Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme

Von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Stefan Jens Kluge

aus Schorndorf

Hauptberichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. E. Westkämper
Mitberichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath

Tag der Einreichung:	27. April 2011
Tag der mündlichen Prüfung:	26. Juli 2011

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2011

IPA-IAO Forschung und Praxis

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

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
und
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath
und
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Alexander Verl

Universität Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb
Fraunhofer IPA

Stefan Kluge

Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme

Nr. 510

JOST-JETTER VERLAG
Fachverlag · 71296 Heimsheim

Dr.-Ing. Stefan Kluge

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

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

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

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

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

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

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

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

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

D 93

ISBN 978-3-939890-81-2
Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.
© Jost-Jetter Verlag, Heimsheim 2011.
Printed in Germany.

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

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

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

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

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF),
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT),
- Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW),

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

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

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath Alexander Verl

Vorwort des Autors

„Der Gedanke wächst, indem er sich von seinen eigenen Worten nährt.“
Rabindranath Tagore (1861-1941)

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb. Meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper danke ich in besonderem Maße für die wohlwollende Unterstützung und die Möglichkeit verantwortungsvolle Aufgaben am Institut übernehmen zu dürfen. Mein Dank gilt auch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath für die sorgfältige Durchsicht dieser Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Für viele wertvolle Anregungen und Diskussionen sowie die kritische Durchsicht der Arbeit bin ich Herrn Dr.-Ing. Alexander Schloske und Frau Prof. Dr.-Ing. Vera Hummel zu großem Dank verpflichtet.

Meinen ehemaligen Kollegen aus dem Fachgebiet advanced Industrial Engineering, Dr.-Ing. Lars Aldinger, Dr.-Ing. Ralf Kapp, Dr.-Ing. Dipl.-Kffr. Rita Kreuzhage und Dipl.-Ing. Philipp Riffelmacher, danke ich für die fachlichen Diskussionen und die kollegiale Zusammenarbeit.

Ganz herzlich bedanke ich mich auch bei Sarah Grünler B.A. und Dr. phil. Christian Grünler, die mit sprachlicher und fachlicher Kompetenz meine Arbeit redigierten.

Mein Dank gilt allen Diplom- und Studienarbeitern sowie studentischen Hilfskräften, die mich während meiner Zeit am Institut unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich Dipl.-Kfm. techn. Thorsten Pflüger, Franz Gaupp, Dipl.-Kfm. techn. Volker Hofmann, Dipl.-Ing. Max Conrad, Dipl.-Kffr. techn. Melanie Bürger und Dipl.-Ing. Bruno von Hochmeister.

Zudem bedanke ich mich bei den Kolleginnen aus der IPA-Bibliothek für die umfassende Unterstützung in den letzten Jahren.

Meinen Eltern Heidemarie und Dipl.-Ing. Manfred Kluge danke ich dafür, dass Sie mir durch ihre Unterstützung das Studium ermöglichten, welches den Grundstein für diese Arbeit legte.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Daniela, die während meiner Promotion auf viele gemeinsame Stunden verzichtete und mir stets liebevoll und mit viel Geduld sowie mit eminentem Engagement zur Seite stand. Ihr widme ich diese Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis IX
Abbildungsverzeichnis XI
Tabellenverzeichnis XIII
Abkürzungen XIV
1 Einleitung 1
1.1 Ausgangssituation 1
1.2 Problemstellung 11
1.3 Zielsetzung und Aufgabenstellung 11
1.4 Vorgehensweise 12
2 Klärung von Begriffen und Festlegung des Betrachtungsbereichs 15
2.1 Die Montage in wandlungsfähigen Unternehmensstrukturen 15
2.2 System Montage 19
2.3 Arten modularer Montagesysteme 23
2.4 Montageplanung 25
2.5 Lebenszyklen modularer Systeme 28
2.6 Fazit der Begriffsklärung und Präzisierung des Betrachtungsbereichs 34
2.6.1 Betrachtungsbereich 34
2.6.2 Anforderungen an die Methodik 36
3 Diskussion forschungsrelevanter Ansätze 39
3.1 Produktinformationen 39
3.2 Planungssystematiken 46
3.2.1 Klassische Planungssystematiken 46
3.2.2 Forschungsspezifische Planungssystematiken 49
3.2.3 Bewertung 54
3.3 Beschreibungsmethoden 57
3.3.1 Methoden im Rahmen von Planungssystematiken 58
3.3.2 Methoden in weiteren Anwendungsgebieten 60
3.3.3 Bewertung 61
3.4 Fazit 63
4 Entwicklung einer Planungsmethodik für modulare Montagesysteme 67
4.1 Prämissen 67
4.2 Gesamtkonzept 69
4.3 Einordnung des Gesamtkonzepts 71
4.4 Entwicklung von Szenarien 74
4.5 Generische Beschreibungsmethode 77
4.5.1 Fähigkeitsmodell 77
4.5.2 Deskription der Montageressourcen 80
4.5.3 Entwicklung und Deskription der Montageprozesse 89
4.5.4 Merkmalmodell 95
4.6 Alternativengenerierung 103
4.7 Szenariobasierte Bewertungssystematik 106
4.7.1 Gesamtablauf 106
4.7.2 Kostenmodell 108

4.7.2.1 Kosten in der Entstehungsphase ... 108
4.7.2.2 Kosten in der Betriebsphase ... 109
4.7.2.3 Kosten in der Rekonfigurationsphase ... 111
4.7.2.4 Kosten der indirekten Bereiche ... 113
4.7.3 Betrachtung bewertungsrelevanter Aspekte ... 114
4.7.3.1 Bewertungskriterien ... 115
4.7.3.2 Analytische Systemwertermittlung ... 116
4.7.4 Gesamtbewertung ... 117
5 Umsetzung der Methodik ... 121
5.1 Methode zur Entwicklung von Szenarien ... 121
5.2 Systemtechnische Realisierung der Planung ... 125
5.2.1 Präzisierung der Rahmenbedingungen ... 125
5.2.2 Deskription von Ressourcen in einer Modulbibliothek ... 126
5.2.3 Modul zur Erstellung von Fähigkeitsfolgen ... 128
5.2.4 Modul zur Ressourcenauswahl ... 129
5.2.5 Modul zur Leistungsabstimmung und Layoutplanung ... 130
5.2.6 Vorauswahl ... 132
5.3 Umsetzung der szenariobasierten Bewertungssystematik ... 133
6 Validierung der Methodik ... 137
6.1 Vorgehen ... 137
6.2 Anwendungsfall der Methodik ... 138
6.2.1 Ausgangssituation ... 138
6.2.1.1 Das System des Anlagenherstellers – iTRAME ... 138
6.2.1.2 Das Betreiberunternehmen EMARTi AG ... 139
6.2.1.3 Produktfamilie „Schreibtischaccessoire“ ... 140
6.2.2 Anwendung der Planungsmethodik ... 140
6.2.2.1 Entwicklung von Szenarien ... 141
6.2.2.2 Präzisierung der Rahmenbedingungen ... 146
6.2.2.3 Erstellung von Fähigkeitsfolgen ... 147
6.2.2.4 Auswahl von Ressourcen ... 148
6.2.2.5 Leistungsabstimmung ... 150
6.2.2.6 Vorauswahl ... 150
6.2.2.7 Szenariobasierte Bewertung und Auswahl einer Lösung ... 152
6.3 Erkenntnisse ... 155
7 Zusammenfassung und Ausblick ... 157
8 Summary ... 161
9 Literaturverzeichnis ... 165
10 Anhang ... 181
Anhang A: Planungssystematik nach Konold und Reger ... 181
Anhang B: Grafische Übersichten zur Bewertung ... 183
Anhang C: Fähigkeiten ... 185
Anhang D: Produkt- und Prozessmerkmale ... 196
Anhang E: Workshop Lebenszyklusszenarien ... 198
Anhang F: Weiterführende Unterlagen zum Anwendungsfall ... 210

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Auftragsentwicklung Maschinenbau ... 2
Abbildung 1-2 Herausforderungen der Montage ... 4
Abbildung 1-3 Methodik zur Planung modularer Montagesysteme ... 12
Abbildung 1-4 Vorgehensweise ... 13
Abbildung 2-1 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit ... 16
Abbildung 2-2 Skalenmodell der Produktion ... 18
Abbildung 2-3 Holistisches Montagesystemmodell ... 20
Abbildung 2-4 Organisationsprinzipien der Montage ... 22
Abbildung 2-5 Beispiele modularer Montagesysteme ... 25
Abbildung 2-6 Hybrides Montagesystem LPM 2400 ... 25
Abbildung 2-7 Ausbaustufen entlang des Produktlebenszyklus ... 29
Abbildung 2-8 Systemlebenszyklus über den Lebenszyklus des Montagesystems ... 31
Abbildung 2-9 Kapazitätsabstimmung ... 32
Abbildung 2-10 Betriebstypologie der Systembetreiber ... 34
Abbildung 3-1 Wechselbeziehungen zwischen Produkt und Montagezelle ... 40
Abbildung 3-2 Grundsätzliche Vorgehensweise beim Entwickeln und Konstruieren ... 41
Abbildung 3-3 Auswahl klassischer Planungssystematiken ... 47
Abbildung 4-1 Gesamtkonzept der Lösung ... 70
Abbildung 4-2 Einordnung der Methodik ... 72
Abbildung 4-3 Ausprägungen der Szenario-Methode ... 75
Abbildung 4-4 Grundstruktur der standardisierten Beschreibungssystematik ... 78
Abbildung 4-5 Fähigkeitsmodell ... 79
Abbildung 4-6 Montagestation ... 81
Abbildung 4-7 Gliederung von Ressourcen ... 83
Abbildung 4-8 Module einer Montagezelle am Beispiel zweier Montagestationen ... 83
Abbildung 4-9 Transportmodul mit Werkstückträger ... 84
Abbildung 4-10 Beispiel einfache Baugruppe ... 91
Abbildung 4-11 Baugruppenstruktur ... 92
Abbildung 4-12 Montageprozessklassen eines Produkts ... 93
Abbildung 4-13 Montagevarianten für Montageprozessklasse ... 94
Abbildung 4-14 Gesamtschema der szenariobasierten Bewertungssystematik ... 107
Abbildung 4-15 Kriterienpräferenzmatrix ... 115
Abbildung 4-16 Bewertungsschema für die analytische Systemwertermittlung ... 117
Abbildung 4-17 Gesamtinformationsschema für die Bewertung ... 119
Abbildung 5-1 Umsetzung der Methodik ... 121
Abbildung 5-2 Kapazitätsbereiche ... 126
Abbildung 5-3 Hinzufügen neuer Module ... 127
Abbildung 5-4 Erstellung von Montageabläufen ... 129
Abbildung 5-5 Ressourcenauswahl ... 130
Abbildung 5-6 Leistungsabstimmung ... 131
Abbildung 5-7 Beispiel 1 für Alternativenfelder ... 133
Abbildung 5-8 Beispiel 2 für Alternativenfelder ... 133
Abbildung 6-1 iTRAME Beispielkonfiguration ... 139

Abbildung 6-2 Potenzieller Produktlebenszyklus 143
Abbildung 6-3 Entwickelte Produktlebenszyklen 146
Abbildung 6-4 Fähigkeitsfolge 148
Abbildung 6-5 Detailvergleich von Modulen mittels Merkmalen 149
Abbildung 6-6 Schematische Darstellung der Alternativenfeld 1 151
Abbildung 6-7 Schematische Darstellung der Alternativenfeld 2 152
Abbildung 6-8 Schematische Darstellung der Alternativenfeld 3 152
Abbildung 6-9 Bestimmung von Stückzahlen bei Szenario 1 154
Abbildung 10-1 Aktiv-Passiv-Grid des Anwendungsfalls 210
Abbildung 10-2 Kapazitätsbereiche im Anwendungsfall 217
Abbildung 10-3 Layoutübersicht zu den Konfigurationen 218
Abbildung 10-4 Gesamtwertigkeitsschaubild 223

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1 Ausschnitt aus der standardisierten Beschreibungssystematik 78
Tabelle 4-2 Struktur der Aufbewahrungselemente 85
Tabelle 4-3 Beispielhafte Fähigkeitsbeschreibung von Aufbewahrungsmitteln 86
Tabelle 4-4 Struktur von Basismodulen mit Beispielen 87
Tabelle 4-5 Beispielhafte Gliederung von automatisierten Prozessmodulen 88
Tabelle 4-6 Klassifikation von Produktmerkmalen 97
Tabelle 4-7 Klassifikation von Prozessmerkmalen 99
Tabelle 4-8 Ausgewählte Kostenmerkmale 100
Tabelle 4-9 Beispiele für Produktmerkmale 101
Tabelle 4-10 Beispiele für Prozessmerkmale 102
Tabelle 4-11 Anwendungsmöglichkeit von Merkmalen 103
Tabelle 4-12 Weitere Anwendungsmöglichkeit von Merkmalen 103
Tabelle 5-1 Übersicht der Kosten 134
Tabelle 6-1 Produktvarianten im Anwendungsfall 140
Tabelle 6-2 Unternehmensanalyse 141
Tabelle 6-3 Einflussfaktoren 142
Tabelle 6-4 Identifizierte Einflussfaktoren 143
Tabelle 6-5 Ausgewählte Schlüsselfaktoren 144
Tabelle 6-6 Szenariobildung 145
Tabelle 6-7 Gewichtung der Kriterien 147
Tabelle 6-8 Auswahl an Ressourcen 149
Tabelle 6-9 Kosten der Lebenszyklusphasen 153
Tabelle 6-10 Systemwertermittlung Alternativenfeld 1 155
Tabelle 6-11 Gesamtinformationsschema 155
Tabelle 10-1 Projektionen der Schlüsselfaktoren 210
Tabelle 10-2 Szenariotransfer Szenario 1 214
Tabelle 10-3 Szenariotransfer Szenario 2 215
Tabelle 10-4 Szenariotransfer Szenario 3 216
Tabelle 10-5 Prozesszeiten 217
Tabelle 10-6 Kennzahlen für die Kostenrechnung 218
Tabelle 10-7 Kosten indirekter Bereiche IO1 219
Tabelle 10-8 Kosten indirekter Bereiche IO2 220
Tabelle 10-9 Kosten indirekter Bereiche IO3 221
Tabelle 10-10 Betriebskosten pro Jahr 222
Tabelle 10-11 Stückkosten 222
Tabelle 10-12 Fixkostenbelastungsübersicht 222
Tabelle 10-13 Investitionsübersicht 222
Tabelle 10-14 Beschreibung der Zielbereiche 223

Abkürzungen

3D	Dreidimensional
AE	Aufbewahrungselement
AF	Alternativenfeld
AM	Aufbewahrungsmittel
ASF	Ausbaustufenfolge
BDE	Betriebsdatenerfassung
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
BG	Baugruppe
BM	Basismodule
CAD	Computer-Aided-Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAP	Computer Aided Planning
CAPP	Computer-Aided-Process-Planning
CIM	Computer Integrated Manufacturing
DfA	Design for Assembly
ET	Einzelteil
F	Fähigkeit
FMEA	Fehler-Möglichkeits-Einfluss-Analyse
G	Gewichtung
GSK	Gesamtstückkosten
GSW	Gesamtsystemwert
I&K-System	Informations- und Kommunikationsystem
IO	Initialopportunität
iTRAME	intelligent Transformable Reconfigurable Assembly and Manufacturing Equipment
K	Kriterium
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KP	Kriterienpunkt
LZP	Lebenszyklusphase
M	Stückzahlmenge
MES	Manufacturing Execution System
MPK	Montageprozessklasse
MRP	Material-Requirement-Planning-System
MRPII	Manufacturing-Resource-Planning
MTM	Methods-Time Measurement
NC	Numerical Control
P	Produkt
PK	Phasenstückkosten

PLZ	Produktlebenszyklus
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PSzx	Wahrscheinlichkeit (von Szenario x)
PW	Punktwert
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
RFID	radio-frequency identification
SK	Stückkosten
SOP	Start of Production
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
St.	Stück
SUM	Stuttgarter Unternehmensmodell
SW	Systemwert
Sz	Szenario
TW	Teilwert
UML	Unified Modeling Language
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
VDW	Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V.
VR	Virtuelle Realität
W	Wert

1 Einleitung

Die wirtschaftliche Situation produzierender Unternehmen wird aufgrund der schnellen und intensiven Veränderungen an den globalen Märkten immer turbulenter (Westkämper 2009, S. 8f), weshalb die dadurch auftretenden internen und externen Turbulenzen als Wandlungstreiber in Unternehmen eine erhöhte Wandlungs- und Adaptionsfähigkeit in der Produktion erfordern (Westkämper 2009, S. 9-12). Das wichtige Ziel der Wandlungsfähigkeit gewinnt so neben den klassischen Zielgrößen immer mehr an Bedeutung. Um es zu realisieren, benötigen viele Produktionsunternehmen im mitteleuropäischen Raum für einen nachhaltigen wirtschaftlichen Erfolg entsprechende Befähiger (Hernández Morales 2002, S. 50-56). Der hohe Mitteleinsatz und die Produktivitätseinbußen für die Adaption von Produktionen an die neuen Erfordernisse sind neben der relativ langen Zeitspanne aktuelle Herausforderungen für Unternehmen, die solche Adaptionen durchführen müssen (Fisser u. a. 2009, S. 115).

1.1 Ausgangssituation

Vor allem der Produktionsbereich Montage, im Speziellen die Endmontage, ist als meist letztes Glied der Wertschöpfungskette hinsichtlich der direkten Auswirkungen von externen Turbulenzen von besonderer Bedeutung (Reinhart, Zäh 2007, S. 602; März, von Langsdorff 2001, S. 3; Westkämper 2006c, S. 9). Stellvertretend für externe Turbulenzen sind zur Verdeutlichung die Schwankungen des Auftragseingangs im Maschinenbau bis in das Jahr 2009 aufgeführt. Abbildung 1-1 zeigt dazu den Verlauf des stark schwankenden Maschinenbaugeschäfts über Jahre hinweg (Wiechers, Schneider April 2010, S. 15). In Unternehmen mittlerer Größe, deren Produktion durch eine variantenreiche Serienproduktion geprägt ist, treten diese Gegebenheiten in verstärktem Maß auf (Kirchner u. a. 2009, S. 273, 285). Um diesen Herausforderungen entgegenzutreten, haben die Hersteller von Montagesystemen verschiedene Lösungen entwickelt. So gibt es heutzutage beispielsweise modulare Baukastensysteme, Modulsysteme und modulare Komplettsysteme, die durch ihre verschiedensten Ausführungsformen ein umfassendes Angebot darstellen. So kann der Anwender zwischen vielen Stufen von manuellen über hybride bis hin zu hoch automatisierten Montagesystemen wählen (Drunk 2006, S. 3f). Dadurch wurde der Ansatz der vollkommenen Hochautomatisierung, welcher in den achtziger und Anfang der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts angestrebt wurde, in seiner Wirtschaftlichkeit hinterfragt. Untersuchungen hierzu führten zu dem Ergebnis, dass die Hochautomatisierung den Erfordernissen des 21. Jahrhunderts nur in kleinen Teilen genügt und dass andere Systeme meist bessere Lösungen darstellen (Lay, Schirrmeister 2000, S. 1, 12). Dies gilt im Besonderen für die variantenreiche Serienproduktion, da diese unter den genannten Rahmenbedingungen den emergenten Veränderungen externer und interner Herkunft verstärkt unterworfen ist.

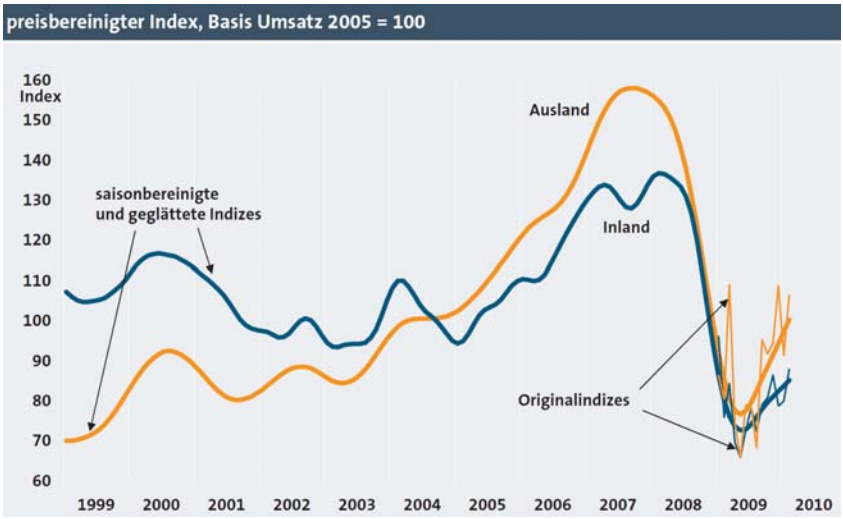


Abbildung 1-1 Auftragsentwicklung Maschinenbau
(Wiechers, Schneider April 2010, S. 15)

Reaktionsfähigkeit von Unternehmen in der Montage

Zur Sicherstellung nachhaltiger Gestaltung von wandlungsfähigen Fabriken und Produktionen müssen die Produktionssegmente spezielle wandlungsbefähigende Eigenschaften besitzen. Dies wiederum wird durch deren Subsysteme, den Produktionssystemen, besonders durch die Montagesysteme und deren Stationen, ermöglicht. Um Fabriken nachhaltig wandlungsfähig zu gestalten, müssen somit die einzelnen Elemente eines Montagesystems befähigende Eigenschaften besitzen (Nofen, Klußmann, Löllmann 2005, S. 20f). Die Wandlungsfähigkeit der Produktionssegmente und dadurch des gesamten Montagesystems gewinnt daher immer mehr an Bedeutung. Die befähigenden Eigenschaften werden von Hernández Morales und Wiendahl als folgende Wandlungsbefähiger definiert: Universalität, Modularität, Kompatibilität, Mobilität und Skalierbarkeit (Hernández Morales 2002, S. 54; Wiendahl, Heger 2003, S. 7f, Wiendahl, Heger 2004, S. 2-5). Die Umsetzung dieser Eigenschaften in der Praxis wird von modularen Montagesystemen in einem hohen Maß erreicht. Dadurch wird von Seiten der Hardware und Steuerung von Montagesystemen ein als mindestens ausreichend zu bezeichnendes Angebot abgedeckt. Auch das Grundprinzip zur technischen Fabrikgestaltung „PLUG&PRODUCE“ hat diese Entwicklung vorangetrieben und durch seine Entwicklung bzw. durch die Entwicklung von entsprechenden Umsetzungsrichtlinien für die Praxis einen Beitrag zur technischen Weiterentwicklung geleistet (Hildebrand 2005, S. 135). Solche Systeme sind bereits seit Längerem auf dem Markt, wobei sie die ihnen zugesprochene potenzielle Marktdurchdringung noch nicht erreicht haben (Vollmers 2008, S. 1; von der Weiden 19.09.2008, S. 20). Sie entsprechen durch die speziellen Eigenschaften den

Anforderungen an ein modulares Montagesystem, wie es von Westkämper definiert wurde (Hummel, Westkämper 2009, S. 54-57; Westkämper 2006c, S. 9ff).

Dies zeigt, dass auf Seiten der Hard- und Software die Entwicklung in den letzten Jahren in die richtige Richtung ging und sehr tragfähige Ergebnisse erzielt werden konnten. So konnten die Hersteller solcher Anlagen ihr vorhandenes Know-how nutzen, neues Wissen dazugewinnen und somit tragfähige Lösungen bereitstellen. Unternehmen können den Herausforderungen der Märkte durch Wandlungsfähigkeit erfolgreich begegnen. Sie können somit agierend und reagierend auf die Entwicklungen an den Märkten schnell antworten (Riffelmacher, Kluge, Westkämper 2009, S. 29). Durch die vorhandene Anlagentechnik lassen sich dadurch Planungsergebnisse schnell umsetzen.

Auf die Aufgabe des Reduzierens von Entwicklungszeiten von Produkten wird schon seit Jahren ein verstärktes Augenmerk gelegt, wodurch sich beispielsweise neue Methoden der Produktentwicklung und beschleunigend wirkende Softwarewerkzeuge durchgesetzt haben. So sind Methoden wie Simultaneous und Concurrent Engineering oder Software im Bereich Product Lifecycle Management aus modernen Unternehmen nicht mehr wegzudenken (Müller, Brecher 2009, S. 8).

Die immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen und die damit verbundene immer kürzer werdende Time-to-Market führen neben der Notwendigkeit zur Verkürzung der Entwicklungszeiten der Produkte aber auch zu einem Bedarf der Beschleunigung der Planungsphasen bis zum Anlaufmanagement von Anlagen in der Serienproduktion (Westkämper 2001b, S. 479-482). Daher rückt der Fokus immer mehr auf die Betrachtung der Planung von Montageanlagen. Es gilt auch hier, entsprechende beschleunigende Methoden und Konzepte zu entwickeln und umzusetzen. Dies bedeutet, dass die Anlagenhersteller, welche die Entwicklung der Anlagen mit hoher Geschwindigkeit vorantreiben, die eigenen Vorgehensweisen und Methoden innerhalb der Planung auf Optimierungspotenzial hin überprüfen müssen. Sie sehen sich somit neben der klassischen Aufgabe, der Herstellung eines Produktions- oder Montagesystems, welches aufgrund der technischen Eigenschaften einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglicht, mit neuen Herausforderungen konfrontiert. Deshalb ist eine Optimierung der Montageplanungsabläufe unter Berücksichtigung der aktuellen Herausforderungen ein wichtiger Schlüssel für den erfolgreichen Einsatz moderner Montagesysteme.

In einer von Müller und Brecher vorgestellten Analyse wird die Optimierung von Montageplanungsabläufen, das Engineering, ebenfalls als Herausforderung für die Zukunft gesehen. Dabei werden dem Engineering alle Planungsprozesse eines Montagesystems über dessen Lebenszyklus zugeordnet (Müller, Brecher 2009, S. 9). Bei dem zugehörigen Vorgehensmodell soll der Anlagenhersteller eine vollständige Prozesskettenauslegung durchführen (Müller, Brecher 2009, S. 8).

Aktuelle Herausforderungen in der Montage und Montageplanung

Um die wichtigsten zukünftigen Trends zu identifizieren und um deren Auswirkungen auf die Montageanlagenhersteller abzuleiten, wurde eine Untersuchung der aktuellen

Herausforderungen im Themengebiet der Montageanlagen und Montageplanung durchgeführt. Diese Herausforderungen werden im Folgenden vorgestellt und speziell im Hinblick auf die Veränderungen innerhalb der Montageplanung diskutiert.

Der Fokus der Betrachtungen lag bei der Durchführung auf variantenreichen Serienproduktionen, die sich, wie eingangs erwähnt, durch ein Produktspektrum mit mehrstufigem Produktionsprozess und demgemäß unterschiedlichen Prozessen sowie durch Schwankungen beim Absatz der Varianten auszeichnen (Westkämper 2006e, S. 13f).

In insgesamt 206 Veröffentlichungen konnten Hinweise zu entsprechenden Herausforderungen in der Montage, im Folgenden kursiv dargestellt, gefunden werden. Dabei wurden sowohl Monografien als auch Veröffentlichungen in Form von unselbständiger Literatur berücksichtigt. Durch die Analyse von Veröffentlichungen aus den Jahren 2003 bis 2008 wurde die Aktualität der Untersuchung gewährleistet.

Bei der Untersuchung wurde die Erkenntnis erarbeitet, dass es starke Unterschiede in der Häufigkeit der Nennung einzelner Herausforderungen gibt. So nehmen 20% der Herausforderungen 71,8% der Nennungen für sich in Anspruch. Dagegen entfallen knapp 8% der Nennungen auf die 50% Herausforderungen, die am seltensten genannt wurden. Die einzelnen Aspekte werden also bezüglich ihrer Bedeutung sehr unterschiedlich bewertet. Daher fokussiert sich die Betrachtung zunächst auf die zehn am häufigsten genannten Herausforderungen. Diese werden in Abbildung 1-2 aufgeführt.

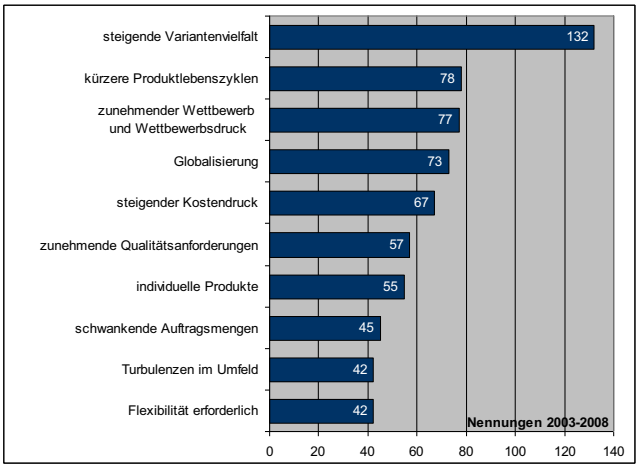


Abbildung 1-2 Herausforderungen der Montage

Die *steigende Variantenvielfalt* wird mit deutlichem Abstand am häufigsten genannt, was ihre besondere Bedeutung für die Montageplanung hervorhebt. An zweiter und dritter Stelle stehen die *Verkürzung der Produktlebenszyklen* und die *Zunahme des Wettbewerbs*. Mit mittlerer Nennhäufigkeit versehen sind die Herausforderungen *Globalisierung*, *steigender*

Kostendruck, *zunehmende Qualitätsanforderungen* sowie *individuelle Produkte*. Mit teilweise nur einem Drittel der Nennungen der *steigenden Variantenvielfalt* wird den Punkten *schwankende Auftragsmengen, Turbulenzen im Unternehmensumfeld* sowie die *erforderliche Flexibilität* relativ wenig Bedeutung zugemessen. Allerdings ist zu beachten, dass der Zusammenhang der drei Aspekte untereinander, zu den *Turbulenzen im Umfeld* und zur *steigenden Variantenvielfalt* deren Wirkung auf das Gesamtsystem verstärkt.

In den nächsten Abschnitten werden ausgewählte Herausforderungen diskutiert, um Zusammenhänge und Rückschlüsse auf die Montage aufzuzeigen. Betrachtet man hierzu den Markt im Unternehmensumfeld, ist besonders die *hohe Dynamik der Nachfrage* bedeutend, die neben der *Globalisierung* durch die Möglichkeiten der Kunden auf *gesättigten Märkten* (umfangreiches Produktangebot) zu *schwankenden Bedarfen des Marktes* aus Sicht des Unternehmens führt (bspw. Schuh u. a. 2008b, S. 671; Große-Heitmeyer, Wiendahl 2004a, S. 1f; Lotter 2006a, S. 3f). Die zunehmende *Marktveränderung an Geschwindigkeit und Umfang* führt zu einer Verstärkung der vom *Markt ausgehenden Unsicherheiten*. Unternehmen müssen sich also stetig mit *neuen Rahmenbedingungen* auseinandersetzen, die zu *unsichereren Zukunftsprognosen* und damit auch zu *Unterschieden zwischen Planung und Realisierung* führen. Neue *internationale Konkurrenten* (Zäh u. a. 2007, S. 837) und die *regionalen Anforderungen neuer Märkte* gründen auf der Globalisierung und verstärken diese Effekte sowie die *Bedeutung der Kundennähe* ebenfalls. Die Unternehmen haben dadurch mit einem *zunehmenden Wettbewerb* und demzufolge mit erhöhtem *Wettbewerbsdruck*, der sich vor allem durch *wachsenden Preis-, Termin-, und Zeitdruck* deutlich zeigt, sicher umzugehen (Schuh u. a. 2008b, S. 671). Der Kostendruck führt schon seit längerem zu Forderungen nach einer zunehmenden Automatisierung, allerdings mündet eine Vollautomatisierung nicht zwangsweise in einer Erreichung des Ziels der Senkung der Produktionskosten (Lay, Schirrmeister 2000, S. 1). Zur Optimierung der Montagekosten ist eher eine hohe Auslastung der Anlagen erforderlich (Westkämper 2009, S. 17). Aufgrund der gleichzeitig vorhandenen Notwendigkeit der Berücksichtigung der Auftragsmengen- und Stückzahlschwankungen (Schuh u. a. 2008a, S. 727) stellt dies allerdings eine besondere Herausforderung dar. Die *Turbulenzen und Schwankungen in den Auftragseingängen* und *den Stückzahlen* hängen direkt von *der hohen Dynamik der Nachfrage* ab und führen zu *einer Zunahme der Auftragsvielfalt*.

Mittel- und langfristige Schwankungen können mit entsprechenden Unsicherheiten in der Planung durch Berücksichtigung von Prognosen abgebildet werden. Kurzfristige Schwankungen können durch die besonderen Eigenschaften von modularen Montagesystemen durch schnelles Umrüsten derselben ausgeglichen werden. Dies unterstützt auch das bereits angesprochene „PLUG&PRODUCE“-Prinzip, welches die Idee des Austauschs einer modularen Station oder eines einzelnen Prozessmoduls schon allein durch die Bezeichnung nahelegt. Allerdings bleiben sowohl die mittel- und langfristigen Schwankungen als auch die besondere Berücksichtigung der Begegnung eben dieser Schwankungen durch die Eigenschaften von modularen Systemen in der Planung eine Herausforderung.

Betrachtet man den einzelnen Kunden als Individuum, identifiziert man Herausforderungen wie die *Zunahme der Kundenanforderungen* (Harfensteller u. a. 2005, S. 131), die beispielsweise einen *hohen Lieferservice* (Meier 2005, S. 232; Schuh u. a. 2008c, S. 211) und *kurze Lieferzeiten* beinhalten und zur Zunahme der *Bedeutung der Liefertreue* (Westkämper 2004b, S. 4; Schuh u. a. 2008c, S. 211) führen. Die zunehmend *individuelleren* und sich *häufig wandelnden Kundenwüsche* verstärken die *Dynamik der Nachfrage,* die auch durch eine *hohe Frequenz von neuen Produkten* gekennzeichnet ist. Diese Kundenwünsche führen auch zu einer *ansteigenden Variantenvielfalt,* die unter anderem eine *Senkung der Stückzahl* pro Variante bzw. Produkt zur Folge hat (Zäh u. a. 2007, S. 837). Diese Reduktion *der Losgrößen* führt bis hin zu einer *kundenindividuellen Montage*. Im Bereich der Beschaffung wirken sich die Forderungen nach kurzen Liefer- und Durchlaufzeiten am stärksten, beispielsweise in kürzeren Beschaffungszeiten aus. Diesen Herausforderungen wird in der Serienmontage bereits durch Lösungen wie Just-in-Time, Just-in-Sequence oder durch Cross-Docking entgegengewirkt (Liker 2006, S. 293).

Auch die gesellschaftliche Entwicklung nimmt für Unternehmen aufgrund des *demografischen Wandels* eine zunehmend wichtigere Rolle ein (vgl. bspw. Nyhuis, Mühlenbruch, Heins 2004, S. 426; Zäh, Wagner, Prasch 2005, S. 637; Reinhart u. a. 2008, S. 681; Schuh u. a. 2008b, S. 671). Dadurch entstehen Forderungen nach einer *alters- und qualifikationsgerechten Einbindung* von Mitarbeitern (vgl. bspw. Zäh 2004, S. 383; Reinhart u. a. 2008, S. 681; Schuh u. a. 2008b, S. 671). Die *permanenten Veränderungen der Organisation* eines Unternehmens führen unter anderem zu einer *Steigerung der Anforderungen an die Mitarbeiter* wie beispielsweise *Einsatzflexibilität* oder *Qualifikation*.

Die Entstehung *neuer Technologien* (Wirth 2003, S. 11; Schuh, Wemhöner, Kampker 2004, S. 116; Schuh u. a. 2006, S. 167; Schuh u. a. 2007, S. 195; AlGeddawy, ElMaraghy 2008, S. 115) wird unter anderem durch die immer *kürzer werdenden Innovationszyklen* getrieben und tritt dabei beispielsweise in den Bereichen von Fügeverfahren oder der Informationstechnik in den Vordergrund (vgl. bspw. Schuh u. a. 2008b, S. 671). Aufgrund dieser Entwicklung gewinnen Standards in den Informations- und Kommunikationstechnologien immer mehr an Bedeutung (vgl. Schuh u. a. 2008b, S. 671). Diese Entwicklung lässt sich auch auf modulare Montagesysteme übertragen. *Kürzere Produktlebenszyklen* führen über mehrere Aspekte wie beispielsweise die *Reduzierung der Entwicklungszeiten* zu einer *früheren Markteinführung* der Produkte und zu einer verhältnismäßig *späten Festlegung* von *Produktkonfigurationen*. Daher muss in den ersten Montageplanungsphasen mit unscharfen Informationen gearbeitet werden.

Bei Betrachtung des Planungsbereichs im Unternehmen sind neben der *Senkung der Planungskosten* die *kurzen Planungshorizonte*, die dadurch *kürzeren Planungszyklen* sowie die direkt damit zusammenhängenden *kürzeren Planungszeiten für die Montage* von Bedeutung (vgl. bspw. Spath u. a. 2007, S. 625). Als Folge dieser Bedingungen wird von einem *Anstieg der Planungsprojekte* ausgegangen, wobei *Planungsumfang und -aufwand* steigen. Dies führt auch zur *Notwendigkeit häufiger Um- und Anpassungsplanungen* und zur Häufung der *Veränderungen* bei den *Montageaufgaben* (Westkämper 2008a, S. 438, 444).

Daraus leiten sich die Forderungen nach einer flexiblen Montage und einer *flexibleren Planung* ab. Das daraus resultierende Auftreten von modularen Systemen – mit ihren Vorteilen in der kurz-, mittel-, und langfristigen Anpassungsfähigkeit – auf dem Markt hat bereits vor Jahren eingesetzt aber noch nicht die möglichen Marktanteile erreicht (Vollmers 2008, S. 1). Eine weitere Herausforderung ist, dass aufgrund der Verkürzung aller Zeiten die *kürzeren Anlaufzeiten* zu einem erhöhten *Risiko von Anlaufschwierigkeiten* führen. Zwei wesentliche Forderungen lassen sich aus diesen Zusammenhängen ableiten. Zum einen ist die bessere Abschätzungsmöglichkeit des Flexibilitätskorridors einer Anlage über den Lebenszyklus ein Ziel zukünftiger Aufgabenstellungen. Zum anderen muss die Planung die Vorteile von modularen Systemen nutzen und mit unscharfen Informationen arbeiten können.

Bei Analyse der Einflüsse auf Unternehmen kann als ein wichtiger Punkt festgehalten werden, dass die *ganzheitliche Betrachtung* von Fabrik-, Produkt-, Prozess- und Produktionssystemlebenszyklus eine aktuelle Herausforderung darstellt. Durch die Entwicklung hin zu *individuelleren* und *innovativen Produkten steigen* die *Anforderungen* an die Produkte und damit auch deren *Komplexität*. Dies führt wiederum zu einer *steigenden Anzahl* von *Arbeitsabläufen* und einer *Erhöhung der Komplexität* bezüglich der *Prozesse* (vgl. bspw. Nyhuis, Zoleko 2007, S. 244). Die zunehmende Komplexität des Produkts überträgt sich über diese Prozesse auf die Anlagen und Arbeitsaufgaben. Daher wird es schwieriger, optimal auf den Produktionsprozess abgestimmte Anlagen herzustellen. Zu den Herausforderungen an Anlagen und Montagetechnik folgen in diesem Zusammenhang die *Rekonfigurierbarkeit, Mobilität, Standardisierung und Wiederverwendbarkeit* sowie *schnelle Umrüstbarkeit* der Montageanlagen. Des Weiteren werden die Zunahme der Komplexität *im Bereich des gesamten Produktionssystems* (somit auch der Planung) und die Tatsache, dass Entscheidungen häufig dezentralisiert – also in den entsprechenden Know-how-Bereichen – erfolgen, als Herausforderungen genannt (vgl. bspw. Große-Heitmeyer, Wiendahl 2004a, S. 5).

Das durch das turbulente Umfeld *erhöhte Investitionsrisiko* führt zu *Forderungen nach geringen Investitionen* und *kurzen Amortisationszeiten*, was im Hinblick auf immer komplexere Produkte und Anlagen als Herausforderung angesehen wird (Lotter, Wiendahl 2006, S. 517). Daher gilt es, bereits bei den ersten Schritten der Planung im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung den Anlagenlebenszyklus in Augenschein zu nehmen und entsprechende Kostenabschätzungen vorzunehmen. Hierbei müssen entsprechende Informationen zur Abschätzung der Betriebskosten und der Veränderungs- und Anpassungskosten eines (modularen) Systems – bspw. zur Rekonfiguration des Systems in die nächste Ausbaustufe – über die Investitionskosten hinaus erarbeitet werden (Slama 2004, S. 88). Dazu müssen auch die Flexibilitätskorridore der einzelnen Ausbaustufen festgelegt werden.

Bei Betrachtung des Montageplanungsablaufs und der möglichen Einflüsse der Herausforderungen auf die einzelnen Phasen erkennt man folgende wesentliche Aspekte. Dabei wird von einem fünf-phasigen Montageplanungsablauf in Anlehnung an Konold und Reger ausgegangen (Konold, Reger 2009). Viele Herausforderungen wirken auf die erste

Phase der Aufgabenstellung. Allerdings ist deren Auswirkung aufgrund des hohen Abstraktionsgrads der ersten Phase (Konold, Reger 2009, S. 32-39) und der damit verbundenen Unsicherheiten nur von durchschnittlicher Bedeutung. Wesentlich deutlichere Wirkungen zeigen die Herausforderungen in der Phase der Grobplanung, da in dieser die unterschiedlichsten beteiligten Disziplinen erste Konkretisierungen bis hin zu wichtigen Entscheidungen vornehmen müssen. So stellen sich vor allem die sich negativ beeinflussenden Aspekte als besonders herausfordernd dar. Der *Wettbewerbsdruck* determiniert beispielsweise die *Senkung der Produktionskosten,* was unter anderem durch *geringere Bestände* angestrebt wird. Entgegengesetzt wirken die *steigende Variantenvielfalt*, die Forderung nach *individuelleren Produkten* und *kürzeren Produktlebenszyklen*, die eher zur Erhöhung der Gesamtbestände führen (bspw. Lotter 2006a). Aber auch die schwankenden Auftragsmengen erschweren die Aufgaben der Grobplanungsphase in wesentlichem Maß. Die Feinplanung dagegen dient hauptsächlich der Detaillierung des Gesamt- und der Teilsysteme. Aber auch hier sind aktuelle Herausforderungen zu bewältigen. Neben der Detaillierung sind davon allerdings auch die Absicherung der Prozesse und die detaillierte Ausführung des Wirtschaftlichkeitsnachweises auf Basis der in der Grobplanung erarbeiteten Informationen betroffen. Die anschließenden Phasen Realisierung und Fertigungsanlauf dienen der Umsetzung der Planung und sind deshalb den meisten Herausforderungen nicht direkt ausgesetzt, sondern zeigen eher die noch bestehenden Lücken und Mängel der Planung auf. Daher sind vor allem in der Grobplanungsphase die wesentlichen Potenziale zu heben.

Nach Müller und Brecher fehlen in der Montage geeignete Instrumente und Methoden, um mit den aktuellen Herausforderungen, denen sich Unternehmen in einem Hochlohnland stellen müssen, richtig umzugehen. Es wurde eine Studie durchgeführt, deren Aufgabe es war, erfolgsversprechende Anstrengungen und Handlungsfelder zu identifizieren (Müller, Brecher 2009, S. 1). Die Untersuchung gründet auf Literatur und schwerpunktmäßig auf erfolgreichen Anwendungen der Praxis, die im Rahmen von Experteninterviews analysiert wurden. Durch diese Untersuchung werden die Aussagen, die auf Basis der eigenen Betrachtung getroffen wurden, bestätigt. Zur Bewältigung der Herausforderungen soll unter anderem eine optimierte Planungskette das Ziel einzelner Entwicklungen sein, wozu die methodische Weiterentwicklung eben dieser gezählt wird (Müller, Brecher 2009, S. 8f, 58). Beispielsweise wird im Bereich der Montageprozessplanung die Wandlungsfähigkeit von Montagesystemen beleuchtet. Dabei wird erkannt, dass dieses Thema ein übergreifendes Thema ist, welches in verschiedene Handlungsfelder einwirkt. Ein wichtiges Handlungsfeld stellt dabei das sogenannte Engineering dar. Zum Engineering von Montageanlagen zählen Müller und Brecher alle Prozesse der Montagesystemplanung, welche auf eine betriebsbereite Montage zielen. Hierzu gehören neben der Investitionsplanung und Lastenhefterstellung auch die Projektierung und Inbetriebnahme (Müller, Brecher 2009, S. 9, 58).

Wesentliche Herausforderungen

Auf Basis der Untersuchung lassen sich die folgenden Punkte als für die Anlagenhersteller relevant bezeichnen. Als sehr wichtig wird die stärkere Berücksichtigung der Eigenschaften

modularer Systeme bei der Planung gesehen. Dazu zählt vor allem die Berücksichtigung der Charakteristika der Standardisierung. Dabei ist es wichtig, die Vorteile der Standardisierung zu nutzen, um den Effekten der steigenden Komplexität entgegenzuwirken. Ein großer Vorteil von modularen Systemen besteht in der Nachhaltigkeit des Betriebs und der breiteren Einsatzfähigkeit der Elemente über den Lebenszyklus gesehen. Es bleibt festzuhalten, dass die Berücksichtigung des Life-Cycle-Gedankens auf Basis von Marktprognosen in der Planung deutlich verstärkt werden muss. Außerdem soll hier nochmals betont werden, dass die Rolle der Anlagenhersteller aufgrund derer umfangreichen Aufgabe der vollständigen Prozesskettenauslegung (Müller, Brecher 2009, S. 8) und des damit zunehmenden Know-hows bezüglich der Anlagen immer wichtiger wird und daher in den Fragestellungen der Montageplanung stärker beachtet werden muss. Deshalb sind entsprechende Forschungs- und Umsetzungsanstrengungen notwendig, um den abgeleiteten Anforderungen und Herausforderungen der Montage und im Speziellen der Montageplanung gerecht zu werden (vgl. Müller, Brecher 2009, S. 1).

Zur Identifizierung der entsprechenden Betrachtungsbereiche wurde bei der eigenen Studie auf hoher Abstraktionsebene begonnen. Dabei konnte die Aussage von Westkämper, dass Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Beherrschung zukünftiger Entwicklungen als Schlüssel gesehen werden, bestätigt werden (vgl. bspw. Westkämper 2004b, S. 6, Westkämper 2006b, S. 27). Sehr viele Ansätze wirken positiv auf diesen Aspekt und lassen sich den beiden Betrachtungsbereichen „Digitales Engineering“ und „Modulare Montagesysteme“ zuordnen. Im digitalen Engineering bildet die digitale Fabrik als statische Nachbildung der real existenten Fabrik (vgl. Marczinski 2004, S. 666; Kapp, Constantinescu 2006, S. 9; Westkämper 2006b, S. 67) eine wichtige Grundlage für zukünftige Entwicklungen neuer Methoden, wobei sie sowohl als Werkzeug als auch als Methode anzusehen ist (Zäh, Patron, Fusch 2003, S. 76). Hierbei beeinflussen sich Methoden und Softwarelösungen gegenseitig (Bley, Fritz, Zenner 2006, S. 19ff). Ein großes Potenzial liegt in der Verkürzung der Planungszeit, was im Hinblick auf die kürzeren Planungszyklen ein wesentlicher Aspekt ist (vgl. Schraft 2003, S. 268; Bracht, Eckert, Masurat 2005, S. 10; Zäh, Möller, Vogl 2005, S. 6f). Der Bereich der modularen Montagesysteme ist ein zentraler Aspekt zur Erreichung der Wandlungsfähigkeit (Schuh u. a. 2004, S. 101). Durch ihre Charakteristika wie standardisierte Komponenten und definierte Schnittstellen (vgl. Nyhuis u. a. 2008, S. 88) können einzelne Module im Sinne von „PLUG&PRODUCE“ beispielsweise in sehr kurzer Zeit ausgetauscht werden (Westkämper 2001a, S. 480; Enderlein, Hildebrand, Müller 2003, S. 282-286). Durch die Modularität können ein großer Teil der Anlagen für neue Montageaufgaben wiederverwendet (Schuh u. a. 2004, S. 102; Scharf 09.09.2005, S. 16; Kuhn 2007, S. 1; Schenk 2007, S. 119) und Nutzungsdauern verlängert werden, wodurch sich vor allem bei der Betrachtung des ganzen Lebenszyklus Vorteile bemerkbar machen (Küpper 2005, S. 482f; Westkämper, Decker 2006, S. 27f). Außerdem ergibt sich durch die Verlagerung von immer mehr Planungsaufgaben auf den Hersteller für diesen die Möglichkeit, Know-how im Unternehmen zu halten, langfristige Kundenverbindungen aufzubauen sowie neue Geschäftsfelder zu erschließen (Wiendahl, Harms 2001, S. 326; Schuh u. a. 2008a, S. 732).

Bei Betrachtung konkreter Planungsansätze unter Berücksichtigung der Wandlungsfähigkeit von Montagesystemen wird dies direkt nur in der Arbeit von Slama betrachtet, der sich vor allem auf modulare Systemstrukturen fokussiert (Slama 2004, S. 75ff). Ein modularer Ansatz wird von Sutanto/Schmuck verfolgt, der seinen Schwerpunkt allerdings im Bereich der virtuellen Planung setzt (Sutanto, Schmuck 2003, S. 392). Zur Planung wandlungsfähiger Produktionsstrukturen erarbeitet Hernández, der die Wandlungsfähigkeit durch Planung mit integrierter Szenario-Technik partiell vorhersehbar macht, einen ausführlichen Ansatz (Hernández Morales 2002, S. 64ff, 92ff). Bei der strategischen Leistungsplanung in wandlungsfähigen Produktionsstrukturen nutzt Aldinger Szenarien zur Prognose von Veränderungen der Produktionsleistung und somit der zukünftigen Leistungsstruktur in einem langfristig-strategisch Zeithorizont (Aldinger 2009, S. 5-8, 39). So zählen Hernández und Aldinger zu den wenigen in der Produktionstechnik, die die Szenario-Technik bewusst als Prognose-Methode benutzen, um damit bestimmte Schwerpunkte von Veränderungen im Umfeld der Fabrik berechenbar zu machen (Hernández Morales 2002, S. 92ff; Aldinger 2009, S. 147f). Im Kontext der Montageplanung wird sie in einigen Veröffentlichungen erwähnt, allerdings findet sie nur im spezifischen Bereich der Kapazitätsplanung eine Anwendung (Krüger 2004, S. 106-111). Die Betrachtung des Lebenszyklus von Montagesystemen wird vor allem von Slama und Hildebrand vorangetrieben (Slama 2004, S. 87-92; Hildebrand 2005, S. 135-138). Die Arbeiten von Bley beschäftigen sich sehr intensiv mit der Erarbeitung von Prozessbeschreibungen durch sogenannte Features (Avgoustinov, Bossmann, Bley 2006, S. 55-62; Bley, Zenner 2006, S. 23-28). Eine Nutzung dieses Ansatzes in den frühen Phasen des Montageplanungsablaufes ist aber aufgrund der Abhängigkeit von genauen Geometriedaten (CAD) und wegen des möglichen Know-how-Transfers für Anlagehersteller nicht sinnvoll.

Die Ergebnisse von Müller und Brecher sind dagegen direkt auf einer konkreteren Ebene beschrieben. Sie entwickeln auf Basis analysierter Lösungsansätze vier Handlungsfelder. Die Lösungsansätze lassen sich dabei drei Betrachtungsbereichen unterordnen. Diese sind die Montageorganisation, die Montageautomatisierung und die Mikro- und Präzisionsmontage. Beispiele für die untersuchten Lösungsansätze sind Montagesimulation, Funktionales, baukastenorientiertes Engineering, vertikale Integration und Standardisierung von Schnittstellen, modulare Anlagenkonzepte und Steuerungsarchitekturen, adaptive Greifwerkzeuge und Modellierung und Simulation (Müller, Brecher 2009, S. 22-52).

