüterindustrie treffsicher voranbringen. Konzepte und Lösungen*. 2., völlig neu bearb. Aufl. Frankfurt am Main: VDMA-Verl. S.104–113. ISBN 9783816306238.
- Westkämper 2013a Westkämper, Engelbert, 2013. Increasing resource efficiency through education and training. In: 3<sup>rd</sup> Conference on Learning Factories, 7. May 2013. München: Fraunhofer IRB Verlag, S. 170-181.

- 
- Westkämper 2014 Westkämper, Engelbert, 2014. *Towards the re-Industrialization of Europe. A concept for manufacturing for 2030*. Berlin u.a: Springer Vieweg. ISBN 3-642-38501-X.
- Westkämper et al. 1998 Westkämper, Engelbert et al., 1998. Auftragsmanagement in wandlungsfähigen Unternehmensstrukturen. Anforderungen und Ansätze. *PPS Management* 3(1) S. 22-26.
- Westkämper et al. 2000a Westkämper, Engelbert et al., 2000. Turbulenz in der PPS - eine Analogie. *wt Werkstattstechnik online* 90(5) S. 22-26. ISSN: 1436-4980
- Westkämper et al. 2000b Westkämper, Engelbert, 2000. Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. Ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld. *wt Werkstattstechnik online* 90(1/2) S. 22-26. ISSN: 1436-4980
- Westkämper et al. 2013 Westkämper, Engelbert, Spath, Dieter und Constantinescu, Carmen, 2013. *Digitale Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-20259-9.
- Westkämper und Zahn 2009 Westkämper, Engelbert und Zahn, Erich, 2009. *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin: Springer. ISBN 9783540688907.
- Wiendahl 2002a Wiendahl, Hans-Hermann, 2002. *Situative Konfiguration des Auftragsmanagements im turbulenten Umfeld*. Heimsheim: Jost-Jetter. IPA-IAO-Forschung und Praxis 358 ISBN 3931388875. Stuttgart, Univ., Diss., 2002.

- Wiendahl 1996                      Wiendahl, Hans-Peter, 1996. Aufgabenstellung und Zielkonflikte. In: Eversheim, Walter und Schuh, G., 1996. *Produktion und Management "Betriebshütte"*. 7. völlig neu bearb. Aufl. / hrsg. von Walter Eversheim, Günther Schuh. Berlin: Springer. S. 14. ISBN 3540593608.
- Wiendahl 2002b                    Wiendahl, Hans-Peter, 2002. Wandlungsfähigkeit. Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. *wt Werkstattstechnik online* **92**(4) S. 122-127. ISSN: 1436-4980
- Wiendahl 2004                      Wiendahl, Hans-Peter, 2004. *Variantenbeherrschung in der Montage. Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe*. Berlin u.a: Springer. Engineering online library. ISBN 3-540-14042-5.
- Wiendahl 2005                      Wiendahl, Hans-Peter, 2005. *Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*. München: Hanser. ISBN 9783446400450.
- Wiendahl 2010                      Wiendahl, Hans-Peter, 2010. *Betriebsorganisation für Ingenieure*. Mit 2 Tab. 7., aktualisierte Aufl. München: Hanser. ISBN 3446418784.
- Wiendahl und Hernández 2000    Wiendahl, Hans-Peter und Hernández, Rodriguez, 2000. Wandlungsfähigkeit - neues Zielfeld in der Fabrikplanung. *Industrie Management* **16**(5) S. 37-41. ISSN 0179-2679
- Wiendahl et al. 2009              Wiendahl, Hans-Peter, Reichardt, Jürgen und Nyhuis, Peter, 2009. *Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. München: Hanser. ISBN 9783446224773.

- 
- Wildemann 1994 Wildemann, Horst, 1994. *Die modulare Fabrik. Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung*. 4., Neubearb. Aufl. München TCW. 2. ISBN 3-929918-30-7.
- Wirth et al. 2000 Wirth, Siegfried et al., 2000. Visionen zur wandlungsfähigen Fabrik. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **95**(10) S. 96-100. ISSN 0932-0482
- Wolf 1989 Wolf, Jürgen, 1989. *Investitionsplanung zur Flexibilisierung der Produktion*. Zugl.: Darmstadt, Techn. Hochsch., Diss., 1989. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. DUV-Wirtschaftswissenschaft. ISBN 3-8244-0029-4.
- Wright 1936 Wright, Theodore Paul, 1936. Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the Aeronautical Science* **3**(2). S. 1222-128. DOI 10.2514/8.155.
- Zahn 1995 Zahn, Erich, 1995. *Handbuch Technologiemanagement*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel. ISBN 9783791007588.

Die vorliegende Dissertation behandelt das Thema der systematischen und kurzfristigen Reaktionsfähigkeit von Montagesystemen hinsichtlich permanent wirkender marktseitiger und unternehmensseitiger Einflüsse. Um dies zu ermöglichen, wurde eine fünfstufige Methode entwickelt und ein app-basiertes Software-Werkzeug erstellt.

ISBN 978-3-8396-0816-6



FRAUNHOFER VERLAG