Die vier erarbeiteten Handlungsfelder montagegerechte Produktgestaltung, Montageprozessplanung, Montagetechnologie und Automation sowie Logistik in der Montage lassen sich wiederum in 18 Themenbereiche unterteilen. In Bezug auf die oben diskutierten Herausforderungen erscheinen folgende Punkte als für die diskutierte Problematik besonders relevant. So sollen technische und ökonomische Aspekte bei den Planungs- und Entscheidungsaufgaben Berücksichtigung finden und neue Ansätze zur Auswahl eines Montagesystems entwickelt werden. Dazu wird auch die Bestimmung von Auswahlkriterien in Bezug zur Wandlungsfähigkeit gezählt. Auch soll die Betrachtung des Lebenszyklus der Anlagen in bestimmten Bereichen Anwendung finden und die Modularität der Anlagen berücksichtigt werden. Die gleichzeitige Entwicklung von Produktionsprozessen und Produkt

wird ebenfalls genannt (Müller, Brecher 2009, S. 57-62). Da diese Themenbereiche als zukünftig zu bearbeitende Felder definiert wurden, lässt sich determinieren, dass es derzeit keine bestehenden Lösungen gibt, die die aktuellen Fragestellungen, wie von Müller und Brecher beschrieben, ausreichend beantworten.

1.2 Problemstellung

Zusammenfassend lässt sich mithilfe dieser wesentlichen Herausforderungen die Problemstellung festlegen. Dazu ist die Erkenntnis hervorzuheben, dass Flexibilität und Wandlungsfähigkeit als Schlüssel zur Beherrschung zukünftiger Entwicklungen gesehen werden. Die modulare Montage stellt zur Erreichung der Wandlungsfähigkeit einen wichtigen Aspekt dar, wobei die Modularität und die damit zusammenhängenden Möglichkeiten der Erarbeitung von Lösungen in der Montageplanung zu wenig berücksichtigt werden. Die standardisierten Elemente modularer Systeme ermöglichen eine standardisierte Beschreibung, welche bislang für die Planung modularer Montagesysteme nicht in ausreichendem Maß zur Verfügung steht. Auch werden die Vorteile modularer Systeme über den Lebenszyklus hinweg sowie die damit zusammenhängende Betrachtung zukünftiger Entwicklungen nicht ausreichend betrachtet. Zudem wird die Tatsache der Verlagerung von Planungsaufgaben auf den Anlagenhersteller derzeit in Planungsmethodiken nicht ausreichend berücksichtigt, wodurch auch deren spezielle Rahmenbedingungen nicht zufriedenstellend beachtet werden. So führt die Parallelisierung der Planung von Produkt und Produktionsprozessen zu unscharfen Informationen über das Produkt, die bei der Grobplanung einer Montageanlage zu handhaben sind. Bei Bewertung und Auswahl von Lösungsalternativen werden neue Ansätze benötigt, die von der Wandlungsfähigkeit abhängige Auswahlkriterien in Form von technischen und ökonomischen Aspekten gebührend beachten.

1.3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Aus diesen Bedingungen begründet sich das Ziel, dem Anlagenhersteller eine Grobplanungsmethodik zur Verfügung zu stellen, die auf Grundlage einer generischen Beschreibungsmethode für Ressourcen und Prozesse sowie unscharfer Produktinformationen eine automatisierte, lebenszyklusorientierte Erstellung von Konfigurationsalternativen ermöglicht und eine mehrdimensionale Bewertungssystematik zur Auswahl und Entscheidung bereitstellt.

Zur Erreichung dieses Ziels sind die im Folgenden beschriebenen Aufgabenstellungen erforderlich. Als Grundlage der gesamten, in Abbildung 1-3 dargestellten Methodik dient eine generische Beschreibungssystematik, welche gleichermaßen zur Beschreibung von Ressourcen innerhalb der Montage als auch von Prozessen dient. Aufbauend auf dieser Beschreibungssystematik soll ein Verfahren entwickelt werden, welches die Montageressourcen charakterisierend darzustellen vermag. Parallel dazu soll, ebenfalls auf Basis der Beschreibungssystematik, eine Methode erarbeitet werden, welche es ermöglicht, die vom Produkt abgeleiteten Prozesse gleichermaßen charakterisierend darzustellen. Aufbauend auf den Ergebnissen sollen die möglichen Zuordnungen von Prozessen und

Ressourcen unter der angestrebten Einbeziehung des Know-hows des Planers ermöglicht werden. Auf Basis dieser Allokation soll eine Systematik zur Erzeugung von Alternativkonfigurationen möglicher Ressourcen – Prozesskombinationen entwickelt werden. Abschließend soll eine Bewertungssystematik zur Auswahl von Lösungsalternativen auf Basis kundenspezifischer Rahmenbedingungen und unter Berücksichtigung der spezifischen Charakteristika von modularen Montagesystemen über den Lebenszyklus hinweg gestaltet werden. Dabei sollten auch mögliche zukünftige Entwicklungen über den Lebenszyklus berücksichtigt werden. Das Zusammenführen der Teillösungen zu einer Gesamtlösung soll das Ergebnis bilden.

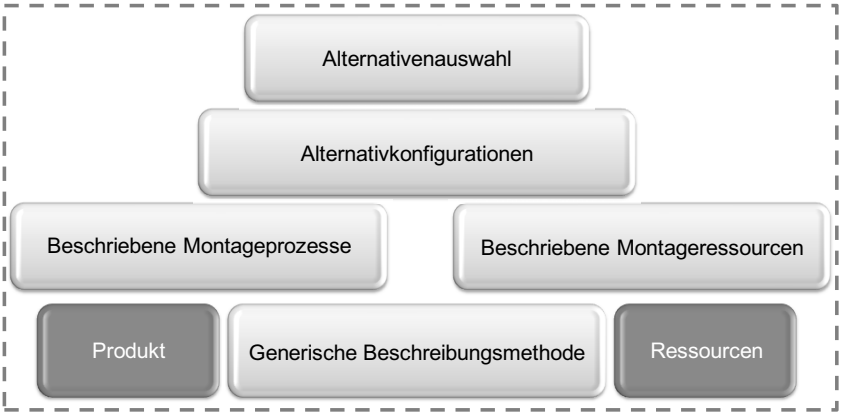


Abbildung 1-3 Methodik zur Planung modularer Montagesysteme

1.4 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise zur Bearbeitung dieser Aufgabenstellung erfolgt in insgesamt sieben wesentlichen Schritten. Diese sind in Abbildung 1-4 in Form einer Chevron-Darstellung aufgelistet.

Kapitel 2 dient dabei der grundlegenden Klärung von relevanten Begriffen und soll den Betrachtungsbereich formulieren sowie Anforderungen an die Methodik definieren. Kapitel 3 soll Grundlagen forschungsrelevanter Ansätze diskutieren und analysieren. Dies dient als Basis für die in Kapitel 4 zu entwickelnde Methodik zur Planung modularer Montagesysteme. In Kapitel 5 soll die Umsetzung der Planungsmethodik für modulare Montagesysteme erarbeitet und beschrieben werden. Zur Validierung, welche in Kapitel 6 aufgeführt wird, soll die Methodik in einem Anwendungsfall zur Planung Verwendung finden. Abschließend soll eine Zusammenfassung der Arbeit erfolgen und ein Ausblick gegeben werden.

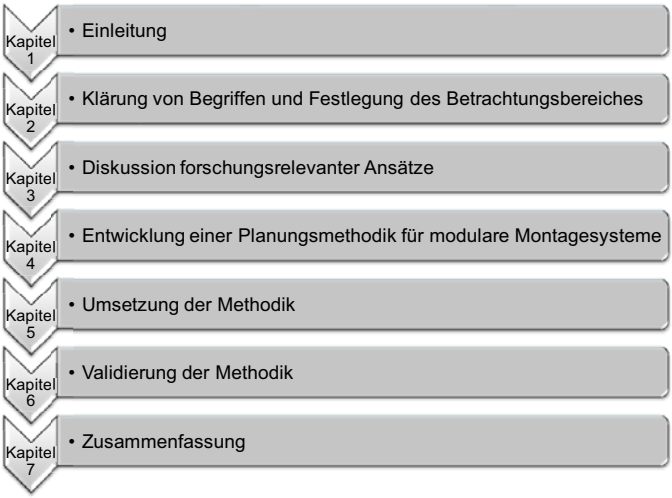


Abbildung 1-4 Vorgehensweise

2 Klärung von Begriffen und Festlegung des Betrachtungsbereichs

Die Entwicklung einer der Zielsetzung entsprechenden Methodik erfordert die Kenntnis über wandlungsfähige Unternehmensstrukturen mit dem Schwerpunkt auf der Montage (vgl. Kapitel 2.1). Dazu ist zudem eine detaillierte Betrachtung des Systems Montage hinsichtlich der Systemgrenze und der enthaltenen Elemente notwendig (vgl. Kapitel 2.2). Außerdem ist zu klären, welche Arten von modularen Montagesystemen hardwaretechnischer Art in der Praxis Anwendung finden (vgl. Kapitel 2.3). Wesentliche Bedeutung nehmen ebenso grundlegende Informationen zur Montageplanung und ihrer Aufgaben als Basis für die folgenden Schritte ein (vgl. Kapitel 2.4). Des Weiteren ist relevant, wie die Entwicklung modularer Systeme im Hinblick auf den Lebenszyklus erfolgt (vgl. Kapitel 2.5).

Abschließend erfolgt die Abgrenzung des Betrachtungsbereiches der Arbeit und die Festlegung der Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik (vgl. Kapitel 2.6). Insgesamt wird dadurch der Rahmen geschaffen, dokumentierte Erkenntnisse der Wissenschaft in Kapitel 3 zu analysieren und somit die systematische Entwicklung der Methodik zu ermöglichen.

2.1 Die Montage in wandlungsfähigen Unternehmensstrukturen

Die Montage stellt in wandlungsfähigen Unternehmensstrukturen einen wichtigen Erfolgsfaktor dar, welcher durch den Einsatz von modularen Montagesystemen zu einem erfolgreichen Produktionsbetrieb führen kann (vgl. Kapitel 1.1). Modulare Montagesysteme weisen wandlungsbefähigende Eigenschaften auf, wodurch sie grundsätzlich wandelbar und damit ein wichtiger Baustein zur Realisierung von wandlungsfähigen Unternehmensstrukturen sind. Die Wandelbarkeit wird dabei wie folgt definiert:

Ein System besitzt die Eigenschaft Wandelbarkeit dann, „[…] wenn seine räumliche Strukturierung sowie sein Verhaltensspektrum aufgrund einer Anpassung des Umfangs an Merkmale sowie deren Ausprägungen auch an zunächst unbekannte Gegebenheiten veränderbar sind“ (Westkämper u. a. 2000, S. 24).

Die Wandelbarkeit stellt somit die Grundlage für wandlungsfähige Systeme dar und kann durch die Verwendung der Begriffe der Wandlungsbefähiger differenzierter charakterisiert werden. Insgesamt sollen dazu die fünf Wandlungsbefähiger Universalität, Modularität, Kompatibilität, Mobilität und Skalierbarkeit Verwendung finden. Diese wandlungsbefähigenden Eigenschaften werden für die weitere Erarbeitung der Methodik, ergänzend zur Nennung in Kapitel 1.1, im Folgenden definiert: Die Universalität stellt dabei die Eigenschaft dar, „für verschiedene Aufgaben, Anforderungen und Funktionen […] verwendbar zu sein“ (Nofen, Klußmann, Löllmann 2005, S. 26). Die Modularität ist „[…] die Art und Weise, wie die innere Struktur eines Fabrikelements aufgebaut ist“ (Nofen, Klußmann, Löllmann 2005, S. 26f). Sie ist durch standardisierte und funktionstüchtige Einzelelemente gekennzeichnet. Die Kompatibilität ist durch „[…] die Vernetzungsfähigkeit von Fabrikmodulen und/oder Fabrikelementen bezüglich Material, Medien und Energie“

definiert (Nofen, Klußmann, Löllmann 2005, S. 27). Die Mobilität spiegelt „die örtliche Beweglichkeit von […] physischen Fabrikelementen“ wider (Nofen, Klußmann, Löllmann 2005, S. 26). Die Skalierbarkeit definiert „die technische, räumliche, organisatorische und personelle […] Erweiter- und Reduzierbarkeit […] von Fabrikelementen“ (Nofen, Klußmann, Löllmann 2005, S. 26).

Wandlungsfähige Systeme können durch diese Eigenschaften interne und externe Turbulenzen agierend und reagierend handhaben. Zur Verdeutlichung dieser Eigenschaften wandlungsfähiger Systeme wird der Begriff Wandlungsfähigkeit im Folgenden definierend beschrieben. Außerdem erfolgt eine Abgrenzung zum Begriff der Flexibilität.

Die Flexibilität wird dazu nach folgender Definition betrachtet: „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 u. a. 2000, S. 24). Der nutzbare Handlungsraum für diese kurzfristigen Reaktionen ist somit begrenzt und wird vorab definiert (vgl. Spath 2009, S. 15; Spath, Rally, Scholtz 2008, S. 675 und 676 und Abbildung 2-1).

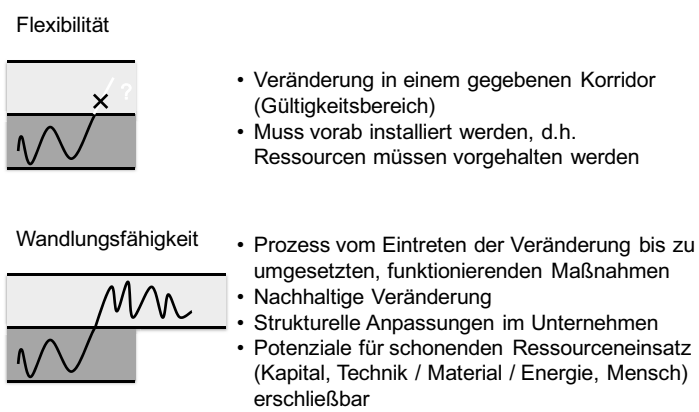


Abbildung 2-1 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit
(vgl. Spath 2009, S. 15)

Die Wandlungsfähigkeit wird abgrenzend dazu und basierend auf den bereits angemerkten Eigenschaften als „Fähigkeit zur nachhaltigen Veränderung“, die „eine Reaktionsfähigkeit über den vorhandenen Flexibilitätskorridor hinaus bietet“, definiert (vgl. Abbildung 2-1 und Spath 2009, S. 15). Ein wandlungsfähiges System verfügt „aus sich selbst heraus über gezielt einsetzbare Prozess- und Strukturvariabilität sowie Verhaltensvariabilität“ und kann „neben reaktiven Anpassungen auch antizipative Eingriffe“ beinhalten sowie auf „Systemveränderungen wie auch auf Umfeldveränderungen hinwirken“ (vgl. Westkämper u. a. 2000, S. 25). Die Wandlungsfähigkeit besitzt „die drei Dimensionen Mensch, Organisation und Technik“ und eine „Reaktionsdauer, die größer als bei der Flexibilität“ ist (vgl. Spath 2009, S. 15).

Die Ausprägungen eines Systems bezüglich den Wandlungsbefähigern von modularen Montagesystemen beeinflussen neben der Wandlungsfähigkeit selbst, direkt die Flexibilität des Systems gegenüber verschiedenen Faktoren. Aufgrund dieser verschiedenen Aspekte, die mit dem Begriff der Flexibilität in der Montage abgedeckt werden und der damit zusammenhängenden Informationsunschärfe des Begriffs ist zwischen den wichtigsten, im Folgenden beschriebenen Flexibilitätsarten zu differenzieren. Eine für Montagesysteme sehr wichtige Flexibilitätsart stellt die Volumenflexibilität dar. Sie ist durch die Leistungsfähigkeit des Systems bezüglich einer wirtschaftlichen Montage bei schwankenden Stückzahlen gekennzeichnet (vgl. Roscher 2008, S. 27). Die Variantenflexibilität stellt die Fähigkeit dar, unterschiedliche Varianten auf einem System zu montieren und kurzfristige Variantenänderungen handhaben zu können (vgl. Meier 2005, S. 232). Bei der Produktflexibilität steht die Fähigkeit eines Systems zur kurzfristigen Umstellung auf die Montage eines anderen Produkts im Mittelpunkt (Feldmann, Slama 2001, S. 491). Die Nachfolgeflexibilität eines Montagesystems ist das Potenzial der Wiederverwendung einzelner Systemelemente, wodurch der zukünftige Investitionsumfang reduziert werden kann (vgl. Roscher 2008, S. 27). Die Erweiterungs- und Rückbauflexibilität eines Montagesystems ist durch die Möglichkeit einer kapazitätswirksamen Erweiterung bzw. eines Rückbaus gekennzeichnet (Evers 2002, S. 24 und Witte, Vielhaber 2003, S. 23-28). Die Flexibilität hinsichtlich der kostenbeeinflussenden Faktoren eines Montagesystems ist als Kostenflexibilität definiert. Im Hinblick auf mögliche Anpassungen an Umweltentwicklungen (siehe S. 18, Rekonfiguration) mit dem Ziel eines Betriebs nahe dem optimalen Betriebspunkt, ist die Möglichkeit zur Veränderung der kostenbeeinflussenden Faktoren von hoher Bedeutung. Die Kostenflexibilität ist vor allem bei Montagesystemen mit geringen Fixkostenanteilen und somit mit geringem Investitionsrisiko ausgeprägt (vgl. auch S. 30).

System eines wandlungsfähigen Unternehmens

Zur korrekten gedanklichen Einordnung des Montagesystems und seiner Elemente in ein wandlungsfähiges Unternehmen wird im Folgenden auf einer systemtheoretisch untermauerten Unternehmenssicht aufgebaut. Dieses systemorientierte Verständnis eines Unternehmens, welches von Westkämper entwickelt und im Stuttgarter Unternehmensmodell (SUM) festgehalten wurde (Hummel, Westkämper 2009, S. 57f), stellt die Struktur eines wandlungsfähigen Unternehmens dar. Dabei besitzen die einzelnen Elemente eines Unternehmens (Leistungseinheiten) Eigenschaften, Handlungsmöglichkeiten sowie Beziehungen untereinander. Die auf diesen Leistungseinheiten aufbauende, komplexe Struktur eines Unternehmens wird innerhalb des SUM in einem Skalenmodell mit verschiedenen Ebenen (System-Leveln) abgebildet (Westkämper 2006a, S. 15f). Da sich die hier zu entwickelnde Methodik auf modulare Montagesysteme fokussiert, wurde die zusätzliche Ebene der Module zwischen der Stationsebene (Arbeitsplätzen und Maschinen) und der Prozessebene eingeführt, um den hardwaretechnischen Realitäten und planungsbezogenen Anforderungen gerecht zu werden, vgl. Abbildung 2-2.

Die ausführliche Beschreibung des Systems Montage bezüglich seiner eigenen Struktur und der hier eingeführten Elemente (vom Montagesystem bis zum Montageprozess) erfolgt aufgrund der hohen Relevanz separat (siehe Kapitel 2.2).

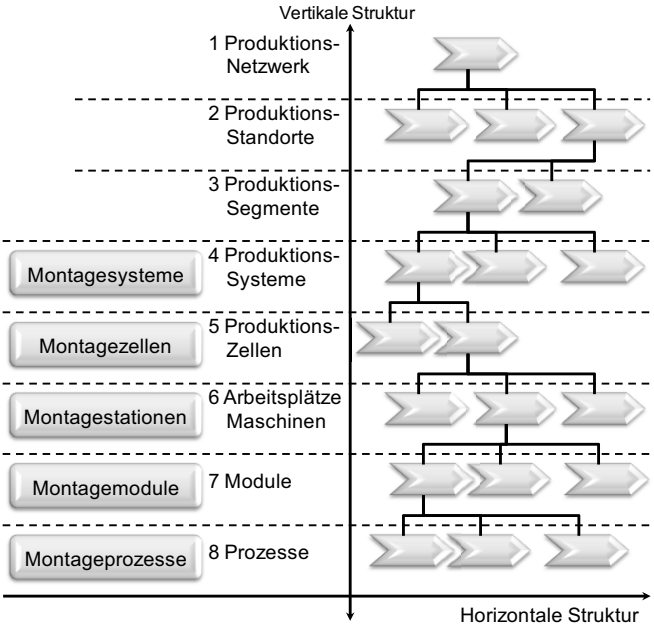


Abbildung 2-2 Skalenmodell der Produktion
(in Anlehnung an Westkämper 2006a, S. 16)

Rekonfiguration

Montagesysteme auf Basis dieser systemtheoretischen Sicht lassen sich somit verhältnismäßig schnell verändern. Diese Veränderungen lassen sich in verschiedene Arten gliedern. Zum einen sind dies Rüstvorgänge, welche durch das Austauschen von einzelnen Werkzeugen oder entsprechenden Elementen des Montagesystems mit dem Ziel einer Anpassung an veränderte Einflussfaktoren gekennzeichnet sind. Dabei wird die Taktzeit und damit die Gesamtausbringungsmenge des Systems nur im marginalen Bereich verändert. Eine Veränderung der gesamten Systemstruktur erfolgt dabei nicht.

Zum anderen ist davon der Begriff der Rekonfiguration zu unterscheiden. Nach Heisel lässt sich die Rekonfiguration als die „…schnelle, zielgerechte und wirtschaftliche Systemanpassung bezüglich Technologie, Funktion und Kapazität…“ definieren (Heisel 2006, S. 130). Die Fähigkeit zur Rekonfiguration ist dabei wesentliches Merkmal der Wandlungsfähigkeit und durch die Realisierung von Wandlungsbefähigern im System begründet. Daher ist die Rekonfiguration im Hinblick auf die Definition der Wandlungsfähigkeit nach Spath (Spath 2009, S. 15) die technikbezogene Veränderung eines Systems über den existierenden Flexibilitätskorridor hinaus (siehe Definition Flexibilität und Wandlungsfähigkeit). Somit unterscheidet sich die Rekonfiguration von Veränderungen durch Umrüsten (Rüstvorgänge) deutlich. Im Rahmen einer Rekonfiguration können

Montagesysteme durch effizientes Einbeziehen, Herauslösen oder Substituieren mobiler, modularer Montageelemente ohne Störung der laufenden Produktion verlustarm erweitert, reduziert oder qualitativ angepasst werden (vgl. Hildebrand 2005, S. 52). Der Begriff der Konfiguration beschreibt in diesem Zusammenhang die erstmalige Zusammenstellung eines solchen Systems entsprechend den zuvor definierten Anforderungen. Zudem wird auf hardwaretechnischer Seite unter dem Begriff Konfiguration eine spezifische Kombination von Montageelementen bzw. Modulen verstanden.

2.2 System Montage

Zur Einordnung des Begriffes Montagesystem in den richtigen Aufgabenrahmen muss zuerst der Begriff Montage definiert werden. Darauf aufbauend wird dann das System zur Ausführung von Aufgaben der Montage charakterisiert. Der Begriff Montage sei daher nach Warnecke wie folgt definiert (Warnecke, Löhr, Kiener 1975, S. 11):

„… Teilsysteme eines Produktes zu einem System höherer Komplexität mit vorgegebenen Funktionen in einer bestimmten Stückzahl je Zeiteinheit zusammenzubauen."

Diese Kernaufgabe wird flankiert von weiteren unmittelbar und mittelbar damit verbundenen Aufgaben und Ressourcen, welche zur Ausführung der Montageaufgaben dienen. Dieses Gesamte, das Montagesystem, gilt es im Folgenden näher zu charakterisieren. Um ein umfassendes Verständnis für die Beschreibung dieses Systems zu entwickeln, werden verschiedene Sichten aus der Literatur im Wesentlichen angesprochen und darauf aufbauend das für diese Methodik notwendige, holistische Systemverständnis abgeleitet. So werden unterschiedlichste Auffassungen und Definitionen von Montagesystemen in der Literatur genannt. Eine Sichtweise auf Montagesysteme fokussiert sich dabei auf die hardwaretechnischen Elemente, die direkt zu einer einzelnen Station zuordenbar sind. Die Systemgrenze ist somit durch das Betrachten einer einzelnen Station festgelegt. Steuerungsaufgaben und das Zusammenspiel mehrerer Stationen, beispielsweise der Einsatz von Mitarbeitern an mehreren Arbeitsplätzen, finden aufgrund der engen Systemgrenze hierbei keine Berücksichtigung (vgl. bspw. Schmidt 1992, S. 56-60; Konold, Reger 2009, S. 50 und 155; Hesse 2006b, S. 68 und 301). Eine weitergehende Sichtweise ist die Betrachtung des Montagesystems über mehrere Stationen und der umgebenden Hardware hinweg. Die Systemgrenze beinhaltet bei dieser umfassenden Sichtweise sämtliche Betriebsmittel und Aufgaben, die der reinen Montageaufgabe direkt zugeordnet werden können. Planerische und koordinierende Tätigkeiten werden dabei nicht betrachtet (vgl. bspw. Feldmann, Slama 2003, S. 594-595; Hesse 1993, S. 205). Ganzheitliche Ansätze unterscheiden sich dahingegen vor allem durch diese bisher ausgeschlossenen, planerischen und koordinierenden Aufgaben und integrieren teilweise sogar weitergehende Aufgaben tangierender Bereiche, wie beispielsweise Reparatur- und Verpackungstätigkeiten (vgl. bspw. Spur, Stöferle 1986, S. 593; Katalinic, Visekruna, Kordic 2002, S. 157).

Ein Montagesystem, welches entsprechend dem Stuttgarter Unternehmensmodell für turbulente Umgebungen geeignet ist, muss ein wandlungsfähiges Montagesystem auf Basis einer ganzheitlichen Betrachtungsweise sein. Ein solches, soziotechnisches System enthält,

um agierend und reagierend mit Turbulenzen umzugehen, planerische und koordinierende Elemente (Westkämper 2006c, S. 13, Westkämper 2008b, S. 11). In Abbildung 2-3 ist ein dieser holistischen Sichtweise entsprechendes Montagesystemmodell abgebildet, welches durch seinen Aufbau und damit durch die Transparenz und Übersichtlichkeit auf die Reduzierung der Komplexität zielt. Darin wird deutlich, dass sich das Montagesystem entsprechend dem in Kapitel 2.1 vorgestellten Skalenmodell (Abbildung 2-2) aus Montagezellen zusammensetzt, welche sich wiederum aus Montagestationen aufbauen. Die innere Struktur der einzelnen Stationen mit Modulen und den darauf ausgeführten Prozessen wird aufgrund der Abhängigkeit von der gesamten Ausgestaltung der Methodik und vor allem der zu entwickelnden Beschreibungssystematik bei deren Entwicklung näher erläutert und die notwendige Präzisierung erarbeitet. Diese einzelnen Elemente eines Montagesystems werden auch als Ressourcen bezeichnet. Unter Ressourcen können in diesem Zusammenhang grundsätzlich alle personellen, physischen und monetären Faktoren zur Bereitstellung einer Leistung verstanden werden (vgl. Vogel, Jongmanns 2004, S. 41).

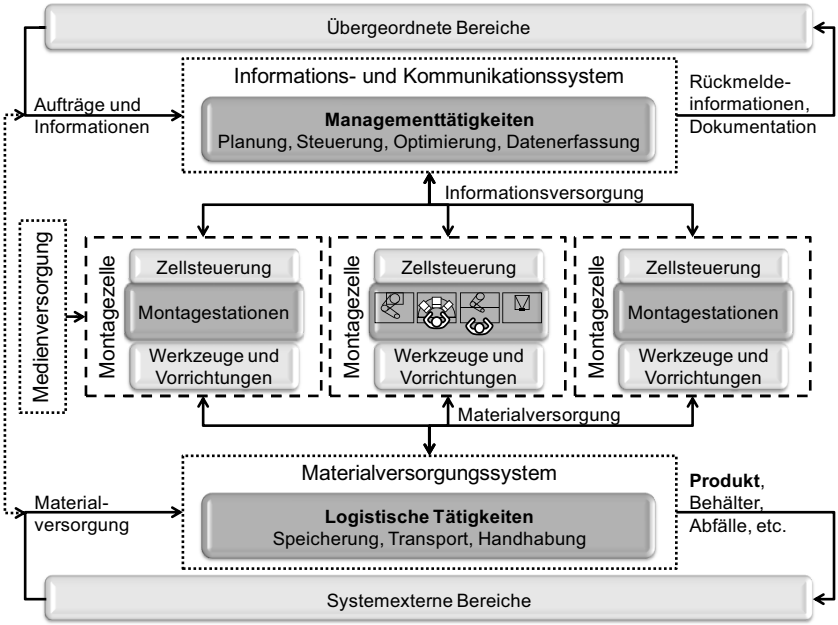


Abbildung 2-3 Holistisches Montagesystemmodell
(in Anlehnung an Westkämper 2006c, S. 9–15; Kluge u. a. 2007, S. 154; Kluge, Hummel, Westkämper 2006, S. 234)

Das System als Ganzes beinhaltet alle zum Betrieb des Montagesystems notwendigen Elemente. Es ist eingebunden in übergeordnete Bereiche (Segmentebene) sowie vor- und nachgelagerte Leistungseinheiten (Systemexterne Bereiche). Betrachtet man die enthaltenen Aufgaben eines solchen Systems ist kennzeichnend, dass

Managementtätigkeiten ebenfalls zum Montagesystem gezählt werden. Diese bilden den über ein Informations- und Kommunikationssystem (I&K-System) eingebetteten organisatorischen Rahmen des Systems und beinhalten die Datenerfassung auf Betriebs- und Maschinenebene. Das I&K-System stellt den Informations- und Kommunikationsfluss zu den übergeordneten und systemexternen Bereichen sowie zu den einzelnen Elementen des Systems sicher und ist damit wesentliches Element der Datenerfassung. Die einzelnen Elemente des Systems, die in einer Montagezelle enthalten sein können, sind sehr vielfältig (z.B.: In-Line Prüfstationen, manuelle/hybride/automatisierte Arbeitsplätze, somit Menschen und Maschinen). Das zum Montagesystem zugeordnete Materialversorgungssystem beinhaltet die systemrelevanten logistischen Tätigkeiten (gegliedert nach Einlagerung, Kommissionierung, Transport) wie Transport oder Speicherungsaufgaben von Werkzeugen, Halbzeugen, Bauteilen, Baugruppen und Behältern bis hin zu Abfällen. Die Medienversorgung der einzelnen Zellen wird ebenfalls im Rahmen der Managementtätigkeiten geplant und überwacht.

Die Gliederung der Managementtätigkeiten beinhaltet in diesem Modell die systembezogenen Aufgaben des Qualitätsmanagements, der Instandhaltung und der Arbeitsvorbereitung. Die Managementtätigkeiten stellen in der zu entwickelnden Methodik die indirekten Bereiche des Montagesystems dar, wobei deren Aufgaben in Umfang und Intensität von den Spezifika der modularen Systeme abhängen. Die Gliederung der Arbeitsvorbereitung orientiert sich im Aufbau der Tätigkeiten an Eversheim, Minolla und Warnecke (Eversheim 2002, S. 1-3; Minolla 1975, S. 8-17; Warnecke 1986, S. 615-619). Sie beinhaltet somit planende und steuernde Tätigkeiten.

So zählen zu den Planungsaufgaben die Planungsvorbereitung, Stücklistenverarbeitung, NC-Programmierung und Montageablaufplanung sowie die Montagemittelplanung, Lagerplanung, Transportplanung, Personalplanung und Layoutplanung (vgl. Eversheim 2002, S. 6-13; Minolla 1975, S. 8). Diese Tätigkeiten sind allerdings vom Umfang her im Betrieb des Systems als gering einzuschätzen, da bei modularen Systemen der Anlagenhersteller diese Tätigkeiten bereits in der Grobplanung weitestgehend übernimmt. Die Modularität der Systeme verringert zudem den Umfang dieser Tätigkeiten während des Betriebes.

Die Steuerungsaufgaben umfassen alle Tätigkeiten, die für die Erfüllung von Aufträgen (in der Montage) auf Basis der Ergebnisse der Planungsaufgaben notwendig sind (vgl. Eversheim 2002, S. 13; Minolla 1975, S. 8). Dazu zählen die Aufgaben der Festlegung des Arbeitsvorrats, die Materialbereitstellung, die Informationsbereitstellung und die Personaleinsatzplanung (Warnecke 1986, S. 616-618). Außerdem beinhaltet sind auch die Reaktion auf Störungen, die Materialsteuerung, koordinierende Tätigkeiten und die Personaleinsatzsteuerung sowie überwachende Tätigkeiten in Form der Betriebs- und Maschinendatenerfassung und der Überwachung des Montagefortschritts (vgl. Warnecke 1986, S. 618-619).

Im Aufgabenbereich der Instandhaltung ist bei Montagesystemen die produktbezogene Instandhaltung von besonderer Bedeutung. Sie lässt sich hinsichtlich Inspektion, Wartung und Instandsetzung differenzieren (DIN Norm 31051, S. 2-4).

Die Aufgaben des Qualitätsmanagements enthalten, bezogen auf ein modulares Montagesystem, die Tätigkeiten zur präventiven Vermeidung von Abweichungen und der planmäßigen Qualitätsprüfung sowie die Behebung von Abweichungen und die abweichungsbedingte Entsorgung (vgl. Sasse 2002, S. 112-118).

Der Aufbau einer Montagezelle orientiert sich sowohl bei der Konfiguration als auch bei möglichen Rekonfigurationen an den Organisationsprinzipien der Montage. Bei diesen wird differenziert zwischen Baustellenmontage, Gruppenmontage, Reihenmontage, Taktstraßenmontage und kombinierter Fließmontage (vgl. Miese 1973, S. 33-38; Kern 1996, S. 1237f und Abbildung 2-4). Unterschieden wird dabei danach, ob und wie Montageobjekte und Montagearbeitsplätze bewegt werden.

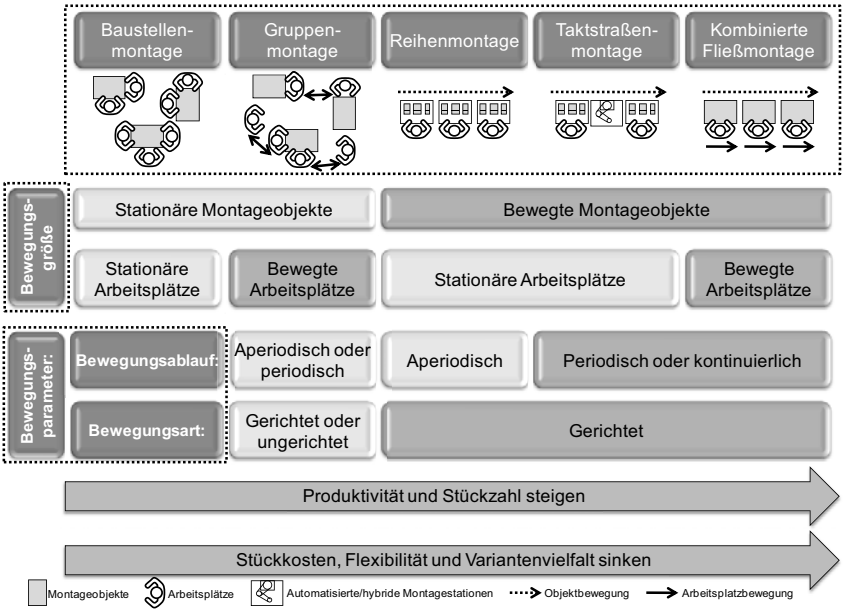


Abbildung 2-4 Organisationsprinzipien der Montage
(in Anlehnung an Miese 1973, S. 33–38; Kern 1996, S. 1237f und Lotter 2006d, S. 193)

Baustellen- und Gruppenmontage beispielsweise sind durch stationäre Montageobjekte charakterisiert und unterscheiden sich dadurch, dass bei der Gruppenmontage im Gegensatz zur Baustellenmontage bewegte Arbeitsplätze existieren. Die Baustellenmontage ist mit einem geringen Planungs- und Steuerungsaufwand aber auch mit hohem Platzbedarf, langen Durchlaufzeiten und aufwändigem Materialfluss verbunden (Lotter 2006b, S. 174-

176; Richter 2006, S. 104). Die Gruppenmontage ist durch wenige Schnittstellen, eine kürzere Durchlaufzeit und große Spielräume hinsichtlich Durchführung und Optimierung sowie durch hohen Koordinationsaufwand gekennzeichnet (Richter 2006, S. 105). Die Reihen-, Taktstraßen- und kombinierte Fließmontage sind dagegen durch bewegte Montageobjekte und eine gerichtete Bewegungsart gekennzeichnet. Die Reihen- und Taktstraßenmontage unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Taktung des Systems, wodurch beispielsweise die Volumenflexibilität eingeschränkt wird. Die kombinierte Fließmontage zeichnet sich durch eine kurze Einarbeitungszeit der Mitarbeiter und hohe Effizienz aus, wobei der hohe Planungs- und Steuerungsaufwand und hohe Investitions- und Betriebskosten nachteilig sein können (Richter 2006, S. 102f). Typisches Beispiel für die kombinierte Fließmontage ist die mit hohen Stückzahlen charakterisierte Endmontage von PKW in Automobilwerken.

Zusätzlich zur Kenntnis der Montageorganisationsprinzipien sind noch der One-Piece-Flow (Einzelstückfluss) und der One-Set-Flow (Verrichtungsweise Montage) von Relevanz. Sie unterscheiden sich dadurch, dass beim Einzelstückfluss nur ein einzelnes Bauteil und dagegen bei der verrichtungsweisen Montage ein bestimmtes Los durch den betrachteten Montagebereich fließt.

Betrachtet man Abbildung 2-4 bezüglich verschiedenen Faktoren von der Baustellenmontage bis zur kombinierten Fließmontage, können grundsätzliche Aussagen getroffen werden. So steigen Produktivität und damit Stückzahl während Stückkosten, Flexibilität und Variantenvielfalt sinken (vgl. Lotter 2006d, S. 193).

2.3 Arten modularer Montagesysteme

Modulare Montagesysteme lassen sich in unterschiedliche Arten einteilen. Hersteller, die auf ausgewählte Montageaufgaben oder -bereiche spezialisiert sind (bspw. Zuführ- oder Handhabungstechnik sowie Sondermaschinen), werden von Anlagenherstellern modularer Montagesysteme flankiert (Slama 2004, S. 93). Der Entwicklung einer steigenden Komplexität innerhalb einzelner Elemente wird in diesem Zusammenhang durch Standardisierung (bspw. bei Schnittstellen zwischen Modulen) entgegengewirkt. Modulare Montagesysteme lassen sich abhängig vom Modularisierungsgrad in modulare Komplettsysteme, Modulsysteme und modulare Baukastensysteme (Feldmann, Slama 2001, S. 490; Slama 2004, S. 93) kategorisieren. Der Modularisierungsgrad ist durch die Auflösung der Modularität bezogen auf die Systemkomponenten gekennzeichnet.

Modulare Komplettsysteme setzen sich aus Montagemodulen zusammen, welche alle Komponenten, die zur Ausführung einer Montageaufgabe notwendig sind, beinhalten. Hierzu zählen auch Komponenten für den Werkstücktransfer. Eine intensive Marktdurchdringung solcher Systeme wird aufgrund der dominanten Nachteile in Form von hohen Systemkosten und Defiziten bei der Flexibilität in der Teilebereitstellung gehemmt. Von Vorteil sind die Erweiterungs- und Rückbauflexibilität (geringer Realisierungs- und Inbetriebnahmeaufwand) und die Nachfolgeflexibilität sowie eine hohe Störungssicherheit (Slama 2004, S. 95; Feldmann, Slama 2001, S. 490f; Slama 2000, S. 4).

Die wesentliche Charakteristik von Modulsystemen ist durch Montagestationen kennzeichnet, welche sich aus einzelnen Modulen zusammensetzen. Dabei wird auf betriebsfertigen Basismodulen, die eine dezentrale Steuerung und funktionsbestimmende Komponenten beinhalten, aufgebaut. Diese werden bei Anwendung des PLUG&PRODUCE Prinzips mit prozessspezifischen Modulen aufgabenorientiert ausgestattet. Dadurch verringern sich der Inbetriebnahme- und der Planungsaufwand (Slama 2004, S. 94f; Feldmann, Slama 2001, S. 490; Slama 2000, S. 3f). Zu Modulsystemen zählen prinzipiell, aufbauend auf den nach Eversheim definierten Komponenten eines Montagesystems, Grund-, Peripherie- und Verkettungsmodule (vgl. Eversheim 1986, S. 683; Eversheim, Kettner, Merz 1983, S. 27-30 und Kapitel 4.5.2).

In diesem Zusammenhang ist auch der Begriff PLUG&PRODUCE zu definieren. Das PLUG&PRODUCE Prinzip nach Hildebrand (Hildebrand 2005, S. 52) baut auf der Plug&Play Philosophie aus der Informationstechnik auf. Durch das Übertragen dieser Philosophie auf Produktion und Fabrikbetrieb entsteht ein neuer Grundsatz zur technischen Gestaltung von Fabriken und Produktionsanlagen (v.a. Montageanlagen). Durch die Anwendung dieses Grundsatzes können Strukturen modularer Fabriken und Anlagen durch effizientes Rekonfigurieren, ohne oder nur mit geringen Störungen der laufenden Produktion, qualitativ und quantitativ verändert werden (vgl. Hildebrand 2005, S. 52).

Modulare Baukastensysteme besitzen den größten Modularisierungsgrad der drei Arten. Modulare Baukastensysteme enthalten Elemente wie: standardisierte Grundelemente (bspw. Träger) und standardisierte Funktionselemente (bspw. Greifer), funktionsorientierte Teilmodule (bspw. Transporteinheiten, Kurvenelemente) sowie vormontierte Grundmodule (bspw. einfache manuelle Montagearbeitsplätze). Durch die Verwendung von standardisierten Elementen unterscheiden sich die modularen Baukastensysteme von produktspezifischen Sonderkonstruktionen. Verbindungen zwischen den Elementen sind über standardisierte Verbindungselemente möglich. Modulare Baukastensysteme können sehr gut an verschiedenste Anforderungen angepasst werden. Allerdings ist dies aufgrund der hohen Auflösung der Modularisierung mit hohen Folgekosten und hohem Inbetriebnahme- und Planungsaufwand verbunden (Slama 2004, S. 93f; Feldmann, Slama 2001, S. 490; Slama 2000, S. 2f).

In der Praxis gibt es verschiedenste Hersteller, welche sich auf eine Art fokussieren oder versuchen, verschiedene Arten abzudecken. Als Beispiele seien hier Firmen wie baumann GmbH, Feintool Automation AG, Robert Bosch GmbH, teamtechnik GmbH, ST.E.P Stein Experten Pool GmbH, LP Montagetechnik GmbH genannt.

Abbildung 2-5 Beispiele modularer Montagesysteme
(S.T.E.P. Stein Experten Pool GmbH und Feintool Automation AG)

In diesem Kontext werden die Begriffe der hybriden Montage und hybriden Montagestation definiert und letztgenannte mit einem Beispiel beschrieben. Die hybride Montage lässt sich auf Montagezellenebene als paralleler Einsatz von manuellen und/oder hybriden Montagestationen und automatischen Stationen identifizieren. Hybride Montagestationen, siehe Abbildung 2-6, stellen die Kombination von automatischen Stationen mit manuellen Arbeitsplätzen zu Stationen mit automatisiert und manuell ausgeführten Vorgängen auf einer Station dar (vgl. Lotter 2006d, S. 193; Petersen 2005, S. 184; Heilala, Voho 2001, S. 26f).

Abbildung 2-6 Hybrides Montagesystem LPM 2400
(LP-Montagetechnik GmbH)

2.4 Montageplanung

Nach Grundig erfordert die Montage eine separate Planung, da sie Besonderheiten aufweist und sich damit in einigen Punkten deutlich von der Planung der Fertigung differenziert (Grundig 2006, S. 137).

Die Montageplanung ist definiert als eine komplexe, ganzheitliche Gestaltungsaufgabe, die neben technisch-organisatorischen und personellen Aspekten auch Fragestellungen der

Arbeitsorganisation, Arbeitsaufgaben und Arbeitsinhalten sowie logistische und strategische Aspekte mit einer insgesamt marktorientierten Zielrichtung verbindet (vgl. Westkämper 2001b, S. 11-13). Die Montageplanung beinhaltet dabei Phasen wie die Aufgabenstellung (beginnend bei der Analyse der Ausgangssituation), Grobplanung, Feinplanung und Realisierung sowie den Fertigungsanlauf und Betrieb (vgl. bspw. Grundig 2006, S. 137-139; Patron 2005, S. 6-9).

Die Vorgehensweisen zur Planung der Montage, die Planungssystematiken, können in verschiedene Gruppen grob eingeteilt werden. So gibt es klassische Systematiken, die sich auf alle Phasen beziehen und spezifische Ansätze, welche sich auf bestimmte Fragestellungen vertiefend konzentrieren. Außerdem lassen sich in der Gruppe „Planungssystematiken im weiteren Sinne“ alle Vorgehensweisen subsumieren, die sich nicht ausschließlich auf die Montage fokussieren, sondern im weiteren Umfeld (der Produktion) Anwendung finden und montagerelevante Inhalte einschließen. Der für die Montageplanung modularer Montagesysteme mit zunehmender Bedeutung versehene Anlagenhersteller (vgl. Müller, Brecher 2009, S. 8) spielt dabei vor allem in der Grobplanungsphase eine wichtige Rolle. In dieser Phase, in der alternative Lösungsvorschläge erarbeitet werden, erhöhen sich durch Modularisierung und Standardisierung der Elemente die Kombinationsmöglichkeiten und somit auch der Planungsaufwand (siehe Kapitel 1.2).

Design for Assembly (DfA)

Die nach klassischer Ansicht vorgeschalteten, konstruktionsbezogenen Aufgaben werden aufgrund der verkürzten Produktlebenszykluszeiten immer mehr mit den montageplanerischen Aufgaben parallelisiert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Produktentwicklung entscheidenden Einfluss auf den Aufwand zur späteren Montage des Produkts hat (Lotter 2006a, S. 5, Lotter 1992, S. 4; Wegener 2003, S. 14). Teilweise werden Zahlen für die von der Konstruktion determinierten Herstellungskosten in Höhe von ca. 70% genannt (Ullrich 2006, S. 37; Eversheim 1998, S. 4). Zur Erreichung der Zielsetzung einer wirtschaftlichen Montage muss somit eine montagegerechte Produktgestaltung erfolgen (Lotter 1982, S. 119; Hesse 2006c, S. 11; Spur, Helwig 1986, S. 600). Folglich ist die Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung und Montageplanung für ein erfolgreiches Unternehmen von großer Bedeutung (Franke 2003, S. 28; Schuster 1992, S. 30), vor allem unter Berücksichtigung der teilweise parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem (Konold, Reger 2009, S. 5f). Dies verdeutlicht, dass das Produkt in den ersten Phasen der Montageplanung nur unscharf beschrieben werden kann und keine ausgearbeiteten Konstruktionen (bspw. in Form von detaillierten CAD-Modellen) vorliegen.

Gerade einfache konstruktive Änderungen können zu wesentlichen Verbesserungen bei der Montage im Allgemeinen und besonders bezüglich der Automatisierbarkeit führen. Aufgrund dessen sind im Rahmen einer vollständigen Systemplanung sowohl fertigungs- als auch montagetechnische Aspekte in der Konstruktion zu berücksichtigen (Jonas 2000, S. 14).

Zur Unterstützung der Umsetzung wurden Richtlinien zur montagegerechten Konstruktion erarbeitet (vgl. bspw. Ponn, Lindemann 2008, S. 217f; Mital u. a. 2008, S. 137-140; Hesse

2006c, S. 18-54; Ullrich 2006, S. 47-94; Boothroyd, Dewhurst, Knight 2002, S. 85-146). Heutzutage wird diese Stoßrichtung mit ihren Richtlinien und Vorgaben unter dem Begriff Design for Assembly zusammengefasst.

Bewertungssystematik

Eine wichtige Rolle bei der Planung von modularen Montagesystemen nimmt die Auswahl von alternativen Lösungsmöglichkeiten während der Grobplanung ein, wobei die Berücksichtigung von lebenszyklusorientierten Aspekten eine immer wichtigere Rolle einnimmt (siehe Kapitel 2.5). Die Erhöhung der Kombinationsmöglichkeiten bei modularen Systemen, welche zu mehr Lösungsmöglichkeiten führt, verstärkt diese Bedeutung. Der zur Auswahl notwendige Entscheidungsprozess wird durch eine Bewertungssystematik unterstützt. Bewertungssystematiken innerhalb der Montageplanung werden in der Literatur in unterschiedlichen Formen beschrieben und beinhalten teilweise unterschiedliche Bewertungsmethoden (vgl. Kapitel 3.2). Bei der Bewertung im Rahmen der Montageplanung kann zwischen qualitativen und quantitativen sowie kostenbezogenen Kriterien unterschieden werden. Aufgrund der zukunftsorientierten Vorgehensweise im Rahmen von Bewertungen und der damit verbundenen Notwendigkeit von Annahmen sind Bewertungsergebnisse immer mit Unsicherheiten behaftet.

Digitales Engineering

Digitales Engineering beinhaltet alle planungsbezogenen und informationstechnisch unterstützte Methoden, die im Zusammenhang mit der Digitalisierung der produkt- und produktionsrelevanten Inhalte ihre Anwendung finden. Hervorzuheben sind die digitale und virtuelle Fabrik sowie die Augmented Reality. Unter der digitalen Fabrik ist dabei das digitale Abbild der Fabrik (v.a. der Produktion) zu einem bestimmten Zeitpunkt zu verstehen. Dieses wird durch Methoden wie Simulationen auf Basis unterschiedlichster Informationen verändert, wodurch die virtuelle Fabrik entsteht (Kapp, Constantinescu 2006, S. 9; Riffelmacher u. a. 2008, S. 12). Der Einsatz von digitalen Fabrikabbildern und Simulationen erfolgt hauptsächlich im fortgeschrittenen Stadium von Planungen (Feinplanung). Die Augmented Reality ist dadurch gekennzeichnet, dass sie die reale Welt mit der virtuellen Welt verbindet, indem die Wahrnehmung des Menschen im Hinblick auf die physische Fabrik mit zusätzlichen Informationen erweitert wird (Patron 2005, S. 21; Kapp, Constantinescu 2006, S. 9f).

Durch das digitale Engineering wird die Möglichkeit geschaffen, unterschiedliche Softwarewerkzeuge zu kombinieren und den Planern ein standardisierteres Planungsverfahren zur Verfügung zu stellen (Bley, Fritz, Zenner 2006, S. 19-23; Westkämper 2006c, S. 12). Ein weiterer wichtiger Punkt ist die umfassende Bereitstellung an aktuellen Informationen durch eine logisch-zentrale und redundanzfreie Speicherung, wodurch das aufwändige Zusammentragen von Informationen überflüssig wird und eine Effizienzsteigerung erfolgen kann (Westkämper 2006b, S. 67; Marczinski 2004, S. 666; Lange 30.09.2005, S. 17; Zäh, Möller, Vogl 2005, S. 6; Bley, Fritz, Zenner 2006, S. 21). Außerdem können Planungsfehler frühzeitig erkannt, die Planungszeit verkürzt und dadurch die Planungseffizienz erhöht werden (Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW)

02.09.2005, S. 30; Westkämper 2006b, S. 66; Schraft 2003, S. 269). Außerdem werden Anlaufschwierigkeiten und Kosten reduziert sowie der Grad der Wiederverwendbarkeit von beispielsweise Prozessdaten erhöht (Schraft 2003, S. 268f; Horn 2005, S. 20; Zäh, Möller, Vogl 2005, S. 7). Durch den Einsatz der Simulation können darüber hinaus Entwicklungen bestimmter Zielgrößen über eine Zeitspanne hinweg untersucht werden und somit auch Lerneffekte vorweggenommen werden (Gagsch, Herbst 2001, S. 39f; Westkämper 2008a, S. 445f, Westkämper 2002a, S. 27f, Westkämper 2006b, S. 66). Der Einsatz von Augmented Reality benötigt keine vollständige, dreidimensionale Abbildung der kompletten realen Fabrik, wodurch der Aufwand verringert und möglichen Schwierigkeiten bezüglich der Aktualität der vorhandenen Daten entgegengewirkt wird (Schreiber 2008, S. 10).

Allerdings ist auch zu beachten, dass die angestrebten hochwertigen Planungen nur eingeschränkt realisiert werden können, da Änderungen an der realen Produktion nur selten in der digitalen Welt aktualisiert werden (Kapp, Constantinescu 2006, S. 10). Der mit der Aktualisierung verbundene hohe Aufwand, der sich durch häufige Änderungen weiter erhöht, hemmt die Umsetzung (Zäh, Möller, Vogl 2005, S. 8). Die Beschaffung, der Einsatz und die Komplexität von Werkzeugen des digitalen Engineering hängen ebenfalls mit einem großen Aufwand zusammen, wodurch eine effektive Nutzung schwer möglich wird (Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. 2005, S. 13; Westkämper 2005, S. 11; Dombrowski, Tiedemann, Quack 2005, S. 11; Bley, Fritz, Zenner 2006, S. 21). Besonders für KMU sind dies große Hemmnisse (Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. 2005, S. 13; Westkämper 2005, S. 11). Es gibt viele Aufgaben der Montageplanung, die von Werkzeugen des digitalen Engineering abgedeckt werden (Zäh, Möller, Vogl 2005, S. 7; Bley, Fritz, Zenner 2006, S. 20). Allerdings werden nicht alle Aufgabenfelder abgedeckt (Zweck u. a. 2008, S. 23). So liegt die Entwicklung von neuen Systemalternativen nach wie vor in der Hand des Planers (Zäh, Möller, Vogl 2005, S. 7). Eine Orientierung an der Aufgabenteilung zwischen Anlagennutzer (Produktentwickler und Produzent) und -hersteller (Anlagenplaner) und den spezifischen Herausforderungen erfolgt nicht. Zudem stellt sich der Datenaustausch zwischen verschiedenen Werkzeugen und die Realisierung einer gemeinsamen, logisch-zentralen Datenbank aufgrund mangelnder Kompatibilität als schwierig dar (Bley, Fritz, Zenner 2006, S. 20).

2.5 Lebenszyklen modularer Systeme

Bei der Planung modularer Montagesysteme ist eine Betrachtung über die Lebenszyklen von Produkt und System, vor allem in Hinblick auf die Wandlungsfähigkeit der Systeme, von besonderer Bedeutung (Westkämper 2002b, S. 20-26; Heinen, Rimpau, Wörn 2008, S. 31). Besonders in der variantenreichen Serienproduktion, bei der die technische Nutzungsdauer von Montagesystemen länger als der Produktlebenszyklus ist (Westkämper 2001a, S. 480), wird die Fixkostenbelastung durch Anrechnung der gesamten Investitionen auf ein Produkt sehr intensiv und damit den dynamischen Rahmenbedingungen nicht gerecht (Spath, Scholtz 2007, S. 64). Die zunehmende Verkürzung der Produktlebenszyklen verstärkt diesen Effekt (Meier 2005, S. 232). Die Möglichkeit modularer Montagesysteme, sich der Nachfrageentwicklung innerhalb des Produktlebenszyklus anzupassen und somit Module

wiederzuverwenden, kann dem entgegenwirken (vgl. Schanz, Frede 2003, S. 79). Die Wiederverwendbarkeit von Modulen modularer Montagesysteme ist dabei durch die Möglichkeit gekennzeichnet, einzelne oder mehrere Module bei einer Rekonfiguration des Systems im selben oder in einem anderen System kurz- bis mittelfristig einzusetzen.

Dieses Konzept einer nachhaltigen Nutzung von Modulen im Rahmen der stufenweisen Anpassung eines modularen Montagesystems entsprechend des Nachfrageverlaufs führt zu einer absatzorientierten Montage (vgl. Schanz, Frede 2003, S. 79; Witte, Vielhaber 2003, S. 145; Feldmann, Slama, Junker 2002, S. 401 und siehe Abbildung 2-7), die bei geringerer Kostenbindung eine hohe Wandlungsfähigkeit des Systems erlaubt. Als Ausbaustufen bezeichnet werden dabei Konfigurationen, die durch die Zuordnung zu zeitlichen Abschnitten des Lebenszyklus und somit zu einem bestimmten Stückzahlbereich definiert werden. Sie können von manuellen über hybride bis hin zu höher automatisierten Systemen ausgebaut werden, wobei keine Konfiguration die Anforderungen über alle Phasen hinweg optimal erfüllt (Witte, Vielhaber 2003, S. 145; Meier 2005, S. 232f). Eine optimale Montagesystemstruktur ist somit kein feststehendes Ziel, sondern ein temporärer Zustand, der permanent optimiert werden muss (vgl. Sesterhenn 2003, S. 17; Wirth 2000, S. 35-37).

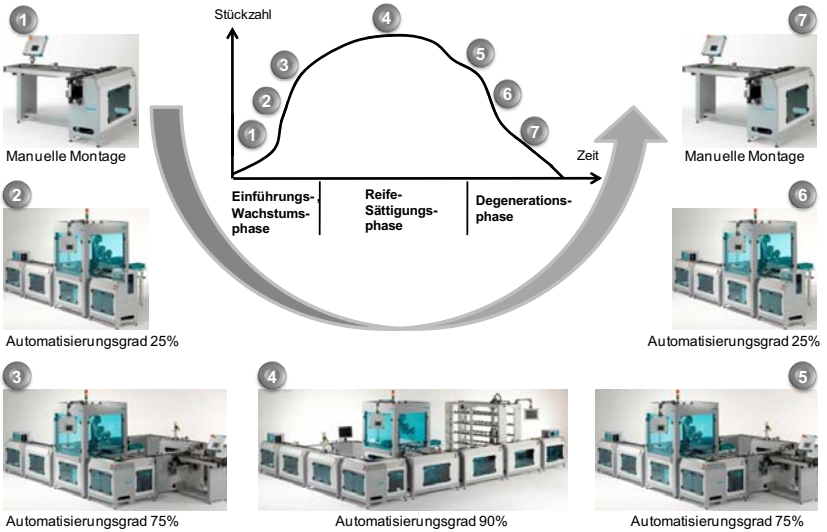


Abbildung 2-7 Ausbaustufen entlang des Produktlebenszyklus
(in Anlehnung an Slama 2004, S. 101 und Kluge u. a. 2009, S. 594)

Alternative Ausbaustufen können durch sich überlappende Leistungsbereiche und fließende Übergänge unterschiedliche Anforderungen (bspw. bzgl. Stückzahlen und Produktvarianten) erfüllen (Hartel, Lotter 2006, S. 419). Das Ziel, innerhalb einer kurzen Reaktionszeit möglichst nahe an den optimalen Betriebspunkt zu gelangen, wird durch diesen stufenweisen Ausbau erreicht (Feldmann, Slama, Junker 2002, S. 401; Heilala, Helin,

Montonen 2006, S. 3968). Außerdem verringert sich durch die stufenweise finanzielle Belastung neben der Kapitalbindung auch das Investitionsrisiko. Nicht benötigtes Kapital kann anderweitig angelegt werden, bis in Abhängigkeit von Nachfrage und Umweltentwicklungen weitere Investitionen in das modulare System erforderlich werden (vgl. Spath, Rally, Scholtz 2008, S. 675f; Nyhuis u. a. 2009, S. 206; Berkholz 2008, S. 14f; Slama u. a. 2004, S. 204). Im Vergleich zu einem klassischen Montagesystem, welches bereits vom Produktionsstart an auf die maximale Stückzahl ausgelegt ist, wird der Break-even-Point aufgrund der geringeren Fixkosten in den Anfangsphasen früher erreicht (Schanz, Frede 2003, S. 79; Slama u. a. 2004, S. 204).

Hemmnisse für eine umfassende Umsetzung in der Praxis liegen beispielsweise in der fehlenden Etablierung des stufenweisen Aus- und Rückbaus von Montagesystemen in der Unternehmensstrategie sowie in Problemen einerseits bei der Schnittstellenkompatibilität infolge rechtlich geschützter, herstellerspezifischer Formate und andererseits in einsatzunabhängigen, kontinuierlichen Abschreibungen und damit Kosten (vgl. Korte 2005, S. 151-154; Meier 2005, S. 135). Zum Abbau dieser Hemmnisse ist es erforderlich, dass die Akzeptanz für modulare Systeme in der Praxis durch eine fundierte Argumentation – mittels entsprechender Planungsmethoden –, getrieben von Anlagenherstellerseite, erhöht wird. Dazu ist es notwendig, die Vorteile der Systeme in den Bereichen der Nachhaltigkeit und Anpassungsfähigkeit über den kompletten Lebenszyklus mit allen Phasen ganzheitlich zu betrachten und unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungsmöglichkeiten mehrdimensional zu bewerten. Die lebenszyklusorientierte Planung und Bewertung muss vor allem die Kosten über den Lebenszyklus eines modularen Montagesystems und dessen Module betrachten (siehe Kapitel 4.7.2). Sie wird sich dabei auf Erwartungen bezüglich zukünftiger Entwicklungen stützen (vgl. Sesterhenn 2003, S. 4; Witte, Vielhaber 2003, S. 77; Schuh, Wemhöner, Kampker 2004, S. 116-118; Petersen 2005, S. 195).

Für die Durchführung einer lebenszyklusorientierten Betrachtung ist es notwendig, die zugehörigen Begriffe der Lebenszyklen von Produkt und System zu definieren und näher zu erläutern. In Abbildung 2-8 wird dazu diese ganzheitliche Sichtweise auf die Entwicklung von Produkten und modularem System dargestellt. Sie beinhaltet somit die Marktphasen des Produkts inkl. Varianten und Nachfolgeprodukt sowie die Unterscheidung zum gesamten Lebenszyklus Montagesystem und dem davon abzugrenzenden Systemlebenszyklus. Dieser wird in Hinblick auf die Zeitdauer einer Ausbau- und Rückbaustufe eines modularen Systems definiert und entspricht meist einer Marktphase eines Produktes (Lebenszyklusphase). Der Systemlebenszyklus wird dabei in Entstehungs-, Betriebs- und Rekonfigurationsphase untergliedert. Das Montagesystem ist in dieser Sicht als ein Produkt zu sehen, welches zur Herstellung anderer Produkte Verwendung findet. Der gesamte Lebenszyklus Montagesystem besteht somit aus mehreren Systemlebenszyklen und ist im Hinblick auf die Wandlungsfähigkeit und Wiederverwendbarkeit des Systems bzw. seiner Elemente normalerweise länger als der Lebenszyklus eines einzelnen Produktes.

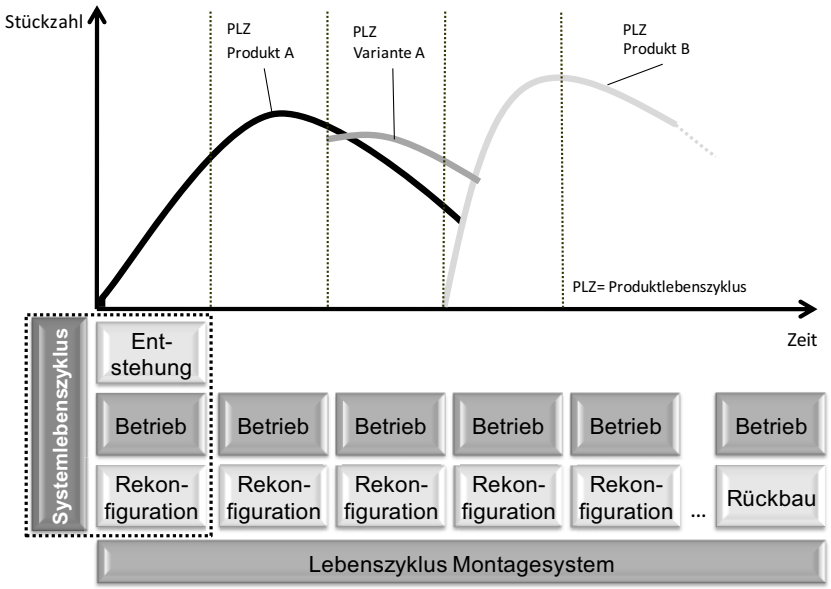


Abbildung 2-8 Systemlebenszyklus über den Lebenszyklus des Montagesystems
(in Anlehnung an Biege, Schröter, Vielhaber 2007, S. 59–61; Hartel, Lotter 2006, S. 416 und Kluge u. a. 2009, S. 595)

Bei Betrachtung des Lebenszyklus Montagesystem unter Berücksichtigung der Anwendung von Ausbaustufen (Abbildung 2-8 und Abbildung 2-7) wird deutlich, dass sich der Systembetreiber beim Kauf nur für eine erste Ausgangskonfiguration für die erste Marktphase entscheiden muss. Diese Konfiguration kann als Initialkonfiguration bezeichnet werden. Die anzuwendenden, weiteren Ausbaustufen sollten zwar möglichst weitgehend auf der Initialkonfiguration aufbauen, sind in ihren charakterisierenden Eigenschaften allerdings stärker von den erwarteten zukünftigen Entwicklungen geprägt (vgl. Sesterhenn 2003, S. 4 und 17; Witte, Vielhaber 2003, S. 145; Petersen 2005, S. 195).

Kapazitätsveränderungen entlang des Lebenszyklus

Die technischen Potenziale und Kapazitäten modularer Montagesysteme sind eng mit dem Produktlebenszyklus im Sinne der erwarteten Stückzahlen und der Produktvariantenvielfalt abzustimmen (Zehbold 1995, S. 56-60). Daher ist bei der Betrachtung des Lebenszyklus eines modularen Montagesystems die Kenntnis über Möglichkeiten einer kapazitiven Anpassung des Systems von Relevanz. Im Folgenden werden daher die wichtigsten Begriffe der Kapazitätsplanung diskutiert.

Für ein System wird die Kapazität als das Leistungsvermögen einer Einheit in einem festgelegten Zeitabschnitt definiert. Diese wirtschaftliche oder technische Einheit kann dabei beliebiger Art, Größe und Struktur sein (Kern 1962, S. 27; Bullinger, Ammer 1986, S. 38). In

diesem Zusammenhang beschreibt das Leistungsvermögen die mengenmäßige Ausbringung eines nicht näher spezifizierten Produkts bzw. Merkmals. Die Kapazitätsplanung hat die Abstimmung von Kapazitätsbedarf und -angebot als Aufgabe. Dies bedeutet, dass im Rahmen der Kapazitätsplanung sichergestellt werden muss, dass der geforderte Bedarf an einem Produkt der benötigten Menge und Qualität zur richtigen Zeit am richtigen Ort zur Verfügung steht (Thommen, Achleitner 2009, S. 399f; REFA 1991, S. 180-187). Grundsätzlich lässt sich die Kapazitätsabstimmung zwischen Bedarf und Angebot durch Maßnahmen umsetzen, welche entsprechend des Zeithorizontes in Kapazitätsanpassung und Kapazitätsabgleich gegliedert werden, siehe Abbildung 2-9.

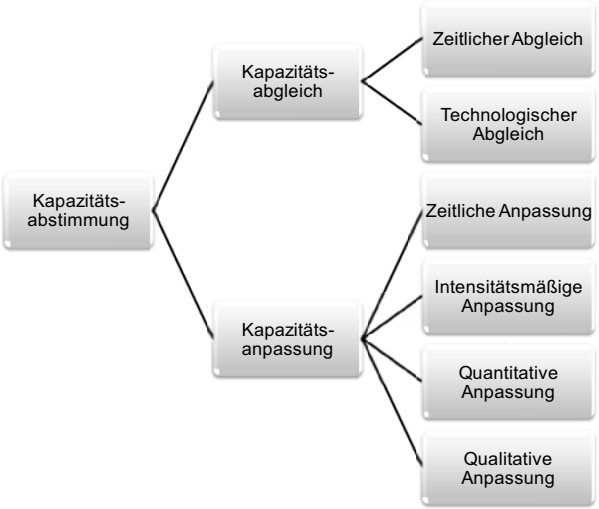


Abbildung 2-9 Kapazitätsabstimmung
(in Anlehnung an Wagner 2006, S. 34–45; Vahrenkamp, Siepermann 2004, S. 202–206; Lebefromm 2003, S. 215–226; Scheer 1998, S. 246–251; Wiendahl 1997, S. 323–325; REFA 1991, S. 392–394; Bullinger, Ammer 1986, S. 38)

Aufgaben zur Umsetzung dieser Maßnahmen können der strategischen oder operativen Kapazitätsplanung zugeordnet werden. Dabei ist die operative Kapazitätsplanung durch kurzfristige Aufgaben, beispielsweise der Produktionsplanung und -steuerung (PPS), Durchlaufterminierung oder Kapazitätsterminierung, gekennzeichnet. Die strategische Kapazitätsplanung beinhaltet mittel- und langfristige Aufgaben wie Kapazitätsstrategien und Leistungsabstimmung. Im Hinblick auf den Lebenszyklus Montagesystem ist vor allem die mittel- und langfristige Kapazitätsplanung von Interesse. Daher werden die diesbezüglich bereits genannten Aufgaben im Folgenden definierend beschrieben.

Die Kapazitätsstrategien charakterisieren Kapazitätsanpassungsmaßnahmen hinsichtlich Zeitpunkt und Umfang einer Anpassung. Vor dem Hintergrund eines Absatzverlaufs lassen

sich dabei das Gleichlaufprinzip[1], das Zeitstufenprinzip[2] und das Ausgleichsprinzip[3] unterschieden (Krüger 2004, S. 34f; Kobylka 2000, S. 31f; Hoitsch 1993, S. 96-99). Außerdem können, vor allem in Bezug auf das Zeitstufenprinzip, die Lead-[4], Lag-[5] und Trackstrategie[6] unterschieden werden (Olhager, Rudberg, Wikner 2001, S. 217f; Nahmias 2001, S. 41-44; Krajewski, Ritzman 1999, S. 334-337).

Nach der Erstellung einer groben Montagestruktur in der Grobplanungsphase der Montageplanung erfolgt eine Optimierung der Verteilung von Montagevorgängen auf die Ressourcen. Dies kann eine Leistungsabstimmung[7], Pufferdimensionierung oder Reihenfolgenplanung beinhalten, wobei die Reihenfolgenplanung durch den Auftragsbezug operativen Charakter besitzt (Gottschalk 2006, S. 37). Die Pufferdimensionierung legt die Abhängigkeit zwischen den einzelnen Ressourcen im System fest (vgl. Bullinger 1993, S. 23). Die konkrete Zuordnung von Montagevorgängen auf einzelne Stationen und Modulen ist Schwerpunkt der Leistungsabstimmung (Kratzsch 2000, S. 18). Bei dieser wird eine möglichst zeitbezogen gleichmäßige Verteilung der Vorgänge auf die Elemente angestrebt, was auf eine hohe Auslastung der Stationen zielt (Lauke 1928, S. 14). Dazu können die Zielwerte durch eine angestrebte kleinste erforderliche Mitarbeiterzahl bei gegebener Ausbringungsmenge oder durch eine größte mögliche Ausbringungsmenge bei fester Mitarbeiterzahl definiert werden (vgl. Fremerey 1993, S. 25). In diesem Zusammenhang sei auch die die Ausbringungsmenge bestimmende Taktzeit als die Zeit, in der jeweils eine Mengeneinheit eines Produktes fertig gestellt werden muss, definiert (REFA 1993, S. 179; Takeda, Meynert 2006, S. 109f). Die Festlegung der Taktzeit orientiert sich an dem zu erwartenden Kundentakt, welcher die vom Kunden pro Zeiteinheit geforderten Produkte widerspiegelt (Hiller-Brod 2005, S. 5,17f; Kössel 2005, S. 37-40).

Zur Bearbeitung von Aufgaben der Kapazitätsplanung existieren verschiedenste Methoden, welche sich entsprechend des Planungshorizonts in planungsbezogene und betriebsbezogene Methoden einteilen lassen. Dabei sind, wie bei den Aufgaben, die planungsbezogenen Methoden durch den mittel- bis längerfristigen Horizont von höherer Relevanz für eine lebenszyklusorientierte Planung. Eine weitere Differenzierung kann jeweils durch Unterscheidung in klassische und spezifische Methoden erfolgen. Die betriebsbezogenen Methoden sind sehr stark ausgeprägt und decken verschiedenste Aspekte ab (bspw. Corsten 2007, S. 509-595; Fusch 2005; Jodlbauer 2009, S. 16-19; Wiedenmann 2001). Die planungsbezogenen Methoden decken in ihrer Anwendbarkeit das gesamte Feld der Aufgaben der Kapazitätsplanung von der Grobplanung bis zur Feinplanung ab (Beispiele sind Friese 2008; Krüger 2004; Müller 2002; Roscher 2008).

[1] kontinuierliche Kapazitätsanpassung.
[2] stufenweise Kapazitätsänderung, geringer Ausgleich über Lager.
[3] keine Kapazitätsänderung, kompletter Ausgleich über Lager.
[4] Kapazität immer größer oder gleich der prognostizierten Nachfrage.
[5] Kapazität immer kleiner oder gleich der prognostizierten Nachfrage.
[6] Mischform.
[7] Auch Abtaktung oder Line-Balancing genannt.

2.6 Fazit der Begriffsklärung und Präzisierung des Betrachtungsbereichs

Die folgenden Ausführungen geben, aufbauend auf den vorigen Unterkapiteln, die wesentlichen Punkte zur Präzisierung des Betrachtungsbereichs wieder. Zusammenfassend sind diese als Fazit des Kapitels für die weitere Vorgehensweise von besonderer Bedeutung. Des Weiteren werden die elementaren Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik, welche sich aus den zuvor diskutierten Inhalten ableiten lassen, identifiziert und genannt.

2.6.1 Betrachtungsbereich

Der Betrachtungsbereich gibt den Rahmen für die zu betrachtenden Inhalte bei der Entwicklung der Methodik vor. Dabei werden im Hinblick auf Einsatzgebiete modularer Montagesysteme Aspekte beleuchtet, die den Zielkorridor für die vom Anlagenhersteller durchgeführte Planung eingrenzend beschreiben. Dieser Zielkorridor wird durch die Darstellung betriebstypologischer Informationen über die anvisierten Systembetreiber festgelegt (siehe Abbildung 2-10).

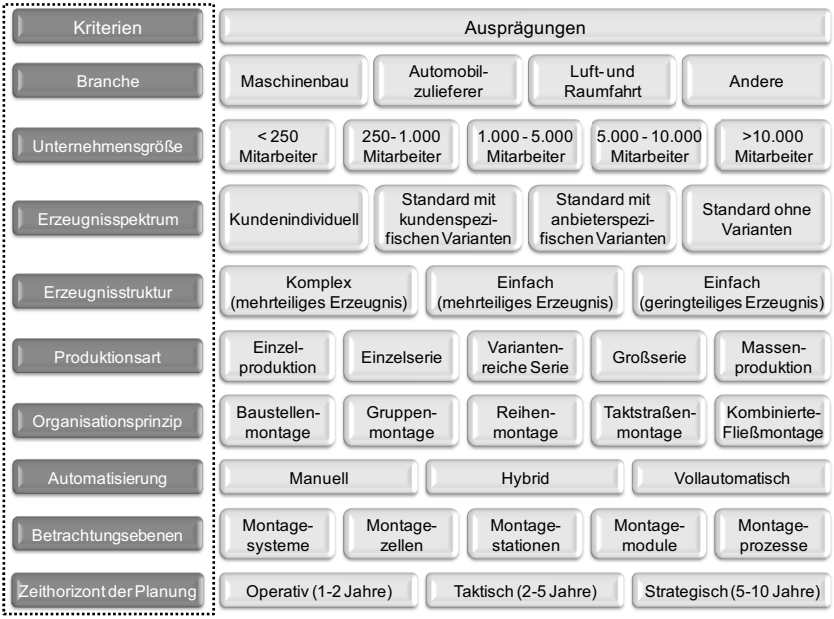


Abbildung 2-10 Betriebstypologie der Systembetreiber
(in Anlehnung an Aldinger 2009)

Die Systembetreiber agieren dabei auf turbulenten Märkten, welche neben den in Kapitel 2.1 genannten Flexibilitätsarten als Systemeigenschaft (v.a. Volumen-, Nachfolge- und Variantenflexibilität) auch wandlungsfähige Strukturen und Systeme erfordern. Die Betreiber sind im Wesentlichen Unternehmen, wie sie charakteristisch für den Maschinenbau, die

Automobilzulieferer und die Luft- und Raumfahrtbranche sind. Bei dem dort auftretenden Erzeugnisspektrum, welches durch Standardprodukte mit kunden- und/oder anbieterspezifischen Varianten gekennzeichnet ist, werden die Anforderungen an Unternehmen ganz besonders vor dem Hintergrund der Wandlungsfähigkeit gestellt. Die dort zu betrachtenden, mehrteiligen Erzeugnisse sind dabei von einfacher oder komplexer Struktur. Diese determinieren auch die Produktionsart, welche von der Einzelserie bis zur Großserie reichen kann, wobei eine Konzentration auf die variantenreichen Serienproduktion erfolgt.

Unternehmen, welche die beschriebenen Charakteristika besitzen, weisen bezüglich des Montageorganisationsprinzips meist eine Reihen- oder Taktstraßenmontage auf, die somit die Grundlage für die folgenden Betrachtungen bilden. Dazu zählen hauptsächlich hybride und manuelle Montagestationen sowie teilweise vollautomatische Stationen. Dabei erfolgen die Betrachtungen im Kontext von Modulsystemen und teilweise von modularen Komplettsystemen. Modulare Baukastensysteme sind aufgrund des hohen Modularisierungsgrads nicht Gegenstand der Betrachtungen. Entsprechend der in Kapitel 2.3 (vgl. auch S. 2f und S. 5) beschriebenen spezifischen Eigenschaften von Modulen besitzen diese standardisierte Schnittstellen und modulintegrierte Steuerungen.

In der Planung modularer Montagesysteme müssen die Ebenen des Skalenmodells (siehe Abbildung 2-2) vom System bis hin zum Prozess betrachtet werden, wobei der Fokus auf den Zellen, Stationen und Modulen (v.a. Prozessmodulen) liegt und produktspezifische Werkzeuge in der ersten, groben Planung nicht betrachtet werden.

Entsprechend dem holistischen Montagesystemmodell spielen die Aufgaben der indirekten Bereiche (Managementtätigkeiten) eine wesentliche Rolle hinsichtlich der Betriebskosten. Besonders im Hinblick auf die Kosten ist aufgrund der in der Regel höheren Anschaffungskosten und damit aus Argumentationsgründen eine lebenszyklusorientierte Betrachtung schon zu Beginn der Planungen von hoher Bedeutung. Daher steht die frühe Planungsphase, das heißt, die Grobplanungsphase in der die vielen Kombinationsmöglichkeiten und die Wandlungsfähigkeit modularer Systeme erörtert werden (vgl. Kapitel 2.4), im Fokus der Betrachtung. Die lebenszyklusorientierte Planung determiniert, dass die Planung modularer Montagesysteme einen taktischen und strategischen Zeithorizont besitzt. Bei der hier betrachteten Unternehmensgröße der Anwender übernehmen diese in den seltensten Fällen selbst die Planung von Montagesystemen. Für diese Unternehmen (bspw. Zulieferer), die keine entsprechenden Planungskompetenzen besitzen, übernimmt der Anlagenhersteller die Planungsaufgaben der Grobplanung (vgl. Müller, Brecher 2009, S. 8f).

Durch Rekonfigurationen ist ein stufenweiser Ausbau des Systems auf einfache Art und Weise möglich, wobei aufgrund der Modularität verschiedene Ausbaumöglichkeiten bestehen und dadurch eine Anpassung der Kapazität an die Nachfrage erfolgt. Um dies zu ermöglichen, müssen in der Grobplanung (Planung des Anlagenherstellers) einfache Kapazitätsplanungsmethoden Anwendung finden. Die unscharfen Informationen über das Produkt dienen bei der Planung als Eingangsgröße, wobei der Betrachtungsschwerpunkt auf

der Berücksichtigung der Tatsache unscharfer Informationen bei der Planung liegt. So sind die Möglichkeiten von Rückkopplungen von der Planung zur Konstruktion über den Bereich des Design for Assembly hinaus sicherzustellen, allerdings ist die Vervollständigung der Informationen und somit die Reduzierung der Produktunschärfe nicht Schwerpunkt der Betrachtungen.

Ein elementarer Baustein von Planungsaufgaben stellt die Bewertung von Lösungsmöglichkeiten dar. Betrachtet werden soll diese in der Form, dass sie sowohl monetäre als auch nicht monetäre Aspekte über den Lebenszyklus hinweg berücksichtigt. Die charakteristischen Problemstellungen des digitalen Engineering werden nicht betrachtet, da die grundsätzlichen Fragestellungen einer Methodik für den beschriebenen Betrachtungsbereich mit seinen Spezifika im Vordergrund stehen. Umfangreiche digitale Abbilder einer realen Fabrik und aufwändige Simulationen sind im Hinblick auf den notwendigen Planungshorizont und die im Fokus stehende Grobplanungsphase für die Entwicklung einer vom grundsätzlichen Ansatz her neuen Methodik Hemmnis und daher nicht zu betrachten. Zudem finden umfangreiche softwaretechnische Lösungen, wie sie in diesem Bereich in Großkonzernen existieren, aufgrund der Unternehmensgröße der Anlagenhersteller bei diesen derzeit keine Anwendung.

2.6.2 Anforderungen an die Methodik

Aufbauend auf der einleitenden Diskussion, dem Diskurs der Begrifflichkeiten und der Beschreibung des Betrachtungsbereiches werden im Folgenden elementare Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik zur Planung modularer Montagesysteme deduziert. Diese Anforderungen bilden neben der Grundlage für die Diskussion forschungsrelevanter Ansätze (Kapitel 3) den Rahmen für die Entwicklung der Methodik. Eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung der neuen Methodik ist, dass diese bezogen auf Umfang und Komplexität für einen mittelständischen Anlagenhersteller handhabbar sein muss. Außerdem muss sie auf einen Einsatz von modularen Montageanlagen für die variantenreiche Serienproduktion in Unternehmen zielen und somit hinreichend präzise und trotzdem anwendbar sein. Der Fokus liegt dabei auf der Grobplanung als Grundlage für die Angebotserstellung mithilfe einer standardisierten Vorgehensweise.

Die abgeleiteten elementaren Anforderungen an die Methodik sind: Handhabbarkeit unscharfer Produktinformationen, standardisierte Beschreibung von Ressourcen und Prozessen, Planungsunterstützung bei der Alternativengenerierung, Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des modularen Montagesystems, Berücksichtigung relevanter zukünftiger Entwicklungen und eine umfassende Betrachtung der Kosten. Diese seien im Folgenden kurz charakterisiert:

Handhabbarkeit unscharfer Produktinformationen

> Die Methodik muss auf Basis unscharfer Produktinformationen eine Planung ermöglichen. Dabei ist davon auszugehen, dass die Ausarbeitung der Konstruktion nicht abgeschlossen ist, aber eine Produktstruktur vorliegt bzw. bei der Anwendung der Methodik festgelegt werden kann.

Standardisierte Beschreibung von Ressourcen und Prozessen

Zur standardisierten Beschreibung von Ressourcen (bspw. Modulen) und Prozessen (abgeleitet vom Produkt) muss eine einheitliche, generische Beschreibungsmethode entwickelt werden, welche die Grundlage für eine automatisierte Alternativengenerierung bildet. So sollen die durch Standardisierung und Modularisierung erhöhten Kombinationsmöglichkeiten beherrscht werden.

Planungsunterstützung bei der Alternativengenerierung

Die zu entwickelnde Methodik muss den Planer bei der Generierung von Alternativen durch automatisierte Schritte unterstützen. Bei der Planung sollen die Erfahrungen des Planers genutzt werden können, um so die Komplexität und den Umfang der Methodik in einem vertretbaren Rahmen zu halten.

Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des modularen Montagesystems

Ein wesentlicher Vorteil modularer Montagesysteme liegt in der Anpassungsfähigkeit der Systeme (durch Rekonfiguration) an sich verändernde Rahmenbedingungen (Markt) über den Lebenszyklus hinweg. Daher ist die Betrachtung des Lebenszyklus modularer Montagesysteme eine elementare Anforderung.

Berücksichtigung relevanter zukünftiger Entwicklungen

Vor allem im Hinblick auf die Lebenszyklusbetrachtung ist es notwendig, die relevanten zukünftigen Entwicklungen der Rahmenbedingungen, die im Zusammenhang mit einem modularen Montagesystem stehen, in validierten Szenarien zu erfassen und als Grundlage für die Planung zu nutzen. Ein Ziel ist dabei der Aufbau von Wissen als Mehrwert für den Betreiber. Dazu zählt die Kenntnis sowohl über Eigenschaften und Grenzen der Anlage als auch über Möglichkeiten und Notwendigkeiten der Erweiterung dieser.

Umfassende Betrachtung der Kosten

Die Betrachtung der Kosten (Investitions- und Betriebskosten) muss ein gesamtes Montagesystem inklusive der darin enthaltenen indirekten Bereiche beinhalten und mögliche zukünftige Entwicklungen über den Lebenszyklus einzuschätzen ermöglichen.

Als zusätzliche Funktionalität soll auf Basis der genannten Anforderungen die Methodik eine mehrdimensionale Bewertung ermöglichen, die der Auswahl eines geeigneten Lösungsvorschlages für ein modulares Montagesystem dient. Diese soll sowohl quantifizierbare als auch qualitative Kriterien berücksichtigen (abgeleitet von den Leistungszielen Qualität, Kosten und Zeit). Die Kriterien sollen dabei die Kundenwünsche widerspiegeln und daher auf diese adaptierbar sein. Durch die Bewertung soll dabei das Ziel verfolgt werden, die Kostenvorteile modularer Montagesysteme über den Lebenszyklus eines Montagesystems unter Berücksichtigung der Wiederverwendung von Montagemodulen zu verdeutlichen.

Für die Entwicklung einer Methodik ist es somit erforderlich, eine kundenintegrierte, lebenszyklusorientierte Grobplanung modularer Montagesysteme von Seiten des

Anlagenherstellers zu ermöglichen. Dazu zählt eine planungsunterstützende, automatisierte Planung. Diese soll auf einer generischen Beschreibungsmethode, unter Berücksichtigung der aufgrund der Modularität erhöhten Kombinationsmöglichkeiten, basieren und auf Grundlage unscharfer Informationen angewendet werden. Hinsichtlich der lebenszyklusorientierten Planung ist eine vorausschauende Beachtung zukünftiger Entwicklungsmöglichkeiten notwendig, beispielsweise in Form von Szenarien. Diese Sichtweise determiniert eine lebenszyklusorientierte Kostenbetrachtung.

3 Diskussion forschungsrelevanter Ansätze

In diesem Kapitel werden die für die zu entwickelnde Methodik relevanten Aspekte vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung und der Anforderungen an die Methodik in Bezug auf bestehende Arbeiten analysiert. Dafür bilden die Produktinformationen die Grundlage, weswegen sie zu Beginn des Kapitels erörtert werden. Die Produktinformationen nehmen den wesentlichen Teil der Eingangsinformationen für die Methodik ein. Diese soll im Rahmen der Planung modularer Montagesysteme spezifische Aspekte berücksichtigen. Diesen Ansprüchen wird die Diskussion dahingehend gerecht, dass klassische und spezifische Planungssystematiken im Kontext der für die Methodik charakteristischen Fragestellungen erörtert werden. Ein weiterer wesentlicher Aspekt sind Beschreibungsmethoden zur Charakterisierung von Ressourcen im Rahmen von Planungssystematiken und in weiteren Anwendungsgebieten. Diese werden, aufgrund der geringen Relevanz innerhalb der Beschreibungen der Planungssystematiken, separat, unter Berücksichtigung weiterer Arbeiten diskutiert.

3.1 Produktinformationen

Die Kenntnis über die Charakteristika des Produktes und die daraus abgeleiteten Informationen bilden ein wichtiges Element der Ausgangssituation der hier betrachteten Planungsaufgabe. Das Produkt bildet somit den Ausgangspunkt für die Planung, wobei die Unschärfe der Produktinformationen sowie die Struktur des Produkts für die Bildung von Prozessreihenfolgen (bspw. durch Vorranggraphen) von wesentlicher Bedeutung sind. Die folgenden Betrachtungen erfolgen vor dem Hintergrund der Anforderung der Handhabbarkeit unscharfer Produktinformationen an die zu entwickelnde Methodik und somit der Planung von modularen Systemen zu einem frühen Zeitpunkt der Produktentwicklung.

Produkt als Ausgangspunkt der Planung

Das wichtigste Element der Ausgangssituation für die Planung eines Montagesystems ist das Produkt. Von Beginn des Produktentwicklungsprozesses, der Planung eines Produkts, bis hin zu den detaillierten Ausarbeitungen der Produktcharakteristika sind die produktionstechnischen Aspekte mit zunehmender Relevanz behaftet. Daher ist die frühe Parallelisierung von Produktentwicklung und Montageplanung sowie deren Zusammenspiel sehr wichtig (vgl. Göbel 1999, S. 16f; Konold, Reger 2009, S. 5f). Umso früher die Parallelisierung erfolgt, desto früher wird der Start of Production (SOP) erreicht. Daher ist auch der intensive Austausch zwischen Produktentwicklung und Montageplanung sehr wichtig, welcher durch die organisatorischen Rahmenbedingungen beeinflusst wird (vgl. Schuster 1992, S. 30f; Franke 2003, S. 28). Ein wesentlicher Grund hierfür ist unter anderem der hohe Anteil an der Kostenbeeinflussung durch die Produktentwicklung (vgl. Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann 2007, S. 8-14).

Die Gestaltung des Produkts hat wesentlichen Einfluss auf die Montageanlagen und damit die Montageprozesse (vgl. Hesse 2006c, S. 23, Hesse 2006b, S. 39; Konold, Reger 2009, S. 7; Grunwald 2002, S. 16). Betrachtet man den zeitlichen Fortschritt unter Annahme eines Top-Down-Ansatzes, so wird deutlich, dass die Produktstruktur die erste, sehr wichtige

Information für die Planung ist und diese in erster Linie Einfluss auf die Anlagenstruktur besitzt (siehe Abbildung 3-1). Die Festlegung der Verbindungstechnik determiniert das Montageverfahren und die konkrete Bauteilgestalt bestimmt die endgültige Ausgestaltung der Handhabungstechnik.

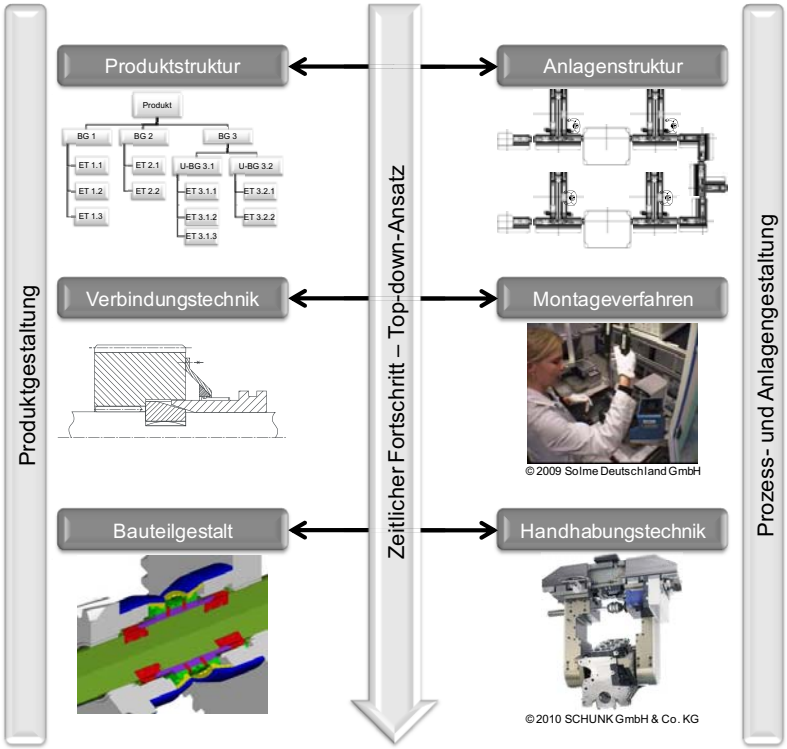


Abbildung 3-1 Wechselbeziehungen zwischen Produkt und Montagezelle (in Anlehnung an Hesse 2006c, S. 23)

Betrachtet man den Entwicklungsprozess nach den VDI-Richtlinien 2221 und 2222 (VDI-Richtlinie VDI 2221; VDI-Richtlinie VDI 2222 Blatt 1) unter der hier angenommenen Parallelisierung von Produktentwicklung und Planung der Montagezelle, wird auf anschauliche Weise deutlich, dass die detaillierte Entwicklung des Produkts (Ausarbeitung) noch nicht abgeschlossen ist. Die hier zu entwickelnde Methodik ist bezüglich des Ausgangspunktes zeitlich dem Ende der Konzeptionsphase (Phase II) und der Phase des Entwerfens (Phase III) zuzuordnen (vgl. Abbildung 3-2). Charakteristisch für den Zustand des Produkts entsprechend dieser zeitlichen Darstellung ist daher dessen Unschärfe.

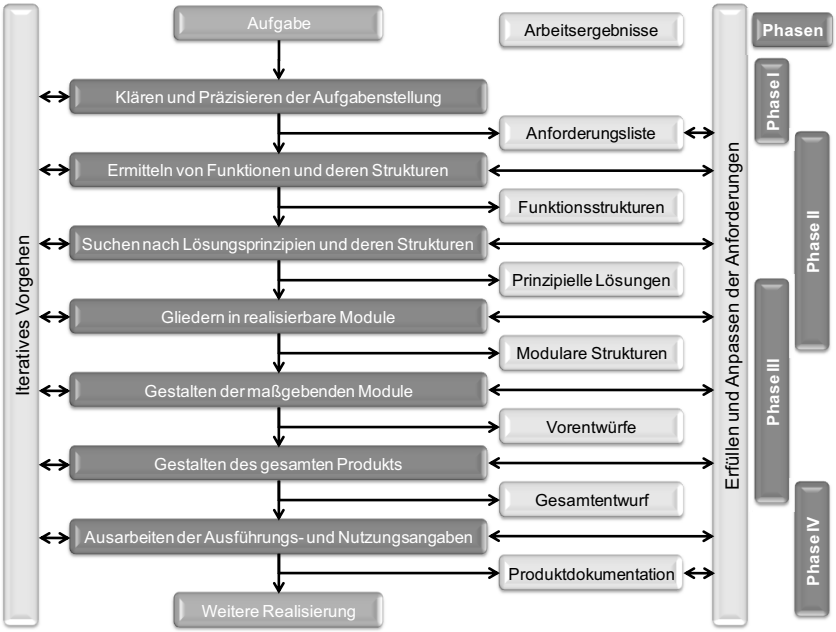


Abbildung 3-2 Grundsätzliche Vorgehensweise beim Entwickeln und Konstruieren (vgl. VDI-Richtlinie VDI 2221, S. 9 und Pahl u. a. 2007, S. 21f)

Produktinformationen – Berücksichtigung der Unschärfe

Die Informationen über das Produkt, welches den wesentlichen Ausgangspunkt einer Planung von Montagesystemen darstellt, sind von enormer Bedeutung für die gesamte Qualität der Planung. Daher werden in der Literatur Produktmodelle entwickelt, welche den Rahmen für Informationen über Produkte auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen und mit unterschiedlichem Betrachtungsumfang und -schwerpunkt bilden (vgl. Nurcahya 2009, S. 6-10; Mühlenbruch 2008, S. 36-41 nach Wahlers 1998; Specht, Möhrle 2002, S. 251). Dabei werden die Informationen auf verschiedene Weise strukturiert und aus differenzierenden Blickwinkeln betrachtet. Relevant für die zu entwickelnde Methodik sind dabei weniger die rechnergestützten Systeme, die auf den Modellen aufbauen, als vielmehr die Modelle selbst mit den darin enthaltenen Gesetzmäßigkeiten.

Produktmodelle lassen sich nach Aldinger entsprechend ihren unterschiedlichen Anwendungsdisziplinen in markt- und technologieorientierte, fertigungsorientierte sowie integrierte Produktmodellierungsansätze einteilen (Aldinger 2009, S. 76-81). Diese Gliederung soll als Grundlage für die folgende Betrachtung dienen. Grundsätzlich werden bei allen Ansätzen, entsprechend ihrer Ausrichtung in unterschiedlicher Intensität, bestimmte Aspekte betrachtet. Dazu zählen vor allem die Produktstruktur, die unter anderem mittel- bis langfristig Einfluss auf die Organisation im Unternehmen hat (vgl. Schuh 2005, S. 122f)

sowie die Geometrie des Produktes. Der Aspekt der geometrieorientierten Modellierung wird in erster Linie vor dem Hintergrund rechnergestützten Handhabung von geometrischen Objekten betrachtet. Wobei versucht wird, der schwachen Aussagefähigkeit hinsichtlich Funktionalitäten und Technologien (Spur, Krause 1997, S. 49-51), beispielsweise durch Features (bspw. Avgoustinov, Bossmann, Bley 2006, S. 55-62; Bley, Bossmann 2005, S. 627-631; Bley, Franke 2004, S. 25-30; Franke 2003; Matthes, Bullinger, Warschat 1997, S. 139-147; Sanft 1994, S. 28), entgegenzuwirken. Der Feature Ansatz, der einen weiten Fortschritt der Produktentwicklung erfordert (späte Phasen), wird im Folgenden aufgrund der Anforderung der Handhabbarkeit von unscharfen Produktinformationen nicht weiter berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.6.2).

Die Markt- und technologieorientierten Ansätze charakterisieren sich durch die Konzentration auf die frühen Phasen der Produktentwicklung, vor allem Phase I (siehe Abbildung 3-2), die Bewertung von Produktideen hinsichtlich des Marktes und die technologieorientierte Abbildung und Bewertung von Ideen (vgl. bspw. Eversheim, Schuh 2005, S. 8-10; Zäpfel 2000, S. 119-122). Letztgenanntes Charakteristikum bildet dabei einen ersten Blick auf die Verbindung zwischen Produkt und Produktionstechnologie.

Die fertigungsorientierte Modellierung ist zeitlich der Phase IV (siehe Abbildung 3-2) des Produktentwicklungsprozesses zuzuordnen. Sie ist durch einen hohen Detaillierungsgrad gekennzeichnet und zielt daher auf operative Tätigkeiten im Rahmen des Managements der Produktion (bspw. Wiendahl 1997, S. 186f und 237; Anderl 1989, S. 640-644).

Ansätze integrierter Produktmodelle sind auf Basis von Arbeiten zur Realisierung rechnergestützter Programme zum Computer Aided Design (CAD), des Computer Integrated bzw. Aided Manufacturing (CIM und CAM) und dem Computer Aided Planning (CAP) sowie vor allem deren Zusammenspiel entstanden. Diese orientieren sich überwiegend an Fragestellungen der Informatik und daher der informationstechnischen Umsetzung eines Modells bezüglich den Aufgaben der unterschiedlichen Planer (vgl. bspw. Grabowski, Leutsch 2003; Grabowski 2002; Spur, Krause 1997; Sanft 1994; Grabowski, Anderl, Schmitt 1989). Dazu bedienen sich die Arbeiten an sogenannten Partialmodellen, die das Zusammenspiel über die unterschiedlichsten Aufgabenfelder und die Erarbeitung von nutzerrelevanten Sichten auf die umfangreichen Informationssammlungen ermöglichen (Rimpau, Wiedemann 2009, S. 23-26; Grabowski, Leutsch 2002, S. 80f; Grosse u. a. 1997; Anderl 1989). Ein häufig betrachteter Aspekt ist der Produktlebenslauf, also eine Betrachtung deutlich über die eigentliche Produktentwicklung hinaus (vgl. bspw. Krause, Jansen, Langenberg 2004, S. 80f; Specht, Möhrle 2002, S. 251). Im Fokus steht dabei das Produkt selbst. Der Lebenszyklus von modularen Produktionseinrichtungen findet vor dem Hintergrund deren Planung keine Berücksichtigung.

Vor dem Hintergrund der hier zu entwickelnden Methodik besitzen die Ansätze zur Modellierung von Produkten, mit Ausnahme des Modells von Aldinger, insgesamt gesehen keine strategische Sichtweise hinsichtlich der Entwicklung von Produktionsstrukturen in einer frühen Planungsphase. Strategische Betrachtungen stellen allerdings eine wesentliche Grundlage hinsichtlich einer mittelfristigen, zukunftsorientierten Betrachtung von Produkten

und zu planenden Montagesystemen dar. Das von Aldinger erarbeitete Produktmodell, welches in einem UML-Modell realisiert wurde, ist durch einen generischen Ansatz mit dem Fokus auf die strategische Leistungsplanung gekennzeichnet. Durch diesen Ansatz wird das Modell zu einem Betrachtungsaspekt, der bei der Konzeption und Entwicklung einer standardisierten Beschreibungsmethode berücksichtigt wird (vgl. Aldinger 2009, S. 98-101).

Durch den Aufbau von Produktmodellen, bis hin zu integrierten Produkt- und Produktionsmodellen (vgl. bspw. Grabowski 2002) wird das Ziel verfolgt, möglichst viele Informationen in den Modellen abzubilden. In diesen Modellen wird somit eine Abbildung des gesamten Produktes und darüber hinausgehenden Informationen angestrebt und die Informationsunschärfe nicht in einer für die Planung von modularen Montagesystemen notwendigen Weise betrachtet. Die Informationen, die zum Zeitpunkt des Einsatzes der hier zu entwickelnden Methodik vorliegen, sind nur einzelnen Informationsbereichen eines umfassenden Modells zuzuordnen und mit teilweise unscharfen Inhalten versehen. Ein wichtiger Aspekt der zu erarbeitenden Methodik ist daher, diese Unschärfe zu berücksichtigen. Vor allem bei einer standardisierten Beschreibung von Ressourcen und Prozessen ist dies von Bedeutung.

Die in der Literatur identifizierten Ansätze stellen eine umfangreiche Hilfestellung dar, da sie etliche Strukturierungsaspekte hinsichtlich Produktinformationen und damit auch viele Informationsklassen betrachten. So kann bei der Entwicklung der Methodik, besonders bei der Beschreibungsmethode der Beschreibung von Ressourcen und Prozessen, auf diese Arbeiten zurückgegriffen werden und der besondere Aspekt der Unschärfe der Produktinformationen spezifisch berücksichtigt werden.

Produktstrukturierung

Systematiken zur Strukturierung eines Produkts im Rahmen der Produktgestaltung spiegeln verschiedene Sicht- und Denkweisen wider. Die Produktstruktur dient dabei im Wesentlichen dazu, sich einen Überblick über den Produktaufbau zu verschaffen und diesen Einflussfaktor auf die Anlagenstruktur näher zu betrachten (vgl. Seite 39 und Abbildung 3-1).

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze, die der Strukturierung des Produkts dienen. Beispiele für produktstrukturbestimmende Bauweisen sind aus Funktionssicht die Integral-, Differential, Wiederhol-, Modul- und die Verbundbauweise (vgl. bspw. Hesse 2006c, S. 27-31; Firchau u. a. 2002, S. 20; Grunwald 2002, S. 44). Aus montageorientierter, strukturbezogener Sicht ist vor allem der Auflösungsgrad von Relevanz, wie bei der Unterscheidung von Komplett-, Baugruppen- und Baukastenbauweisen deutlich wird (vgl. Hesse 2006c, S. 29; Firchau u. a. 2002, S. 20; Spur, Helwig 1986, S. 602f). Man unterscheidet bei der Montageplanung zudem aus konstruktiver Sicht, welche weiteren montagerelevanten Bauweisen des Produkts vorliegen. Unterschieden wird dabei in Schichtbauweise, Nestbauweise und Schachtelbauweise (Hesse 2006c, S. 30-31). Es sind aber auch weitere Gliederungsgesichtspunkte möglich, wie beispielsweise nach der Auftragsabwicklung in Transport-, Lager- oder Zukaufgruppen (vgl. Miese 1976, S. 71f).

Für Planungs- und Entwicklungsaufgaben eignen sich vor allem grafische Darstellungsformen der Produktstruktur, welche meist auf hierarchischen Begriffsbeziehungssystemen basieren (Firchau, Franke 2002, S. 62-66). Dabei determinieren die Montageart und die Komplexität des Erzeugnisses die Gliederungstiefe und damit die Gliederungsebenen der Produktstruktur (Miese 1976, S. 73; Bullinger, Ammer 1986, S. 92f). In der neueren Literatur erfolgt, entgegen der klassischen Auffassung (siehe Miese 1976, S. 73), die Gliederung bis hin zu Einzelteilen (Westkämper, Decker 2006, S. 162-165; Muckenhirn 2005, S. 25f; Zeile 1995, S. 32-40; Hesse 1993, S. 31f). Eine Darstellungsform stellen Erzeugnisstrukturbäume dar, wobei diese mit (Gozintographen) oder ohne gewichteten Kanten Verwendung finden (bspw. Zeile 1995, S. 32-40). Bei der Existenz von Erzeugnisvarianten können verschiedene Umsetzungsformen bspw. die getrennte Darstellung der Produktstruktur oder die Erstellung eines gemeinsamen Graphen auftreten (bspw. Muckenhirn 2005, S. 33f; Große-Heitmeyer, Wiendahl 2004b, S. 28f; Löhr 1977, S. 40-42). Hierzu eignet sich beispielsweise der sogenannte Variantenbaum bei dem eine vertikale Erzeugnisgliederung mit einer horizontalen Produktvarianz kombiniert wird (Schuh 2005, S. 145-147), wodurch ein guter Überblick über den Einfluss einzelner Teile und Baugruppen auf die Variantenbildung realisiert wird (Große-Heitmeyer, Wiendahl 2004b, S. 29).

Zusätzlich zu den verschiedenen Darstellungsformen der Erzeugnisgliederung wird zur Strukturierung oftmals auf Stücklisten verwiesen. Bei diesen wird entsprechend der unterschiedlichen Aufgaben, beziehungsweise verschiedener Sichtweisen nach Stücklistenarten – wie Mengenübersichts-, Struktur-, Varianten-, Baukasten-, Konstruktions-Stückliste – differenziert (vgl. bspw. Pahl u. a. 2007, S. 560-566). Da Stücklisten allerdings in der letzten Phase des Produktentwicklungsprozesses entstehen, liegen diese im jeweiligen Planungsfall für die hier zu entwickelnde Methodik noch nicht vor. Daher können diese für die zu entwickelnde Methodik nur relevant sein, wenn ein ähnliches Vorgängerprodukt existent ist, an dessen Struktur sich die Entwickler und Planer mit einer entsprechenden Unschärfe orientieren können.

Montageablaufstruktur

Bei der Erstellung einer Montageablaufstruktur wird im Allgemeinen auf den Informationen zur Produktstruktur aufgebaut. Da diese in den fokussierten Planungsfällen, wie bereits beschrieben, durch Unschärfe charakterisiert ist, erfolgt die Erarbeitung eines Montageablaufs unter dem Einflusses eben dieser. Hierdurch wird auch deutlich, dass die Produktstruktur über den Montageablauf die Auswahl von Montageressourcen beeinflusst (Jonas 2000, S. 16).

Die Montageablaufstruktur ist als Veranschaulichung der Gliederung der Montageaufgabe in Teilaufgaben und deren zeitliche und logische Folge zu definieren (vgl. Seidel 1998, S. 37; Warnecke 1986, S. 609-611; Metzger 1977, S. 48). Die am häufigsten angewandte Darstellungsform stellt der Montagevorranggraph dar (vgl. Muckenhirn 2005, S. 26f; Seidel 1998, S. 38; Ammer 1985, S. 25). Die Darstellungsform ähnelt der eines Netzplans, wobei die Knoten die Montageteilaufgaben und die Kanten ablauflogische und zeitliche

Abhängigkeiten widerspiegeln (vgl. bspw. Westkämper, Decker 2006, S. 162-165; Muckenhirn 2005, S. 26f; Konold, Reger 2009, S. 118-121; Warnecke 1986, S. 609-611; Metzger 1977, S. 48f). Entsprechend der frühesten Ausführbarkeit werden die Teilaufgaben von links beginnend aufgeführt, wobei das Ende der die Knoten verbindenden Kanten den spätesten Zeitpunkt der Ausführung darstellt (vgl. bspw. Westkämper, Decker 2006, S. 162-165; Hesse 1993, S. 33-36; Bullinger, Ammer 1986, S. 94-98). Dabei sind unterschiedliche Abstraktionsgrade möglich, welche sich bspw. vom gewünschten Automatisierungsgrad ableiten lassen (Miese 1976, S. 76). Grundsätzlich lassen sich die Ausgangspunkte zur Erstellung von Montagevorranggraphen entsprechend den folgenden wesentlichen Betrachtungsansätzen differenzieren: Ableitung aus Erzeugnisstrukturinformationen, stufenweise Detaillierung, Montagemerkmale, Analyse der Fügeflächen, Erstellung einer Verbindungsliste und die Ermittlung der Demontagefolge (Seidel 1998, S. 93-97; Hesse 1993, S. 33-36; Schilling, Brandes 1989, S. 21-25; Bullinger, Ammer 1986, S. 94-98; Ammer 1985, S. 37-77; Löhr 1977, S. 52f; Miese 1976, S. 76-82). Alle Ansätze bauen dabei auf den in der Produktentwicklung erstellten Informationen auf, wie sie zu Beginn dieses Kapitels bereits diskutiert wurden. Die Darstellungsform des Montagevorranggraphen bezüglich der ablauflogischen Zusammenhänge verdeutlicht anschaulich, dass trotz der Abhängigkeit des Montageablaufes von der Erzeugnisstruktur meist verschiedene Ablaufvarianten denkbar sind (vgl. Westkämper, Decker 2006, S. 164f; Krüger 2004, S. 112; Schilling, Brandes 1989, S. 19). Auf Basis des Montagevorranggraphen kann, bei entsprechend komplexen Produkten, eine Definition von Arbeitsabschnitten erfolgen, wobei der jeweilige Arbeitsabschnitt im Regelfall für eine eigene Montagezelle steht. Diese Gliederung kann nach verschiedenen Aspekten erfolgen (Konold, Reger 2009, S. 40): bspw. Varianten- und Baugruppenteilung, verfahrensbezogene Unterscheidung, qualifikationsbezogene Trennung, Montagelage (Ausrichtung des Basisteils) oder nach progressivem Volumen- und Gewichtszuwachs (Konold, Reger 2009, S. 40-42; Schilling, Brandes 1989, S. 48f; Bullinger, Ammer 1986, S. 127-130).

Aufbauend auf der Montageablaufstruktur kann auch ein Ablaufplan erstellt werden. Ein Ablaufplan stellt dabei die zeitliche Abfolge von Einzelaufgaben der Gesamtmontageaufgabe und die ausführenden Stellen dar (vgl. bspw. Thommen, Achleitner 2009, S. 401-403; Eversheim 1987, S. 67f). So kann auf eine übersichtliche Weise festgehalten werden, welche Stellen in welcher Reihenfolge die Aufgaben bearbeiten sollten. Der Ablaufplan kann, entsprechend der Montageablaufstruktur (vgl. Bullinger, Ammer 1986, S. 106-125), in detaillierter Form vor allem in der Feinplanung für konkretere Beschreibung der Montageaufgaben Verwendung finden. Wobei der Detaillierungsgrad niedriger als beim Arbeitsplan ist (vgl. Westkämper, Decker 2006, S. 156-161).

Die Strukturierung von Produkten und die Erstellung einer Montageablaufstruktur wurden in bisherigen Arbeiten umfangreich betrachtet, sodass auf diesen Methoden im Rahmen der zu entwickelnden Methodik aufgebaut werden kann. Daher können bei der Erarbeitung der Methodik die existierenden Arbeiten eine Hilfestellung für den Rahmen der zu entwickelnden Bausteine bilden.

3.2 Planungssystematiken

Planungssystematiken für Montagesysteme können in klassische und spezifische Systematiken eingeteilt werden. Diese werden im Folgenden im Zusammenhang der für die Methodik charakteristischen Fragestellungen diskutiert. Dabei werden zuerst die klassischen Planungssystematiken, die den Ausgangspunkt für die forschungsspezifischen Planungssystematiken darstellen, charakterisiert, um die Grundlagen der Montageplanung aufgabenspezifisch zu erläutern. Dazu werden diese hinsichtlich der zeitlichen Abfolge ihrer einzelnen Arbeitsschritte vorgestellt sowie eine Systematik als Referenzvorgehensweise festgelegt, die in den weiteren Betrachtungen der Arbeit als Leitfaden dient. Danach werden die charakteristischen Merkmale der betrachteten forschungsspezifischen Ansätze dargestellt. Anschließend erfolgt, im Rahmen der Bewertung, die Analyse der Planungssystematiken unter Berücksichtigung der Anforderungen der zu entwickelnden Methodik. Vor dem Hintergrund der Erforschung montageplanerischer Fragestellungen wird diese Analyse mit dem Schwerpunkt auf den spezifischen Ansätzen umgesetzt.

3.2.1 Klassische Planungssystematiken

Die Planung der Montage unterscheidet sich in Teilen deutlich von der Planung der Fertigung (vgl. Kapitel 2.4), weshalb sich diese als eigenes Themenfeld in der Literatur etabliert hat. Daher gibt es in der Montageplanung viele Veröffentlichungen, die passende Planungssystematiken definieren. Diese sind dabei allgemein anwendbar, nicht herstellerspezifisch und bilden die Grundlage für spezifische Forschungsansätze. Die wichtigsten idealtypischen Planungssystematiken seien im Folgenden als klassische Planungssystematiken im Gesamten knapp vorgestellt und hinsichtlich ablauforganisatorischen Aspekten geordnet.

Bei der Analyse der Planungsabläufe können fünf wesentliche Phasen definiert werden, die in allen Abläufen vorhanden sind und unter denen die jeweiligen Planungsaufgaben subsummiert werden können. Diese fünf Phasen werden entsprechend Konold und Reger folgendermaßen bezeichnet: Aufgabenstellung, Grobplanung, Feinplanung, Realisierung und Fertigungsanlauf (Konold, Reger 2009, S. 32f). Es erfolgt im Wesentlichen eine Betrachtung der Planungssystematiken von Bullinger, Konold und Reger sowie Lotter und Hartel (siehe Abbildung 3-3) (Konold, Reger 2009; Hartel, Lotter 2006; Bullinger, Ammer 1986). Die Systematik nach Bullinger konzentriert sich auf Fragestellungen im Rahmen des Projekts Montageplanung, wobei er projektspezifische Aufgaben stärker als andere betrachtet und somit dem organisatorischen Rahmen einen hohen Stellenwert beimisst (vgl. Bullinger, Ammer 1986, S. 23-55). So wird in der Vorgehensweise nicht nur auf die ablaufspezifische Ausarbeitung eines Montagesystems, sondern auch auf die durchgängige Dokumentation Wert gelegt. Die Planungssystematik von Konold und Reger konzentriert sich auf eine möglichst umfassende Montageplanung von der Einzel- bis zur Serienmontage, wobei sie sich auch durch die aufgeführten Praxisbeispiele für Montagestationen charakterisiert (Konold, Reger 2009, S. 92-110; 155-270). Lotter erstellte seine Vorgehensweise, die aus elf Schritten besteht, hauptsächlich vor dem Hintergrund automatischer Montagesysteme. Erst in späteren Veröffentlichungen nimmt die Bedeutung von hybriden Systemen deutlich zu

(Lotter 2006c). Neben der Kostenrechnung ist für Lotter auch die Rechnerunterstützung und die Simulation von hoher Relevanz (bspw. Lotter 1992, S. 392-397).

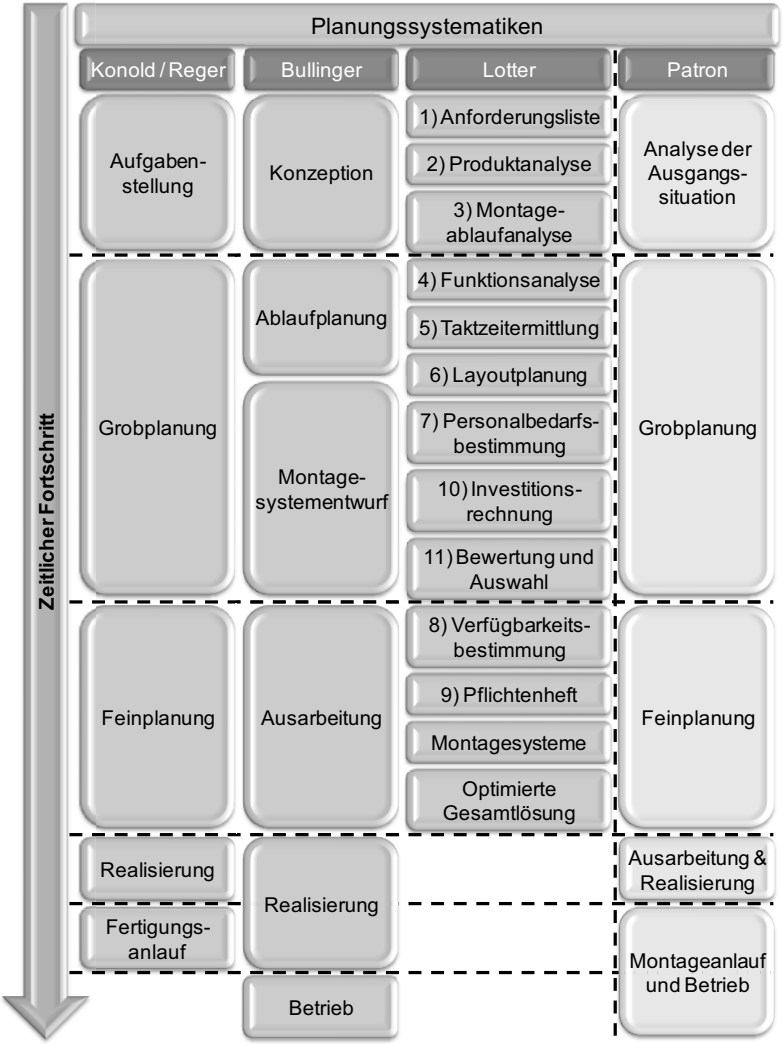


Abbildung 3-3 Auswahl klassischer Planungssystematiken
(nach Konold, Reger 2009, Bullinger, Ammer 1986, Lotter 2006c und Patron 2005)

Ein weiterer Autor, der zu den klassischen Vertretern der Montageplanung gezählt werden kann, aber in der Abbildung nicht dargestellt ist, ist Warnecke (bspw. Warnecke 1986; Warnecke, Löhr, Kiener 1975). Er fokussiert sich in seinen Veröffentlichungen hauptsächlich

auf die Ablaufplanung, die Planung technischer Lösungen und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Warnecke thematisiert außerdem im Kontext der Montageplanung einen ressourcenschonenden Aufbau des Montagesystems und die Weiterverwendung von bestehenden Anlagen (Stationen). Die Rekonfiguration und modulare Montagesysteme spielen bei ihm allerdings noch keine Rolle.

Zur Veranschaulichung wie die spezifischen Planungssystematiken auf den klassischen aufbauen, ist als Beispiel dazu die Arbeit von Patron mit aufgeführt, welche sich auf den Einsatz von Augmented Reality konzentriert (Patron 2005). Bei der Betrachtung der Montageplanungsabläufe ist grundsätzlich zu beachten, dass diese idealtypische Abläufe darstellen, von denen in der Realität meist projektspezifisch abgewichen wird. So werden tatsächlich projektabhängig verschiedene Teilaufgaben intensiver, mit mehreren Iterationen oder auch gar nicht durchgeführt (vgl. bspw. Hartel, Lotter 2006, S. 409; Patron 2005, S. 7; Konold, Reger 2009, S. 32f).

Anhand Abbildung 3-3 wird deutlich, dass sich die Planungssystematiken in verschiedenen Punkten unterscheiden. Beispielsweise ist auffällig, das das Ende der Planung bei den Autoren zu unterschiedlichen Zeitpunkten bezüglich des Planungsfortschritts beziehungsweise der Planungsumsetzung erfolgt. Wobei nicht vom Betrachtungshorizont auf die Anzahl der vom Autor festgelegten Planungsphasen geschlossen werden kann. Außerdem unterscheiden sich die Ansätze in der Zuordnung von Planungsaufgaben zu den einzelnen Phasen. Zum Beispiel werden die Wirtschaftlichkeits- bzw. Kostenbetrachtung teilweise unterschiedlichen Phasen zugeordnet (bspw. bei Lotter am Ende der Planung).

Als Referenzvorgehensweise soll die Planungssystematik von Konold und Reger dienen, welche alle Phasen bis zum Produktionsanlauf abdeckt und den notwendigen Detaillierungsgrad besitzt. Die Vorgehensweise mit den einzelnen Arbeitsschritten ist im Anhang ausführlich dargestellt (siehe Anhang A). Im Folgenden sollen die Phasen dieser Systematik, stellvertretend für die klassischen Planungssystematiken, genauer diskutiert werden. Wie bereits in Kapitel 2.6.1 beschrieben, steht für den Anlagenhersteller vor allem die Grobplanungsphase im Fokus, da diese die für den Hersteller relevanten Tätigkeiten beinhaltet.

In der ersten Phase des Montageplanungsablaufes nach Konold und Reger werden die Ziele festgelegt und die Projektverantwortlichen benannt. Zudem werden der Terminrahmen definiert und Daten für die Planung beschafft (bspw. erste Informationen über die Erzeugnisse, die gewünschte Flexibilität des Montagesystems, der Produktionslogistik und den Montageablauf). In diesem Kontext steht zudem die Durchführung einer Situationsanalyse, die vor allem bei bestehender Montage von größerer Relevanz ist. Darüber hinaus erfolgt eine Eingrenzung der Aufgabenstellung und eine erste Vorgabe über die verfügbare Hallenfläche (Konold, Reger 2009, S. 33-39).

In der Grobplanungsphase wird zuerst, auf Grundlage der ermittelten Daten, die benötigte Ausbringung des Montagesystems (bzw. Montagezelle) und somit die geforderte Taktzeit berechnet. Anschließend werden über einen Montagevorranggraphen und eine

Vorgabezeitermittlung die Arbeitsabläufe definiert und darauf aufbauend die Montagestruktur erarbeitet. Die Entwicklung von Montagesystem-Alternativen stellt den nächsten Schritt dar (falls notwendig erfolgt dazu die Definition von Montageabschnitten). Dabei werden die Alternativen durch verschiedene Informationen wie beispielsweise Personal- und Flächenbedarf beschrieben. Darauf aufbauend werden die Alternativen beurteilt und bewertet, um die beste Lösung auszuwählen. Diese Auswahl stützt sich hierbei sowohl auf monetäre als auch nicht monetäre Betrachtungen (Konold, Reger 2009, S. 39-63).

Die Feinplanungsphase ist die Phase, in der die Planung des Montagesystems bis ins Detail erfolgt. Dazu zählt nach Konold und Reger neben dem Erstellen eines Pflichtenhefts vor allem die konstruktive Ausarbeitung aller Montagestationen. Außerdem zählen die Definition von Auftragsplanungs- und Steuerungssystem sowie die Aktualisierung des Zeitplans, Ausschreibungen und das anschließende Vergleichen von Angeboten zu den Aufgaben dieser Phase. Zudem erfolgt vor dem abschließenden Wirtschaftlichkeitsnachweis die Personaleinsatzplanung (Konold, Reger 2009, S. 64-75).

Der Realisierungsphase werden die Aufgaben zugeordnet, die vor der Inbetriebnahme des Montagesystems durchgeführt werden müssen. Hierzu zählen nach Konold und Reger auch die endgültige Gestaltung manueller Arbeitsplätze (bspw. mithilfe von MTM), Personalschulungen, der Aufbau des Systems und die Dokumentation (Konold, Reger 2009, S. 33).

Zur letzten Phase, dem Fertigungsanlauf, zählen im wesentlichen Tätigkeiten, welche die Realisierung des Montagesystemanlaufes unterstützen. Dazu gehören vor allem die Fehlerbehebung bzw. Prozessoptimierung, da die Notwendigkeit hierzu teilweise erst bei Testläufen in der realen Umgebung deutlich wird (bspw. Programmiertätigkeiten). Der Abschluss der Dokumentation und die Abnahme des Montagesystems stellen das Ende dieser Phase dar (Konold, Reger 2009, S. 33).

3.2.2 Forschungsspezifische Planungssystematiken

Nach der Beschreibung der wesentlichen Eigenschaften der klassischen Planungssystematiken erfolgt nun die Charakterisierung der betrachteten forschungsspezifischen Planungssystematiken.

Die Arbeit von Beumelburg konzentriert sich auf die Ablaufplanung hybrider Montagesysteme, wobei sie auf das gleichzeitige Arbeiten von Mensch und Roboter an einem Montageobjekt eingegrenzt ist. Beumelburg entwickelt dabei eine fähigkeitsorientierte, automatisierte Ablaufplanung für den Anwendungsfall der Mensch-Roboter-Kooperation unter Beachtung des Montageprozesses selbst, der Ergonomie, des Bauteils und der Teilebereitstellung (Beumelburg 2005, S. 36). Die Entwicklung einer Lösung zur Teilung der Arbeitsinhalte im Rahmen der automatisierten Ablaufplanung bedient sich dabei genetischer Algorithmen (Beumelburg 2005, S. 76-101).

Loferer fokussiert sich in seiner Methodik anfangs auf die Gestaltung eines einzelnen Montagevorgangs bzw. Fügeprozesses im Detail, um darauf aufbauend weitere Vorgänge und somit Schritt für Schritt weitere Montagestationen zu planen. Die Beschreibung der

Einzelaufgaben erfolgt dabei nach der VDI Richtlinie 2860. Die Erstellung einer Montagestation beginnt somit bei einzelnen Bauteilen der Station (bspw. Linearmodule), die nach und nach zu einer Station zusammengesetzt werden (Loferer 2002, S. 90-100). Wesentlicher Bestandteil ist ein rechnergestützter Montagebaukasten, in dem diese Bauteile hinterlegt sind und mit Hilfe dessen man die einzelnen Stationen aufbauen kann. Auf den dann existierenden Informationen kann eine automatische Layoutplanung durchgeführt werden (Loferer 2002, S. 117-130).

Die achtphasige Planungssystematik nach Kratzsch konzentriert sich auf die organisatorische Gestaltung von Montagesystemen im Fließprinzip. Die Systematik deckt dabei im Wesentlichen alle Schritte von der Vorbereitung bis zum Betrieb des Montagesystems ab (Kratzsch 2000, S. 37-73). Ein wichtiger Baustein der Planungssystematik ist die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit, welche vor allem die Betriebskosten differenziert analysiert (Kratzsch 2000, S. 96-105).

Auf kleine und mittelständische Unternehmen und modulare Montagesysteme, die sich durch den standardisierten Aufbau und die Wiederverwendungsmöglichkeiten für eine rechnergestützte Planung eignen, fokussiert sich die Methodik von Slama (Slama 2004, S. 49f). Die Planungsinhalte lassen sich alle der Grobplanung zuordnen und werden durch ein Auswahl- und Analysewerkzeug rechnergestützt ausgeführt, wobei die Betrachtung über den Lebenszyklus von hoher Relevanz ist (Slama 2004, S. 67).

Der Planungsansatz von Holle nutzt mehrere rechnergestützte Werkzeuge zur Planung von Montagesystemen. Das Gesamtsoftwarepaket (Ilmoplan) orientiert sich dabei stark an den Verfahren der Deutschen MTM-Vereinigung e.V. und ermöglicht eine sehr detaillierte Planung (Holle 2002).

Die Planungssystematik nach Cuiper zielt auf eine parallele Planung, die sowohl produktgetrieben als auch anlagengetrieben durchgeführt wird (Cuiper 2000, S. 72-75). Dabei setzt er vor dem Montageanlauf auf eine Synchronisation dieser beiden Planungslinien (Cuiper 2000, S. 84). Auch bei diesem Ansatz erfolgt die Planung mit Unterstützung durch ein Planungssystem am Rechner (Cuiper 2000, S. 98f).

Zur Ermöglichung eines rechnerunterstützten, parallelen Vorgehens in der Montageplanung entwickelt Jonas eine ganzheitliche Methodik, welche den zunehmenden Einfluss rechnergestützter Verfahren verdeutlicht (Jonas 2000, S. 70f). Dabei liegt der Schwerpunkt der Arbeit auf dem Ziel, die Datenhandhabung und Datenhaltung von Produkten und Ressourcen einfach, redundanzfrei, durchgängig und damit widerspruchsfrei zu realisieren. Der Kern der Arbeit liegt somit auf einem Datenmodell (Jonas 2000, S. 102f).

Die Methodik von Fusch orientiert sich bezüglich des Planungsablaufs an der Montageplanungssystematik von Bullinger und setzt ihren Schwerpunkt im Bereich der organisationsabhängigen Implementierungsstrategien für den Einsatz von digitalen Planungshilfen (Fusch 2005, S. 59f). Er geht dabei von einer bestehenden Montage aus und entwickelt daher ein Referenzmodell für die Modellierung der betriebsbegleitenden Planung, dessen Kernelemente die Funktions-, Steuerungs-, Organisations- und Datensicht darstellen

(Fusch 2005, S. 60). Neben der Datenhaltung ist die Implementierung des Modells in existierende Unternehmensstrukturen ein wichtiger Baustein seiner Arbeit.

Grunwald verfolgt mit seiner rechnerunterstützten Methodik das Ziel, die Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung und Montageplanung zu optimieren (Grunwald 2002, S. 7-10). Dazu entwickelt er eine Vorgehensweise auf Basis eines digitalen Baukastens, welcher die wichtigste Grundlage der Arbeit bildet. Die Vorgehensweise dient der Anwendung flexibler, integrierter Produktentwicklungs- und Montageprozesse und berücksichtigt die Anwendbarkeit auf neue Planungsfälle (bspw. auch in anderen Unternehmen mit differenzierenden Charakteristika) sowie der flexiblen Anpassung des Planungsablaufs (Grunwald 2002, S. 71-74).

Die Methodik von Patron konzentriert sich auf den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung (wie bereits in Kapitel 3.2.1 erwähnt) und beschreibt ein Verfahren, welches hauptsächlich in der Montagelayout- und ablaufplanung verwendet wird (Patron 2005, S. 52-57). Durch die Kombination von realer und virtueller Welt in einem Kontext sind solche Verfahren im Wesentlichen für Änderungs- oder Erweiterungsplanungen geeignet. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in den Spezifika der Augmented Reality (Patron 2005, S. 51f).

Rudolf entwickelte eine Planungssystematik, welche der zunehmenden Relevanz der Digitalen Fabrik Rechnung trägt, indem sie die Ablage, Darstellung und den Nutzen des dort existenten Wissens in den Vordergrund stellt (Rudolf 2007, S. 91-93). Mit der Forderung nach einem Montageplanungskonzept für die variantenreiche Serienmontage definiert er den Ausgangspunkt für die Entwicklung eines generischen Ansatzes (mit den Basisklassen: Produkte, Prozesse und Ressourcen), welcher es ermöglicht, vorhandene Planungswerkzeuge zu erweitern (Rudolf 2007, S. 91; 108; 118f).

Die Planungssystematik von Roßgoderer konzentriert sich auf die Layoutplanung hybrider Montageanlagen und somit auf die optimierte Anordnung manueller und automatisierter Arbeitsstationen (Roßgoderer 2002, S. 3). Auf Grundlage vorhandener Datenmodelle (CAD) zu Produkt und Ressourcen erfolgt eine Modellierung des Montagesystems, der eine Modellierung und Simulation der Prozesse folgt, um abschließend eine Optimierung zu realisieren (Roßgoderer 2002, S. 34f).

Evers fokussiert sich in seiner Planungsmethodik auf das Auftragsmanagement in der Montage mit dem Ziel der Vermeidung von Verschwendung von Ressourcen. Ausgangspunkt ist die Tatsache, dass Montagevorgänge durch verschiedene Ressourcen (Werker oder automatische Stationen) durchführbar sind (Evers 2002, S. 16-18). Diese Multiressourcen-Montage führt durch ihre vielseitigen Ausprägungen zu einer großen Unschärfe in der Planung und zur Notwendigkeit einer bedarfsgerechten Zuteilung von Ressourcen, weshalb Evers ein rechnerunterstütztes modulares Planungssystem für die Belegungsplanung entwickelt (Evers 2002, S. 7-9; 109-120).

Müller entwickelt auf Basis einer mehrschichtigen Ansicht (Produkt, Mitarbeiter und Betriebsmittel) der Montagestruktur eine Systematik zur rechnerunterstützten Planung hybrider Montagesysteme (Müller 2002, S. 63-66). Durch das Verfahren, welches als

Algorithmus für die Rechnerunterstützung umgesetzt wurde, erfolgt die Leistungs- und Kapazitätsabstimmung der Ressourcen nach Art und Menge auf Basis mehrschichtiger Vorranggraphen (Müller 2002, S. 149-157, 172).

Die Montagplanungssystematik nach Schulz konzentriert sich auf die Grobplanungsphase und die Rechnerunterstützung durch Simulation. Auf Basis der prozesstechnologischen und organisatorischen Festlegungen (umfangreiche Modellierung) und des Layouts erfolgt eine Simulation des Montagesystems (Schulz 2005, S. 2f). Die Simulation soll nach Schulz auf Basis einer Modellbibliothek durchgeführt werden, die Elemente von Montagestationen und der Logistik enthält und leicht auf Verbesserungsvorschläge adaptierbar sein (Schulz 2005, S. 73-96). Die Ergebnisse sollen dann in etablierten Planungssystemen weiter verwendet werden (Schulz 2005, S. 96).

Die Planungsmethodik von Hack fokussiert sich auf die simulationsgestützte Belegungsplanung mit dem Ziel der optimalen Zuordnung von Aufträgen zu Ressourcen. Sie ist somit für die Optimierung der Regelung der Montage in einem kurzen Zeithorizont vorgesehen (Hack, Thomas Klaus Paul 1997, S. 36-38). Der Unschärfe der Planung wird in dieser Methodik durch Petri-Netze begegnet, wodurch die Bedeutung der Beschreibung der programmiertechnischen Hintergründe für eine fehlerfreie Simulation sehr hoch ist (Hack, Thomas Klaus Paul 1997, S. 57-63).

Die synergetische Montageplanungssystematik nach Gerst bildet eine ganzheitliche Betrachtungsweise, indem sie neben technologischen und strukturellen Schwerpunkten das Lohnsystem und Verbesserungsprozesse berücksichtigt (Gerst u. a. 2006, S. 576). Das Ziel ist dabei eine Zeitersparnis im Montageablauf, beispielsweise durch eine Optimierung des Vorranggraphen oder der ergonomischen Gestaltung von Arbeitsplätzen. Außerdem wird den Verbesserungsmaßnahmen unter Einbeziehung der Mitarbeiter, mit dem Ziel der Berücksichtigung von Prozesswissen, eine hohe Bedeutung zugemessen (Gerst u. a. 2006, S. 78-80).

Müller und Brecher stellen keine eigene Montageplanungssystematik vor, weisen aber auf Grundlage einer durchgeführten Expertenstudie auf Herausforderungen und Lösungsansätze in diesem Kontext hin (vgl. Müller, Brecher 2009 und Kapitel 1). Zur Gestaltung der Montage verweisen sie auf bestehende Ansätze und Methoden, wie beispielsweise schlanke Montageprozesse oder die Verwendung von digitalen Planungshilfsmitteln. Durch diese Vorgehensweise wird ein grober Rahmen für eine Planungsmethodik definiert (Müller, Brecher 2009, S. 22-32).

Die von Gottschalk entwickelte Planungssystematik beschäftigt sich mit einer komplexitätsgerechten Montageauslegung, die sich auf die bedarfsgerechte Belegungsplanung konzentriert. Dabei soll im Hinblick auf das Gesamtsystem jede Ressource einen optimalen Anteil der Prozesskomplexität tragen (Gottschalk 2006, S. 125-135). Die Systematik enthält zwei Zieldimensionen der Komplexität, Varianz und Dynamik, auf Basis derer eine optimale Belegung mithilfe eines Algorithmus erfolgt. Diese, den

kosteneffizientesten Grad der Kapazitätsstrukturierung beschreibenden Zustand, nennt Gottschalk Dedicated Flexibility (Gottschalk 2006, S. 125).

Sutanto und Schmuck entwickeln ein Konzept der rechnergestützten Planung modularer Montagesysteme mit dem Schwerpunkt auf 3D-Modellen und Simulationen (Materialflusssimulation) (Sutanto, Schmuck 2003, S. 392-395). Dabei werden die digitalen Modelle und Baukästen, wie auch die reale Montageanlage, modularisiert und somit ein übergreifender Ansatz geschaffen.

Die Kapazitätsabstimmung in Montagesystemen steht bei Krüger im Mittelpunkt der Methodik. Dabei werden Strategiebausteine erarbeitet, die bei der Durchführung der Kapazitätsabstimmung angewendet werden. Neben diesem Methodenbaukasten stellt die Betrachtung von Szenarien zur Ermöglichung eines vorausschauenden Planens den zweiten Schwerpunkt der Methodik dar.

Hernández Morales stellt die Wandlungsfähigkeit in den Mittelpunkt seiner nicht montagespezifischen Planungssystematik. Er erweitert damit die Fabrikplanung um den wichtigen Aspekt der Wandlungsfähigkeit und definiert dazu Wandlungsbefähiger (Hernández Morales 2002, S. 53-56). Neben diesen stellt das Szenario-Management einen wesentlichen Baustein zur Realisierung einer die Wandlungsfähigkeit berücksichtigenden Fabrikplanung dar (Hernández Morales 2002, S. 103-108). Dadurch können mögliche Markt- und Unternehmensentwicklungen analysiert sowie strategische Ungewissheiten in der Planung verringert und erkannt werden.

Die Planungssystematik von Röhrig befasst sich sowohl mit der Fertigung als auch mit der Montage. Dabei konzentriert er sich auf die Beherrschung der Produktvarianz in Produktionssystemen. Diese müssen möglichst flexibel um- und neugestaltet werden können, weshalb er die klassische Trennung zwischen Fertigung und Montage auflöst und stattdessen Produktionsvor- und -endstufen definiert (Röhrig 2002, S. 66-73). Durch eine entsprechende Gestaltung von Produktionsstruktur, -prozessen und -logistik soll der Aufwand für die Produktionssteuerung vermindert und die Produktion somit flexibler und wandlungsfähiger werden (Röhrig 2002, S. 4f).

Ein weiterer Ansatz, der die Produktion als Ganzes betrachtet, wurde von Mörtl für die Ressourcenplanung entwickelt. Durch die Modularisierung von Produkt und Produktionsgestaltung inklusive der Aufträge wird eine optimale Nutzung von Produktionsressourcen ermöglicht (Mörtl 2008, S. 95-97). Die Anwendung des Modularisierungsprinzips auf die Planung führt außerdem zu einer Verbesserung der Variantenbeherrschung (Mörtl 2008, S. 135-138).

Hildebrand entwickelt eine Methodik zu Gestaltung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen auf Basis des „PLUG&PRODUCE“ Konzepts. Grundlage bildet eine Baukastenstruktur, die durch Konfiguration und Rekonfiguration einen lebenszyklusübergreifenden Einsatz von Fabrikkomponenten und -modulen ermöglicht (Hildebrand 2005, S. 49-58), wobei Wandlungsfähigkeit und Flexibilität der Fabrik durch Austauschbarkeit und Mobilität erzielt werden (Hildebrand 2005, S. 53).

3.2.3 Bewertung

Die vorgestellten klassischen und forschungsspezifischen Planungssystematiken werden im Folgenden einer Bewertung unterzogen, deren Kriterien auf den in Kapitel 2.6 definierten Anforderungen aufbauen, der Charakterisierung der Systematiken dienen und vor dem Hintergrund des Betrachtungsbereichs definiert werden. Diese Kriterien werden im Folgenden kurz vorgestellt, um anschließend die Bewertung selbst zu beschreiben.

Kriterien

In einem ersten Kriterium wird der Betrachtungsrahmen für die angestrebten Anwendungsunternehmen hinsichtlich der Betriebstypologie in Relation zu der im Betrachtungsbereich beschriebenen Unternehmenstypologie bewertet. Dabei werden Planungssystematiken, die ebenfalls im Bereich der variantenreichen Serienproduktion ihren Schwerpunkt haben, mit hoher Punktzahl bewertet.

Modulare Montagesysteme beinhalten verschiedene technologische Ausprägungen: Von manuellen über hybride bis hin zu automatischen können alle vertreten sein. Die Planungssystematiken werden dahingehend betrachtet, inwiefern sie für diese Ausprägungen angewendet werden können.

Die Aspekte der Flexibilität und der Wandlungsfähigkeit von Montagesystemen sind vor allem durch die Möglichkeiten modularer Montagesysteme von hoher Relevanz. Bei der Analyse der Planungssystematiken wird daher bewertet, inwieweit diese in den Planungssystematiken durch die bewusste Planung von beispielsweise erweiterbaren oder reduzierbaren Strukturen erreicht werden sollen. Die Betrachtung der Flexibilität unterscheidet hierbei nicht zwischen den verschiedenen Flexibilitätsarten, sondern wird als Überbegriff betrachtet.

Die Modularität lässt sich sowohl in der Planung selbst als auch in der Hardware umsetzen. Daher werden mit dem Kriterium modulare Elemente die beiden Ausprägungen modulare Planung und modulare Systeme als Aspekte zur Bewertung der Planungssystematiken eingesetzt.

Die Standardisierung innerhalb von Montagesystemen, beispielsweise der Medien und Informationsflüsse, ist vor dem Hintergrund der Modularität ein wichtiger Aspekt. Die besondere Beachtung der Verwendungsmöglichkeiten entsprechender Systeme und dieses Aspektes in der Grobplanung wird bei den Planungssystematiken bewertet.

Zur Beschreibung der Montagereihenfolge von Produkten kann ein Montagevorranggraph auf Basis der Struktur des Produkts erstellt werden. Für die Bewertung ist relevant, ob eine Anwendung des Vorranggraphen für die Darstellung der Montageablaufstruktur erfolgt.

Die benötigte Ausbringung eines Montagesystems ist durch die daraus abgeleitete Taktzeit ein zeitlicher Faktor innerhalb der Planung. Daher wird bewertet, ob Ausbringung und Taktzeit in der Grobplanung berücksichtigt werden.

Der Einsatz von rechnergestützten Verfahren in der Planung kann in verschiedensten Ausprägungen auftreten (bspw. 3D-Darstellungen, Simulation, Algorithmen zur

Beschleunigung der Planung), dient aber immer den Zielen zur Beschleunigung oder Verbesserung des Planungsprozesses. Bewertet wird bei diesem Kriterium, ob die Planungssystematik eine Rechnerunterstützung nutzt, wobei hoher Detaillierungsgrad und Konsistenz positiv gewertet werden.

Die Berücksichtigung von Lebenszyklen bei der Planung von Montagesystemen spielt, auch vor dem Hintergrund der Kosten, eine wichtige Rolle hinsichtlich modularer Montagesysteme. Ob und wie umfangreich dies in den Planungssystematiken erfolgt, wird mit diesem Kriterium bewertet.

Die Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen ist ein wichtiges Kriterium, da dadurch der Veränderbarkeit modularer Systeme über die Zeit Rechnung getragen wird. Bewertet wird hierbei die vorrausschauende Planung dahingehend, ob sie unter Berücksichtigung von Wirkzusammenhängen mögliche Entwicklungen der Zukunft betrachten.

Die Betrachtung einer Kostenkalkulation bzw. der Wirtschaftlichkeit des Montagesystems im Rahmen einer Bewertung innerhalb der Planungssystematik ist ein wichtiges Kriterium. Die Berechnung von Kosten dient dabei im Wesentlichen dem Vergleich zwischen verschiedenen Lösungen, die sich beispielsweise in der Struktur- oder Organisationsform unterscheiden. Für die Bewertung von Planungssystematiken ist dabei von Relevanz, ob eine Betrachtung der Kosten erfolgt.

Diskussion der Planungssystematiken

Im Folgenden wird die Bewertung der vorgestellten Planungssystematiken anhand der beschriebenen Kriterien durchgeführt. Eine grafische Übersicht hierzu findet sich in Anhang B.

Die variantenreiche Serienfertigung als betriebstypologisches Kriterium wird im Großteil der Ansätze abgedeckt. Allerdings werden bei den spezifischen Ansätzen, aufgrund der Fokussierung auf eine spezielle Fragestellung, nicht immer entsprechende Angaben gemacht (vgl. bspw. Beumelburg 2005).

Bei Betrachtung der unterschiedlichen Ausprägungen des Automatisierungsgrads, der manuellen, hybriden und automatischen Montage, kann festgehalten werden, dass in den meisten Ansätzen Angaben dazu beiläufig erfolgen und keine besondere Spezialisierung erkennbar ist. Die Betrachtung der hybriden Montage im Speziellen erfolgt erst in der neueren Literatur, was mit der technischen Entwicklung im Zusammenhang steht, wobei sowohl Fokussierungen auf einzelne Arbeitsplätze (Beumelburg 2005) als auch die Betrachtung über mehrere Arbeitsplätze (vgl. Roßgoderer 2002; Müller 2002) hinweg erfolgen. Die Entwicklung hin zur hybriden Montage spiegelt sich auch bei Lotter wider, der in seiner Planungssystematik von der ursprünglichen Ausrichtung auf automatische Systeme mehr und mehr auf die hybriden (v.a. One-Set-Flow) zielt (vgl. Lotter 2006c; Lotter 1992).

Die Betrachtung der Flexibilität wird bei den klassischen Planungssystematiken nicht explizit genannt, wohingegen bei vielen spezifischen Ansätzen diese ein wichtiges Element für die Montage bzw. Montageplanung darstellt. Hervorzuheben sind in diesem Kontext

Planungssystematiken, die die Flexibilität durch Modularisierung der Planung und/oder des Montagesystems sicherstellen. So werden rechnergestützte Verfahren modular aufgebaut (vgl. bspw. Fusch 2005; Sutanto, Schmuck 2003; Loferer 2002; Grunwald 2002) und beispielsweise das Wissensmanagement innerhalb der digitalen Fabrik detailliert betrachtet (Rudolf 2007). Die Flexibilität eines Systems wird teilweise aber auch aus anderen Blickwinkeln betrachtet. Für Beumelburg steht beispielsweise die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine im Vordergrund (Beumelburg 2005), wohingegen andere Autoren die operative Montageplanung im Auftragsmanagement in den Mittelpunkt stellen (Evers 2002; Hack, Thomas Klaus Paul 1997). Bei den Planungssystematiken, die sich nicht direkt mit der Montage sondern mit der Produktion im Allgemeinen befassen, spielt die Flexibilität ebenfalls eine wichtige Rolle. Diese soll beispielsweise durch die Verwendung der Szenariotechnik in der Planung (Hernández Morales 2002) sowie durch die Modularisierung von Planung, Produkt und Ressourcen (Mörtl 2008) und durch neue Produktionsstrukturen erreicht werden (Röhrig 2002).

Die Planungssystematiken für die Montage konzentrieren sich selten auf die Wandlungsfähigkeit. Slama ist der einzige, der sich explizit auf diese fokussiert, und betrachtet zur Erreichung der Wandlungsfähigkeit modulare Strukturen vor dem besonderen Hintergrund der manuellen Montage (Slama 2004). Auf abstrakterer Ebene wird die Wandlungsfähigkeit wesentlich häufiger fokussiert und deren schwieriger Vorhersehbarkeit, beispielsweise durch die Szenariomethode oder veränderte Produktionsstrukturen, begegnet (vgl. Röhrig 2002; Sutanto, Schmuck 2003; Hernández Morales 2002).

Modulare Elemente werden entsprechend der zwei definierten Schwerpunkten (Modularisierung der Planung und des Systems) in den Planungssystematiken betrachtet. So gibt es auf der einen Seite Ansätze, die eine Modularisierung der Planung, meist in Kombination mit modularisierten rechnergestützten Planungssystemen, forcieren (Grunwald 2002; Cuiper 2000; Jonas 2000). Auf der anderen Seite gibt es Arbeiten, die die Modularisierung des Montagesystems bzw. Produktionssystems betrachten und die Systeme selbst oder die Planung dieser untersuchen (Slama 2004; Sutanto, Schmuck 2003; Hernández Morales 2002; Evers 2002).

Die besondere Berücksichtigung der Standardisierung erfolgt bei einzelnen spezifischen Planungssystematiken (Hildebrand 2005; Slama 2004), die sich mit der Modularisierung in der Fabrik bzw. Montage befassen. In den weiteren untersuchten Veröffentlichungen wird die Standardisierung meist nicht in diesem hohen Detaillierungsgrad oder gar nicht betrachtet.

In den meisten Planungssystematiken werden Vorranggraphen thematisiert, wobei die Grundlagen dafür in den klassischen Systematiken ausgeführt werden (Bullinger, Ammer 1986; Warnecke 1986). Die spezifischen Planungssystematiken fokussieren sich auf ausgewählte Aspekte wie das Nutzen der Informationen des Vorranggraphen zur Optimierung von beispielsweise Reihenfolgen, der Erstellung von Vorranggraphen als auch der Verbesserung des Vorranggraphen selbst (bspw. Gerst u. a. 2006; Bley, Bossmann 2005; Müller 2002). Holle zeigt beispielsweise in seinem Ansatz eine Möglichkeit zur rechnergestützten Verknüpfung zwischen Vorranggraph und Ressourcen auf (Holle 2002).

Die Ausbringung eines Montagesystems und damit auch die Taktzeit werden in den klassischen Planungssystematiken teilweise genauer betrachtet (Lotter 2006c; Lotter 1992; Bullinger, Ammer 1986). Bei den forschungsspezifischen Ansätzen wird meist davon ausgegangen, dass die Ausbringung von „oben“ (bspw. durch höhere Entscheidungsebenen im Unternehmen) vorgegeben wird, weshalb keine Gestaltung diesbezüglich erfolgt. Eine Beachtung erfolgt aber aufgrund der hohen Relevanz nahezu immer, meist über die geforderte Taktzeit.

Die Anwendung von Rechnerunterstützung bei der Planung zielt bei allen Planungssystematiken, die eine solche einsetzen, darauf, den Planungsablauf hinsichtlich verschiedener Aspekte (bspw. Geschwindigkeit oder Inhalt) zu verbessern. Schwerpunkte liegen beispielsweise im Bereich der Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung und Planung, der Betrachtung von Datenmodellen oder der computergestützten Layoutplanung (vgl. bspw. Roßgoderer 2002; Cuiper 2000; Jonas 2000). Systematiken für den operativen Betrieb von Montagesystemen befassen sich hauptsächlich mit der rechnergestützten Belegungsplanung (bspw. Evers 2002; Hack, Thomas Klaus Paul 1997).

Die Lebenszyklusbetrachtung an sich erfolgt vor allem in den spezifischen Ansätzen, die sich mit modularen Systemen auseinandersetzen. Dabei spielen Rekonfigurationen des Systems und die Möglichkeit der Wiederverwendung über den Produktlebenszyklus hinweg besondere Beachtung (vgl. bspw. Hildebrand 2005; Slama 2004).

Die Anwendung von Methoden zur Berücksichtigung relevanter zukünftiger Entwicklungen (bspw. im Hinblick auf die zu erwartenden Stückzahlen) als elementarer Baustein einer Methodik, findet vor dem Hintergrund valider Szenarien in nahezu keiner Planungssystematik besondere Berücksichtigung. Krüger ist der einzige, der im montagerelevanten Zusammenhang diese Fragestellung durch Einsatz der Szenario-Technik intensiv diskutiert. Er nutzt diese Technik für die spezifische Aufgabe der Kapazitätsplanung in der Montage, ohne dabei die Spezifika modularer Systeme zu berücksichtigen. Auf abstrakterer Ebene nutzt Hernández Morales, der die Fabrikplanung betrachtet, die Szenario-Technik dazu, die Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung berücksichtigen zu können und somit eine Berechnung von Entwicklungen im Unternehmensumfeld zu ermöglichen.

Die Kosten- bzw. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird in allen klassischen Ansätzen beschrieben, wohingegen bei den spezifischen diese Betrachtung eher selten erfolgt (bspw. Fusch 2005; Kratzsch 2000). Insgesamt fehlt bei allen betrachteten Planungssystematiken die Kostenrechnung mit spezieller Berücksichtigung der Veränderungen modularer Montagesysteme über den Lebenszyklus.

3.3 Beschreibungsmethoden

Die Beschreibung von Ressourcen und Prozessen vor dem Hintergrund einer automatisierten Zuordnung von Prozessen zu Ressourcen, als Grundlage für die Alternativengenerierung, spielt bei den zuvor diskutierten Planungssystematiken weitgehend eine untergeordnete Rolle. Daher erfolgt eine separate Betrachtung von

Beschreibungsmethoden, wobei zwischen Methoden im Rahmen von Planungssystematiken und Methoden in weiteren Anwendungsgebieten unterschieden wird.

3.3.1 Methoden im Rahmen von Planungssystematiken

Die charakterisierende Beschreibung von Prozessen und Ressourcen wird nur in einzelnen der bisher diskutierten Planungssystematiken vertiefend behandelt. Daher werden folgende (genannt werden die Autoren), bereits bei der Betrachtung der Planungssystematiken vorgestellten Methoden anschließend ebenfalls einer Bewertung unterzogen: Bullinger, Loferer, Konold und Reger, Rudolf und Jonas sowie Mörtl.

Des Weiteren sollen zusätzliche, im Planungskontext positionierte Systematiken bewertet werden und daher anschließend vorgestellt werden.

Die Planungssystematik von Eversheim dient der Montageplanung in der Einzel- und Kleinserienproduktion, wobei ein Schwerpunkt auf dem Montageablauf liegt (Eversheim, Witte, Peffekoven 1981). Dazu werden Bestimmungsgrößen definiert, die die Gestaltungs- und Ausführungsform der Montageorganisation beeinflussen. Dies sind die Materialwirtschaft, Betriebsmittel, Personal und der Montageablauf. Die Vorgehensweise der Systematik gliedert sich dabei in die Phasen: Ist-Analyse und Beschreibung der Montageaufgabe, Montageuntergliederung in Teilbereiche, Aufbau des Gesamtsystems, Detaillierung von Montageablauf und Betriebsmittelbedarf sowie die weitere Optimierung. Eversheim gliedert dazu die Elemente des Systems und erarbeitet dazu eine montageobjektunabhängige Beschreibungssystematik für Betriebsmittel, die in grob, mittel und fein (von einem abstrakten zu einem detaillierteren Auflösungsgrad) unterscheidet. Die Beschreibung selbst orientiert sich dabei an dem sehr detaillierten Klassifizierungsschlüssel von Hoeschen (Hoeschen 1978).

Die Planungssystematik von REFA, welche nicht speziell für die Montage entwickelt wurde, gliedert sich in sechs Phasen: Analyse der Ausgangssituation, Konkretisierung der Aufgaben, Grobplanung, Feinplanung, Aufbau und Betrieb. Dabei erfolgt eine Gliederung der Betriebsmittel. Hierbei werden Betriebsmittel als Teil des Arbeitssystems, mit dem Zweck der Erfüllung der Arbeitsaufgabe, einer groben Gliederung unterzogen (vgl. REFA 1993, S. 141f, REFA 1991, S. 339-343).

Der Schwerpunkt der Planungssystematik von Dieckhoff liegt in einer rechnergestützten Parallelsimulation mit dem Ziel der Bewertung von sogenannten komplexen Montage-Inertialsystemen. Diese beinhalten verfügbare Ressourcen, eine Tätigkeitsstruktur, eine Montagestruktur und ein Zielsystem. Dabei werden die Ressourcen in die Klassen Mensch, Maschine, Material und Information eingeteilt. Die Beschreibung der Ressourcen erfolgt in sogenannten Modulen, welche deren Anzahl, den Typ und die Position enthalten (Dieckhoff 1995).

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 467 wurde eine Systematik zur Planung eines Arbeitsplatzes in der Virtuellen Realität (VR) vor dem Hintergrund der variantenreichen Serienproduktion entwickelt (Westkämper 2004a). Dabei erfolgt die Ressourcengliederung in einer objektorientierten Struktur und die Beschreibung der Ressourcen in einem UML-

Diagramm mittels sogenannten Fähigkeiten. Die Ressourcengliederung erfolgt hierbei auf einer sehr detaillierten Ebene (bspw. Greifschale). Durch die zusätzliche Beschreibung der im digitalen Planungstool abgebildeten Prozesse mittels Fähigkeiten erfolgt eine automatische Zuordnung von Prozessen zu Ressourcen. Der Fokus liegt bei dieser Methode auf der Feinplanung einzelner Arbeitsplätze in der VR, wobei ein Schwerpunkt auf der Anordnung einzelner Ressourcen am Arbeitsplatz liegt (Westkämper 2004a).

Die Planungssystematik von Müller zielt auf eine Verfahrensauswahl und somit Technologieauswahl für die Produktion während der Produktentwicklungsphase. Ein wichtiger Schwerpunkt seiner Lösung stellt die Produkt-Primärverfahren-Matrix dar, die die Verbindung zwischen Produktelementen und möglichen Produktionsverfahren darstellt. Die Beschreibung der Verfahren erfolgt dabei mit einem ähnlichen Ansatz wie beim SFB 467, wobei ein stärkerer Fokus auf dem Nutzen des Wissens der Mitarbeiter liegt. Insgesamt wird die Methode in einem sehr umfangreichen und damit auf relativ abstrakter Ebene liegenden Betrachtungsbereich entwickelt, wodurch dem Ziel der Technologieauswahl Rechnung getragen wird (vgl. Müller 2008).

Ebenfalls im Bereich der Technologieauswahl erarbeitete Fallböhmer eine Methodik zur Auswahl alternativer Fertigungsprozesse. Dabei bedient er sich Produkt- und Technologiemerkmalen, die auf Basis einer allgemeinen Definition von Features auf rechnergestützte Verfahren wie das Computer-Aided-Process-Planning (CAPP) zielen. Zeitlich wird die Anwendung der Methodik direkt nach Abschluss der Grobplanungsphase gesehen. Zur Beschreibung von Betriebsmitteln wird ein sogenanntes Technologieinformationsmodell entwickelt, welches die Technologie in die vier Untergruppen Prozess, Entwicklung, Funktionsträger und Anlage einteilt. Darauf aufbauend nutzt Fallböhmer zur Planung von Fertigungsverfahrensketten ein Technologiedatenmodell (detaillierte Beschreibung von Fertigungsverfahren), eine Technologiezuordnungsmatrix (Verknüpfung der Leistungsmerkmale der Fertigungsverfahren mit den Produktmerkmalen) sowie eines Systems zur Technologiebewertung und -auswahl (Fallböhmer 2000).

Die Methodik von Trommer erweitert die zuvor beschriebene von Fallböhmer um die Betrachtung von Betriebsmitteln mit Transport, Handhabungs- und Lageraufgaben. Er versucht damit die gesamten produktionsrelevanten Eigenschaften abzubilden, um eine strategische und operative Planung zu ermöglichen. Die Erarbeitung von Fertigungsfolgen erfolgt dabei in einem Vorgehen mit fünf Schritten (Grobentwerfen, Fertigungsalternativengenerierung, Alternativenreduzierung, Bewertung der Alternativen und Alternativenauswahl). Bei der Beschreibung von Produkteigenschaften nutzt er eine dreistufige Gliederung, bei der die Features (hier: geometrische Formelemente) die größte Detaillierung darstellen (Trommer 2001).

Einen ähnlichen Ansatz verwendet Knoche in ihrem generischen Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Sie zielt auf ein einfach strukturiertes Modell, um komplexe Strukturen vereinfacht darstellen zu können und baut dazu ein durchgängiges, featurebasiertes Datenmodell auf. Dabei beinhalten Features alle relevanten Produkteigenschaften sowie deren Relationen und Zwangsbedingungen auf aggregierte

Weise. Durch den Abgleich von Produktmerkmalen und Prozesseigenschaften (Beschreibung der Ressourcen) erfolgt eine Zuordnung von Ressourcen zur benötigten Technologie. Auf diese Weise kann eine schrittweise Erstellung von Fertigungsketten realisiert werden (Knoche 2005).

3.3.2 Methoden in weiteren Anwendungsgebieten

Neben Methoden, die im Kontext von Planungssystematiken erarbeitet wurden, sind Beschreibungsmethoden weiterer Anwendungsgebiete vor dem Hintergrund einer möglichen Relevanz für die zu entwickelnde Methodik zu betrachten. Daher werden im Folgenden solche Methoden charakterisierend beschrieben. Die dieser Gruppe zuordenbaren Methodiken von Roßgoderer und Hildebrand wurden bereits vorgestellt, sodass diese in der Bewertung berücksichtigt werden, aber nachfolgend nicht nochmals beschrieben werden.

Die VDI-Richtlinien 2860 und 2411 beschreiben alle Funktionen und Teilfunktionen, die einen Materialfluss bewirken. Dabei erfolgt beginnend bei den drei Funktionen Handhaben, Lagern und Fördern eine Klassifizierung bis hin zu Elementarfunktionen. Ein wesentliches Merkmal der Richtlinien ist die symbolische Darstellung der Funktionen (VDI-Richtlinie VDI 2860, VDI-Richtlinie VDI 2411).

Die Normen DIN 8580 bis DIN 8593 wurden zur Klassifizierung der Fertigungsverfahren entwickelt und stellen somit eine umfassende, hierarchische Gliederung dieser dar. Dazu zählen beispielsweise das Umformen (DIN 8582 und DIN 8583 bis DIN 8587), das Spanen (DIN 8589) und das aufgrund der Fokussierung der Arbeit hervorzuhebende Fügen (DIN 8593).

Rockland entwickelt eine Methodik, die der Flexibilisierung in der automatischen Teilebereitstellung dient. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der systematischen Strukturierung der Bezeichnungen von Teilfunktionen innerhalb der automatischen Teilebereitstellung. Die bestehenden VDI-Richtlinien eignen sich seiner Ansicht nach nicht für seine Aufgabenstellung zur Klassifizierung der Funktionen. Daher entwickelt er entsprechend den Anforderungen an seine Methodik eine eigene, detailliertere Beschreibung auf Basis der VDI-Richtlinie 2860 inklusive einer entsprechenden Symbolik (Rockland 1994).

Für die Betrachtung von Ressourcen im Controlling entwickelt Fiedler eine Methodik, die sich auf die Projektplanung, -steuerung und -kontrolle konzentriert. Als Ressourcen werden von ihm Mitarbeiter, Material und Sachmittel definiert, wobei er sich hauptsächlich auf die Mitarbeiter fokussiert. Aus seiner Sicht bedürfen die Betriebsmittel keiner besonderen Planung. Daher steht für ihn auch der personalbezogene Kapazitätsausgleich im Vordergrund und die Beschreibung beziehungsweise Klassifizierung von Ressourcen erfolgt auf übersichtliche Weise. Die Methodik ist allerdings nicht nur auf ein Projekt begrenzt, sondern soll einer projektübergreifenden Koordination dienen (Fiedler 2005).

Eine ähnliche Methodik entwickelt Aichele mit seinem intelligenten Projektmanagement, bei dem die Ressourcenplanung im Rahmen des Projektdesigns erfolgt. Dazu gehört die Gestaltung der strukturellen und statischen Charakteristika von Projekten, zu denen auch die Projektressourcen zählen. Die Gruppe der Projektressourcen beinhalten nach Aichele neben

dem Personal, auf das er sich konzentriert, die Budgetierung und Finanzen, Sachmittel, Werkzeuge und Tools (Aichele 2006).

Die Methodik von Jodlbauer konzentriert sich auf die Ressourcenplanung im Rahmen des Manufacturing Resource Planning (MRPII) und der Materialplanung über ein Material-Requirement-Planning-System (MRP). Er erstellt verschiedene Berechnungsverfahren, die im Rahmen des MRP die Kapazitätsplanung hinsichtlich der Zuordnung von Material und Maschinen (bzw. Mitarbeiter, Werkzeuge) unterstützt. Im Kontext des MRPII zielt seine Methode darauf, in der Lang-, Mittel- und Kurzfristplanung die Programm- und Absatzplanung bzw. einen Kapazitätsabgleich durchzuführen. Bei der Betrachtung von Ressourcen werden fünf Gruppen unterschieden (Materialien, Betriebsstoffe, Anlagen, Werkzeuge, Menschen) (Jodlbauer 2008).

In dem Ansatz von Fresner u.a. liegt der Schwerpunkt auf der Betrachtung der Ressourceneffizienz in der Produktion bei der die Nachhaltigkeit im Vordergrund steht und eine sogenannte „Cleaner Production“ angestrebt wird. Der Begriff Ressourcen muss im Kontext des Ansatzes von Fresner u.a. differenziert betrachtet werden, da hierbei nicht Produktionsmittel und Maschinen im Fokus stehen, sondern darunter Energie und Rohstoffe verstanden werden. Daher kann dieser Ansatz nicht unmittelbar Inhalte für die hier zu entwickelnde Methodik liefern. Ein wesentlicher Baustein des Ansatzes ist die Produktplanung, die die Rohstoffe auch vor dem Hintergrund des Recycling und der Wiederverwendung betrachtet. Das Ziel ist dabei, einen prozessintegrierten Umweltschutz zu erreichen und gleichzeitig die Kosten zu senken (Fresner, Bürki, Sittel 2009).

3.3.3 Bewertung

In Anlehnung an die Bewertung der Planungssystematiken werden die Beschreibungsmethoden teilweise mit den gleichen aber auch weiteren charakterisierenden Kriterien diskutiert.

Kriterien

Die Kriterien, die in beiden Bewertungen Verwendung finden, werden im Folgenden aufgezählt: manuelle, hybride sowie automatische Montage, Flexibilität, Wandlungsfähigkeit, modulare Elemente/Montage, rechnergestützte Methode, Lebenszyklusbetrachtung, Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen und die Kostenbetrachtung. Anschließend werden nun die zusätzlichen Kriterien knapp beschrieben.

Zur Identifizierung von charakterisierenden Schwerpunkten bei der Beschreibung werden die Methoden zu Beginn hinsichtlich der beschriebenen Ressourcen, wie Betriebsmittel und Anlagen, Personal, Rohstoffe und Material sowie sonstigen Elementen, analysiert.

Zwei wichtige Kriterien zur Charakterisierung von Beschreibungsmethoden vor dem Hintergrund der identifizierten Anforderungen sind die Beschreibung von Prozessen und die Beschreibung von Ressourcen. Dabei ist relevant, ob die Methode dazu geeignet ist, diese zu beschreiben. Dadurch können wichtige Grundlagen identifiziert werden, um eine generische Methode zu entwickeln.

Vor allem bei der Beschreibung von Prozessen und Ressourcen ist der Umgang mit unscharfen Produktinformationen von hoher Bedeutung. Daher werden die Methoden hinsichtlich der frühen Einsetzbarkeit parallel zum Produktentwicklungsprozess betrachtet.

Vor dem Hintergrund unterschiedlicher Lösungsalternativen wird betrachtet, ob auf Basis der Beschreibungsmethode eine Generierung von Produktionsalternativen angestrebt wird. Dazu zählt auch, ob die Methode bei der Generierung und bei der Auswahl unterstützende Wirkung besitzt.

Diskussion der Methoden

Bei der Betrachtung der Methoden hinsichtlich beschriebener Ressourcen zeigt sich, dass die Beschreibung von Betriebsmitteln und Anlagen bei vielen Methoden auf abstrakter oder detaillierter Ebene eine wichtige Rolle spielt. Das Personal wird bei den hier untersuchten Methoden seltener umfangreich betrachtet (bspw. bei Mörtl 2008). Die Rohstoffe und das Material werden vor allem von Methoden, die einen operativen Planungscharakter besitzen, vertiefend analysiert.

Die Beschreibung von sowohl Prozessen als auch Ressourcen mit derselben Planungssystematik wird nur von wenigen Autoren mit ausführlicher Tiefe dokumentiert (bspw. Westkämper 2006d; Loferer 2002; Trommer 2001).

Unscharfe Produktinformationen werden von mehreren Autoren thematisiert, wobei unterschiedliche Methoden zu deren Handhabung eingesetzt werden. So werden neben der öfters dazu eingesetzten iterativen Vorgehensweise selten mathematische Verfahren angewandt, öfters jedoch die planerischen Fähigkeiten des Menschen genutzt (vgl. bspw. Müller 2008; Loferer 2002; Trommer 2001; Fallböhmer 2000).

Die Generierung von Produktionsalternativen unter Berücksichtigung der jeweiligen Beschreibungsmethode wird von mehreren Autoren angestrebt. Sie unterscheiden sich dabei im Betrachtungsumfang und in der Abstraktionsebene der Beschreibung (bspw. Müller 2008; Rudolf 2007; Knoche 2005).

Die verschiedenen Ausprägungen des Automatisierungsgrads werden bei den älteren Methoden meist mit dem Fokus auf die manuelle Montage berücksichtigt (bspw. Bullinger, Ammer 1986; Eversheim, Witte, Peffekoven 1981). Eine differenziertere Betrachtung mit häufigerer Einbeziehung hybrider Aspekte erfolgt im Wesentlichen bei den neueren Methoden (bspw. Rudolf 2007; Jonas 2000).

Flexibilität und Wandlungsfähigkeit bilden vor allem in neueren Veröffentlichungen einen besonders relevanten Rahmen für die Forschungsansätze. Die Erreichung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Produktion ist für einige der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten, wobei diese durch Entwicklung von Methodiken in individuellen Themenbereichen erzielt wird (bspw. Mörtl 2008; Westkämper 2006d; Loferer 2002).

Die modulare Montage (modulare Elemente) spielt bei den Planungssystematiken eine geringe, bei den Ressourcenplanungen im weiteren Sinne quasi keine Rolle. Von den untersuchten Methoden sind die Entwicklungen von Müller, Westkämper und Loferer die

wenigen, die modulare Montageelemente vor dem Hintergrund des hier angestrebten Betrachtungsbereiches sinnvoll berücksichtigen können (Müller 2008; Westkämper 2006d; Loferer 2002).

Die Rechnerunterstützung innerhalb von Methoden findet in den neueren Arbeiten grundsätzlich sehr häufig Anwendung, wobei sie sich meist auf einzelne Aufgaben der Methode konzentriert, für die deren Einsatz besondere Vorteile erschließt. Dabei hat die Rechnerunterstützung unterschiedliche Ausprägungen, die neben der direkten Planungsunterstützung auch erweiternde Planungsinhalte wie Simulationen oder die VR abdecken (vgl. Müller 2008; Knoche 2005; Westkämper 2004a; Dieckhoff 1995).

Die Lebenszyklusbetrachtung wird neben der bereits genannten Methodik von Hildebrand (siehe Kapitel 3.2.3) nur selten und nicht vor dem Hintergrund modularer Systeme durchgeführt. Neben Fallböhmer sei auf den globalen Ansatz von Fresner verwiesen, der vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit eine „Cleaner Produktion“ anstrebt und in diesem globalen Kontext den Lebenszyklus vor allem hinsichtlich Recycling und Wiederverwertung betrachtet (Fresner, Bürki, Sittel 2009; Fallböhmer 2000).

Die Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen als Bestandteil der Methodiken ist bei den untersuchten Inhalten nur schwach ausgeprägt. Zwar werden teilweise die Rahmenbedingungen für die jeweilige Methode beschrieben, eine Methode zur systematischen Analyse zukünftiger Entwicklungen liegt jedoch nicht vor.

Eine Kostenbetrachtung innerhalb der Planungssystematiken beziehungsweise Beschreibungsmethoden als Grundlage für eine Bewertung oder Auswahl von alternativen Lösungen erfolgt in wenigen Methoden. Eine Berücksichtigung der Veränderung der Kosten über den Lebenszyklus vor dem speziellen Hintergrund modularer Systeme wird in den untersuchten Methoden nicht angestrebt (vgl. Konold, Reger 2009; Knoche 2005; Bullinger, Ammer 1986).

3.4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich aus der Diskussion forschungsrelevanter Ansätze festhalten, dass es verschiedenste Ansätze gibt, die einzelne der für diese Methodik relevanten Aspekte berücksichtigen oder auch teilweise vertiefend betrachten. Daher kann auf diesen Arbeiten als Grundlage für die zu entwickelnde Methodik bei den jeweils relevanten Fragestellungen aufgebaut werden. Zur Erfassung und zum Umgang mit Produktinformationen liegen beispielsweise ausreichend Methoden vor, die entsprechend den spezifischen Erfordernissen der hier vorliegenden Aufgabenstellung angepasst werden können. Dazu lässt sich festhalten, dass neben den Methoden auch der Einsatz von erfahrenen Planern den Umgang mit unscharfen Produktdaten ermöglichen kann.

Die Beschreibung von Ressourcen und Prozessen wird nur in wenigen Methodiken mit Montagebezug vertiefend und nur für einen sehr begrenzten Anwendungsbereich behandelt, weshalb weitere Methodiken betrachtet wurden. Hinsichtlich dieser Fragestellung kann zudem festgehalten werden, dass in den betrachteten Produktmodellen keine

Beschreibungsmethode enthalten ist, die in dieser Arbeit verwendet werden könnte. Aus der Betrachtung aller Ansätze bleibt festzuhalten, dass die existierenden Ansätze nicht direkt für die hier thematisierte Fragestellung verwendet werden können. Es fehlt ein entsprechend umfassendes, fähigkeitsbasiertes Beschreibungsmodell mit einer für alle relevanten Ressourcen eines holistischen Montagesystemmodells im Kontext modularer Montage anwendbaren Systematik. Die thematisch angrenzende Literatur kann partiell in Teilaspekten bei der Entwicklung eines Beschreibungsmodells berücksichtigt werden, zum Beispiel Arbeiten der Universität Stuttgart und der Technischen Universität München. Dazu zählen beispielsweise die Methodiken von Müller und diejenigen von Westkämper (Westkämper 2006e; Müller 2008). Daher ist eine generische Beschreibungssystematik zur Klassifizierung und Gliederung mit entsprechendem Abstraktionsgrad der Beschreibungsbegriffe, die als Grundlage für die automatisierte Alternativengenerierung dienen, auf Basis von Fähigkeiten zu entwickeln.

Die Unterstützung bei Planungsaufgaben durch automatisierte Schritte und somit in Form der Rechnerunterstützung wird in vielen und vermehrt in neueren Arbeiten eingesetzt. Entsprechend der Anforderung sie in der zu entwickelnden Methodik zur Alternativengenerierung einzusetzen, wird sie bei den untersuchten Methodiken für die jeweils spezifischen Fragestellungen verwendet. Auf die hier definierte Aufgabe bezogen bedeutet dies, dass die Rechnerunterstützung für eine automatisierte Vorgehensweise im Kontext der Anwendung der zu entwickelnden Beschreibungssystematik eingesetzt werden soll. Diese soll dabei die Voraussetzung erfüllen, die Komplexität und den Umfang der Methodik in einem beherrschbaren Rahmen zu halten und dadurch den Planer in den Prozess integrieren.

Die Betrachtung des Lebenszyklus modularer Montagesysteme oder modularer Fabrikelemente wird selten thematisiert, vor allem bei Hildebrand und Slama (Hildebrand 2005; Slama 2004). Verschiedene Aspekte der untersuchten Methodiken können in die zu entwickelnde Methodik einfließen und vor dem Hintergrund der Identifikation möglicher zukünftiger Entwicklungen in einer mehrdimensionalen Bewertung verstärkte Beachtung finden.

Zur Berücksichtigung relevanter zukünftiger Entwicklungen werden in den untersuchten Methodiken meist einfache Abschätzungen oder teilweise auch die Szenariotechnik angewendet. Krüger ist dabei der einzige, der die Szenariotechnik im Montagekontext (zur Kapazitätsplanung) einsetzt (Krüger 2004). In den Bereichen Grobplanung und modulare Montagesysteme wurden hierzu keine Arbeiten identifiziert. Grundsätzlich stehen quantitative und qualitative Methoden für diese Aufgabe zur Verfügung (bspw. Expertenbefragungen, Zukunftswerkstatt, Regressionsmethode oder Trendprognose), wobei die Szenariotechnik zu den qualitativen gezählt wird. Die Szenariotechnik ist für die zu entwickelnde Methodik am besten geeignet, da die anderen Methoden hinsichtlich der Erstellung von langfristigen Entwicklungsverläufen unter Berücksichtigung wechselnder Einflussfaktoren und der Handhabbarkeit bezogen auf Umfang und Komplexität insgesamt

nicht die gleiche Leistungsfähigkeit besitzen. Die Szenariotechnik muss allerdings auf die spezifischen Aspekte der zu entwickelnden Methodik angepasst werden.

Die zusätzliche Funktionalität zur Integration der oben genannten Aspekte in eine mehrdimensionale Bewertungssystematik kann die zuvor betrachteten Methodiken ebenfalls als Grundlage nutzen. So muss sich beispielsweise der bedeutende Aspekt der Kostenvorteile modularer Systeme über den Lebenszyklus hinweg in einer entsprechenden Kostenrechnung widerspiegeln.

4 Entwicklung einer Planungsmethodik für modulare Montagesysteme

Durch die Analyse von bestehenden Ansätzen im Bereich der Montageplanung wurde deutlich, dass keine Methodik existiert, die die aktuellen Herausforderungen bezüglich der besonderen Anforderungen der Planung modularer Montagezellen unter Berücksichtigung der Vorteile der Modularität über den Lebenszyklus aus Sicht des Anlagenherstellers erfüllt. Außerdem wurde deutlich, dass zur Erarbeitung einer geeigneten Lösung teilweise auf den Erkenntnissen forschungsrelevanter Ansätze aufgebaut werden kann. Daher wird in diesem Kapitel das Konzept zur Erreichung der Zielsetzung im Detail erarbeitet. Hierbei werden zuerst die Prämissen definiert, das Gesamtkonzept entwickelt und die Interdependenzen der Teilkonzepte angesprochen sowie das Gesamtkonzept in Relation zum Planungsablauf von Konold und Reger (vgl. Kapitel 3.2) beschrieben. Anschließend werden die Teillösungen im Einzelnen konzipiert. Dabei wird zuerst auf die Entwicklung von Szenarien eingegangen, um anschließend eine generische Beschreibungsmethode für Prozesse und Ressourcen zu entwerfen, wobei auf die spezifischen Belange und Voraussetzungen zur vollständigen Deskription eben dieser eingegangen wird. Des Weiteren wird die Erzeugung von alternativen Lösungen während der Konfiguration modularer Montagezellen konzeptionell dargestellt und damit die Grundlage für eine spätere softwaregestützte Alternativengenerierung geschaffen. Abschließend wird eine Bewertungssystematik entwickelt, welche auf Basis von entwickelten Szenarien eine beurteilende Beschreibung der generierten unterschiedlichen Konfigurationen ermöglicht. Hierzu wird der Gesamtablauf dargestellt und anschließend ein Kostenmodell entwickelt sowie die Betrachtung bewertungsrelevante Aspekte erarbeitet, um abschließend ein Gesamtbewertungsschema zu entwerfen.

4.1 Prämissen

Zur präziseren Beschreibung der Rahmenbedingungen für die Entwicklung einer Planungsmethodik für Anlagenhersteller zur fähigkeitsbasierten Konfiguration modularer Montagesysteme werden im Folgenden Prämissen und Annahmen definiert. Dabei ist festzuhalten, dass die variantenreiche Serienproduktion die Grundlage für die weiteren Betrachtungen darstellt (vgl. Kapitel 2.6.1). Hierzu sollen Stückzahlbereiche von mehreren Zehntausend bis zu mehreren Hunderttausend pro Jahr fokussiert werden. In diesem Bereich finden die meisten modularen Montagesysteme ihre Anwendung, nicht zuletzt weil dort ihre Vorteile am stärksten sichtbar werden (vgl. Lotter 2006d, S. 193, 204-207; Lotter 2006b, S. 180). Die Entwicklung der Produkte über den Lebenszyklus eines Montagesystems bildet die Basis für die Erarbeitung von Stückzahlszenarien. Hierbei werden auch Produktvarianten und Nachfolgeprodukte beachtet.

Außerdem wird von Produkten ausgegangen, welche aufgrund ihrer Spezifika in Volumen und Gewicht klassischer Weise auf Montagesystemen produziert werden, die die gleichen Anwendungsfelder wie modulare Systeme aufweisen. Referenz seien Produkte mit bis zu 20 kg und einer Werkstückträgergrundfläche von ca. 300 mm x 400 mm. Oftmals sind dies

aber auch Produkte mit größerer Grundfläche (bspw. 600 mm x 800 mm) und bis zu 150 kg (Lotter 2006b, S. 180; Hesse 2006a, S. 204). Durch diese Definition wird deutlich, dass grundsätzlich Prozesse auf Makromontageebene betrachtet werden. Wobei dadurch eine mögliche spätere Anwendung des Modells auf die Mikroebene, nach entsprechender Anpassung, nicht ausgeschlossen werden soll. Ein sehr wichtiger, wesentlich zu beachtender Punkt ist die Unschärfe des Produkts (vgl. Kapitel 1.2 und 2.4). Durch die Notwendigkeit des frühen Planungszeitpunktes, bezogen auf den Produktentwicklungsprozess, kann nicht von einer vollständig ausgearbeiteten Konstruktion ausgegangen werden (vgl. Kapitel 2.6.2 und 3.1). Die Informationen über das Produkt liegen in einer ungenauen und unvollständigen Art vor. Dabei ist festzuhalten, dass die Entwicklung des Produkts soweit fortgeschritten ist, dass die Erzeugnisstruktur des Produkts bereits ausreichend präzise beschreibbar ist (vgl. Kapitel 2.6.2).

Bei Betrachtung des Montageplanungsablaufes ist festzuhalten, dass dieser aus Sicht des Anlagenherstellers gesehen wird und somit die Anforderungen an die Methodik auf Aufgaben der Grobplanungsphase zielen in der der Anlagenhersteller maßgeblich involviert ist. Die Schwerpunkte liegen daher auf der fähigkeitsbasierten Entwicklung von Konfigurationen für Montagezellenalternativen und damit der zugehörigen Ausbringungsmengen, aber auch auf der Bewertung und Auswahl von Lösungsvarianten inkl. der zugehörigen Kostenbetrachtungen. Für das Bilden der Ablaufstruktur und der Erstellung eines Vorranggraphen stehen etliche Methoden zur Verfügung, sodass auf diese unter besonderer Berücksichtigung der unscharfen Informationen zum Produkt zurückgegriffen werden kann. Diese Kenntnisse über die Erstellung von Ablaufplan und Vorranggraph dienen als Ausgangsbasis für den Kern der zu entwickelnden Methodik. Die Feinplanung erfolgt erst nach Annahme des Angebotes durch den Kunden mit stärkerer Integration desselben. Deshalb und da bei der Feinplanung auf Inhalte bestehender Ansätze zurückgegriffen werden kann, wird eine ausführliche Betrachtung derselben in der vorliegenden Methodik nicht durchgeführt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass durch die im Folgenden zu entwickelnde Methode für die Feinplanung beschleunigende Faktoren entstehen und somit auch in dieser Phase Vorteile entstehen.

Bei den zu examinierenden Ressourcen sollen entsprechend dem definierten Betrachtungsbereich und dem Verständnis für den Begriff Montagesystem alle Elemente eines modularen Montagesystems Beachtung finden, wobei sich der Hauptfokus auf eine Montagezelle und deren Stationen und Module richtet. Die Betrachtung mehrerer Zellen als Montagesystem würde nur den Umfang nicht aber den Inhalt der Methodik erweitern, wobei die Aufgaben der indirekten Bereiche eines Montagesystems betrachtet werden müssen. Ein spezieller Schwerpunkt liegt dabei auf den für die Durchführung der Montage sehr relevanten Prozessmodulen. Bei der Planung von Montagezellen werden auch die indirekten Bereiche eines modularen Montagesystems durch die später beschriebene Kostenbetrachtung mit einbezogen (Kapitel 4.7.2). Die Kostenbetrachtung konzentriert sich dabei auf den eigenen Betrieb von Montagezellen. Betreibermodelle stehen nicht im Fokus der Untersuchungen. Grundsätzlich wird bei der Betrachtung angenommen, dass es sich um verkettbare Elemente handelt, wobei Modul- und modulare Komplettsysteme den Rahmen bilden. Die

Auswirkungen der eingesetzten Technologie innerhalb der betrachteten Module (mit dem Schwerpunkt Prozessmodule) soll durch die zu entwickelnde Beschreibungssystematik Beachtung finden. Sowohl die Technologie als auch der damit eng verbundene Automatisierungsgrad werden über die Prozesszeiten und Kosten berücksichtigt, wobei die technische Realisierbarkeit der Prozesse vorausgesetzt wird.

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Qualität, die die Kunden heutzutage an Montagesysteme haben, wird es bei den unterschiedlichen Konfigurationen zu keinen signifikanten Unterschieden bezüglich dieses Kriteriums kommen. Vielmehr spiegeln die Kosten zur Sicherstellung der hohen Qualtitätsansprüche die Differenzen von Konfigurationen in diesem Gesichtspunkt wider und werden daher als Bestandteil der Kostenbetrachtung gesehen. Mögliche Unterschiede beim Aspekt montagesysteminterne Logistik werden ebenfalls bei der Betrachtung durch deren Kosten als Teil indirekter Bereiche mit einbezogen. Die Auslegung eines Logistikkonzepts erfolgt in Unternehmen mindestens auf Segmentebene. Daher kann auf dieses kein großer Einfluss genommen werden.

4.2 Gesamtkonzept

Zur Entwicklung der Gesamtlösung ist eine Erarbeitung von Ergebnissen für die wesentlichen Fragestellungen in Form von Teillösungen notwendig. Das Gesamtkonzept der Lösung wird die Grundlage für das richtige Zusammenspiel durch Sicherstellen des gemeinsamen Kontextes und der Schnittstellen dieser einzelnen Bausteine bilden. Aufbauend auf den Feststellungen in Kapitel 3 und den auf der Aufgabenstellung basierenden Anforderungen an die Methodik (vgl. Kapitel 2.6.2) sowie der Eingrenzung des Betrachtungsbereiches erfolgt im Folgenden die Entwicklung dieses Gesamtkonzepts.

Als erster Schritt der Methodik steht neben der Beschaffung von Eingangsinformationen die Entwicklung von schlanken aber richtungsweisenden Szenarien. Dies dient dazu, mögliche zukünftige Veränderungen von Einflussfaktoren auf ein Montagesystem zu erarbeiten und wesentliche Merkmale unterschiedlich möglicher, zukünftiger Entwicklungen in Szenarien festzuhalten. Dabei werden die Szenarien sehr eng, in Expertenworkshops, mit dem Kunden zusammen erarbeitet. Bei der Szenarienentwicklung wird ein Hauptaugenmerk auf die mögliche Entwicklung der Stückzahlen des betrachteten Produktes und dessen Varianten gelegt. Die damit erarbeiteten Informationen unterstützen zwar auch die Alternativengenerierung, stellen allerdings vor allem die Grundlage für die szenariobasierte Bewertungssystematik dar.

Entsprechend Abbildung 4-1 bildet die Beschreibungsmethode in Form eines Fähigkeitsmodells die zweite Teillösung und den ersten Schwerpunkt des Gesamtkonzepts. Dazu gehört zum einen die Deskription der vom Produkt determinierten Prozesse und zum anderen die Deskription der Montageressourcen auf Basis derselben Beschreibungsmerkmale. Hierbei bildet das für diese beiden Aspekte generische Fähigkeitsmodell die wesentliche Grundlage. Dabei muss dieses die zur Montage des Produkts notwendigen Prozesse auf gleiche Art und Weise beschreiben, wie die zur

Ausführung von Montageprozessen möglichen Ressourcen. Dies soll die später darauf aufbauende Erstellung von Konfiguration von Montagezellen ermöglichen.

Diese Generierung von alternativen Konfigurationen von Montagezellen erfolgt unter Berücksichtigung der Variationsmöglichkeiten in verschiedenen Bereichen wie der Szenarien (Variation der Eingangsgrößen), der Reihenfolge von Fähigkeiten und der einzusetzenden Ressourcen. Letztgenannter Punkt baut hierfür auf der Auswahl möglicher Ressourcen entsprechend den benötigten Prozessen bzw. den diese beschreibenden Fähigkeiten auf. Dem Planer werden dabei nur die für die ausgewählte Fähigkeit möglichen Ressourcen aus dem Angebotspool des Herstellers offeriert, aus denen er anhand von vorhandenen Informationen eine Vorauswahl trifft. Auf dieser Grundlage soll die Generierung von Konfigurationsalternativen durchgeführt werden, wobei Unterschiede hauptsächlich durch die Anordnungsstruktur und der Verwendung von Ressourcen entstehen. Nach einer Plausibilitätsprüfung durch den Planer erfolgt die Bewertung.

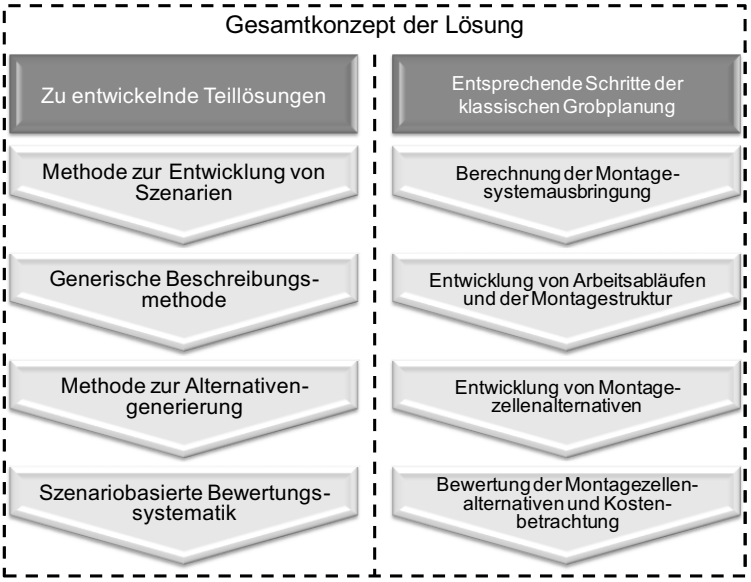


Abbildung 4-1 Gesamtkonzept der Lösung

Der Bewertungssystematik kommt als zweiter Schwerpunkt der Gesamtmethodik besondere Bedeutung zu, da sie szenariobasiert die Aspekte von Lebenszyklusbetrachtungen inklusive einer spezifischen Kostenbetrachtung beinhaltet. Um eine der früheren Phase „Aufgabenstellung“ Rechnung tragende Systematik zu entwickeln muss auf mögliche Entwicklungen der Rahmenbedingungen der zu planenden Montagezelle eingegangen werden. Dazu wird auf die zu Beginn der Planung mit dem Kunden entwickelten Szenarien zurückgegriffen. Dementsprechend werden die Kriterien zur Bewertung von Alternativkonfigurationen auch an den Rahmenbedingungen der Szenarien orientiert. Ein

wesentlicher Punkt zur Auswahl von Konfigurationen stellen die Kosten dar. Zur Sicherstellung einer nachhaltigen, der Lebenszyklusbetrachtung entsprechenden Kosteneinschätzung wird ein spezielles Kostenmodell für modulare Montagesysteme aufgebaut.

4.3 Einordnung des Gesamtkonzepts

Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, orientiert sich die Gesamtmethodik am Planungsablauf nach Konold und Reger. Daher wird im Folgenden die Einordnung des Gesamtkonzepts in diesen beschrieben und dadurch werden zudem die Spezifika der Gesamtmethodik verdeutlicht.

Insgesamt handelt es sich bei dem Vorgehen nach Konold und Reger um ein analytisches Vorgehen von „außen nach innen“ (Kettner, Schmidt, Greim 1984, S. 10), bei dem Schritt für Schritt die Planungsaufgabe detaillierter bearbeitet wird. Bei Betrachtung der Aufgaben des Anlagenherstellers in der Grobplanungsphase wird festgestellt, dass diese vom zu produzierenden Produkt ausgehend beginnen. Dies bedeutet, dass das Gesamtkonzept der Methodik in die analytische Vorgehensweise nach Konold und Reger eingebunden wird, sie selbst aber im Kern, beginnend bei den vom Produkt abgeleiteten, durchzuführenden Prozessen, eine synthetische Vorgehensweise aufweist.

Insgesamt tangiert das Gesamtkonzept die Phase der Aufgabenstellung, um sich darauf aufbauend auf die Phase der Grobplanung zu fokussieren (Abbildung 4-2). Dabei wird die Szenario-Technik verwendet, um zukünftige Entwicklungen in der Planung zu berücksichtigen und eine Bewertung aufbauend auf der Lebenszyklusbetrachtung zu ermöglichen. Als Ergebnis der Methodik werden alle Informationen bereitgestellt, die zum Erstellen eines detaillierten Angebotes dienen. Die nachfolgende Phase der Feinplanung wird erst nach Annahme des Angebots durch den Kunden durchgeführt und ist daher nicht Teil der im Folgenden entwickelten Methodik.

Durch die Betrachtung des Planungsablaufs aus Sicht eines Anlagenherstellers konzentriert sich diese Methodik im Rahmen der Phase der Aufgabenstellung auf die Beschaffung von Planungsdaten und der Analyse der momentan existierenden Situation. Die daraus entstehenden Daten stellen die Eingangsinformationen dar. Dies beinhaltet hauptsächlich Informationen zum Produkt, welches in dieser frühen Phase noch nicht präzise beschreibbar ist (vgl. Kapitel 3.1). Diese vorhandene Unschärfe ist ein wesentliches Merkmal solcher Planungsprozesse und wirkt sich direkt auf die Möglichkeiten in der Grobplanungsphase aus. So kann der Anlagenhersteller fast nie auf konkrete CAD-Daten zurückgreifen und muss sich daher intensiv mit dem geplanten, unscharf beschriebenen Produkt auseinandersetzen und mit den Ansprechpartnern beim Kunden abstimmen. Die Situationsanalyse wird entsprechend der Vorgehensweise nach Konold und Reger bei bestehenden Montagesystemen durchgeführt, wenn durch ein entsprechendes Erzeugnisprogramm ein Nutzen für die Planung ersichtlich ist (Konold, Reger 2009, S. 36f).

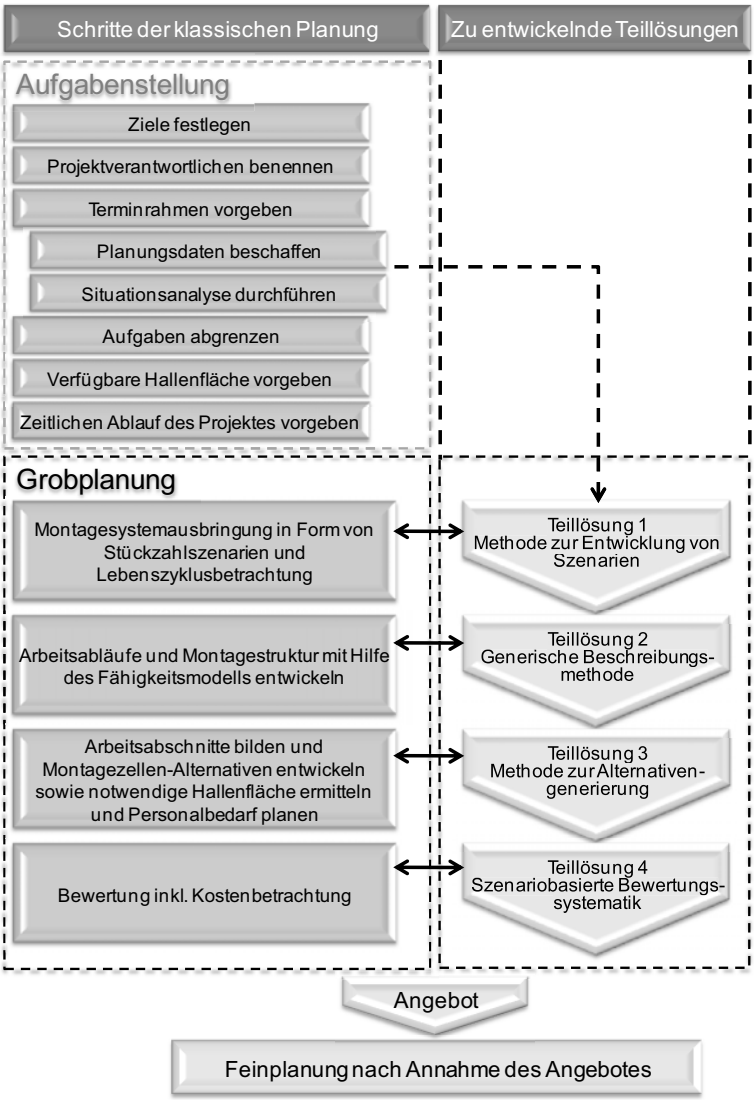


Abbildung 4-2 Einordnung der Methodik

Die durch die Beschaffung der Planungsdaten und Durchführung der Situationsanalyse erarbeiteten und für die Methodik notwendigen Informationen werden durch die weiteren in der Phase der Aufgabenstellung erarbeiteten Daten ergänzt. Diese Eingangsinformationen dienen der Grobplanungsphase und der dazu anzuwendenden Szenariomethode als Basis.

Auf der Grobplanungsphase liegt das Hauptaugenmerk des Gesamtkonzepts der Lösung, da hier die wichtigsten Entscheidungen bezüglich der neuen Montagezelle getroffen werden und sie als „die Phase des Anlagenherstellers“ bezeichnet werden kann. Den ersten Schritt stellt klassischer Weise die Berechnung der Montagesystemausbringung dar, welche in diesem Konzept um weitere Aspekte erweitert wird. Dies bedeutet, dass über die mengenmäßige Berechnung der Montagesystem-Ausbringung in Form einer einzigen Zahl, die der maximal erforderlichen Stückzahl entspricht, hinaus gegangen wird und vor allem die Aspekte der Lebenszyklusbetrachtung im Rahmen von Szenarien wahrgenommen werden (siehe Kapitel 4.4). Wie in Kapitel 4.2 beschrieben werden diese Szenarien zur Darstellung möglicher Stückzahlentwicklungen über die Zeit und der Variantenentwicklung erarbeitet. Um dieses Teilkonzept der Gesamtlösung umsetzbar zu gestalten, muss auf Seiten des Anlagenherstellers entsprechendes Methoden-Know-how vorhanden sein und eine enge Zusammenarbeit mit dem Kunden realisiert werden. Die Ergebnisse dienen neben der Erarbeitung der Montagezellen-Alternativen hauptsächlich dem letzten Schritt der Grobplanungsphase, der Bewertung.

Die Entwicklung der Arbeitsabläufe und damit der Montagestruktur stellt den zweiten Schritt in der Phase der Grobplanung dar. Dabei werden aus den Informationen, die zum Produkt vorliegen, die Arbeitsabläufe abgeleitet und die einzelnen Prozessschritte anhand des Fähigkeitsmodells und der darin enthaltenen Beschreibungsmerkmale dargestellt. Hierdurch wird eine schnelle Zuordnung zu den Ressourcen ermöglicht. Die Ressourcen sind größtenteils über die standardisierte Systematik bereits beschrieben (Kataloggedanke), können aber auch in dieser Phase neu beschrieben werden (erweiterungsfähig). Hierbei wird auch das Wissen des Planers und damit seine Erfahrung genutzt, wodurch eine aufwandsarme Planung ermöglicht wird, welche zu einem späteren Mehrwert für den Kunden führt. In diesem Planungsschritt entstehen bereits alternative Ausprägungsmöglichkeiten, welche im nächsten Schritt wiederum zu Montagezellen-Alternativen führen.

Den nächsten Schritt der Planung bildet die Entwicklung von Arbeitsabschnitten und der Montagezellen-Alternativen, wobei durch die zuvor durchgeführte Prozess- und Ressourcenbeschreibung dem Planer eine umfangreichere Planung ermöglicht wird. Die Bildung von Montageabschnitten erfolgt bei entsprechend umfangreicher Aufgabenstellung nach den Prinzipien der Arbeitsteilung, Mengenteilung oder Baugruppen- und Variantenteilung. Die Generierung von Alternativen basiert auf Informationen zum Stückzahlbereich, der Laufzeit des Erzeugnisses sowie der Typen- und Variantenvielfalt, die durch die Szenariomethode bereitgestellt werden. Des Weiteren übernehmen die für die Planung zur Verfügung stehende Zeit, der Arbeitsinhalt der Baugruppe bzw. des Erzeugnisses, der Schwierigkeitsgrad einzelner Vorgänge sowie der Erzeugnistransport eine wichtige Rolle. Vor allem beim Arbeitsinhalt und beim Schwierigkeitsgrad wird der Planer durch die hier erarbeitete Methodik stark unterstützt. Durch die besonderen Eigenschaften modularer Systeme (v.a. Standardisierung) erfolgt die Ermittlung der notwendigen Hallenfläche und des Personalbedarfes auf Basis der umfangreich vorhanden Informationen zu den einzelnen Systemelementen.

Im letzten Schritt der Grobplanungsphase wird die Bewertung der Alternativen mit integrierter Kostenbetrachtung durchgeführt. Dabei wird wie in Kapitel 4.2 beschrieben auf die mit der Szenariomethode erarbeiteten Inhalte zurückgegriffen. In diesem Schritt werden die beiden Planungsschritte nach Konold und Reger „Lösungsalternativen bewerten und auswählen“ sowie „Projektkalkulation und Wirtschaftlichkeitsrechnung durchführen“ in einer Methode für den Anlagenhersteller zusammengefasst und um neue Aspekte ergänzt.

4.4 Entwicklung von Szenarien

Bei einer lebenszyklusorientierten Montageplanung steht neben den stetigen Anpassungen vor allem die Adaption durch Rekonfiguration einer Montagezelle in Form von mehreren Ausbaustufen im Vordergrund, um einen wirtschaftlichen Betrieb bei schwankenden Anforderungen zu erreichen (vgl. Sesterhenn 2003, S. 17). Dabei besteht die Aufgabe darin, auf die korrekte Art und Weise, mit dem richtigen Umfang und zur richtigen Zeit bezüglich des Planungshorizonts eine Montagezelle adaptionsfähig zu gestalten (Wirth 2000, S. 35-45). Die Anpassungsbedarfe werden direkt aus den zu montierenden Produkten determiniert und müssen ex ante identifiziert werden, um eine prospektive Planung und Adaption der Montagezelle zu ermöglichen. Zur Sicherstellung einer solchen Planung werden von Produkt und Markt die wesentlichen lebenszyklusorientierten Anforderungen an die Montage abgeleitet. Hierzu wird die Szenario-Methode verwendet, wobei die Entwicklung von bspw. Stückzahlen, Varianten und Ressourcenpreis betrachtet wird. Die Durchführung der Szenario-Methode (vgl. Kapitel 5.1) setzt sich aus der Phase der Aufgaben- und Problemanalyse, die der Beschaffung von Eingangsinformationen dient (vgl. Kapitel 4.3), und der Phasen Einflussanalyse, Trendprojektion, Szenariobildung und Szenario-Transfer, welche direkt der Erarbeitung der Szenarien dienen, zusammen. Insgesamt steht dabei das Ziel im Vordergrund, mögliche spezifische Ereignisse zu bestimmen, welche eine Anpassung der Montage zur Folge haben können. Aufbauend auf diesen Informationen erfolgen im Anschluss an die Szenarienerarbeitung die weiteren Schritte der Planung. Die Szenario-Methode wird auf diese Weise verwendet, um die lebenszyklusorientierten Anforderungen an ein Montagesystem zu erarbeiten. Dazu gehört die qualitative und quantitative Kapazität, welche in der Art und Menge der über den Lebenszyklus zu montierenden Produkte beschrieben wird (vgl. Sesterhenn 2003, S. 56).

Die Methode fokussiert sich dabei auf Szenarien der Stückzahlentwicklung über den Produktlebenszyklus (inklusive möglicher Nachfolgeprodukte), was direkt mit der notwendigen mengenmäßigen Montagesystemausbringung korreliert. Dies begründet sich durch die in Kapitel 1 vorgestellte Analyse, bei der die Auftragsschwankungen und somit die Stückzahlentwicklung als aktuelle Herausforderung identifiziert wurde. Deren hohe Relevanz wird auch durch frühere Arbeiten bestätigt (Sesterhenn 2003, S. 58,7). Bei der Erstellung dieser Szenarien zum Stückzahlverlauf wird der Betrachtungsumfang zur Sicherstellung einer überschaubaren Anzahl an Szenarien mit entsprechender Aussagekraft auf Trend- und Extremszenarien festgelegt (Zäpfel 2000, S. 17). Diese werden im Folgenden als lokale Szenarien von den globalen Szenarien unterschieden. Die Rahmenbedingungen für die Erstellung von lokalen Szenarien, die als Ergebnisse aus den Phasen der Aufgaben- und

Problemanalyse, der Einflussanalyse und der Trendprojektionen entstehen, definieren dabei ein globales Szenario. Die lokalen Szenarien (Trend- und Extremszenarien) spiegeln die Auswirkungen von Veränderungen innerhalb eines globalen Szenarios wider. Dazu zählen beispielsweise alternative Entwicklungen der Stückzahlen auf Basis einer Initialstückzahl (vgl. Aldinger 2009). Bei der Erstellung der Szenarien wird somit der Rahmen für Phasen des Produktlebenszyklus festgelegt. Dadurch wird die Definition der Stückzahlbereiche, die im Rahmen der Alternativengenerierung durchgeführt wird, determiniert. Als Alternativen werden dabei mehrere Konfigurationen bezeichnet, die für bestimmte Stückzahlbereiche geeignet sind sich aber durch ihren Aufbau unterscheiden.

Zur konzeptionellen Beschreibung der Szenario-Methode bei der Anwendung in der Montageplanung werden deren Ausprägungsformen mit Hilfe von neun Dimensionen charakterisiert (vgl. Gausemeier, Fink, Schlake 1996, S. 103ff; Hernández Morales 2002, S. 103-106). Dies dient hauptsächlich der Klärung wesentlicher Fragestellungen der Vorgehensweise und der Zielorientierung bei der Planung. In Abbildung 4-3 werden die neun Dimensionen, die sich in drei Gruppen einteilen lassen, mit ihren Ausprägungen dargestellt.

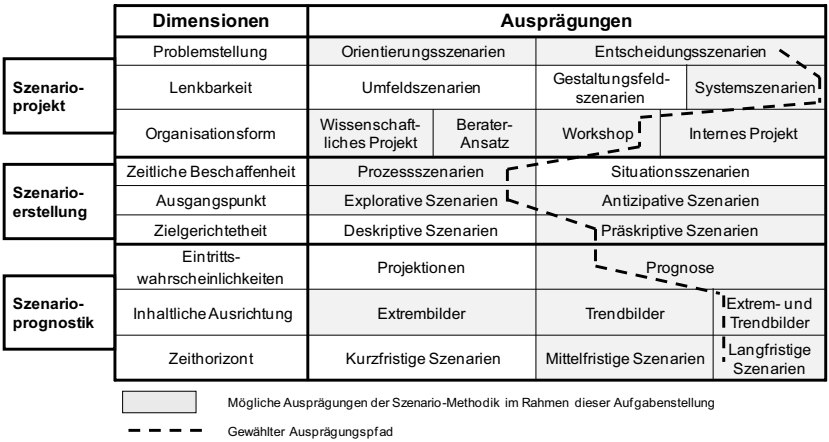


Abbildung 4-3 Ausprägungen der Szenario-Methode
(vgl. Hernández Morales 2002, S. 104)

Die Dimension der Problemstellung besitzt zwei mögliche Ausprägungen, Orientierungsszenarien und Entscheidungsszenarien. Beide sind im Bereich der Montageplanung anwendbar, allerdings dient die Szenario-Methode in diesem Konzept primär als Basis für die spätere Bewertungssystematik. Die Bewertung dient dabei der Entscheidungsfindung, weshalb die Entscheidungsszenarien als Ausprägung der Problemstellung festgelegt werden. Die Lenkbarkeit unterscheidet die Szenarioerstellung nach der Beeinflussbarkeit der Einflussfaktoren. Umfeldszenarien basieren auf nicht lenkbaren, externen Einflussfaktoren, auf die der Planer nahezu keine Einwirkung nehmen kann. Gegensätzlich dazu stehen die Gestaltungsfeldszenarien. Da in der Montageplanung

sowohl lenkbare als auch nicht lenkbare Einflussfaktoren verwendet werden, ist hierbei nur die Anwendung von der Mischform, den Systemszenarien, sinnvoll.

Die Organisationsform eines Szenario-Projektes untergliedert sich in vier verschiedene Projektformen. Bei diesem Konzept der Montageplanung steht der Hersteller im Mittelpunkt und es erfolgen Erstellung und Anwendung der Szenarien im Rahmen von Workshops mit Vertretern des Kunden und des Herstellers. Somit wird in Bezug auf die Organisationsform in dieser Methode ein Workshop-Ansatz angewendet. Insgesamt ist zu beachten, dass das Know-how unterschiedlicher Hierarchieebenen der Unternehmen einfließen kann. Die Dimension der zeitlichen Beschaffenheit unterscheidet zwischen der Beschreibung einer zukünftigen Situation und der Beschreibung einer solchen Situation mit dem Schwerpunkt der Entwicklungspfade zu dieser. Der Fokus dieses Konzepts liegt auf der Entwicklung über den Lebenszyklus und entspricht somit der Ausprägung der Prozessszenarien. Bei der Dimension Ausgangspunkt der Szenario-Erstellung wird zwischen antizipativen (induktive Vorgehensweise) und explorativen Szenarien (deduktive Vorgehensweise) unterschieden. Beide Vorgehensweisen sind in der Montageplanung anwendbar, aufgrund der grundsätzlichen Zukunftsorientierung der Montageplanung werden allerdings im Folgenden die explorativen Szenarien fokussiert. Die Zielgerichtetheit der Szenarien unterscheidet deskriptive Szenarien, basierend auf Kausalitätsbeziehungen, und präskriptive Szenarien, bei denen die Ziele und Werturteile der Planer mit einfließen. In der Grobplanungsphase der Montageplanung mit Betrachtung aus Herstellersicht werden somit präskriptive Szenarien entwickelt, da hierbei Ziele des Kunden und damit der Planer mit einbezogen werden. Bei der Dimension der Eintrittswahrscheinlichkeiten fokussiert sich dieses Konzept auf projektionsorientierte Planung, wobei sie aufgrund der Verwendung von Wahrscheinlichkeiten dem Bereich der Prognosen zuzuordnen ist (vgl. Gausemeier, Fink, Schlake 1996, S. 114). Die Festlegung der Eintrittswahrscheinlichkeiten für die einzelnen Szenarien erfolgt ebenfalls in den oben genannten Workshops. In diesen Workshops können viele Szenarien erarbeitet werden, um eine möglichst große Bandbreite zukünftiger Entwicklungen in die Planung mit einzubeziehen. Anschließend werden wenige Szenarien, diejenigen mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit, als Ausgangspunkt für Bewertung ausgewählt (vgl. Schuh, Wemhöner, Friedrich 2006, S. 130f). Die inhaltliche Ausrichtung trennt zwischen Extrem- und Trendbildern sowie einer Form, die beide Aspekte berücksichtigt. Wie bereits erwähnt sollen hier beide Möglichkeiten, also eine Mischform, angewendet werden. Betrachtet man den Zeithorizont der Szenarien, so ist aufgrund der Aufgabenstellung eine Betrachtung über den Lebenszyklus einer Montagezelle notwendig. Dies führt zu einem möglichen mittel- bis langfristigen Zeithorizont, wobei in dieser Methode der Fokus auf einer langfristigen Betrachtung liegt.

Die Anwendung der Szenario-Methode in einem Workshop bildet somit eine wichtige Grundlage für die spätere Bewertungssystematik. Sie verfolgt dazu das Ziel, Informationen bezüglich zukünftigen Stückzahlen, Produktvarianten und weiteren Turbulenzindikatoren zu bestimmen, um den Wandlungsbedarf eines modularen Montagesystems im Kontext der Rahmenbedingungen einschätzen zu können. Die mithilfe der Szenario-Methode gewonnenen Erkenntnisse bilden anschließend die Ausgangsbasis für die Durchführung der

für die Bewertung relevanten Kostenrechnung über den Lebenszyklus (vgl. Heilala, Montonen, Väätäinen 2008, S. 1291).

4.5 Generische Beschreibungsmethode

In diesem Unterkapitel wird das Fähigkeitsmodell zur Beschreibung von Prozessen und Ressourcen konzipiert, welches eine Zuordnung derselben zueinander ermöglicht. Dazu wird zuerst das Konzept des Fähigkeitsmodells im Allgemeinen vorgestellt, um darauf aufbauend das Konzept der Deskription der Montageressourcen zu erarbeiten. Anschließend wird die Deskription der Montageprozesse entwickelt. Da das Fähigkeitsmodell bei der Entwicklung der Arbeitsabläufe eingesetzt wird, wird bei der Betrachtung der Montageprozesse auch auf die Erstellung der Prozessabläufe eingegangen. Abschließend erfolgt die erweiternde Beschreibung der verfügbaren und benötigten Produkte und Ressourcen über Merkmale.

4.5.1 Fähigkeitsmodell

Aufgrund der Modularisierung (u.a. Basismodule, Prozessmodule) und Standardisierung erhöht sich auf der einen Seite die Anzahl der realisierbaren Kombinationsmöglichkeiten für Montagesysteme. Dies bedeutet auf der anderen Seite aber auch, dass dadurch eine komplexere Aufgabenstellung in der ganzheitlichen Planung entsteht (siehe Kapitel 1.2 und Kapitel 3). Zur Beherrschung dieser Komplexität ist eine besondere Beachtung der Fähigkeiten und Eigenschaften der Montagesysteme, insbesondere deren einzelner Elemente, notwendig. Auf Basis des Wissens über bereits verkaufte Systeme, dem Expertenwissen der Mitarbeiter und neu hinzugekommenem, emergenten Wissen sind die Systemhersteller solchen Herausforderungen grundsätzlich gewachsen. Diesem prinzipiell stark mitarbeiterabhängigen Zustand wird durch ein einheitlich aufgebautes, standardisiertes Fähigkeitsmodell eine strukturierte, transparente und der ganzheitlichen Planung entsprechende umfassende Methode zur Seite gestellt. Diese Methode ist dabei so gestaltet, dass sie hinreichend präzise ist und trotzdem für die Aufgabenstellungen eines Montagesystemherstellers anwendbar bleibt (vgl. Kapitel 2.6.2).

Grundlagen des Modells

Die Aufgabe des Fähigkeitsmodells besteht somit darin, Prozesse und Ressourcen standardisiert zu beschreiben, sodass eine Zuordnung möglicher Ressourcen zu den auszuführenden Prozessen ermöglicht wird. Hierzu wird im Folgenden das Konzept zur systematischen Beschreibung erarbeitet.

Die Deskription von Ressourcen erfolgt dabei über eine abstrahierte Beschreibung ihrer Eigenschaften. Das Fähigkeitsmodell dient somit in erster Linie der Differenzierung der Ressourcen. Gleiches gilt für die Prozesse bzw. das Produkt aus dem diese abgeleitet werden. Bei der Anwendung ist aber das jeweilige Produkt nicht auf die gleiche Weise wie die Ressourcen standardisiert aufgebaut, sondern ist immer projektspezifisch. Daher wird eine Vorgehensweise zur abstrakten Beschreibung eines Produktes erarbeitet und der Fokus des Modells auf die Beschreibung der einzelnen Prozesse gerichtet. Zur Umsetzung einer standardisierten Beschreibungssystematik wird daher eine generische Ressourcen- und Prozessstruktur entwickelt (vgl. Kapitel 4.5.2 und 4.5.3), welche eine weitgehend universelle

Einsetzbarkeit der Methode ermöglicht. Als Grundlage für die zu entwickelnde Systematik dient der Ansatz des SFB 467 (vgl. Kapitel 3.3), welcher im Bereich Montagekonfiguration von einzelnen Arbeitsplätzen als Basis für eine virtuell unterstützte Feinplanung diente. Dabei wird auf der Grundidee der Prozessbeschreibung auf Basis von Normen aufgebaut (VDI-Richtlinie VDI 2860; DIN Norm 8593), wobei die Spezifika des Betrachtungsrahmens und damit vor allem der Planung modularer Montagesysteme Beachtung finden. So werden entsprechend dieser Systematiken die Grundfunktionen Fügen, Handhaben und Kontrollieren über die sogenannten Montageprozesse in (Montage-) Fähigkeiten unterteilt, siehe Abbildung 4-4. Außerdem finden die Grundfunktionen Justieren und Sonderfunktionen entsprechend der Literatur Verwendung (Spur, Helwig 1986, S. 592, Spur, Helwig 1986, S. 591; Bullinger, Ammer 1986, S. 275; Löhr 1977, S. 49-51). Durch das dadurch entstehende Fähigkeitsmodell können alle Ressourcen und Prozesse eines modularen Montagesystems auf einer allgemeingültigen Ebene abgebildet und beschrieben werden.

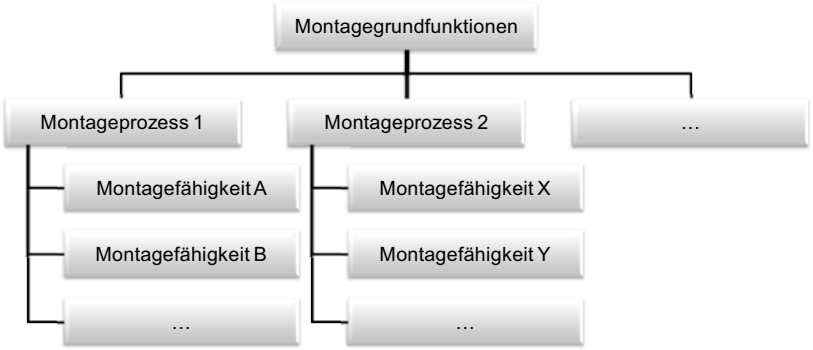


Abbildung 4-4 Grundstruktur der standardisierten Beschreibungssystematik

Die Prozessbeschreibung über Fähigkeiten ermöglicht so dem Montageplaner, die Montageaufgabe in ihre einzelnen fähigkeitsbeschriebenen Prozessschritte zu zerlegen. Die dadurch entstehende Prozessablaufbeschreibung dient als Grundlage für die weitere Planung. Im Folgenden ist zur Verdeutlichung ein Ausschnitt der Struktur bis zur Fähigkeitsebene dargestellt (Tabelle 4-1). Eine umfassende Darstellung aller Grundfunktionen, Montageprozesse und Montagefähigkeiten findet sich in Anhang C. Diese beinhaltet zur Verdeutlichung auch eine nähere Beschreibung der Fähigkeiten.

Tabelle 4-1 Ausschnitt aus der standardisierten Beschreibungssystematik

Montagegrundfunktion	Fügen
Montageprozess	Zusammensetzen
Montagefähigkeit	Federnd Einspreizen

Fähigkeitsbeschreibung	Fügen durch vorheriges elastisches Verformen, damit das Fügeteil nach dem Einlegen oder Aufschieben und anschließendem Rückfedern durch Formschluss gehalten wird.

Aufbau des Modells

Im Folgenden wird der methodische Aufbau des Fähigkeitsmodells näher beschrieben, um die Grundlage für die spätere detaillierte Konzipierung der Methode zu bilden (Kapitel 4.5). Die Methode erleichtert dabei den Grobplanungsprozess von Montagezellen, indem diese den Planer primär bei der Modulauswahl unterstützt. Darauf aufbauend werden die Module der Zelle für die Produktmontage konfiguriert (Kapitel 4.6).

Der methodische Aufbau des Fähigkeitsmodells besteht aus zwei wesentlichen Bearbeitungslinien (siehe Abbildung 4-5). Die erste Linie beginnt bei den Montagemodulen und ist unabhängig vom jeweiligen Planungsprojekt schon bei der Neuentwicklung von Modulen durchzuführen. Allerdings können auch bei konkreten Planungsfällen neue Ressourcen in das System hinzugefügt werden, um kundenspezifische Montageaufgaben lösen zu können. Dies wird bei steigenden Anwendungsfällen aber immer seltener der Fall sein.

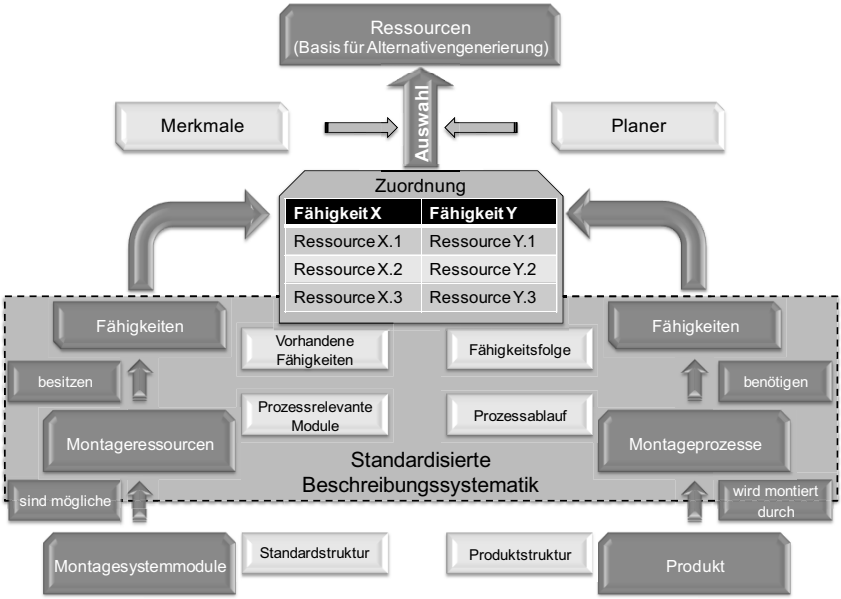


Abbildung 4-5 Fähigkeitsmodell

Die zweite Linie ist die projektbezogene, welche beim wichtigsten Element, dem Produkt, beginnt. Hierbei werden die Planungsaufgaben eng in Zusammenarbeit mit dem Kunden

durchgeführt. Grundsätzlich wird bei beiden Linien der Ansatz verfolgt, dass sich sowohl Montageressourcen als auch die vom Produkt abgeleiteten Prozesse mit Fähigkeiten beschreiben lassen. Dazu werden zuerst die Montagemodule im Kontext der Montagezelle strukturiert und anschließend die prozessrelevanten Module für die Beschreibung ausgewählt (vgl. Kapitel 4.5.2). Diese Montageressourcen werden mit Hilfe der standardisierten Beschreibungssystematik entsprechend ihren Fähigkeiten beschrieben. In der projektbezogenen Linie wird das Produkt hinsichtlich der Produktstruktur analysiert, um darauf aufbauend den Prozessablauf zu erarbeiten (vgl. Kapitel 4.5.3). Dabei determiniert die konstruktive Struktur des Produkts die notwendigen Montageprozesse. Die darin enthaltenen Einzelprozesse werden ebenfalls mit der standardisierten Beschreibungssystematik charakterisiert. Es wird also die vom Produkt abgeleitete Montagereihenfolge in eine Fähigkeitsfolge transformiert, beziehungsweise es wird direkt aus dem Produkt eine Reihenfolge von benötigten Fähigkeiten erstellt.

Anschließend werden den so beschriebenen Prozessen über die Fähigkeiten als Zuordnungskriterium mögliche Montageressourcen zugewiesen, wobei davon ausgegangen wird, dass eine ausreichende Menge an Montageressourcen existiert und beschrieben ist. Dadurch, dass bei diesem Vorgehen die grundsätzliche Eignung geprüft wird, stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, die jedoch einer weiteren Auswahl bedürfen, um die für die Grobplanung nötige Präzision zu erreichen. Zur Einschränkung der ersten Lösungsmenge werden noch weitere Kriterien benötigt, die den Anforderungen der Prozesse und damit des Produkts gerecht werden. Diese Kriterien werden im Folgenden als Merkmale bezeichnet und in Kapitel 4.5.4 erarbeitet. Bei dieser Auswahl wird sowohl die Erfahrung der Planer eingesetzt als auch eine systemische Unterstützung geschaffen (siehe Kapitel 5.2). Dadurch wird sichergestellt, dass für jede Fähigkeit des Montageprozessablaufes mindestens eine, den Kundenanforderungen entsprechende Montageressource, ausgewählt wird.

4.5.2 Deskription der Montageressourcen

Aufbauend auf den in Kapitel 2.2 festgelegten Definitionen von Montagesystem, Montagezelle und der Unterscheidung von Baukasten-, Modul- und modularen Komplettsystemen werden diese für die konzeptionelle Erarbeitung der Lösung detaillierter betrachtet. Dadurch wird die Systemgrenze im Wesentlichen bezüglich der Identifikation der zum System gehörenden Elemente geschärft, die Praxisnähe erhöht und vor allem die Strukturierung der Ressourcen präzisiert. Demzufolge wird die Basis für die spätere Beschreibung der Ressourcen mit Hilfe des Fähigkeitsmodells gebildet. Auch wenn nicht alle Ressourcen bei der Planung im Rahmen einer Angebotserstellung notwendigerweise mit Fähigkeiten beschrieben werden müssen, so muss dennoch dem Planer eine entsprechende ganzheitliche Ressourcenstruktur und -benennung vorgegeben werden, die seinem Arbeitsumfeld und Aufgaben angepasst ist. Dabei fokussiert sich dieses Konzept auf die Hardware eines modularen Systems und deren grundsätzlicher Aufbaustruktur. Durch die systematische Strukturierung und Benennung entsteht die Grundlage für eine abstraktere Beschreibung über Fähigkeiten und der Zuordnung zu den auszuführenden Prozessen.

Struktur der Ressourcen

Montagezellen modularer Montagesysteme setzen sich aus einzelnen Stationen zusammen, die der Ausführung von Montageaufgaben dienen (vgl. Kapitel 2.2). Beginnend bei einer solchen Station erfolgt die Strukturierung von Montageressourcen. Dazu ist in Abbildung 4-6 eine Station für einen hybriden Montageprozess dargestellt, welche einem halbautomatisierten manuellen Arbeitsplatz entspricht. Dieser kann mit drei verschiedenen Prozessmodulen ausgestattet werden, wobei immer zwei davon parallel betrieben werden können. Die Station besteht somit aus einem Basismodul (BM) und drei Prozessmodulen. Die Anlieferung und der Weitertransport erfolgen über vorgelagerte bzw. nachgelagerte Transporteinrichtungen. Ebenfalls als Ressourcen werden Elemente wie eine externe Steuerung (bspw. Leitrechner), Medienversorgungseinrichtungen und Zuführeinrichtungen (bspw. Vibrationswendelförderer) angenommen. Aufgrund der spezifischen Eigenschaften modularer Systeme werden modulinterne Steuerungen nicht separat betrachtet (vgl. Kapitel 2.6.1). Ebenso werden stationsinterne Transporteinrichtungen nicht abgebildet.

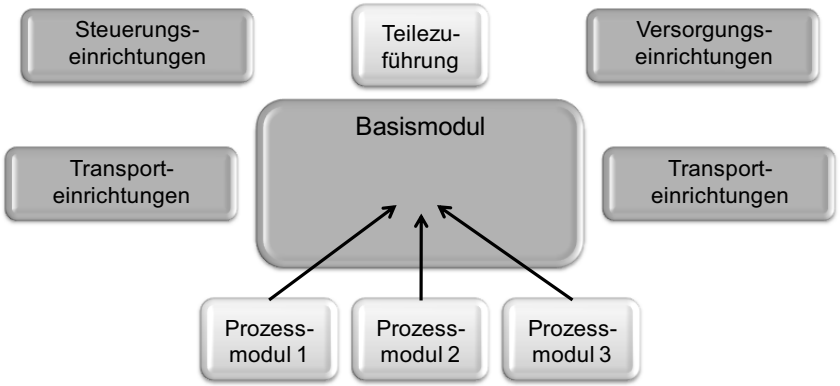


Abbildung 4-6 Montagestation

Der Mensch wird dabei nicht als einzuplanende Ressource gesehen, da dieser zur Durchführung seiner Arbeit immer Einrichtungselemente (Ressourcen) benötigt. Es wird mit gegensätzlicher Sicht von diesen Elementen ausgehend geplant, die wiederum für ihre Einsatzfähigkeit den Menschen als Ausführenden benötigen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Beschreibung dieser Einrichtungselemente die relevanten Fähigkeiten des Menschen beinhaltet, um dessen Vorteile in der Planung nutzbar zu machen. Diese Beschreibung enthält neben standardisierten Arbeitsvorgängen nach Abschluss der kompletten Planung auch die produktspezifischen Arbeitsanweisungen. Die Notwendigkeit der Berücksichtigung arbeitsorganisatorischer Aspekte (z.B. Ergonomie) bei der Konzeption der Ressourcen wird dadurch nicht negativ beeinflusst. Eine Betrachtung des Menschen als separate Ressource erfolgt entsprechend obiger Ausführung daher im Rahmen der folgenden Strukturierung nicht, wobei festzuhalten bleibt, dass bei den entsprechenden Kostenbetrachtungen der Kostentreiber Mensch Berücksichtigung findet (vgl. Kapitel 4.7.2).

Die konkrete Einsatzplanung des Menschen, die operative Kapazitätsplanung, ist nicht Inhalt des Betrachtungsbereiches (vgl. Kapitel 2.5, 2.6 und 4.1).

Eine erste Gliederung der Ressourcen kann nach der Art der Interdependenzen durchgeführt werden, wobei zwischen produktspezifisch und montagespezifisch (prozessspezifisch) unterschieden wird. Diese Unterscheidung ist ausgeprägt durch die Verwendung der Bezeichnungen Betriebs- und Einsatzmittel. Betriebsmittel sind dabei die Ressourcen, die direkt für den Montagesystembetrieb erforderlich sind. Dazu zählen alle Anlagen, Stationen (Maschinen) und sonstige Geräte (Module), die direkt oder indirekt an dem Betrieb des Systems partizipieren. Wobei die Kapazität des Arbeitssystems durch das Zusammenspiel von Mensch, Betriebsmittel und Arbeitsorganisation bestimmt wird (vgl. REFA 1993, S. 43 und Kapitel 2.5).

Insbesondere bei modularen Montagesystemen sind die Betriebsmittel das Grundgerüst des Montagesystems, welches durch entsprechende Module an die produkt- oder variantenspezifischen Anforderungen adaptiert werden kann. Diese Module, im Sinne der produktspezifischen Anforderungen an die Montage angepassten Module, werden als Einsatzmittel bezeichnet. Im Rahmen der Montagezellenplanung findet eine Planung sowohl von Betriebsmitteln als auch von Einsatzmitteln statt. In der Praxis der Montageplanung werden unter Betriebsmitteln oftmals komplette Anlagen oder Maschinen verstanden und den Einsatzmitteln Elemente der Werkzeugebene zugeordnet. Allerdings wird die Abgrenzung zwischen Einsatz- und Betriebsmitteln in der Praxis, nicht zuletzt wegen der divergenten Elementstrukturen, nicht eindeutig vollzogen. Durch die besonderen Merkmale modulare Montagesysteme, vor allem der Standardisierung durch Modularisierung, entstehen diesbezüglich andere Möglichkeiten, weshalb im Folgenden die für diese Methode notwendige Differenzierung vorgenommen wird. Bei modularen Systemen können einzelne Elemente in ihrer Eigenschaft als modulare Komponente aufgrund der Adaptionsfähigkeit problemlos ausgetauscht werden. Für jedes Modul ist eine einzelne Systemgrenze definiert, weshalb sich die Module dann einheitlich beschreiben lassen.

Zur Verdeutlichung der im Rahmen dieser Methode definierten Ressourcenstruktur mit der Unterscheidung zwischen Betriebs- und Einsatzmittel erfolgt eine Beschreibung dieser Hauptgliederungsbereiche. Zudem werden die entsprechenden Untergliederungsbereiche dargestellt und die Benennung dieser aufgezeigt (Abbildung 4-7).

Dabei werden die Betriebsmittel in Transportmodule, Aufbewahrungselemente, Basismodule, IT-Elemente und Versorgungselemente strukturiert. In Verbindung zu den erstgenannten Bereichen der Betriebsmittel werden die Einsatzmittel in Transportmittel, Aufbewahrungsmittel, Prozessmodule und Peripheriemodule gegliedert.

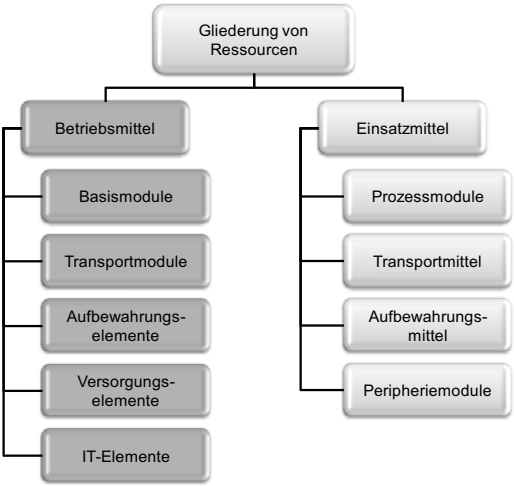


Abbildung 4-7 Gliederung von Ressourcen

Die Beschreibung der Betriebs- und Einsatzmittel wird aufbauend auf der Darstellung zweier Montagestationen durchgeführt, anhand derer die Abgrenzung der verwendeten Begriffe verdeutlicht wird. Zu diesem Zweck werden die zwei Stationen mit den angrenzenden Elementen in Abbildung 4-8 dargestellt. In diesem Zusammenhang dient die Stationsgrenze als Basis zur Differenzierung zwischen Modulen und Elementen bzw. Mitteln.

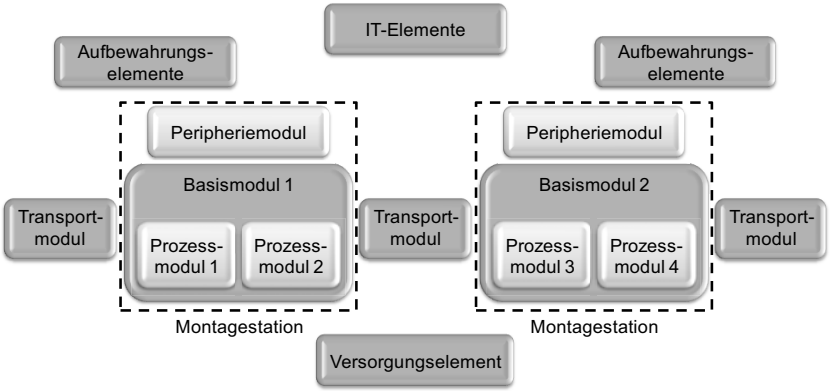


Abbildung 4-8 Module einer Montagezelle am Beispiel zweier Montagestationen

Eine Station setzt sich aus Basismodul, Prozessmodul(en) und Peripheriemodul(en) zusammen. Transportmodule, Versorgungs-, Aufbewahrungs- und IT-Elemente sowie Aufbewahrungsmittel bilden den zum Betrieb notwendigen Rahmen.

Zum Bereich der IT-Elemente werden alle übergeordneten Steuerungs-, Überwachungs- und Erfassungssysteme gezählt. Dies kann beispielsweise ein Leitrechner sein, der entstehende Prozessdaten sammelt (bspw. über die Anbindung zu BDE-Terminals oder Modulinterne SPS) und über den die Verbindung zu einem Manufacturing Execution System (MES) erfolgen kann. In speziellen, prozessbedingten Fällen können Elemente, wie die standardisierte Steuerung ergänzende Schaltschränke bzw. Steuerungssysteme, notwendig sein. Weitere Beispiele sind Leitrechner oder Netzwerke, die der Vernetzung und der Steuerung des Informationsflusses dienen.

Für die Zuführung bzw. den Weitertransport von Werkstücken werden Transportmodule in Form von einfachen Transportbändern oder komplexeren Transportsystemen eingesetzt. Transportsysteme können bspw. mit einer eigenen SPS zur Steuerung der Routen von Werkstückträgern charakterisiert sein. Die basis- und prozessmodulinternen Transporteinrichtungen werden nicht separat betrachtet. Die Beschreibung der Ressourcen des Bereiches der Transporteinrichtungen erfolgt ebenfalls differenziert, weshalb neben den Betriebsmitteln (Transportmodule) auch die Einsatzmittel (Transportmittel) definiert sind. Zur Verdeutlichung des in dieser Methode notwendigen Differenzierungsgrads erfolgt eine kurze Beschreibung anhand eines Beispiels (Abbildung 4-9). In diesem findet ein modulares Transportband (Transportmodul) Verwendung, auf welchem entsprechende Werkstückträger den Transport des Produktes bzw. der Baugruppe (BG) ermöglichen. Diese Werkstückträger bestehen einerseits aus einer standardisierten Grundplatte und andererseits aus einer produktspezifischen Wechselplatte zur Aufnahme des Produkts bzw. der Baugruppe. Der Werkstückträger stellt dabei die Verbindung von Produkt zu Betriebsmittel her. Als Vereinfachung wird der Werkstückträger in dieser Methode nicht in seinen einzelnen Elementen (Grundplatte und Wechselplatte) sondern als Ganzes betrachtet und den Transportmitteln zugeordnet.

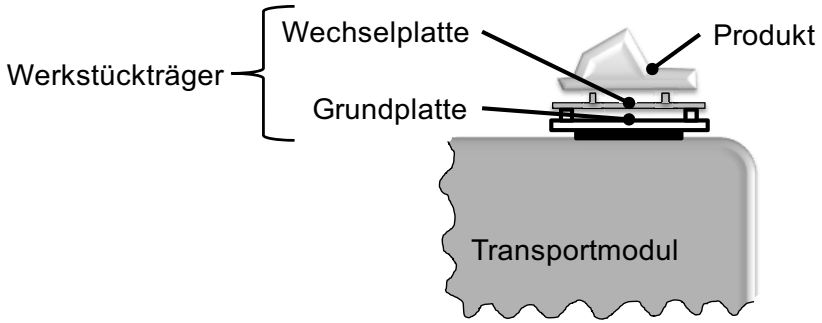


Abbildung 4-9 Transportmodul mit Werkstückträger

Weitere Beispiele seien für automatisierte und manuelle Transportmodule gegeben: Transportband, Transportstrecke und Schienensystem (automatisiert) sowie Hubwagen, Förderwagen und von Hand (manuell). Auf Seiten der Transportmittel sind nach analoger Einteilung Werkstückträger und Schienenwagen (für automatisierte Transportmodule) sowie

Aufbewahrungsressourcen und der Mensch (für manuelle Transportmodule) beispielhaft zu nennen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass Aufbewahrungsmittel als Transportmittel verwendet werden können, wodurch sich deren Zuordnung nicht ändert, da der ursprüngliche Bestimmungsgrund weiter erhalten bleibt.

Die Bereitstellung von Medien zur Versorgung der Elemente im Betrieb ist bei modularen Anlagen einheitlich gestaltet und basiert auf Standardbauteilen. So erfolgt die Versorgung der Elemente mit bspw. Strom, Druckluft, Vakuum und anderen Medien über standardisierte meist modularisierte Verbindungselemente, die einen schnellen Austausch von Elementen wie Prozessmodulen ermöglichen. Bei modularen Montagezellen wird die Versorgung oftmals von Station zu Station über die einzelnen Module realisiert. Dabei sind die Versorgungselemente standardisierter Form in Transportmodule integriert und werden in diesem Konzept dann nicht mehr als separate Elemente betrachtet.

Die Aufbewahrungseinrichtungen werden nach der in diesem Konzept definierten Unterscheidung (Betriebs- und Einsatzmittel) in Aufbewahrungselemente (AE) und Aufbewahrungsmittel eingeteilt. Den Aufbewahrungselementen lassen sich somit Regale, Läger und Kisten zuordnen wohingegen den Aufbewahrungsmitteln (AM) beispielweise Magazine, Kisteneinsätze oder Paletten zugewiesen sind (Tabelle 4-2). Sowohl Aufbewahrungselemente als auch Aufbewahrungsmittel werden dabei entsprechend ihrer Dimensionen unterteilt (klein, mittel und groß).

Tabelle 4-2 Struktur der Aufbewahrungselemente

Aufbewahrungselemente	Kleine AE	Bspw. kleine Kiste
		Bspw. Schrank
	Mittlere AE	Bspw. große Kiste
		Bspw. Regal
	Große AE	Bspw. Container
		Bspw. Lager
Aufbewahrungsmittel	Kleine AM	Bspw. kleiner Kisteneinsatz
		Bspw. Magazin
	Mittlere AM	Bspw. großer Kisteneinsatz
		Bspw. Produktaufnahme
	Große AM	Bspw. Produktgestell
		Bspw. Palette

Aufbewahrungsressourcen können grundsätzlich auf unterschiedlichste Art und Weise entsprechend der Anwendungsaufgabe, unabhängig von der Einteilung in Betriebs- und Einsatzmittel und der Dimension, miteinander kombiniert werden. Beispielsweise kann dies

durch die Zuordnung einer Palette zu einem Regal realisiert oder es kann ein Lager aus mehreren Regalen zusammengestellt werden. In diesem Zusammenhang soll allerdings festgehalten werden, dass diese Kombinationsmöglichkeiten nicht Schwerpunkt der Methode sind. Für den bereits beschriebenen Fall der Nutzung einer Aufbewahrungsressource als Transportmittel sei hier nochmals ein Beispiel genannt, bei dem eine Kiste (Aufbewahrungselement) mit produktspezifischen Kisteneinsatz (Aufbewahrungsmittel) für eine bestimmte Zeitspanne als manuelles Transportmittel genutzt wird.

In Tabelle 4-3 ist zur Verdeutlichung die Anwendung der Beschreibungssystematik für Aufbewahrungsmittel beispielhaft dargestellt. Abgebildet sind die nach der vorgestellten Struktur gegliederten und mit Fähigkeiten beschriebenen Aufbewahrungsmittel. In diesem Beispiel werden die Fähigkeiten ungeordnetes, teilgeordnetes und geordnetes Speichern verwendet, wodurch der Planer bei der Zuweisung von Fähigkeiten zu Ressourcen unterstützt wird. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass diese beispielhafte Darstellung zur möglichen Beschreibung von Aufbewahrungsmitteln nicht für alle Betriebs- und Einsatzmittel sinnvoll ist, da durch die Vielzahl von in Frage kommenden Fähigkeiten die Übersichtlichkeit nicht gewährleistet ist. Durch Weiterentwicklungen von Betriebs- und Einsatzmitteln können weitere Funktionen und somit Fähigkeiten in diese integriert werden, wodurch deutlich wird, dass solche Beschreibungen keine Vollständigkeit aufweisen.

Tabelle 4-3 Beispielhafte Fähigkeitsbeschreibung von Aufbewahrungsmitteln

Aufbewahrungsmittel	Kleine AM	Ungeordnetes Speichern
		Teilgeordnetes Speichern
		Geordnetes Speichern
	Mittlere AM	Ungeordnetes Speichern
		Teilgeordnetes Speichern
		Geordnetes Speichern
	Große AM	Ungeordnetes Speichern
		Teilgeordnetes Speichern
		Geordnetes Speichern

Das Basismodul (BM) einer Montagezelle stellt eines der wesentlichsten Elemente eben dieser dar. Es bildet aufgrund seiner wandlungsbefähigenden Eigenschaften das Fundament für die produktspezifische Anpassung mit Prozessmodulen, die die Montagegrundfunktionen ausführen. Dadurch kann der Anlagenhersteller auf ein Modul zurückgreifen, welches für viele unterschiedliche Prozessmodule (auch mehrere gleichzeitig) geeignet ist. Neben der Vorteile bei der Planung ergeben sich für den Anlagenhersteller dadurch auch Standardisierungsmöglichkeiten bei der Herstellung. Dem Basismodul zugeordnet werden dabei die modulinternen Transporteinrichtungen, die Schnittstellen zur Übertragung von

Daten und Medien sowie die grundlegend benötigte Steuerungstechnik. Wie in Tabelle 4-4 dargestellt, werden die Basismodule in die drei Gruppen manuell, hybrid und automatisiert unterteilt. Ein manuelles Basismodul dient als Grundlage für eine rein manuelle Ausführung von Montagevorgängen, folglich für die Aufnahme von manuell zu betreibenden Prozessmodulen. Diese besitzen dadurch stark ausgeprägten Vorrichtungscharakter und beinhalten somit keine bzw. minimale Steuerungstechnik. Hybride Basismodule sind dagegen dadurch charakterisiert, dass sie sehr schlanke Module darstellen (v.a. bzgl. der Steuerungstechnik), welche die Eigenschaft besitzen, manuelle und teilautomatisierte Prozessmodule aufzunehmen. Hybride Basismodule können durch entsprechende Anpassungsmaßnahmen für die Aufnahme von vollautomatischen Prozessmodulen befähigt werden. Ein automatisiertes Basismodul ist für die Aufnahme von vollautomatisierten Prozessmodulen ausgelegt, wobei auch teilautomatisierte Prozessmodule aufgenommen werden können. Automatische Basismodule sind somit vergleichsweise umfangreich aufgebaut (bspw. Medienversorgung, Steuerungstechnik, Transporteinrichtung). Aufgrund der definierten Prämissen (siehe Kapitel 4.1) konzentriert sich diese Methode hauptsächlich auf die Planung von hybriden und automatischen Modulen.

Tabelle 4-4 Struktur von Basismodulen mit Beispielen

Basismodule	Manuelle BM	Bspw. Handarbeitsplatz mit manuellem Prozessmodul
	Hybride BM	Bspw. Schlankes Basismodul mit teilautomatisiertem Prozessmodul
	Automatisierte BM	Bspw. Umfangreich aufgebautes Basismodul mit vollautomatischem Mehrachssystem (Prozessmodul)

Prozessmodule sind die für die Wertschöpfung wichtigsten aber oftmals auch die komplexesten Elemente einer Montagezelle. Entsprechend der oben aufgezeigten Einteilung werden Prozessmodule den Einsatzmitteln zugeordnet. Dies ist dadurch begründet, dass Prozessmodule immer produktspezifische Eigenschaften oder Bauteile beinhalten. Zwar kann ein Prozessmodul komplett aus standardisierten Elementen aufgebaut werden, allerdings erfolgt die Auswahl dieser entsprechend der produktspezifischen Anforderungen. Dadurch wird deutlich, dass Prozessmodule immer (wenn auch nur programmiertechnisch) angepasst werden müssen. Wie bei der Beschreibung der Basismodule schon genannt, werden die Prozessmodule in automatisierte (bspw. automatische Klebeeinrichtung), hybride und manuelle Prozessmodule (bspw. Sichtprüfplatz) unterschieden. Durch den modularen Aufbau der Prozess- und Basismodule können die Prozessmodule schnell ausgetauscht werden (Umrüsten), wodurch eine Anpassung an verschiedene Produktvarianten oder -familien mit geringem Aufwand ermöglicht wird.

Zu den Prozessmodulen zählen den Montagefähigkeiten entsprechend unterschiedlichste Ausprägungen. Beispielsweise seien hier Mess- und Prüfeinrichtungen genannt. Bei Messungen und Prüfungen, die während des eigentlichen Prozesses oder durch das gleiche Prozessmodul wie der eigentliche Montagevorgang durchgeführt werden, erfolgt die Betrachtung im Rahmen des ursprünglichen Vorganges. Geprüft werden oftmals zuvor

definierte Merkmale eines Produkts oder einer Baugruppe. Zunehmend werden aber auch Funktionalitäten überprüft (beispielsweise Dichtheitsprüfung), um den vorgelagerten Montagevorgang zu verifizieren und mögliche Fehlerursachen schnell beheben zu können.

Neben der montagezelleninternen Prüfung in den einzelnen Stationen (über die Prozessmodule) werden je nach Produkt und Qualitätsstrategie auch Prüfungen durchgeführt. Da diese nicht im direkten Bereich der Montagezelle stattfinden, sondern meist durch unternehmensinterne Dienstleister realisiert werden, finden sie keine direkte Berücksichtigung, sondern werden im Rahmen Kostenmodells über die dabei entstehenden Kosten integriert.

Bei der in dieser Methode betrachteten Planung von Montagezellen ist die Konzeption von Prozessmodulen von besonderer Bedeutung und erfordert ein sehr gutes Zusammenspiel zwischen der (rechnergestützten) Methodik und dem Montageplaner, dessen Expertenwissen von großer Relevanz ist (vgl. Kapitel 5).

Entsprechend dem Beschreibungsmodell lassen sich die Prozessmodule über Prozesse und Fähigkeiten näher beschreiben und dadurch auch gliedern. Beispielsweise lassen sich die Prozessmodule zur Ausführung der Montagegrundfunktion Fügen analog zu den Montageprozessen Zusammensetzen, Füllen, An- und Einpressen, Fügen durch Urformen, Umformen, Schweißen und Löten sowie Kleben und textiles Fügen gliedern. Ein Ausschnitt der Beschreibungsmöglichkeiten wird zur Verdeutlichung in Tabelle 4-5 dargestellt. Gemäß dem Modell erfolgt die weitere Untergliederung über Fähigkeiten. Dabei werden sowohl automatisierte als auch hybride und manuelle Prozessmodule auf die gleiche standardisierte Art und Weise beschrieben.

Tabelle 4-5 Beispielhafte Gliederung von automatisierten Prozessmodulen

Automatisierte Prozessmodule	Fügen	Zusammensetzen
		Füllen
		Anpressen, Einpressen
		Fügen durch Urformen
		Fügen durch Umformen
		Fügen durch Schweißen
		Fügen durch Löten
		Kleben
		Textiles Fügen

Peripheriemodule werden aufgrund der produktspezifischen Charakteristika ebenfalls den Einsatzmitteln zugeordnet. Peripheriemodule beinhalten vor allem Einrichtungen, die in der nächsten Umgebung von Basismodulen installiert wurden und dienen der auf diesen bzw.

auf den darin integrierten Prozessmodulen durchzuführenden Montagevorgängen. Aufgrund der Tatsache, dass nicht für jedes Basismodul ein Peripheriemodul benötigt wird, werden diese wie hier beschrieben separat betrachtet. Meist haben Peripheriemodule die Aufgabe Einzelteile oder Baugruppen bereitzustellen und diese zuzuführen. Als Vertreter dieser Gruppe sind Zuführeinrichtungen wie beispielsweise Vibrationswendelförderer oder Schrägförderer, aber auch Bereitstellsysteme zu nennen. Peripheriemodule werden in automatisiert (bspw. die beiden genannten Beispiele), hybrid und manuell unterschieden. Ein Beispiel für manuelle Module sind Einrichtungen, bei denen die Einzelteile oder Baugruppen in einer Kiste bereitgestellt werden und von einem Mitarbeiter vereinzelt und zugeführt werden. Peripheriemodule können meist über die Fähigkeiten der Grundfunktion Handhaben beschrieben werden.

Als Ergänzung zu dem in Kapitel 4.5.1 beschriebenen Aufbau des Fähigkeitsmodells wird im Folgenden der Ablauf im Kontext der oben erstellten Ressourcenstrukturierung und -beschreibung präzisiert. Wie bereits beschrieben werden ausgehend von der erstellten Fähigkeitsreihenfolge die prozessrelevanten Module ausgewählt. Analog zu der oben vorgestellten Strukturierung sind dies die prozessausführenden Module, die entsprechend der Beschreibungsmethode durch die Prozessmodule dargestellt werden. Aus möglichen Kombinationsmöglichkeiten dieser Prozessmodule und der darauf ausführbaren und benötigten Prozesse werden Alternativkonfigurationen erarbeitet (siehe Kapitel 4.6). Für die anschließende Bewertung dieser Alternativkonfigurationen werden weitere detaillierte Informationen zu der gesamten Montagezelle benötigt. Da eine Montagezelle weitere relevante Elemente beinhaltet, werden die von den Prozessmodulen determinierten Einrichtungen festgelegt und auf diese Weise deren bewertungsrelevanten Informationen in die Vorgehensweise integriert. Bei der präziseren Ausgestaltung der Montagezellen dienen die definierte Struktur der Einrichtungen und die Beschreibung der Ressourcen dazu, dem Planer einen definierten Rahmen zu geben und dadurch eine effektive Planung sicherzustellen. So können über die benötigten Fähigkeiten beispielsweise Peripheriemodule, Aufbewahrungselemente und Transportmodule ausgewählt werden. Die relevanten Informationen zu IT-Elementen und Versorgungselementen werden dabei für die spätere Bewertung ebenfalls zur Verfügung gestellt.

Dies schließt nicht aus, dass mehrere benötigte Fähigkeiten durch ein Modul bereitgestellt werden können. Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit, Module über mehrere Fähigkeiten zu beschreiben. Beispielsweise kann ein Prozessmodul, welches für einen bestimmten Fügeprozess ausgewählt wurde, aufgrund der technischen Eigenschaften auch für Handhabungsaufgaben genutzt werden.

4.5.3 Entwicklung und Deskription der Montageprozesse

Im Folgenden wird beschrieben, wie das später zu montierende Produkt, beginnend in der Phase der Aufgabenstellung (siehe Kapitel 4.3), analysiert wird, um alle für die Planung relevanten Informationen mit dem Kunden zu erarbeiten. Anschließend erfolgt die Erarbeitung der Vorgehensweise zur Ableitung der Prozessreihenfolge mit integrierter Fähigkeitsbeschreibung (Grobplanungsphase). Diese Vorgehensweise erweitert dabei die in

Kapitel 3.1 vorgestellten Methoden zur Erarbeitung der Montageablaufstruktur vor allem im Hinblick auf das Fähigkeitsmodell.

Produktinformationen

Durch zunehmend simultane Vorgehensweise bei der Planung von Produkten und Anlagen erfolgt die Montageanlagenplanung zu einem sehr frühen Zeitpunkt, zu dem das Produkt selbst noch eine zu beachtende Unschärfe besitzt (siehe Kapitel 1.2 und 4.1). Aus diesem Grund kann nicht auf fertiggestellte CAD-Modelle oder daraus automatisch abgeleitete Informationen zurückgegriffen werden. Daher orientiert sich die hier konzipierte Vorgehensweise an einer kundenintegrierten Informationsbeschaffung. Diese erfolgt dabei neben der Durchführung von Gesprächen mit dem Kunden über von Mitarbeitern der Hersteller ausgeführten Workshops, wobei es als sinnvoll und notwendig erachtet wird, dies im Kontext der weiteren Informationsbeschaffung zu realisieren. Grundsätzlich sollte dabei das Ziel erreicht werden, in möglichst wenigen Gesprächen und optimaler Weise in einem einzigen Workshop alle Informationen zu erhalten. Hierbei werden vor allem Fragestellungen zum Produkt im Allgemeinen (bspw. Teilezahl, Werkstoffe, Geometrie, Toleranzen) und zur Struktur dessen gestellt. In diesem Zusammenhang werden die Planer auch durch Leitfäden aus der Konstruktionstechnik unterstützt (bspw. Pahl u. a. 2007).

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben begrenzt sich das Produktspektrum im Wesentlichen auf Produkte bis maximal 150 kg und einer Grundfläche von maximal 600 mm x 800 mm. Das Produkt als solches ist dabei durch die angesprochene Unschärfe gekennzeichnet, wobei die Erzeugnisstruktur feststeht oder mit dem Kunden gemeinsam als Basis für die Angebotserstellung festgelegt werden kann. Dabei muss vor allem beachtet werden, dass der Kunde in der Angebotsphase nur eine begrenzte Menge an Informationen zu dem Produkt preisgibt. In manchen Fällen stehen erste 2D-Skizzen, ein erster Prototyp oder ein Vorgängerprodukt als Diskussionsgrundlage zur Verfügung. Diese Unschärfe wird von den in Kapitel 3 angesprochenen Produktmodellen insofern nicht berücksichtigt, da diese die Abbildung des gesamten Produkts mit umfassenden Details anstreben (siehe Kapitel 3.1). Die Unschärfe des Produkts allerdings, wird durch unvollständige und unsichere Informationen deutlich. Informationen liegen in dieser Phase der Produktentwicklung, dem Entwerfen, zum Beispiel zur Makrogeometrie, Mikrogeometrie und zur Genauigkeit vor (Jonas 2000, S. 42f). Informationen zur vom Konstrukteur angedachten Technologie, dem Werkstoff und auch der Oberfläche können die genannten Bereiche beispielsweise erweitern. Für den Planer können auch weiterführende Informationen hilfreich sein, wie Informationen zur Funktionalität, zur Ergonomie, zum Arbeitsprinzip oder zur angestrebten Zuverlässigkeit des Produkts (vgl. Aldinger 2009, S. 98-101). Die Unsicherheiten und Unvollständigkeiten können in allen Informationsbereichen existieren. Daher konzentriert sich die vorliegende Methode an den für die Planung wesentlichen Informationen zum Produkt (z.B. der Produktstruktur).

Produktstruktur und Montageprozesse

Zur Sicherstellung einer späteren sinnvollen Zuweisung von Prozess und Ressource muss aufgrund der Abhängigkeit davon vor allem der strukturelle Aspekt des Produktes betrachtet

werden. Der konstruktive, strukturwirksame Aufbau des Produktes muss daher für eine systematische Vorgehensweise klar definiert sein bzw. werden, was nicht bedingt, dass die exakte Ausarbeitung der Konstruktion bereits durchgeführt sein muss. Dazu folgt, aufbauend auf Kapitel 3.1, eine abstrakte Betrachtung bezüglich Produktstrukturen und der Erarbeitung des Prozessablaufes.

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge zwischen Produktstruktur, Fähigkeiten und Prozessablauf wurde ein einfaches Beispiel erarbeitet. Dazu wird von einem Produkt ausgegangen, welches aus einer einzigen Baugruppe mit 3 Einzelteilen besteht. Alle drei Bauteile werden in einem Prozess über eine einzige Fähigkeit montiert, siehe Abbildung 4-10. Die Baugruppe besteht aus den Einzelteilen 1 und 2 sowie einer Schraube. Zur Montage der Einzelteile wird der Montageprozess „Anpressen und Einpressen“, genauer die Fähigkeit „Schrauben“ benötigt. Diese Fähigkeit wird dabei durch die konstruktiv geplante Verbindung definiert, wodurch deutlich wird, dass ein Produkt Charakteristika aufweist über die die zur Montage benötigten Fähigkeiten abgeleitet werden können. Diese Abstraktionsebene der Prozessbeschreibung (Fähigkeitsebene) dient der späteren Zuordnung von möglichen Ressourcen, die die Baugruppe montieren können. Die für den Planer entsprechend dem Aufbau des Fähigkeitsmodells notwendige Beschreibung zusätzlicher Merkmale von Produkt und Ressource zur weiteren Auswahl und Alternativenplanung wird in Kapitel 4.5.4 beschrieben.

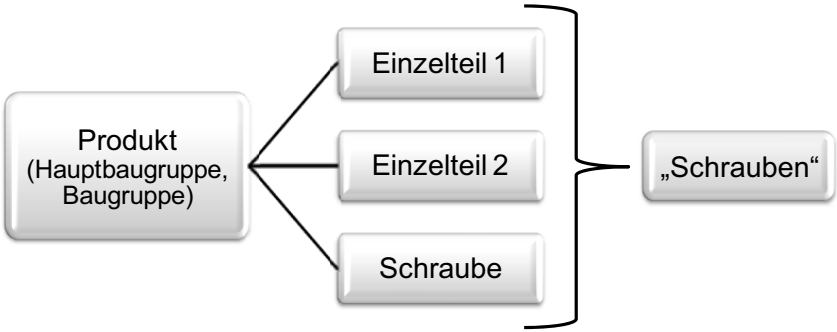


Abbildung 4-10 Beispiel einfache Baugruppe

Der Realität entsprechend wird in der vorliegenden Methode von komplexeren Produkten ausgegangen. Dies bedeutet unter anderem, das die betrachteten Produkte aus mehreren Baugruppen bestehen. Diese können wiederum aus Unterbaugruppen oder Einzelteilen bestehen, wobei zu beachten ist, dass Baugruppen und Einzelteile möglichst nicht auf gleicher Ebene stehen sollten. Dadurch werden Produkte nach einem einheitlichen Schema aufgebaut und dadurch die Übersichtlichkeit der Produktstruktur gewahrt. Fähigkeiten beschreiben die Knotenpunkte von Einzelteilen oder Baugruppen und somit die Montageprozesse. Das Produkt wird demzufolge von den Einzelteilen, die immer am Ende der hierarchischen Struktur stehen, bis zum Gesamten hin montiert und auf diese Weise

auch geplant. Hieraus begründet sich auch die Vorgehensweise vom Einzelnen zum Ganzen. Der Aufbau der Struktur determiniert auf diese Weise somit auch den Prozessablauf. Beispielsweise können die in Abbildung 4-11 dargestellten beiden Montageprozesse (basierend auf den Fähigkeiten F1 und F2) auch parallel ausgeführt werden.

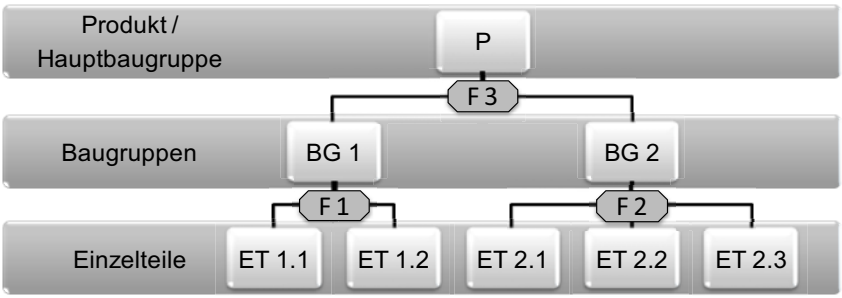


Abbildung 4-11 Baugruppenstruktur

Zur Unterstützung der Entwicklung eines Prozessablaufs werden Montageprozessklassen (MPK) definiert (Abbildung 4-12). Bei Betrachtung eines Produktes, welches aus mehreren Baugruppen, Unterbaugruppen und vielen Einzelteilen besteht, stellen die einzelnen Baugruppenebenen die Montageprozessklassen dar. Die Produktstruktur und die Montageprozessklassen an sich sind produktspezifisch. Daher kann nur das Strukturierungsprinzip als einheitliche Vorgehensweise auf jedes Produkt angewendet werden.

Durch Aufbauen der einzelnen Montageprozessklassen von der niedrigsten bis zur höchsten unter Berücksichtigung der hierarchischen Struktur des Produkts und der darin enthaltenen Fähigkeiten wird der Prozessablauf aufgebaut. Auf diese Art und Weise legen die Montageprozessklassen und die dazugehörigen Informationen die Reihenfolge der Montage fest. Dabei entsteht auch die für die nachfolgenden Planungsschritte relevante Fähigkeitsfolge. Die Montage unterschiedlicher Baugruppen innerhalb einer Montageprozessklasse kann parallel erfolgen. Dies bietet auch die Möglichkeit der Segmentierung und Definition von Vormontagebereichen. Dies muss allerdings produkt- und somit auch projektspezifisch erarbeitet werden und kann daher nicht in dieser einheitlichen Vorgehensweise abstrakt beschrieben werden. Die Komplexität eines Produkts hängt somit von der Anzahl der Montageprozessklassen und der darin enthaltenen Teile ab. Die geringste Komplexität besitzt demnach ein Produkt mit nur einer Montageprozessklasse und einem Prozess (vgl. Beispiel „einfache Baugruppe“ Abbildung 4-10). Bei einzelnen Montageprozessen muss allerdings trotzdem beachtet werden, dass diese auch aus mehreren Fähigkeiten bestehen können. In dieser Phase ist vor allem der Planer mit seinem spezifischen Know-how gefordert. Aufbauend auf den produktspezifischen Anforderungen legt er in dieser Phase fest, wie viele und welche Fähigkeiten zur Montage notwendig sind.

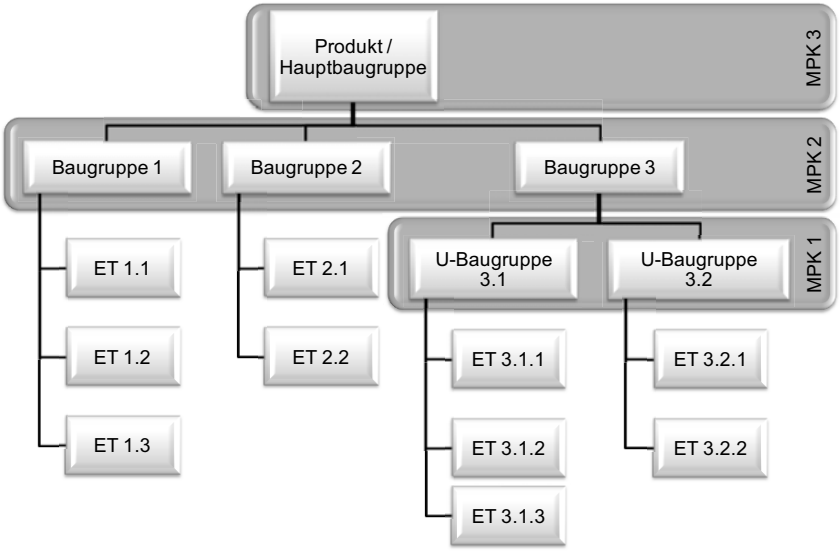


Abbildung 4-12 Montageprozessklassen eines Produkts

Dies soll am Beispiel eines Klebeprozesses verdeutlicht werden, der eine bestimmte Aushärtezeit und aufgrund der spezifischen Eigenschaften einen anschließenden Prüfprozess benötigt. Die Beschreibung des Montageprozesses wäre im vorliegenden Fall durch die Montagegrundfunktion Fügen mit dem Prozess Kleben und der Fähigkeit Nasskleben gegeben. Das Aushärten kann entweder über die Prozesszeit des Nassklebens abgedeckt sein oder einen Handhabungsvorgang Speichern mit der Fähigkeit geordnetes Speichern benötigen. Dies ist von den Eigenschaften des Produktes und des Klebers abhängig und somit durch den Planer zu entscheiden. Anschließend erfolgt dann noch der Prozess des Kontrollierens mit der Fähigkeit Prüfen.

Zur Verdeutlichung der Reihenfolgenbildung, welche durch die Montageprozessklassen und der Betrachtung der hierarchischen Struktur unterstützt wird, sollen im Folgenden zu den in Kapitel 3.1 vorgestellten Methoden ausgewählte Aspekte hervorgehoben werden.

Betrachtet man das in Abbildung 4-13 dargestellte Produkt mit einer Montageprozessklasse und drei Einzelteilen erhält man verschiedene Möglichkeiten der Reihenfolgenbildung. In diesem spezifischen Fall seien die Anforderungen des Produktes derart, dass zwei Reihenfolgevarianten möglich sind. Bei der ersten werden die drei Einzelteile in einem Prozess über eine benötigte Fähigkeit montiert. Im zweiten Fall wird die benötigte Fähigkeit zweimal, in zwei getrennten Prozessen, dargestellt. Da beide Varianten noch keine Zuordnung zu einer Ressource bedingen, ist die Zweite, aufgrund der höheren Flexibilität bei der Kapazitätsplanung, zu bevorzugen. Bei entsprechenden produktspezifischen Eigenschaften kann auch die erste Variante grundsätzlich notwendig sein. Hierdurch wird deutlich, dass eine Baugruppe mehrere Fähigkeiten bzw. mehrere Prozesse benötigen kann.

Dies gilt auch für Baugruppen, die aus mehreren Unterbaugruppen bestehen. Bei Produkten höherer Komplexität wird daher auch die Reihenfolgenplanung anspruchsvoller. Die Verwendung von Montageprozessklassen unterstützt daher bei der Reihenfolgenplanung. Geht man so vor, dass für jede Baugruppe bzw. Unterbaugruppe ein Montageprozess definiert wird, so leitet sich direkt über die erläuterte Vorgehensweise eine Reihenfolge ab. Dabei muss beachtet werden, dass bei unzureichender Erfüllung produktspezifischer Anforderungen weitere Prozesse/Fähigkeiten hinzugefügt werden müssen.

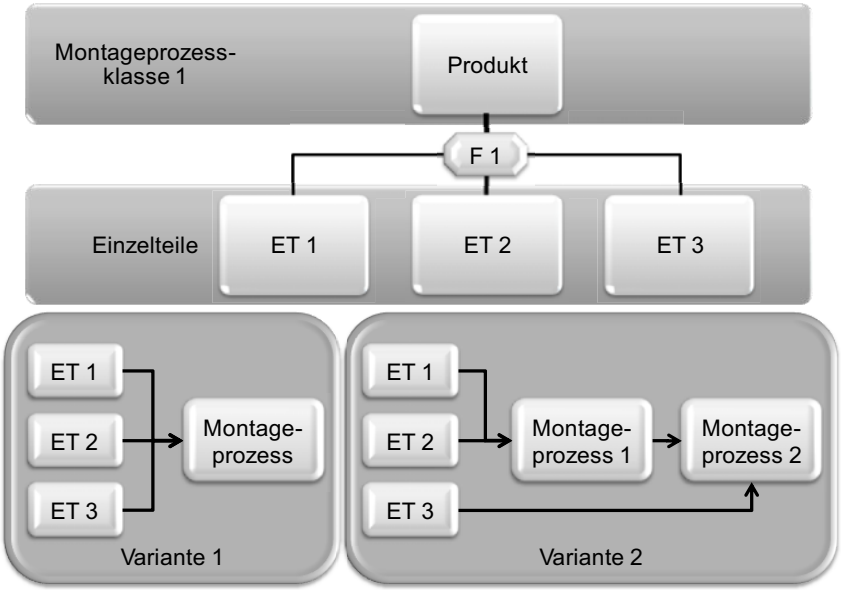


Abbildung 4-13 Montagevarianten für Montageprozessklasse

Entsprechend der in Kapitel 3 vorgestellten Arbeiten basiert die Methode im Bereich der Prozessablaufdefinition auf der in der Wissenschaft und Praxis bewährten Vorgehensweise mittels Vorranggraphen und Ablaufplänen (siehe Kapitel 3.1). Diese bereits von früheren Autoren wie Bullinger, Miese und Warnecke (Bullinger, Ammer 1986; Miese 1973, Miese 1976; Warnecke 1986) eingeführte Vorgehensweise hat heute noch ihre Gültigkeit (Konold, Reger 2009, S. 118-121, 40-42). Durch diese Vorgehensweise kann somit in Anlehnung an die klassische Literatur durch Kopplung mit dem entwickelten Fähigkeitsmodell eine Fähigkeitsfolge und somit ein Montagevorranggraph erstellt werden. Der Graph wird demzufolge direkt mit den Fähigkeiten aufgebaut. Er ist dabei als sinnbildliche Darstellung definiert, welche den Prozessablauf in fähigkeitsbeschriebener Form enthält. Dies bedeutet, dass der wesentliche Unterschied zum klassischen Montagevorranggraphen in der Beschreibung der auszuführenden Prozesse mit Fähigkeiten liegt. Durch die übersichtlichen und sowohl einfach als auch effektiv anwendbaren Methoden wird der Voraussetzung zur

Entwicklung der Methodik Rechnung getragen, dass der Aufwand für die Methodik gering zu halten ist (vgl. Kapitel 2.6.2).

4.5.4 Merkmalmodell

In den Kapiteln 4.5.1 und 4.5.3 wurde bereits angesprochen, dass neben den für die Zuordnung von Ressourcen zu Prozessen notwendigen Fähigkeiten noch weitere Informationen, sogenannte Merkmale, zur detaillierten Beschreibung von Produkt und Ressourcen notwendig sind. Durch die Anwendung von Merkmalen wird die methodengestützte Auswahl von Ressourcen durch den Planer deutlich vereinfacht und die Transparenz bezüglich der Auswahlkriterien erhöht. Die Erarbeitung der Merkmale zielt dabei auf eine generalisierte Beschreibungsmethode, die allgemein, projektunabhängig auf Produkt und Ressourcen anwendbar ist. Dabei wird, wie bei der Entwicklung des Fähigkeitsmodells mittels Fähigkeiten, auf der in Kapitel 3.3 dargestellten Literatur aufgebaut.

Die Merkmale dienen dabei der Erweiterung des Fähigkeitsmodells, bei der über die Auswahl im Rahmen der Zuordnung mittels Fähigkeiten hinaus gegangen wird. Dabei wird eine merkmalbezogene Auswahl vom Planer durchgeführt und dieser bei der Alternativengenerierung unterstützt. Diese Merkmale werden dabei in produkt- und ressourcenbezogen unterschieden, wobei die ressourcenbezogenen Merkmale in Prozessmerkmale und Kostenmerkmale unterschieden werden. Somit können die produktspezifischen und die prozessspezifischen Anforderungen präzisiert werden und die Kosteninformationen bei der Planung berücksichtigt werden. Aufbauend auf den Montagefähigkeiten werden geeignete Merkmale diesen Fähigkeiten zugeordnet und auf diese Weise eine katalogartige Struktur erstellt (siehe Anhang D). Diese Struktur und die beinhalteten Merkmale sind dabei erweiterungs- und anpassungsfähig, um beispielsweise Auswirkungen aktueller technologischer Veränderungen durch entsprechende Anpassungen integrieren zu können. Sie können dabei auch mit Toleranzangaben versehen werden. Die Merkmale bilden somit, wie die gesamte generische Beschreibungsmethode, die Grundlage für eine softwarebasierte Planungsmethodik, wie sie in Kapitel 5 erarbeitet wird.

Zur besseren Differenzierung werden die drei Merkmalsarten definierend beschrieben:

Produktmerkmale:

Produktmerkmale beschreiben die Merkmale einer Ressource bezüglich der Anwendbarkeit dieser auf bestimmte Eigenschaften von Produkten. Sie beziehen sich somit auf definierte Charakteristika von Einzelteilen, Baugruppen oder Produkten. Beispielsweise kann das Produktmerkmal Gewicht mit 5 kg quantifiziert werden, was bedeutet, dass die Ressource für Einzelteile, Baugruppen oder Produkte mit maximal 5 kg Gewicht verwendet werden kann. Hierzu ist anzumerken, dass Merkmalquantifizierungen grundsätzlich Maximalwerte angeben soweit keine anderen Angaben gemacht werden.

Prozessmerkmale:

Prozessmerkmale beschreiben Ressourcen bezüglich ihrer Funktions- und Arbeitsweise (bspw. beim Einpressen: 5 kN Prozesskraft). Auch hier gilt, dass Merkmalquantifizierungen grundsätzlich Maximalwerte angeben soweit keine anderen Angaben gemacht werden.

Kostenmerkmale:

Kostenmerkmale beschreiben die kosten- und wirtschaftlichkeitsbestimmenden Eigenschaften von Montageressourcen wie zum Beispiel die zu berücksichtigenden Investitionskosten. Diese Kostenwerte werden vom Anlagenhersteller selbst festgelegt bzw. vom Kunden (bspw. Kosten für Bedien- oder Montagepersonal) oder der Marktsituation determiniert. Vor allem die vom Anlagenhersteller selbst bedingten Kosten kann dieser entsprechend seiner Angebotsstrategie definieren. Die Kostenmerkmale unterstützen den Planer bei seiner Tätigkeit und dienen als Basisinformationen für das Kostenmodell.

Aufbauend auf einer begrenzten Menge an Ressourcen (Auswahl über die Fähigkeiten) wird diese einer weiteren Filterung unter Verwendung der Merkmale unterzogen und dadurch reduziert. Der Planer kann dabei soweit filtern, bis idealerweise nur noch wenige Ressourcen zur Auswahl stehen. Dabei können und sollen auch Erfahrungswerte des Planers mit einfließen.

Das Merkmalmodell wird in zwei Schritten entwickelt. Zuerst werden auf Basis von Kapitel 3.3 mögliche Merkmale eruiert (Dopplungen werden dabei eliminiert) und anschließend eine Klassifikation entwickelt. Im zweiten Schritt werden die Merkmale in die bereits vorgestellte Fähigkeitsstruktur entsprechend der sinnvollen Ergänzung zu den Fähigkeiten eingebunden.

Entwicklung der Merkmale

Da die Entwicklung der Merkmale auf der Literatur, die in Kapitel 3.3 diskutiert wurde, basiert, wird an dieser Stelle nur auf besonders relevante, ausgewählte Literatur hingewiesen. Diese Darstellung wird gewählt, um die Ausgangsbasis für die Identifizierung und Klassifizierung der Merkmale auf Grundlage montagespezifischer Literatur zu verdeutlichen. Dabei wird sowohl der Zusammenhang von Aussagen und Nennungen hinsichtlich der Merkmale aufgezeigt als auch auf entsprechende Autoren hingewiesen.

Verschiedene Autoren liefern Informationen, welche sowohl für die Erarbeitung von Produkt- als auch Prozessmerkmalen Hilfestellungen geben. So werden beispielweise in Beschreibungen die sich auf Bewertungsfragestellungen konzentrieren, Kriterien bzw. Merkmale genannt, die zur allgemeinen Bewertung von Montagesystemelementen dienen (Hesse 2006b). Aber auch spezifische Fragestellungen, wie zum Beispiel Kostenaspekte oder Automatisierungsmöglichkeiten, werden dabei diskutiert (Hartmann 1993; Roß 2002). Bei anderen Autoren, beispielsweise Schmid und Graf, werden mögliche Einflussfaktoren und Merkmale im Zusammenhang der Betrachtung ausgewählter Montageelemente angesprochen (Schmid 2006; Graf 1984). Ebenfalls werden Merkmale von Prozessen und Produkten ausgehend von der Bedeutung der Abhängigkeit der Montageprozesseigenschaften von konstruktiven Aspekten in entsprechenden Arbeiten angesprochen (Holle 2002; Hesse, Mittag 1989; Bäßler 1988).

Die Einflüsse der Konstruktion auf die Prozesse bzw. die Erkenntnisse prozessgerechter Konstruktion stellen eine wichtige Grundlage für die Erarbeitung von Merkmalen dar. Dabei werden die jeweils genannten Einflussgrößen sowohl in der klassischen als auch in der aktuellen Literatur aus unterschiedlichsten Perspektiven betrachtet. So gibt es beispielsweise Betrachtungen im Bereich der Roboter, der Peripheriemodule, der Handhabung im Allgemeinen, der Montagegerechtigkeit oder aber auch bezogen auf die Produktgeometrie im weiteren Sinne (Ullrich 2006; Matthes 1999; Schmaus 1993; Strohmayr 1993; Frank 1975). Bei dieser produktorientierten Literatur liefern zudem Veröffentlichungen, die sich auf die Bewertung von Produkten und Prozessen fokussieren weitere Informationen. Dabei beziehen sich die Bewertungsschwerpunkte vom Produkt ausgehend sowohl auf die Produkte selbst als auch auf die Prozesse und Ressourcen (Beumelburg 2005; Konold, Reger 2009; Hesse 1993; Bick 1992). In der prozessorientierten Literatur fokussieren sich die Autoren beispielsweise auf einzelne Montageprozesse oder auf automatisierte Elemente (Fahrenwaldt 2006; Schmidt 1992; Schuster 1992; Hausknecht 1989).

Aufbauend auf der Literatur lassen sich Produkt- und Prozessmerkmale entwickeln und klassifizieren. Dabei werden neue Merkmale hinzugefügt, doppelte Nennungen eliminiert und die Auflistung bezüglich gleichbedeutenden Nennungen überprüft. Gleichbedeutend sind Merkmale, welche zwar eine unterschiedliche Bezeichnung besitzen, aber Synonyme sinngemäßer, inhaltlicher Überdeckung darstellen. Als Beispiel für Merkmale zur Beschreibung desselben Sachverhaltes sind Masse und Gewicht zu erwähnen. Für eine bessere Übersichtlichkeit innerhalb dieser Methode werden die Produktmerkmale klassifiziert dargestellt (siehe Tabelle 4-6), wobei diese Darstellung erweiterbar ist. Hierbei werden die Merkmale in die Klassen Bauteilform, Bauteilgeometrie, physikalische Eigenschaften, Ruheverhalten und Förderverhalten eingeteilt. Zur Anwendung der Methode ist allerdings nur die im zweiten Schritt dargestellte, von der Klassifikation unabhängige Zuordnung der Merkmale zu den Fähigkeiten relevant.

Tabelle 4-6 Klassifikation von Produktmerkmalen

Produktmerkmale				
Bauteilform	Bauteilgeometrie	Physikalische Eigenschaften	Ruheverhalten	Förder-verhalten
Fließgut	Anschlag	Abkühldauer	Bearbeitungs-lage	Gleitfähig-keit
Flüssigkeit	Befestigungs-möglichkeiten	Anlieferungs-zustand	Einzelverhalten	Richtungs-stabilität
Form-element	Charakteristische Abmessungen	Anzahl Prüfmerkmale	Hängefähigkeit	Rollfähig-keit
Schüttgut	Durchmesser	Belastbarkeit	Lagestabilität	Schütt-fähigkeit
Stückgut	Freiraum für Werkzeug	Besondere Eigenschaften	Ordnungs-wahrschein-lichkeit	

Produktmerkmale				
Bauteilform	Bauteilgeometrie	Physikalische Eigenschaften	Ruheverhalten	Förder-verhalten
Verhaltens-typ	Greif-empfindlichkeit	Elastische Verformung	Ordnungs-zustand	
Wickelgut	Greifmöglichkeiten	Elektrische Leitfähigkeit	Sicherung des Ordnungs-zustandes	
Wirrgut	Größe der Bearbeitungs-fläche	Empfindlichkeit	Standsicherheit	
	Größenklassen	Gewicht	Stapelfähigkeit	
	Haupt-ausdehnungen	Härte	Unordnungs-grad	
	Haupt-trägheitsachsen	Korrosions-beständigkeit	Verhaken	
	Hüllvolumen	Magnetismus	Verhaken im Verband	
	Innenkonturen	Oberflächen-beschaffenheit		
	Kontaktstellen	Qualitätsniveau		
	Kontur	Reibungs-koeffizient		
	Modifikations-elemente	Saugfähigkeit		
	Orientierung	Schlüpfrigkeit		
	Passungen	Schwerpunkt		
	Seitenverhältnisse	Steifheit		
	Schwerpunktlage	Streckgrenze		
	Stand- und Auflageflächen	Temperatur		
	Symmetrie	Umwelteinflüsse		
	Toleranzen	Verschmutzungs-grad		
	Zentrier-möglichkeiten	Viskosität		
	Zugänglichkeit	Wärmeleitfähigkeit		
		Werkstoff		
		Zerbrechlichkeit		
		Zugfestigkeit		

Analog zu der Klassifikation der Produktmerkmale wird in Tabelle 4-7 die Klassifikation der Prozessmerkmale aufgeführt. Hierbei gilt ebenfalls, dass die Darstellung erweiterbar ist und diese Einteilung nicht zwangsweise für die Zuordnung zu den Fähigkeiten notwendig ist. Allerdings bietet sie eine erhöhte Transparenz und Übersichtlichkeit.

Tabelle 4-7 Klassifikation von Prozessmerkmalen

Prozessmerkmale		
Bauteilorientierte Merkmale	Direkt prozess bestimmende Merkmale	Globale Merkmale
Anzahl Elemente/Teile	Abkühlzeit	Antriebsleistung
Arbeitslage	Art des Bewegungsweges	Antriebsart
Art des Prozesshilfsmittel	Bahngeschwindigkeit	Automatisierungsgrad
Bauteilorientierung	Beschleunigung	Emissionen
Bauteilverbindungsart	Bewegungsweg	Energieart
Empfindlichkeit	Drehmoment	Erfassungsart
Formstabilität	Drehzahl	Funktion des Prozesses/Speichers
Greifmöglichkeiten	Kraftdauer	Genauigkeit
Nahtcharakteristik	Kraftverlauf	Hilfsstoffe nötig
Position	Prozessfrequenz	Losgröße
Viskosität	Prozessgeschwindigkeit	Menge der Prozesshilfsmittel
Vor- und Nachbehandlungen	Prozesskraft	Prozesshilfsmittel
	Prozesstemperatur	Prozessvolumen
	Prozessweg	Stückzahl
	Prozesszeit	Zusatzwerkstoffe nötig
	Richtungsart	
	Schwingungsamplitude	
	Umgebungstemperatur	
	Vor- und Nachbehandlungszeit	
	Vorrichtungskraft	
	Wegstrecke	

Der Aufbau der Kostenmerkmale wird hauptsächlich vom in Kapitel 4.7.2 erarbeiteten Kostenmodell determiniert, welches neben der klassisch kostenspezifischen auch kostenorientierte, montagespezifische Literatur als Grundlage besitzt. Daher wird in diesem Abschnitt, ergänzend zu den Kapiteln 2 und 3 sowie zur Vervollständigung des Merkmalmodels, nur kurz auf die montagespezifische Literatur an einem Beispiel hingewiesen (Kratzsch 2000). Die Kostenmerkmale spielen im Kontext der Montagefähigkeiten eine spezielle Rolle, da sie keine direkte Abhängigkeit zu den

Fähigkeiten besitzen. So ist beispielsweise der Anschaffungspreis eines Moduls nicht direkt in Verbindung mit einer bestimmten Fähigkeit zu setzen. Daher entfällt die Einbindung der Kostenmerkmale in die Fähigkeitsstruktur. Die für das Kostenmodell notwendigen Informationen werden direkt für die jeweilige Ressource angegeben.

In Tabelle 4-8 werden exemplarisch ausgewählte Elemente aus dem sehr umfassenden Merkmalverzeichnis der Arbeit von Kratzsch dargestellt, um diesen Teil der Grundlage des Kostenmodells beispielhaft aufzuzeigen. Mit diesen Informationen lassen sich Montagelemente charakterisieren und untereinander vergleichen. Kratzsch erarbeitet dabei Merkmale folgender Kategorien: Investitionskosten, direkte Betriebskosten, indirekte Betriebskosten und monetär nicht quantifizierbaren Kennzahlen (Kratzsch 2000, S. S.199-205). Aus diesen Kategorien wurden die folgenden Merkmale ausgewählt.

Tabelle 4-8 Ausgewählte Kostenmerkmale (vgl. Kratzsch 2000)

Anwendungsbereich	Merkmal
Ausstattung von Montagemodulen	Nutzungsdauer
	Abschreibung
	Anschaffungskosten
	Kalkulatorische Zinsen
Personalkosten	Anzahl der Mitarbeiter pro Schicht pro Modul/Anlage
	Kosten pro Schicht pro Modul/Anlage
Kosten für Fremdleistungen	Reparaturkosten
	Sonstige Fremdleistungen
Kosten für innerbetriebliche Leistungen	Instandhaltungskosten
	Werkzeugkosten
	Qualitätskosten
	Ausschusskosten
	Kosten für Nachbearbeitung

Allokation von Merkmalen zu Fähigkeiten

Im zweiten Schritt werden nun den Montagefähigkeiten die relevanten Produkt- und Prozessmerkmale zugeordnet, wodurch eine strukturierte katalogartige Systematik entsteht. Die Zuordnung der Merkmale zu den Fähigkeiten erfolgt dabei nach folgenden drei Gesichtspunkten:

- Im Zusammenhang mit Fähigkeiten werden Merkmale in der Literatur oftmals direkt genannt. Beispielsweise im Rahmen von Umfragen zu montagerelevanten Themen. Diese Informationen sind als relativ präzise einzuschätzen.
- Die Merkmale werden nicht direkt im Zusammenhang mit Fähigkeiten sondern im Kontext der höheren Abstraktionsebene der Montageprozesse genannt. Dadurch

lassen sich die Merkmale den Fähigkeiten des jeweiligen Montageprozesses nach einer Plausibilitätsprüfung zuordnen. Durch die höhere Abstraktionsebene der Nennungen ist dieser Gesichtspunkt mit einer geringeren Präzision behaftet.

- Im Rahmen der Beschreibung von Montageelementen werden relevante Merkmale genannt. In diesem Fall erfolgt die Zuordnung indirekt. Dies bedeutet, dass die Zuweisung der Merkmale über die Montageelemente auf die den Elementen zugehörigen Fähigkeiten erfolgt. Durch den Zwischenschritt über die Montageelemente und der Tatsache, dass diese mehrere Fähigkeiten besitzen können, leidet die Präzision dieses Gesichtspunktes.

Durch Anwendung dieser Vorgehensweise der Zuordnung erfolgt die Erstellung einer Produkt- und einer Prozessmerkmalliste. Die komplette Darstellung dieser katalogartigen Systematiken befindet sich im Anhang D. In Tabelle 4-9 werden auszugsweise zwei Beispiele der Produktmerkmalliste, für die Fähigkeiten Auflegen und Einhängen, vorgestellt. In Tabelle 4-10 ist dementsprechend ein Auszug aus der Prozessmerkmalliste abgebildet.

Tabelle 4-9 Beispiele für Produktmerkmale

Montagegrundfunktion	Fügen
Montageprozess	Zusammensetzen
Montagefähigkeit	Auflegen
Produktmerkmale	Abmessungen Anschlag vorhanden Empfindlichkeit Formstabilität Freiraum Fügehilfen vorhanden Gewicht Greifmöglichkeiten Kontaktstellen vorhanden Lagestabilität Lagetoleranz Steifigkeit Zugänglichkeit
Montagegrundfunktion	Fügen
Montageprozess	Zusammensetzen
Montagefähigkeit	Einhängen

Produktmerkmale	Abmessungen Anschlag vorhanden Einhängeweg Empfindlichkeit Formstabilität Freiraum Fügehilfen vorhanden Gewicht Greifmöglichkeiten Kontaktstellen vorhanden Steifigkeit Zugänglichkeit

Tabelle 4-10 Beispiele für Prozessmerkmale

Montagegrundfunktion	Fügen
Montageprozess	Zusammensetzen
Montagefähigkeit	Auflegen
Prozessmerkmale	Auflegefrequenz Auflegezeit Fügebewegung Fügekraft/Moment Fügerichtung Losgröße Stückzahl
Montagegrundfunktion	Fügen
Montageprozess	Zusammensetzen
Montagefähigkeit	Einhängen
Prozessmerkmale	Einhängefrequenz Einhängegeschwindigkeit Einhängekraft Fügebewegung Fügekraft/Moment Fügerichtung Stückzahl

Zur Verdeutlichung der grundsätzlichen Anwendungsmöglichkeit werden zwei Beispiele dazu beschrieben. Im ersten Beispiel (Tabelle 4-11) werden drei Einzelteile zu einem Produkt montiert. Da eine einzige Montageprozessklasse und keine Unterbaugruppen angegeben sind, kann daraus abgeleitet werden, dass alle drei Bauteile in einem Prozess gefügt werden. Dabei wird Einzelteil 1 als Basisteil verwendet, in das die beiden anderen Bauteile eingespreizt werden. Die Merkmale liefern die Information, dass ein Anschlag und Fügehilfen

(beispielsweise Fasen) am Basisteil vorhanden sind sowie das Gewicht angegeben wird (beispielsweise ET1 100 g, ET2 und ET3 15 g).

Tabelle 4-11 Anwendungsmöglichkeit von Merkmalen

MPK	Bauteile	Basisteil	Fähigkeit	Produktmerkmale
1	ET 1	X	Federnd Einspreizen	Anschlag vorhanden, Fügehilfen vorhanden, Gewicht, …
	ET 2			
	ET 3			

Im zweiten Beispiel (Tabelle 4-12) wird ein etwas komplexeres Produkt beschrieben. Dargestellt sind dabei die beiden Montageprozessklassen der Einzelteile und der Unterbaugruppen. Die Hauptbaugruppe, die sich aus weiteren Unterbaugruppen zusammensetzt, ist nicht abgebildet. Zuerst werden die Unterbaugruppen durch Nasskleben bzw. Verstiften montiert (MPK 1), um anschließend ineinandergeschoben zu werden (MPK 2). Zur näheren Beschreibung der Fähigkeiten werden hierbei Angaben beispielsweise zum Vorhandensein von Anschlägen, der Oberflächengüte, den Abmessungen und der Zugänglichkeit gemacht.

Tabelle 4-12 Weitere Anwendungsmöglichkeit von Merkmalen

MPK	Bauteile	Basisteil	Fähigkeit	Produktmerkmale
1	ET 3.1.1	X	Nasskleben	Anschlag vorhanden, Klebefläche, Oberflächengüte, …
	ET 3.1.2			
	ET 3.1.3			
1	ET 3.2.1	X	Einpressen-Verstiften	Anschlag vorhanden Passungen Zugänglichkeit, …
	ET 3.2.2			
2	UBG 3.1	X	Ineinander-schieben	Abmessungen, Fügehilfe vorhanden, Zugänglichkeit, …
	UBG 3.2			

4.6 Alternativengenerierung

Das Generieren von alternativen Lösungen für die Konfiguration von Montagezellen stellt für die Angebotserstellung, entsprechend der Phase der Grobplanung (vgl. Kapitel 4.3), eine wesentliche Aufgabe dar. Die in den verschiedenen Planungsschritten entstehenden, möglichen Lösungsvariationen führen zu einer Vielzahl theoretisch möglicher Konfigurationen. Dabei orientiert sich, aufgrund der zeitlichen Rahmenbedingungen der Angebotserstellung, die im Folgenden vorgestellte Methode an einer schlanken Vorgehensweise. Diese ist gekennzeichnet durch eine bei jedem Planungsschritt durchgeführte Auswahl an Lösungsmöglichkeiten, die die Grundlage für die nachfolgenden Planungsschritte bilden. Zur Verdeutlichung werden die in dieser Methode vorhandenen

Auslöser, die zu neuen Konfigurationen führen, im Rahmen der Vorgehensweise dieser Methode beschrieben.

Vor und während der Planung einer Montagezelle kann aufgrund der Parallelisierung von Produktentwicklung und Montageplanung und der damit zusammenhängenden Unschärfe des Produkts, Einfluss auf dessen Gestaltung genommen werden (vgl. Kapitel 4.3). Dabei müssen die Regeln des Design for Assembly und die Erkenntnisse, die während der Durchführung der Planungen gewonnen werden, in der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Die im Rahmen dieser Änderungen determinierten Möglichkeiten unterschiedlicher Konfigurationen werden in der vorliegenden Methode nicht separat beschrieben (vgl. Kapitel 2.6.1). Dies liegt in der Fokussierung der vorliegenden Methodik auf die Grobplanungsphase begründet. Für diese stellen dies Veränderungen der Eingangsgrößen innerhalb der Ausgangssituation dar. Daher ist die Methode so gestaltet, dass sie unterschiedlichste Eingangsgrößen handhaben kann und die einzelnen Schritte iterativ durchlaufen werden.

Im Rahmen der Planung entstehen in dieser Methode in verschiedenen Planungsschritten Möglichkeiten alternativer Konfigurationen, die unter der Bildung von Montagezellen-Alternativen zusammengefasst werden (siehe Kapitel 4.3). Diese Entstehungspunkte für Konfigurationen sollen im Folgenden beschrieben werden.

Die im Rahmen der Lebenszyklusbetrachtung erarbeiteten lokalen und globalen Szenarien bilden eine wichtige Grundlage für Erarbeitung von Konfigurationen (vgl. Kapitel 4.4). Entsprechend ihrer Ausprägungen sind die stückzahlbezogenen Anforderungen an die zu erstellenden Konfigurationen festgelegt. Durch Bestimmung bzw. Variation der Lebenszyklusphasen und der Stückzahlbereiche wird somit direkt Einfluss auf die Konfigurationen genommen.

Abhängig von seinem Aufbau lässt sich das Produkt auf unterschiedliche Weise strukturieren und auf verschiedene Weise in Baugruppen und Montageprozessklassen untergliedern (vgl. Kapitel 4.5.3). Da die Produktstruktur wesentlichen Einfluss auf den Vorranggraph und damit auf die Montageablaufstruktur hat, wird dadurch die darauf basierte Erstellung von Konfigurationen beeinflusst.

Im Bereich der Erstellung der Montageablaufstruktur anhand von Fähigkeiten gibt es zwei wichtige Punkte zur Beeinflussung der Erstellung unterschiedlicher Konfigurationen. So ist zum einen die Auswahl der Fähigkeiten an sich mit möglichen Alternativen behaftet. Es können beispielsweise mehrere unterschiedliche Fähigkeiten (bspw. Hohlzapfennieten, Stanznieten, Schmelzschweißen durch Gas) für die gleiche Aufgabe ausgewählt werden, wenn diese grundsätzlich dafür geeignet sind (vgl. Kapitel 4.5.1). Zum anderen kann die Reihenfolge der Fähigkeiten der auf der Grundidee des Vorranggraphen entwickelten Fähigkeitsfolge (siehe Kapitel 4.5.3) entsprechend der Freiheitsgrade des Graphen verändert werden. Dies führt ebenfalls zu Unterschieden bei der Fähigkeitsfolge und somit zu Alternativen bei den Konfigurationen.

Bei feststehender Fähigkeitsfolge wird für jede Fähigkeit eine passende Ressource gesucht (bzw. vom System vorgeschlagen, siehe Kapitel 5.2.4). Hierbei können für eine Fähigkeit

unterschiedliche Ressourcen oder ähnliche Ressourcen unterschiedlicher Eigenschaften als Alternativen gefunden werden und somit zu alternativen Konfigurationen führen (vgl. Kapitel 4.5.1). Die unterschiedlichen Eigenschaften können sich dabei beispielsweise durch Automatisierungsgrad, Anzahl benötigter Mitarbeiter, Takt- oder Bearbeitungszeit charakterisieren lassen.

Weitere Alternativen können bei der Kapazitätsbetrachtung im Rahmen der Leistungsabstimmung entstehen (vgl. Kapitel 2.5 und 5.2.5). Diese Alternativen kennzeichnen sich durch unterschiedliche Anordnung der Module in Anzahl, Struktur und der Variation der Anzahl zusammengefasster Prozessmodule in einem Basismodul. So sind in diesem Aufgabenfeld die Prozessmodule den Basismodulen zuzuordnen und die Anzahl der Module festzulegen. Dazu zählt beispielsweise auch die Festlegung der Anzahl paralleler Stationen und Nebenschlussstationen.

Die Möglichkeiten der Alternativengenerierung werden in Kapitel 5.2 im Rahmen der Methode zur rechnergestützten Planung für den Planer leichter handhabbar gemacht. Dort erfolgt die nähere Beschreibung der Umsetzung von den genannten Möglichkeiten der Alternativengenerierung.

Weitere, auf den einzelnen Konfigurationen basierende Variationen im Hinblick auf den Lebenszyklus entstehen bei der Kombination von Konfigurationen über Lebenzyklusphasen hinweg. Als Eingangsinformationen dienen dabei die generierten Alternativkonfigurationen sowie die erarbeiteten Stückzahlszenarien (siehe Kapitel 4.4). Durch Zuordnung der Konfigurationen zu einzelnen zeitlichen Abschnitten (Lebenszyklusphasen) der Szenarien entstehen die bereits genannten Ausbaustufen (Konfigurationen einer Lebenszyklusphase), womit die Grundlage für Ausbaustufenfolgen (ASF) geschaffen wird (vgl. Kapitel 2.5). Diese Ausbaustufenfolgen stellen eine chronologische Aneinanderreihung ausgewählter Ausbaustufen entsprechend der Szenarien und somit eines Lebenszyklus dar. Da für jeden Stückzahlverlauf der entwickelten Szenarien und somit für jede Phase des Betrachtungszeitraumes alternative Konfigurationen (Alternativen) zur Verfügung stehen, ist eine umfassende Zahl an Möglichkeiten für die spätere Umsetzung der Montage vorhanden.

Diese Ausbaustufenfolgen bilden die Grundlage für die Durchführung der szenariobasierten Bewertungssystematik. Die wichtigste Ausbaustufe einer Ausbaustufenfolge für die spätere Entscheidung des Kunden ist die Ausbaustufe der ersten Lebenszyklusphase (Initialkonfigurationen), da sich der Kunde nur für eine Option der ersten Phase entscheiden muss (siehe Kapitel 2.5). Bei den weiteren Ausbaustufen kann aufgrund der Modularität entsprechend den dann aktuellen Anforderungen der technischen Möglichkeiten variiert werden. Dabei bilden mehrere Konfigurationen, die hardwareseitig aufeinander aufbauen und jeweils für einen Kapazitätsbereich ausgelegt sind, eine Initialopportunität. Die Konfigurationen einer Initialopportunität sind hierbei im Gegensatz zu denen der Ausbaustufenfolgen ohne Zeitbezug, das heißt noch keiner Lebenszyklusphase zugeordnet und in keiner zeitlichen Reihenfolge zu sehen. Verschiedene Ausbaustufenfolgen auf Basis unterschiedlicher Initialkonfigurationen, welche einem einzigen Lebenszyklusszenario (Stückzahlverlauf) zugeordnet werden, stellen ein sogenanntes Alternativenfeld (AF) dar. Die

Ausbaustufenfolgen werden dabei aus den einzelnen Konfigurationen einer Initialopportunität aufgebaut. Bevor die Lösungen einer Bewertung unterzogen werden, erfolgt eine Plausibilitäts- und Realisierbarkeitsprüfung durch erfahrene Planer des Herstellers.

4.7 Szenariobasierte Bewertungssystematik

Auf Grundlage der erarbeiteten Alternativkonfigurationen und der entwickelten Szenarien wird die szenariobasierte Bewertungssystematik im Folgenden konzeptionell entwickelt. Dies stellt neben der generischen Beschreibungsmethode mit Fähigkeitsmodell den zweiten wesentlichen Schwerpunkt der Methodik dar. Dabei wird zuerst der gesamte Bewertungsablauf in seiner Struktur und den einzelnen Schwerpunkten erarbeitet. Anschließend erfolgt, aufgrund der hohen Bedeutung in dieser Systematik, die separate Beschreibung des Kostenmodells als Grundlage der Kostenbetrachtung sowie die Betrachtung bewertungsrelevanter Aspekte. Abschließend erfolgt die Entwicklung der Gesamtbewertung, in welcher alle Aspekte zusammengeführt werden.

4.7.1 Gesamtablauf

Das Ziel einer mehrdimensionalen Bewertungssystematik wird durch die im Folgenden vorgestellte szenariobasierte Methode im Wesentlichen durch eine spezifische Kostenbetrachtung und eine nutzwertanalytische Bewertung umgesetzt. Dabei werden die globalen Leistungsziele Qualität, Kosten und Zeit wie folgt berücksichtigt: Die Qualität wird sich aufgrund der konstant hohen Anforderungen der Kunden bei den zu bewertenden Konfigurationen nicht unterscheiden (vgl. Kapitel 4.1). Allerdings ist für die Konfigurationen der Aufwand zur Erreichung dieser hohen Qualität unterschiedlich, was sich in den Kosten und Zeiten der jeweiligen Konfiguration widerspiegelt. Die Kosten werden in der oben genannten Kostenbetrachtung spezifisch entsprechend einer szenariobasierten Lebenszyklusbetrachtung erarbeitet. Die Zeiten werden im Rahmen der nutzwertanalytischen Bewertung berücksichtigt. Das Gesamtschema der Systematik ist in Abbildung 4-14 dargestellt. Sie gibt einen Überblick über den gesamten Ablauf dieser Methode.

Als Eingangsinformationen dienen dabei die bei der Alternativengenerierung aus Szenarien und Alternativkonfigurationen entstandenen Ausbaustufenfolgen (siehe Kapitel 4.6). Diese relativ hohe Zahl an möglichen Ausbaustufenfolgen sollte entsprechend einer zielorientierten, effizienten Vorgehensweise vor einer detaillierten Bewertung reduziert werden. Daher sieht diese Methode eine szenariobasierte Vorauswahl von Ausbaustufenfolgen vor. Diese ist nicht zwingend notwendig, aber aufgrund der genannten Gründe wird diese in der vorgestellten Methode eingesetzt. Bei der Vorauswahl werden dabei zuerst die anfangs erarbeiteten Szenarien mit den zuvor zugeordneten Konfigurationen betrachtet. Bei dieser Vorauswahl wird der Kunde als wesentlicher Treiber in die Entscheidung mit einbezogen. Dabei erfolgt eine präzise Beschreibung durch die Spezialisten des Anlagenherstellers, die alle entscheidungsrelevanten Informationen in kundenorientierter Form darstellen. Zu den wichtigsten Informationen zählen dabei beispielsweise die Initialstückzahl, der Stückzahlverlauf und die technischen Eigenschaften der einzelnen Ausbaustufen. Aufbauend auf diesen Informationen werden gemeinsam mit

dem Kunden favorisierte Ausbaustufenfolgen und Stückzahlverläufe ausgewählt und nicht gewünschte eliminiert.

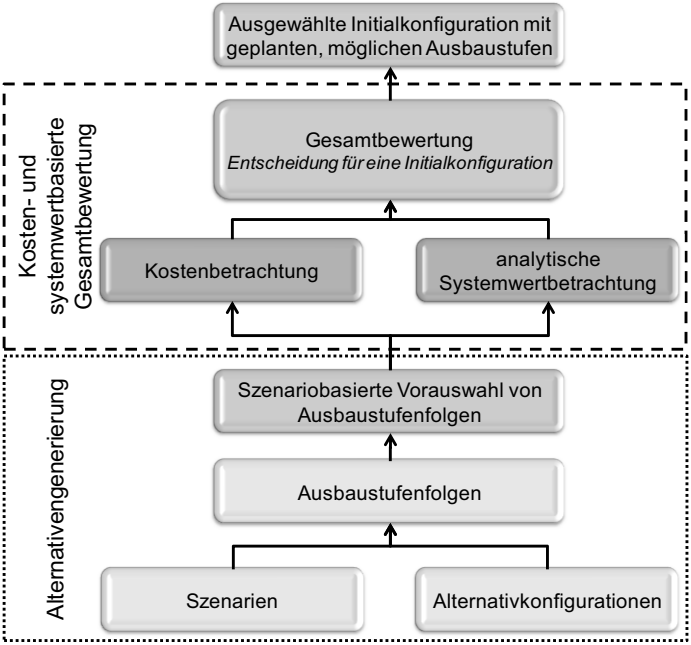


Abbildung 4-14 Gesamtschema der szenariobasierten Bewertungssystematik

Die nach der Vorauswahl vorhandenen Ausbaustufenfolgen werden im Anschluss einer spezifischen Kostenbetrachtung und einer analytischen Systemwertermittlung unterzogen, um diese miteinander auf objektivierter Ebene vergleichbar zu machen. Die Kostenbetrachtung wird aufgrund ihrer hohen Relevanz innerhalb der Systematik im folgenden, separaten Kapitel konzeptionell erarbeitet (siehe Kapitel 4.7.2.). Die Beschreibung der analytischen Systemwertermittlung und der dazu notwendigen Bewertungskriterien erfolgt in Kapitel 4.7.3. Danach wird die abschließende kosten- und systemwertbasierte Gesamtbewertung entwickelt. Die auf diese Gesamtbewertung gestützte Entscheidung trifft der Kunde somit auf Basis der Informationen zu den jeweiligen Kosten und der Ergebnisse der analytischen Systemwertermittlung in Kombination mit seinem unternehmensspezifischen Know-how. Dabei erfolgt stets eine Beratung durch Spezialisten des Anlagenherstellers. Diese Endauswahl wird in einer oder zwei Stufen durchgeführt. In der ersten Stufe entscheidet sich der Kunde für eine Initialopportunität entsprechend der Informationen aus Kostenbetrachtung und Bewertung sowie der eigenen Einschätzung. In der zweiten, optionalen Stufe wird geprüft, ob es aus kundenspezifischen Präferenzen sinnvoll ist, einzelne Ausbaustufen anderer Ausbaustufenfolgen zu integrieren. Dies erfolgt durch Substitution einer vorhandenen Ausbaustufe der gewählten Ausbaustufenfolge. Dabei

sind alle Folgen bezüglich der Veränderungen der Kostenaspekte und der nutzwertanalytischen Bewertungsergebnisse zu berücksichtigen.

Alternativ zur kundenintegrierten Bewertung kann die vorgestellte Systematik auch ohne Einbindung des Kunden in die Entscheidungsprozesse bei der Vor- und Endauswahl erfolgen und somit vom Anlagenhersteller direkt ein Angebot erstellt werden. Allerdings ist hierbei zu berücksichtigen, dass die Transparenz und dadurch die Akzeptanz wie auch die emotionale Bindung des Kunden zum Ergebnis negativ beeinflusst werden.

Als Ergebnis steht bei Anwendung dieser Methode eine ausgewählte Initialkonfiguration mit geplanter Ausbaustufenfolge, welche entsprechend der entwickelten Szenarien ausgebaut werden kann. Ein weiterer wesentlicher Teil des Ergebnisses sind umfassende Informationen zu Ausbaumöglichkeiten und den damit verbundenen Vor- und Nachteilen inklusive Kosteninformationen.

4.7.2 Kostenmodell

Als Basis der Kostenbetrachtung dienen im Wesentlichen die mittels Vorauswahl bestimmten Ausbaustufenfolgen und die entsprechenden Szenarien. Aufbauend auf den bisher erarbeiteten Ergebnissen erfolgt somit eine Lebenszykluskostenrechnung, welche im Folgenden detaillierter entwickelt wird. Diese beinhaltet die Kosten der Entstehungs-, Betriebs- sowie Rekonfigurationsphase und der indirekten Bereiche. Die Entstehungsphase beinhaltet dabei die Investitionskosten, wobei daraus resultierende Kosten in der Betriebsphase Berücksichtigung finden. Die Wandlungskosten sind in den Kosten der Rekonfigurationsphase einbezogen und die Kosten der indirekten Bereiche bilden den Abschluss der ganzheitlichen Kostenbetrachtungen. Ziel dieser Kostenbetrachtung ist die Bereitstellung von transparenten Kosteninformationen und die Erarbeitung der Grundlagen für die Berechnung von Stückkosten.

Diese Vorgehensweise der Betrachtung monetärer Aspekte konzentriert sich auf die Analyse der Kosten modularer Systeme. Die Einnahmen werden aufgrund der an den Aufgaben der Anlagenhersteller orientierten Methode nicht berücksichtigt. Dies begründet sich vor allem darin, dass die möglichen Einnahmen und die entsprechenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen des Anlagenbetreibers für den Hersteller nicht zugänglich sind.

4.7.2.1 Kosten in der Entstehungsphase

In der Entstehungsphase eines Montagesystems sind die auftretenden Kosten den indirekten Bereichen zuzuordnen. Die Kosten setzen sich aus dem modulspezifischem Kostensatz für den Aufbau (siehe Kapitel 4.7.2.3) und den, soweit nicht enthalten, Anlaufkosten zusammen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Kosten, die für die Inbetriebnahme durch den Anlagenhersteller entstehen, von diesem separat ausgewiesen werden und damit den Entstehungskosten zugordnet werden. Da in der Rekonfigurationsphase in den Bereichen Aufbau und Anlauf ähnliche Aufgaben durchzuführen sind, werden die entsprechenden Kosten in ähnlicher Form betrachtet. Daher erfolgt eine ausführlichere Beschreibung im Kontext der Betrachtung der Rekonfigurationsphase (siehe Kapitel 4.7.2.3).

Die Investitionskosten, welche in Form von Ausgaben ebenfalls in der Entstehungsphase auftreten, aber nicht den Entstehungskosten zugeordnet werden, werden im Folgenden beschrieben. Neben dem gesamten Umfang der Investitionskosten sind die daraus resultierenden Kosten für die Betriebsphase für den Kunden von wesentlicher Bedeutung. In dieser werden Investitionskosten im Rahmen von fixen Betriebskosten berücksichtigt. Dazu zählt die Verrechnung der kalkulatorischen Zinsen und der Abschreibungen. Diese Kosten werden, wie die Investitionskosten der Rekonfigurationsphasen, dem Kunden in einem Investitionsplan zur Verfügung gestellt. Die in der Entstehungsphase auftretenden Investitionskosten treten vor allem im Bereich der Betriebs- und Einsatzmittel auf. Die Zahl der für die jeweilige Konfiguration notwendigen Elemente hängt direkt von der Zuordnung der Prozesse des Prozessablaufs zu einzelnen Montagestationen ab. Der Hauptfokus der Investitionskosten liegt daher auf den einzelnen Elementen eines modularen Montagesystems, wie beispielsweise der Kosten für Montagestationen. Dazu gehören die Kosten der Basis-, Prozess- und Peripheriemodule.

Ebenfalls zu beachten, teilweise in hohem Umfang, sind die Kosten für Aufbewahrungselemente und -mittel, wie Teilebehälter und Lagereinrichtungen. Aber auch Transportmittel und -module müssen je nach Ausgangszustand in entsprechendem Umfang beschafft werden (dazu zählen auch Hub- oder Förderwagen, siehe Kapitel 4.5.2).

Die Höhe der Investitionen in IT-Elemente ist ebenfalls stark von der Ausgangssituation abhängig. Da sich die einzelnen Konfigurationen durch die Standardisierung der Module bezüglich der IT-Elemente in definierten Stufen leicht unterscheiden lassen, liegt ein wichtiger Kostenblock im Bereich der Schnittstellen zu bestehenden Systemen im Unternehmen und zu der IT-Infrastruktur.

Im Bereich der Versorgungselemente sind meist aufgrund der standardisierten Schnittstellen und der integrierten Versorgung innerhalb der Montagezelle relativ geringe Kosten zu erwarten, Allerdings können Faktoren wie spezielle Medienanschlüsse für Prozessmodule oder die Notwendigkeit der Erweiterung der Gesamtkapazität der Medienversorgung großen Einfluss auf die Kosten nehmen. Abhängig von der Ausgangssituation und der Verfügbarkeit der Medien können weitere Kosten für die Bereitstellung der Medien entstehen.

4.7.2.2 Kosten in der Betriebsphase

Bei der Betrachtung der Kosten der Betriebsphase werden die Kostenaspekte manueller Montageprozesse separat betrachtet. Außerdem erfolgt die Erarbeitung der Montagemodulkostenrechnung und sonstiger Betriebskosten.

Manuelle Montageprozesse

Zur Bestimmung der bei manuellen Montageprozessen wichtigen Personalkosten können sowohl analytische als auch synthetische Methoden zur Planung des Zeitbedarfs angewendet werden. Mit den letztgenannten Methoden werden für die manuell durchgeführten Prozesse auf Basis von Bewegungselementen, die mit vorbestimmten Zeiten verknüpft sind, die Soll-Zeiten ermittelt. Da eine detaillierte Analyse der manuellen Prozesse Inhalt der Feinplanung ist, werden an dieser Stelle schnell durchführbare Verfahren

eingesetzt, um eine erste grobe Einschätzung zu ermöglichen (bspw. Zeitaufnahme nach REFA, Schätzen oder MTM). In dieser Methode wird aufgrund der Fokussierung auf die Angebotsphase angenommen, dass Montagepersonal ohne zusätzlichen Aufwand in anderen Unternehmensbereichen eingesetzt werden kann. Daher werden diese Kosten den variablen Kosten zugeordnet (Fichtmüller 1996, S. 42; Whitney 2004, S. 499).

Montagemodulkosten

Entsprechend der Modularität des Montagesystems erfolgt die Kostenbetrachtung modulbezogen. Diese sogenannte Montagemodulkostenrechnung baut auf den Prinzipien der Maschinenstundesatz-, der Platzkostenrechnung und des Activity Based Costing auf. Dabei werden die einzelnen Module wie eigenständige Kostenstellen betrachtet und ein zugehöriger Modulstundensatz berechnet. Dieser Satz besteht sowohl aus fixen als auch aus variablen Bestandteilen.

In dem vorgestellten Kostenmodell werden die kalkulatorischen Abschreibungen und Zinsen sowie die Raumkosten zu den fixen Betriebskosten gezählt. Bei der Abschreibung wird dabei zwischen produktspezifischen (Abschreibung über den Produktlebenszyklus) und wiederverwendbaren Elementen (Abschreibung über die komplette technische Nutzungsdauer) unterschieden. Vertreter der produktspezifischen Elemente können beispielsweise Prozessmodule sein, wohingegen klassischer Weise Basismodule und Transfermodule zu den wiederverwendbaren Elementen gezählt werden. Die Festlegung der technischen Nutzungsdauer erfolgt, unter Berücksichtigung der Systembelastung, über Erfahrungswerte des Herstellers und auf Basis von Validierungsläufen. In der Literatur werden für produktspezifische Elemente Werte bis zu 10 Jahren genannt und für wiederverwendbare Elemente Werte von teilweise über 20 Jahren (Fichtmüller 1996, S. 57; Weule, Buchholz 2000, S. 3; Weule, Schmälzle, Trender 2000, S. 103). Die Raumkosten werden über die benötigte Fläche (Modul und zugehöriges Personal) durch Multiplikation mit einem Raumkostensatz berechnet (von der Osten-Sacken 1999, S. 87; Kratzsch 2000, S. 85). Die entstehenden, variablen Energie- und Medienkosten (bspw. Strom, Druckluft) werden entsprechend des Verbrauches des jeweiligen Moduls berechnet. Mögliche Instandhaltungskosten werden im Rahmen der Betrachtung der indirekten Bereiche berücksichtigt (siehe Kapitel 4.7.2.4).

Zur Berechnung des Modulstundensatzes wird neben den Kosten auf die stillstandsfreie Laufdauer des Moduls zurückgegriffen. Diese wird in Anlehnung an die VDI 3423 entsprechend der Ausführungen in der Literatur ermittelt (VDI-Richtlinie VDI 3423; Wiendahl, Hegenscheidt 2006, S. 380). Die für die Durchführung notwendigen Daten werden sowohl vom Anlagenhersteller als auch vom späteren Betreiber (Kunde) bereitgestellt. Der Modulstundensatz ergibt sich dann durch Division der Modulkosten pro Jahr durch die stillstandsfreie Laufdauer pro Jahr.

Falls eine Berechnung der Kosten für einzelne Montagefähigkeiten gewünscht ist, kann dies auf zwei Arten erfolgen. Erstens können bei Kenntnis der Zeitdauer für die Durchführung des entsprechenden Vorgangs durch Multiplikation dieser mit dem Modulstundensatz die Kosten für den Prozess berechnet werden. Die zweite Möglichkeit baut auf den Ergebnissen des

Sonderforschungsbereichs 336 auf. Dabei wird der Modulstundensatz durch Berücksichtigung eines Prozessparameters (bspw. Länge der Schweißnaht) und des zugehörigen Ressourcenverbrauchssatzes (bspw. Zeit pro Weg) umgerechnet. Durch Kenntnis des Wertes des Prozessparameters (bspw. benötigter Weg) können die modulabhängigen Prozesskosten berechnet werden. Dann müssen noch die prozessbedingten Lohnkosten addiert werden um die Kosten für den Montagevorgang zu erhalten.

Für die unterschiedlichen Automatisierungsgrade von Modulen (von manuell über hybrid bis hin zu vollautomatisch) wird durch die Modulkostenrechnung mittels Betrachtung der jeweiligen Personalkosten eine Grundlage geschaffen, um die monetären Auswirkungen entsprechend unterschiedlich zu bewerten.

Sonstige Betriebskosten

Zu den sonstigen Betriebskosten zählen die kalkulatorischen Abschreibungen und Zinsen des gesamten Montagesystems soweit sie in der Modulkostenrechnung nicht berücksichtigt wurden. Hinzu kommen außerdem die Energie- und Medienkosten, welche nicht direkt einem Modul zuordenbar sind. Je nach Anwendungsfall müssen noch Schulungskosten und Wartungskosten (bspw. Wartung von informationstechnischen Systemen) beachtet werden. Diesem Kostenblock werden auch Rüstkosten zugeordnet, welche modulspezifisch analysiert werden. Dadurch kann der Aufwand im System, der durch Produktvarianten oder weitere auf dem System zu fertigende Produkte entsteht, berücksichtigt werden. Ein mit höherem Aufwand behaftetes System wird somit im Rahmen der Kostenbetrachtung schlechter bewertet. Außerdem werden Kapitalbindungskosten berücksichtigt, da ein großer Anteil dieser im Montagesystem anfallen (Hartmann 1993, S. 62). Basis der Berechnung sind der kalkulatorische Zinssatz, die Durchlaufzeit der Bauteile und deren Materialwert (Kratzsch 2000, S. 89). Kapitalbindungskosten können außerdem für gelagerte Werkzeuge und Ersatzteile berechnet werden.

4.7.2.3 Kosten in der Rekonfigurationsphase

Die Rekonfigurationsphase beinhaltet zwei wesentliche Kostenaspekte. Die Kosten für die Wandlung des Montagesystems sowie die Betrachtung verschiedener Möglichkeiten der Wiederverwendung einzelner Montagemodule.

Die Wandlungskosten eines Montagesystems werden durch den Aufbau und Rückbau des modularen Systems bestimmt, welche stufenweise über den Lebenszyklus erfolgen und die über die erarbeiteten Szenarien in Zeitpunkt und Umfang festgelegt werden. Aus den Szenarien leitet sich somit der Wandlungsbedarf des Montagesystems ab, wobei die entsprechenden Kosten unterschiedlichen Wandlungsanlässen und Montagemodulen zugeordnet werden. Dabei werden die Wandlungskosten in Wandlungsprozesskosten, bestehend aus Abbau-, Umstellungs- und Aufbaukosten sowie Wandlungssystemkosten, Stillstands- und Anlaufkosten, gegliedert. Wandlungssystemkosten entstehen also bei der Durchführung von Wandlungsprozessen.

Zur Verdeutlichung der Wandlungsprozesse innerhalb der Rekonfigurationsphase werden im Folgenden wesentliche Vorgänge genannt: Zu den ersten Schritten zählt das Beseitigen von Betriebsstoffen, die Abkopplung der Energie- und Medienversorgung und die Reinigung der Module. Nach Transport an den Bestimmungsort wird die Versorgung wieder hergestellt. Durch die Standardisierung bei Anschlüssen und Steuerung nach dem PLUG&PRODUCE Prinzip kann dies schnell und unkompliziert durchgeführt werden. Die Kosten für Ab- und Aufbau können aufgrund der Eigenschaften modularer Systeme vom Anlagenhersteller in Form eines Fixkostensatzes modulspezifisch angegeben werden. Die Umstellungskosten hängen im Wesentlichen vom Transportaufwand ab und werden daher über Lohnkosten und einen Kostensatz für das verwendete Transportmittel (bspw. Hubwagen oder Gabelstapler) berechnet.

Im Rahmen der Wandlungssystemkosten wird zur Ermittlung der Stillstandskosten auf Erfahrungswerte des Anlagenherstellers zu Abbau-, Umstellungs- und Aufbauzeiten zurückgegriffen. Die Zeitdauer des Stillstands wird somit durch fixe Betriebskosten entsprechend der Modulkostenrechnung und der sonstigen Kosten in einen monetären Rahmen gebracht. Anlaufkosten setzen sich unter anderem aus erhöhten Personalkosten aufgrund von Nacharbeit und Minderleistung (Lernkurveneffekte) sowie Ausschusskosten und Kosten technischer Störungen zusammen (Kratzsch 2000, S. 82). Die Zeitdauer des Anlaufs als wesentlicher Faktor ist stark von der Prozessfähigkeit der Module abhängig. Daher nimmt der Anlagenhersteller durch seine Erfahrungswerte in diesem Aspekt eine wichtige Rolle ein. Auf Basis des Umfangs der Rekonfiguration und der Komplexität des Anlaufs werden entsprechende Fixkostensätze zur Berechnung des Anlaufaufwands verwendet. Dazu wird die Komplexität über eine Komplexitätsskala bewertet.

Die Wiederverwendung einzelner Montagemodule kann die Kosten einer Rekonfiguration wesentlich beeinflussen. Daher ist die Wiederverwendung von Modulen im Zusammenhang mit der Rekonfigurationsphase zu behandeln und entsprechende Kostenaspekte sind zu berücksichtigen. In diesem Modell werden dabei drei Möglichkeiten der Wiederverwendung unterschieden: der stufenweise Ausbau, die Integration von Modulen in ein anderes Montagesystem und die spätere bzw. zukünftige Wiederverwendung.

Beim stufenweisen Ausbau eines Montagesystems wird neben dem Vorteil der Flexibilität in der Entscheidung (spätere Entscheidung bzgl. Art und Umfang des Ausbaus möglich) durch die stufenweise Kostenbelastung die Kapitalbindung verringert und dadurch die Möglichkeit geschaffen, das nicht benötigte Kapital anderweitig anzulegen. Durch geringere Fixkosten in den Phasen des Aufbaus kann der Break-even-Point im Vergleich zu einem konventionellen, auf die Maximalstückzahl ausgelegten System früher erreicht werden (vgl. Slama u. a. 2004, S. 204). Dadurch sinkt das Investitionsrisiko. Bei der Rekonfiguration in eine weitere Stufe erfolgt die Berechnung der Kosten für weiterverwendete Module entsprechend der vorgestellten Modulkostenrechnung (siehe Kapitel 4.7.2.2). Die Rekonfigurationsphase beinhaltet somit die Festlegung des Investitionsumfangs, welcher für die Initialkonfiguration in der Entstehungsphase betrachtet wurde. Die Betriebskosten der folgenden Phase lassen sich wiederum aus den Investitionskosten der jeweiligen Ausbaustufe ableiten.

Die Möglichkeit der Integration von Montagemodulen in ein anderes Montagesystem kann im Rahmen der Rekonfigurationsphase sowohl beim Ausbau als auch beim Rückbau betrachtet werden. In diesem Kostenmodell wird dabei auf Basis von Restwerten gerechnet, wobei sich das Kostenmodell auf ein Montagesystem fokussiert. Die parallele Betrachtung mehrerer Systeme erfolgt in dieser Methode nicht.

Die spätere Wiederverwendung von Montagemodulen orientiert sich an den erarbeiteten Szenarien und damit an der Wiederverwendungsmöglichkeit von Modulen in späteren Phasen des Systemlebenszyklus. Sie basiert auf der Annahme, dass diese nicht in einem anderen Montagesystem vorteilhaft eingesetzt werden können. Berücksichtigt werden im Kostenmodell in diesem Zusammenhang die Lagerkosten für eingelagerte Module.

Für Module, welche langfristig nicht wiederverwendet werden können, erfolgt eine Berücksichtigung der Entsorgungskosten durch einen Fixkostensatz. Ansätze zur Berücksichtigung von Demontage, Verschrottung oder Wiederaufbereitung werden in das Kostenmodell nicht integriert. Zudem werden mögliche Verkaufserlöse nicht betrachtet.

4.7.2.4 Kosten der indirekten Bereiche

Entsprechend der im Stand der Technik beschriebenen ganzheitlichen Sichtweise auf ein Montagesystem (Kapitel 2.2) müssen bei der Planung und somit bei der Kostenbetrachtung die indirekten Bereiche über alle Phasen des Systems betrachtet werden. Dazu werden, entsprechend der in Kapitel 2.2 vorgestellten Gliederung die Bereiche Arbeitsvorbereitung, Logistik, Qualitätsmanagement und Instandhaltung in das Kostenmodell einbezogen. Vor allem durch die Anpassungen der Montagezelle über den Lebenszyklus hinweg sind in allen Phasen Veränderungen in den Kosten der indirekten Bereiche zu beachten. Diese variieren beispielsweise durch Aus- und Rückbaustufen und den damit zusammenhängenden Änderungen von Automatisierungsgrad, Stückzahlen und Variantenzahlen. Durch die Steigerung des Gemeinkostenanteils – auf bis zu über 70% – wird die Bedeutung einer präziseren Verrechnung dieser Kosten stetig größer (vgl. Reinhart 1998, S. 103).

Aufgrund dieser hohen Bedeutung ist es notwendig, bei der Erstellung eines optimalen Montagesystems in seiner Gesamtheit die indirekten Bereiche näher zu detaillieren. Dabei muss die Hauptaufgabe dieser Bereiche, die Versorgung des Montagesystems mit den notwendigen Leistungen und Informationen zu geringsten Kosten und dem richtigen Zeitpunkt (Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, S. 3), im Fokus der Betrachtung liegen.

Die Kosten in den indirekten Bereichen werden in diesem Modell auf Basis von Prozessen geplant. Dabei wird das Ziel verfolgt, dem Kunden Kostenentwicklungen in den indirekten Bereichen bei unterschiedlichen Systemkonfigurationen aufzuzeigen. Als Basis für die Kostenbetrachtung können zwei verschiedene Möglichkeiten genutzt werden. Einerseits kann auf die Prozesskostenbetrachtung des Kunden, falls beim Kunden in Anwendung, und somit auf die entsprechenden Kosteninformationen zurückgegriffen werden. Andererseits wird bei nicht existierender Prozesskostenrechnung auf die Erfahrung von Experten des Kunden und des Anlagenherstellers zurückgegriffen und es werden Schätzungen und

Prognosen erstellt. Hierzu wird auf die bereits entwickelten Szenarien zurückgegriffen und die Kosten werden auf Basis der anfallenden Prozesse berechnet. Beispielsweise wird abhängig von einem Szenario und den darin enthaltenen Rekonfigurationen der Aufwand für diese in den indirekten Bereichen abgeschätzt.

Da wie bereits angesprochen auf die in Kapitel 2.2 genannte Gliederung der indirekten Bereiche zurückgegriffen wird, werden an dieser Stelle nicht alle Tätigkeiten dieser Bereiche wiederholt, sondern es werden einzelne kostenbezogene Aspekte hervorgehoben. So sei beispielsweise darauf hingewiesen, dass im Bereich der Arbeitsablaufplanung als Teil der Arbeitsplanung die Montageanlagenplanung im Bereich der Grobplanung durch den Anlagenhersteller durchgeführt wird. Daher werden die Kosten, die im Rahmen der Konfiguration des Montagesystems entstehen, in der Kalkulation des Anlagenherstellers im Verkaufspreis des Montagesystems bzw. der einzelnen Module berücksichtigt. Gleiches gilt für die Montagemittelplanung sowie, abhängig vom Detaillierungsgrad des Projekts, für weitere Aufgaben. Im Bereich der Logistik, die sich in dieser Methode auf die innerbetriebliche Logistik beschränkt, werden die Kosten für die Einlagerung, Kommissionierung und den Transport berücksichtigt. Dabei werden die Transportkosten auf Basis der Transportzeit, der Transportstrecke, dem Personalkostensatz und dem Kostensatz der Transportmittel ermittelt. Im Bereich des Qualitätsmanagements sei nochmals auf die hohen Qualitätsanforderungen hingewiesen, die die Zielsetzung der Nullfehlerproduktion und damit die Differenzierung der Alternativen über die Kosten determinieren (vgl. Kapitel 4.1). Die Kosten für das Qualitätsmanagement werden dabei in Qualitätskosten und Abweichungskosten unterschieden. Zu den Qualitätskosten werden dabei Kosten der präventiven Vermeidung von Abweichungen (bspw. Schulungskosten oder Kosten für die Durchführung einer FMEA) und der planmäßigen Qualitätsprüfung (bspw. Annahmeprüfungen) gezählt. Die Abweichungskosten beinhalten Kosten zur Behebung von Abweichungen (Nacharbeit) und die Kosten der Entsorgung (Ausschuss). Im Bereich der Instandhaltung erfolgt eine Untergliederung der Kosten in produkt- (bzgl. konkreter Instandhaltungstätigkeiten) und bereitschaftsbezogene (bzgl. des gesamten Instandhaltungsbereiches) Kosten, wobei in dieser Methode nur die produktbezogenen berücksichtigt werden. Bei diesen erfolgt eine Aufteilung in Kosten für Inspektionsaufgaben, Wartung und Instandsetzung.

4.7.3 Betrachtung bewertungsrelevanter Aspekte

In der Betrachtung bewertungsrelevanter Aspekte wird ergänzend zu den monetären Gesichtspunkten, welche im Rahmen der zuvor dargestellten Kostenbetrachtung berücksichtigt wurden, die Perspektive der technischen und organisatorischen Aspekte in den Mittelpunkt gestellt. Angesichts der wichtigen Stellung innerhalb der Bewertungssystematik wird daher diese analytische Systemwertermittlung detaillierter beschrieben. Dafür werden im Folgenden zuerst die Methode für die Auswahl und Gewichtung (G) der für die Bewertung relevanten Kriterien erarbeitet und die Voraussetzungen für deren Verwendung diskutiert, um anschließend auf den Kern der Bewertung in Form der analytischen Systemwertermittlung einzugehen. Diese bildet neben dem Kostenmodell die Grundlage für die in Kapitel 4.7.4 beschriebene Gesamtbewertung.

4.7.3.1 Bewertungskriterien

Neben den kostenrelevanten Aspekten, die in Kapitel 4.7.2 beschrieben wurden, erfolgt in diesem Unterkapitel somit die Beschreibung der Kriterien, welche für die Durchführung der analytischen Systemwertermittlung entsprechend der Anforderungen des Kunden ausgewählt werden. Diese Identifikation kundenrelevanter Kriterien erfolgt direkt im Anschluss an die Phase der Stückzahlermittlung und Lebenszyklusbetrachtung (vgl. Kapitel 5.2.1). Dabei wird auf einen vom Anlagenhersteller bereitgestellten, erweiterbaren Kriterienkatalog zurückgegriffen. Dazu zählen neben quantitativen vor allem qualitative Kriterien, als Beispiel sollen folgende genannt werden: Variantenflexibilität, Stückzahlflexibilität, Rüstaufwand, Durchlaufzeit, Taktzeit und Kapitalbindung. Die komplette Liste möglicher Kriterien, welche als Ausgangsbasis für die Identifikation der Kriterien in Zusammenarbeit mit dem Kunden dient, wird vom Anlagenhersteller kontinuierlich weiterentwickelt.

Bei der Auswahl der Kriterien sollte berücksichtigt werden, dass sich die Anzahl der Kriterien auf unter zehn Stück beschränkt, um den Aufwand für die folgende Gewichtung der Kriterien und spätere Bewertung in einem überschaubaren Rahmen zu halten und klare Ergebnisse zu erzielen. Empfohlen werden fünf bis acht Kriterien.

Nach Identifikation der Kriterien erfolgt die Ermittlung der Präferenzen des Kunden bezüglich der einzelnen Kriterien. Die Kriterien werden dabei in Anlehnung an eine Methode von Schweizer (Schweizer 2008, S. 175f) über eine Kriterienpräferenzmatrix gewichtet, siehe Abbildung 4-15.

	K_1	G_{K1}							
K_1	KP_1	**K_2**	G_{K2}						
K_2		KP_2	**K_3**	G_{K3}					
K_3			KP_3	**K_4**	G_{K4}				
K_4	K_1	***K_4***	K_3	**KP_4=3**	**K_5**	G_{K5}			
K_5				K_5	KP_5	**…**	$G_{K...}$		
…				***K_4***		$KP_{...}$	**K_n**	G_{Kn}	$\sum(G_{K1}\text{-}G_{Kn})=100\%$
K_n				***K_4***			KP_n		
							$\sum(KP_1\text{-}KP_n)$		

Abbildung 4-15 Kriterienpräferenzmatrix
(in Anlehnung an Schweizer 2008, S. 175f)

Bei dieser Vorgehensweise werden die Kriterien (K_1 bis K_n) in der ersten Spalte und der in der zweiten Spalte beginnenden Diagonale aufgelistet. Im Rahmen des Vergleichs der

Kriterien untereinander wird das jeweils präferierte Kriterium im entsprechenden Feld eingetragen. Die Gesamtzahl der Nennungen eines Kriteriums ergibt dessen Kriterienpunkte (KP_1 bis KP_n), die, bezogen auf die Gesamtsumme aller Kriterienpunkte, die Gewichtung der Kriterien (bspw. G_{K1}) determinieren. Bei Notwendigkeit einer differenzierteren Betrachtung der Kriterien über ein Punktesystem zur Festlegung der Zielpräferenzen ist in Anlehnung an das Matrix-Verfahren von Heinen (Heinen 1983, S. 813f) vorzugehen.

4.7.3.2 Analytische Systemwertermittlung

Die hier angewendete analytische Systemwertermittlung basiert auf dem Verfahren von Zangemeister (Zangemeister 1976, S. 55ff). Die Anwendung dieser Systemwertermittlung innerhalb der Bewertungssystematik begründet sich in der schnellen Anwendbarkeit, ohne dabei die notwendige Objektivität zu verlieren, der Flexibilität bezüglich der Einbindung unterschiedlicher vom Kunden gewählten Kriterien und der Transparenz des Bewertungsprozesses (vgl. 2.6.2). Diese einzelnen Aspekte entsprechen den Anforderungen der Struktur eines Anlagenherstellers und des in dieser Methode anvisierten Kunden, welche beide durch eine mittelständische Unternehmenskultur geprägt sind.

Die analytische Systemwertermittlung dient als Grundlage für die Entscheidung für eine in Zukunft beim Kunden einzusetzende Ausbaustufenfolge, wobei die Festlegung auf eine Initialopportunität erfolgt. Auf Basis der ermittelten Systemwerte und der Ergebnisse des Kostenmodells entscheidet sich der Kunde somit für eine Initialkonfiguration (vgl. Kapitel 4.7.4), welche den Ausgangspunkt für darauf folgende Ausbaustufen bildet (vgl. Kapitel 2.5 und 4.6). Diese Initialkonfiguration mit den möglichen Ausbaustufenfolgen stellt die für den Kunden beste Möglichkeit unter den gegebenen Rahmenbedingungen und den erwarteten Entwicklungen innerhalb der Szenarien dar. Die Modularität des Systems bietet dem Kunden demnach die Möglichkeit bei Nicht-Eintreten der erwarteten Entwicklungen, auf Basis der im Planungsprozess generierten Informationen andere Ausbaustufenfolgen auf Basis der gleichen Initialkonfiguration zu realisieren. Dabei müssen sowohl die Veränderungen bezüglich der Kriterien der analytischen Systemwertermittlung als auch die entsprechenden Veränderungen auf der Kostenseite betrachtet werden. Gerade hierfür bieten die bei der Planungsdurchführung entsprechend der vorliegenden Planungsmethodik (insbesondere in der Bewertungssystematik) erarbeiteten Informationen eine gute Ausgangsposition.

Bei der analytischen Systemwertermittlung werden auf Basis der bereits erarbeiteten und gewichteten Kriterien, entsprechend der ausgewählten Szenarien die Systemwerte der einzelnen, zu bewertenden Ausbaustufenfolgen ermittelt. Auf Basis dieser Systemwerte und der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien erfolgt die Ermittlung eines Gesamtsystemwertes. Durch diese Vorgehensweise einer systematischen Betrachtung der Vor- und Nachteile auf der einheitlichen Grundlage objektivierter Kriterien wird eine Vergleichbarkeit der Alternativen ermöglicht.

Im ersten Schritt des Bewertungsschemas, siehe Abbildung 4-16, werden die Informationen zu den einzelnen Ausbaustufenfolgen (ASF_x) für die bereits gewichteten Kriterien (K_x) (vgl. Kapitel 4.7.3.1) entsprechend der einzelnen Szenarien zusammengestellt. Diese quantitativen und qualitativen Werte (bspw. W_{K1ASF1}) werden anschließend im Rahmen der

Wertsynthese durch einen festgelegten Punkteschlüssel in Punktwerte (bspw. PW_{K1ASF1}) umgewandelt. Dabei ist zu beachten, dass die qualitativen Werte durch Vergleiche der Alternativen untereinander und mit einer für dieses Kriterium optimalen Lösung in Form von relativen Werten festgelegt werden. Die vergebenen Punktwerte ergeben durch Multiplikation mit dem Gewichtungsschlüssel (bspw. G_{K1}) jedes Kriteriums (siehe Kapitel 4.7.3.1) einen Teilwert (bspw. TW_{K1ASF1}). Dieser Teilwert steht für den Wert einer Ausbaustufenfolge bezogen auf ein Kriterium im Gesamtkontext eines Szenarios. Durch Summation der Teilwerte erhält man anschließend den Systemwert (bspw. SW_{IO1Sz1}) der jeweiligen Folge für das betrachtete Szenario. Diese Vorgehensweise erfolgt für alle Ausbaustufenfolgen für das entsprechende Szenario (bei entsprechenden Rahmenbedingungen auch für mehrere Szenarien).

			Szenario 1 (Sz_1)									
			K_1		K_2		K_3		…	K_n		
			G_{K1}		G_{K2}		G_{K3}		…	G_{Kn}		
			W_{K1ASF1}		W_{K2ASF1}		W_{K3ASF1}		…	W_{KnASF1}		
Alternativenfeld 1 AF_1	ASF_1	IO_1	PW_{K1ASF1}	TW_{K1ASF1}	PW_{K2ASF1}	TW_{K2ASF1}	PW_{K3ASF1}	TW_{K3ASF1}	…	PW_{KnASF1}	TW_{KnASF1}	SW_{IO1Sz1}
	ASF_2	IO_2										SW_{IO2Sz1}
	ASF_x	$I0_x$										SW_{IOxSz1}

Abbildung 4-16 Bewertungsschema für die analytische Systemwertermittlung

Da durch diese Vorgehensweise nicht eine einzelne Ausbaustufenfolge ausgewählt werden soll, sondern eine Initialopportunität auf Basis der Werte verschiedener Ausbaustufenfolgen bestimmt wird, erfolgt die Berechnung eines Gesamtsystemwertes. Dieser stellt eine Gesamtbewertung für jede der einzelnen Initialopportunitäten unter Berücksichtigung der Ausbaumöglichkeiten im Hinblick auf die definierten Szenarien dar (siehe Kapitel 4.7.4).

4.7.4 Gesamtbewertung

Die komplette Beurteilung der möglichen Lösungen erfolgt in Form einer Gesamtbewertung unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Kostenbetrachtungen und der analytischen Systemwertermittlung, welche in einem Gesamtinformationsschema bereitgestellt werden (siehe Abbildung 4-17). Das Ziel dabei ist, die den Kundenanforderungen am besten entsprechende Initialopportunität unter Beachtung der auf dieser basierenden Ausbaustufenfolgen und der in den Szenarien definierten, möglichen Zukunftsentwicklungen auszuwählen.

Zu diesem Zweck werden die für die Initialopportunitäten ermittelten Systemwerte in Abhängigkeit von den festgelegten Eintrittswahrscheinlichkeiten (siehe Kapitel 4.4) der jeweiligen Szenarien zu einem Gesamtsystemwert (GSW_{IOx}) zusammengefügt. Die

Ermittlung des Gesamtsystemwertes der unterschiedlichen Initialopportunitäten erfolgt in Anlehnung an das Verfahren von Aldinger zur Bewertung alternativer Szenarien (Aldinger 2009, S. 150-152 und 165f) und Zangemeister (Zangemeister 1976). Zur Bestimmung dieses Wertes werden die Systemwerte der jeweiligen Ausbaustufenfolgen einer Initialopportunität (bspw. SW_{IO1Sz1}) über die unterschiedlichen Szenarien mit den jeweiligen szenariospezifischen Eintrittswahrscheinlichkeiten multipliziert und anschließend aufsummiert. Wurden aufgrund der umfangreichen Möglichkeiten mehrere Systemwerte eines Szenarios für eine Initialopportunität erstellt, so ist der beste Wert für die Gesamtwertberechnung zu verwenden. Um über die entstehende Rangfolge hinaus festzuhalten, in welchem Bereich des Gesamtbewertungsspektrums die Gesamtwerte liegen, erfolgt die Betrachtung einer Optimallösung, welche in allen Bereichen mit höchster Punktzahl bewertet wird.

Den ermittelten Gesamtwerten werden Kosteninformationen zur Seite gestellt, welche die Entscheidung aus monetärer Sicht unterstützen (siehe Gesamtinformationsschema, Abbildung 4-17). Diese Kosteninformationen konzentrieren sich in erster Linie auf die Stückkosten. Die Angaben erfolgen dabei in Form von durchschnittlichen Gesamtstückkosten (GSK). Zur Berechnung dieser werden die Stückkosten der einzelnen Initialopportunitäten der jeweiligen Szenarien mit den entsprechenden Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien multipliziert und anschließend aufsummiert. Die Stückkosten der Initialopportunitäten (bspw. SK_{IO1Sz1}) werden als Durchschnitt der Stückkosten aus den einzelnen Phasen des Szenarios errechnet. Wurden mehrere Ausbaustufen auf Basis der gleichen Initialopportunität erstellt und deren Kosten betrachtet, so ist der niedrigste Wert der Stückkosten für die weitere Berechnung auszuwählen. Insgesamt werden neben den Gesamtstückkosten sowohl die Stückkosten der einzelnen Initialopportunitäten als auch die Phasenstückkosten (PK) angegeben um eine differenziertere Betrachtung der Kosten zu ermöglichen.

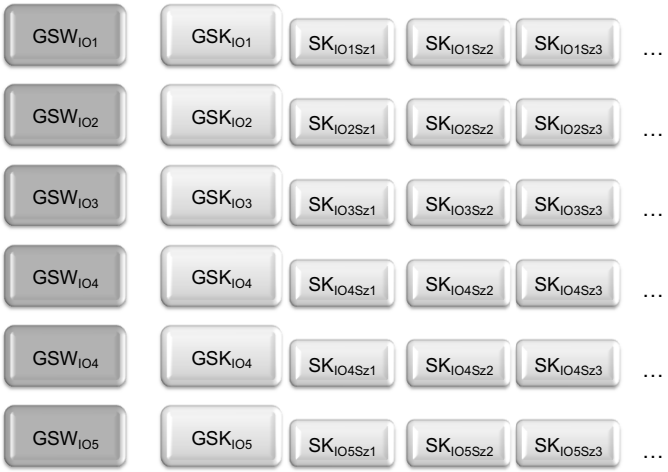


Abbildung 4-17 Gesamtinformationsschema für die Bewertung

5 Umsetzung der Methodik

Die Umsetzung der Methodik stellt die Zusammenführung der in Kapitel 4 beschriebenen Teillösungen zu einer Gesamtlösung dar. Dabei werden die methodischen und softwaretechnischen Ausführungen der einzelnen Teillösungen vor dem Hintergrund der Vorgehensweise bei dieser Planung von Montagesystemen detailliert (siehe Abbildung 5-1). Begonnen wird dabei mit der Methode zur Entwicklung von Szenarien, welche als Grundlage für die Planung und die Bewertung dient. Im nächsten Schritt erfolgt die eigentliche Grobplanung modularer Montagesysteme. Hierzu wird zuerst die Ausgangsbasis der hier entwickelten, rechnergestützten Planung, die Beschreibung von Ressourcen in einer Modellbibliothek, vorgestellt. Anschließend werden die Softwaremodule zur Erstellung von Fähigkeitsfolgen, zur Ressourcenauswahl und zur Leistungsabstimmung beschrieben. Im letzten Schritt erfolgt die Darstellung der Umsetzung der Bewertungssystematik.

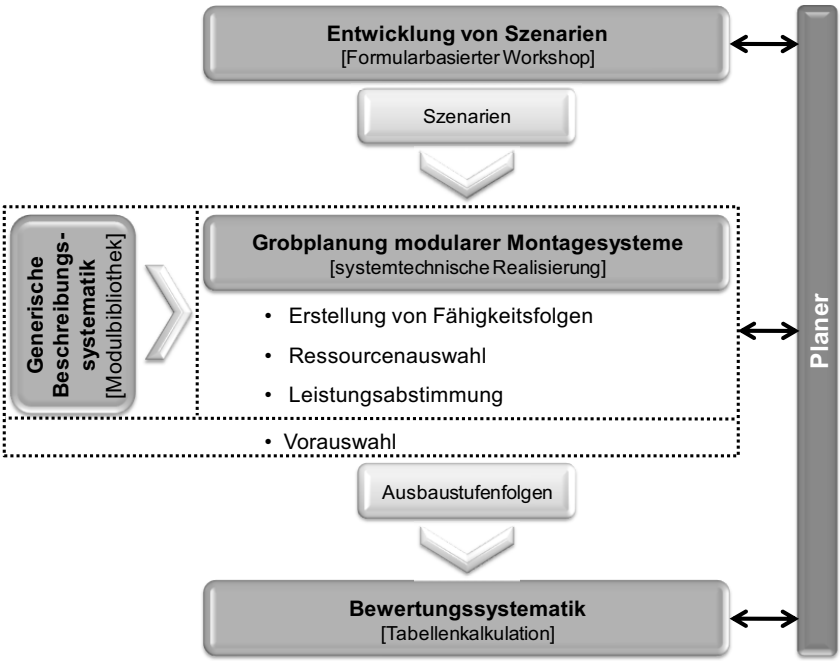


Abbildung 5-1 Umsetzung der Methodik

5.1 Methode zur Entwicklung von Szenarien

Entsprechend der konzeptionellen Beschreibung der Methode zur Entwicklung von Szenarien in Kapitel 4.4 liegt bei der Methode die Zielsetzung auf der Erstellung von Stückzahlszenarien auf Basis von Initialstückzahlen. Entgegen der ursprünglichen Zielsetzung der Szenariomethode, eine umfassende zukunftsrobuste Leitstrategie für

Unternehmen zu erzeugen, fokussiert sich die hier entwickelte Methode somit auf Lebenszyklusverläufe. Die Methode orientiert sich dabei an den Grundlagen der Arbeiten von Gausemeier und von Reibnitz (vgl. Gausemeier, Fink, Schlake 1996; Reibnitz 1992). Die Verwendung der Szenariomethode in dieser spezifischen Anwendung wird nachfolgend dargestellt. Dabei dienen die zu entwickelnden Szenarien als Grundlage für die Grobplanung modularer Montagesysteme und der Bewertung möglicher Ausbaustufenfolgen. Die Entwicklung der Extrem- und Trendbilder erfolgt dabei im Rahmen eines Workshops an dem sowohl Anlagenhersteller als auch der spätere Anlagenbetreiber (Kunde) beteiligt sind. Entsprechend dafür entwickelte Formblätter finden sich in Anhang E.

Bei der Entwicklung der Szenarien sieht die Methode vor, in fünf Phasen vorzugehen: Aufgaben- und Problemanalyse, Einflussanalyse, Trendprojektion, Szenariobildung und Szenariotransfer (vgl. Kapitel 4.4). Diese Vorgehensweise wird im Folgenden detailliert und die einzelnen Schritte hinsichtlich ihrer anwendungsrelevanten Inhalte beschrieben.

Aufgaben- und Problemanalyse

Die Phase der Aufgaben- und Problemstellung dient der vorbereitenden Identifikation von Informationen zur späteren Erstellung von Szenarien. Neben der Festlegung des Untersuchungsgegenstandes und des zu betrachtenden Zeitrahmens stellt die Ist-Analyse einen wesentlichen Schritt dar (siehe Anhang E Formblätter 1.1 bis 1.3). Der Untersuchungsgegenstand steht in der erarbeiteten Methode mit dem Stückzahlverlauf des Produktlebenszyklus fest und muss noch hinsichtlich der zu betrachtenden Produktfamilien und -varianten präzisiert werden.

Begonnen wird bei der Analyse mit der Erarbeitung von Informationen zum Unternehmen des Kunden. Dazu zählen Informationen zum gesamten Unternehmen, zur Montage und zu vergleichbaren Lebenszyklen, die nach den Hauptbegriffen Leistungsspektrum, Leitbild, Ziele und Strategien sowie Rahmenbedingungen gegliedert werden können.

Bei der Analyse von vergleichbaren Lebenszyklen aus der Vergangenheit können Aspekte der Arbeit von Krüger berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 3.2.2). So werden die Absatzverläufe ähnlicher Produktfamilien und -varianten entsprechend folgender Merkmale charakterisiert: Lebenszyklusphasen und charakteristische Zeitpunkte, charakteristische Absatzwerte, Art und Ausprägung des Absatzverlaufs, weiteren Besonderheiten sowie Ursachen und Gründe der Verlaufscharakteristika. Nach der Identifikation von typischen und untypischen Verläufen und Kenntnis über deren Dauer erfolgt eine Einteilung der Lebenszyklen in Phasen. Durch Diskussion der Verläufe zur Identifikation der Einflussfaktoren sollen kausale Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Verläufen festgehalten werden. Ein weiteres Vorgehen zur Erfassung entsprechender Zusammenhänge ist der Vergleich vergangener Planzahlen mit den tatsächlichen Verläufen, wobei auch hier die Zusammenhänge zu den Einflussfaktoren im Mittelpunkt der Betrachtung stehen. Durch dieses Vorgehen wird die Basis geschaffen, in späteren Schritten Szenarien zu erstellen, wobei die Erkenntnisse als Grundlage dienen und keine direkte Übertragung von Verläufen in die Zukunft anstreben. Allerdings kann ein charakteristischer Lebenszyklusverlauf einer ähnlichen Produktfamilie ein guter Anhaltspunkt bei der Erstellung

sein. Zudem ist ein grober, quantitativ beschriebener Rahmen für eine mögliche Stückzahlentwicklung festzulegen. Abhängig von der Ausgangssituation kann, bei Existenz, auf einer bereits geplanten langfristigen Absatzverlauf als Eingangsgröße verwendet werden. In den weiteren Phasen der Methode können aufbauend auf diesem Lebenszyklusszenarien abgeleitet und der Zeithorizont der Betrachtung definiert werden.

Einflussanalyse

Das Ziel der Einflussanalyse, der zweiten Phase, ist es, die Einflussfaktoren für den zu entwickelnden Lebenszyklusverlauf zu identifizieren. Dabei wird in folgenden vier Schritten vorgegangen: Bildung von Einflussbereichen, Bildung von Einflussfaktoren, Analyse der Faktorenvernetzung und Auswahl von Schlüsselfaktoren (siehe Anhang E Formblätter 2.1 und 2.2).

Die Bildung von Einflussbereichen enthält sowohl direkt beeinflussbare Größen (Lenkungsgrößen) als auch nicht oder indirekt beeinflussbare Größen (Umfeldgrößen). Dafür sind in der entwickelten Methode die Bereiche der zu betrachtenden Anfangs- und Randbedingungen vorgegeben. Zu diesen zählen die Lenkungsgrößen Zustand des Unternehmens und der Zustand des Produktes sowie die Umfeldgrößen Zustand des Kunden und der Zustand der Umwelt. Weitere Einflussbereiche können nach Bedarf zusätzlich Verwendung finden.

Beim zweiten Schritt, der Bildung von Einflussfaktoren, kann mit diskursiven oder kreativen Methoden bzw. mit Recherchen vorgegangen werden. Bei diskursiver Vorgehensweise kann auf die in der ersten Phase erzeugten Einflussfaktoren aufgebaut werden und deren Relevanz für den zu entwickelnden Lebenszyklus kritisch betrachtet werden. Eine kreative Vorgehensweise soll eher dazu verwendet werden, neue Einflussfaktoren zu identifizieren. Außerdem ist im Rahmen der Methode vorgesehen, eine Befragung der Unternehmensexperten (des Kunden) im Rahmen des Workshops durchzuführen sowie seitens des Anlagenherstellers branchenspezifische Checklisten über die Jahre der Anwendung hinweg zu entwickeln. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Kombination der verschiedenen Möglichkeiten in der Methode angestrebt wird, um ein möglichst gutes Ergebnis erzielen zu können. Das Ergebnis stellt somit eine sehr wichtige Eingangsgröße für die Auswahl von Schlüsselfaktoren dar.

Die Analyse der Faktorenvernetzung, als dritter Schritt in dieser Phase, dient der Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung der Einflussfaktoren, wie sie aus der Literatur bekannt ist (Reibnitz 1987, S. 37-46). Dazu wird eine Einflussmatrix mit allen Einflussfaktoren verwendet. Die bei der Anwendung jeweils angegebenen Werte (0 bis 2) werden Zeilen und Spaltenweise addiert, um die Aktiv- und Passivsummen zu ermitteln. Dadurch wird eine Darstellung in einem Aktiv-Passiv Grid ermöglicht, welches die Auswahl von Schlüsselfaktoren graphisch unterstützt. Dieser vierte Schritt bedient sich der zuvor erarbeiteten Information zur Eingrenzung der Einflussfaktoren. So werden im Rahmen des Workshops im Team irrelevante Faktoren gestrichen beziehungsweise die wichtigsten ausgewählt. Zur Begrenzung des Aufwands vor dem Hintergrund der Zielsetzung der

gesamten Methodik wird in dieser Methode eine Beschränkung auf acht bis zehn Einflussfaktoren angestrebt.

Trendprojektion

Bei der Trendprojektion, der dritten Phase, steht die Projektion von Zuständen der Einflussfaktoren in die Zukunft im Vordergrund. Dabei sollen Trend- und Extremprojektionen für einen festgelegten Zeitraum erarbeitet werden und somit die Dimensionen der inhaltlichen Ausrichtung, der Plausibilität und des Zeithorizontes Berücksichtigung finden. Zuerst werden dazu die aktuellen Zustände der Einflussfaktoren erfasst, um anschließend verschiedene zukünftige Zustände zu beschreiben (siehe Anhang E Formblatt 3.1). Vor dem Hintergrund der in dieser Methode angestrebten Ergebnisse in Form von Lebenszyklusverläufen ist nicht nur der jeweilige Zeitpunkt und die Ausprägung der Faktoren von Relevanz, sondern auch der zeitliche Verlauf. Auf diese Weise entsteht die Grundlage für die Erarbeitung von Prozessszenarien. Pro Einflussfaktor sollen dabei maximal drei Entwicklungsmöglichkeiten erarbeitet werden, um die Handhabbarkeit der Methode zu gewährleisten. Für die beeinflussbaren Faktoren (Lenkungsgrößen) kann bei entsprechender Entwicklungssicherheit auch nur eine Entwicklungsmöglichkeit angegeben werden.

Szenariobildung

Die vierte Phase zielt auf die Bildung von Trend- und Extremszenarien. Dazu wird auf die zuvor erstellten Entwicklungsmöglichkeiten der jeweiligen Einflussfaktoren aufgebaut. Entsprechend derer Ausprägungen ist bei der Kombination zu einem Szenario darauf abzuzielen eine größtmögliche Stimmigkeit der Zustände der einzelnen Einflussfaktoren, eine Widerspruchsfreiheit und eine möglichst hohe Konsistenz zu erreichen. Zur Entwicklung von Extremszenarien ist es dabei hilfreich, einen möglichst großen Unterschied bei den Szenarien und somit der Summe der einzelnen Einflussfaktoren anzustreben. Die Beschreibung der definierten Trend- und Extremszenarien in einer entsprechenden Übersicht kennzeichnet sich dabei durch eine klare und deutliche Darstellung der Ausprägungen (siehe Anhang E Formblatt 4.1). Bei der Bewertung der Konsistenz wird auf die Verwendung von Konsistenzmatrizen verzichtet und auf eine intuitive Vorgehensweise zurückgegriffen. Durch die Beschränkung der Anzahl der Einflussfaktoren auf acht bis zehn ist die intuitive Bündelung die geeignetere Methode. Insgesamt ist in der Methode vorgesehen, dass für verschiedene Initialstückzahlen jeweils drei Szenarien erarbeitet werden, bei denen ein Trendszenario entwickelt wird und zwei Extremszenarien den Planungskorridor definieren.

Szenariotransfer

Die fünfte Phase, der Szenariotransfer, dient in der Regel der Analyse von Auswirkungen der Szenarien zur Gestaltung von Strategien für Unternehmen. Im vorliegenden Fall wird im Gestaltungsfeld, anders als bei der klassischen Anwendung, nicht die Formulierung einer neuen Leitstrategie gesehen, sondern die Erarbeitung unterschiedlicher Lebenszyklusszenarien (siehe Anhang E Formblätter 5.1, 5.2 und 1.3). Grundlage für diese Untersuchung der Auswirkungen der Szenarien auf mögliche Lebenszyklusverläufen von

Produktfamilien ist der in der ersten Phase identifizierte Absatzverlauf aus der Vergangenheit.

In einem ersten Schritt werden daher auf Basis des in der Aufgabenanalyse ermittelten Lebenszyklus und den dabei festgelegten Phasen Parallelen gebildet. So wird die Einteilung in verschiedene Phasen auf einen möglichen Absatzverlauf übertragen, wobei eine kritische Betrachtung der Zeitpunkte der Phasenübergänge erfolgt und somit die Phasendauern und –grenzen, falls notwendig, neu definiert werden. Der nächste Schritt dient der Erarbeitung von Auswirkungen von den Veränderungen der Einflussfaktoren auf den Lebenszyklus auf Grundlage logischer Schlussfolgerungen und Expertenwissen. Dabei wird phasenweise vorgegangen und die Auswirkungen werden in Relation zum ursprünglich ermittelten Verlauf beschrieben. Der letzte Schritt zielt auf die Erstellung von resultierenden Stückzahlverläufen. Hierzu werden die zuvor beschriebenen Auswirkungen auf den ursprünglichen Verlauf genutzt, um einen zusammenhängenden, neuen Verlauf für die jeweiligen Szenarien zu generieren. Somit stehen im Ergebnis verschiedene Stückzahlverläufe für die Planung zur Verfügung.

Vor allem beim Szenariotransfer ist es von entscheidender Bedeutung, den Kunden mit seinen Erfahrungswerten in die Ausführung der Methode mit einzubinden. So können in dieser intuitiv geprägten Phase Entscheidungen auf Basis logischer Schlüsse und dem Erfahrungswissen des Kunden und der Spezialisten der Anlagenherstellers getroffen werden.

Auf eine in der klassischen Literatur anschließende Ableitung von definierten Handlungsempfehlungen wird in dieser Methode verzichtet, da die erarbeiteten Stückzahlverläufe als Eingangsgröße für die anschließende Planung dienen und dadurch die Planung selbst die Erstellung von Handlungsempfehlungen umfangreich substituiert.

5.2 Systemtechnische Realisierung der Planung

Auf Grundlage der zuvor methodisch erarbeiteten Stückzahlverläufe wird mithilfe der systemtechnischen Realisierung die Planung eines modularen Montagesystems in den weiteren Schritten unterstützt. Diese Vorgehensweise, die die generische Beschreibungsmethode als Grundlage nutzt, wird nachfolgend vorgestellt. Begonnen wird dabei mit den noch festzulegenden Rahmenbedingungen, die die Planung unterstützen. Anschließend wird die Modulbibliothek beschrieben, welche die entsprechend der entwickelten Beschreibungsmethode charakterisierten Ressourcen enthält. Danach werden die in der Anwendung zur Verfügung stehenden Planungsmodule dargestellt, mithilfe derer die Alternativengenerierung erfolgt.

5.2.1 Präzisierung der Rahmenbedingungen

Neben den Produktinformationen, die in die Erstellung von Fähigkeitsfolgen einfließen, gibt es weitere Eingangsgrößen die dem Planer den Rahmen für seine Arbeit vorgeben. Dazu zählen sowohl die entwickelten Szenarien als auch die Anforderungen bzw. Kriterien des Kunden an das Montagesystem.

Zur Präzisierung der Rahmenbedingungen durch die entwickelten Szenarien müssen für die Lebenszyklusverläufe Stückzahlbereiche und somit Kapazitätsbereiche festgelegt werden. Diese geben den kapazitiven Rahmen für die zu erarbeitenden Konfigurationen und folglich für die Gestaltung der Montagesysteme vor. Die Definition der Kapazitätsbereiche (siehe Abbildung 5-2) erfolgt vom Planer auf Basis der Stückzahlverläufe und der bei deren Erarbeitung festgehaltenen Informationen sowie auf Grundlage seiner Erfahrungen.

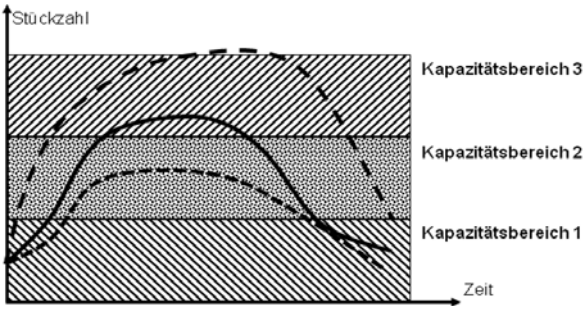


Abbildung 5-2 Kapazitätsbereiche

Des Weiteren dient die Festlegung der Kriterien zur Präzisierung der Rahmenbedingungen. Das Ziel ist dabei, einerseits den Planer frühzeitig über die Wünsche und Forderungen des Kunden zu informieren (mögliche Berücksichtigung bei der Planung) und andererseits eine zu stark emotional ausgeprägte Festlegung der Kriterien nach Kenntnis der Alternativen zu verhindern. Bei der Definition der Kriterien wird wie in Kapitel 4.7.3.1 beschrieben, anhand des veränderbaren Kriterienkataloges des Anlagenherstellers, vorgegangen. In dieser Phase erfolgt auch die im selben Kapitel vorgestellte Gewichtung der Kriterien über eine Kriterienpräferenzmatrix oder über das bereits ebenfalls genannte Matrix-Verfahren.

5.2.2 Deskription von Ressourcen in einer Modulbibliothek

Grundlage für die Durchführung der Grobplanung modularer Montagesysteme mithilfe der systemtechnischen Realisierung bildet die Modulbibliothek, in der die verfügbaren Ressourcen anhand der generischen Beschreibungssystematik (vgl. Kapitel 4.5) charakterisiert werden. Im Folgenden soll daher vor der Beschreibung der Nutzungsmöglichkeiten der Anwendung die Beschreibung der Funktionalitäten der Modulbibliothek erfolgen. Dabei werden das Hinzufügen neuer Module, die Zuordnung von Fähigkeiten zu Modulen und die Beschreibung mittels Merkmalen aufgeführt. Diese Schritte werden von Planern des Anlagenherstellers ausgeführt und aufgrund der Handhabbarkeit in Umfang und Komplexität in der genannten systemtechnischen Realisierung umgesetzt.

In der systemtechnischen Realisierung lässt sich die Modulbibliothek im Menü „Modulbibliothek“ durch den Punkt „Manuelle Verwaltung“ öffnen. Die sich öffnende Anwendung beinhaltet die drei Reiter „Hinzufügen“, „Zuordnen“ und „Beschreiben“.

Das Hinzufügen neuer Module erfolgt im Reiter „Hinzufügen“ durch Eintragen der entsprechenden Informationen, wie Baujahr und Bezeichnung, und anschließendem Betätigen der Funktion „Hinzufügen“. Die Bezeichnung muss dabei einmalig sein. Neben dem Eintragen neuer Module lassen sich auch nicht mehr benötigte löschen oder zu den vorhandenen noch Bilder zur Visualisierung anfügen. Außerdem lassen sich in diesem Reiter alle in der Bibliothek vorhandenen Module aus einer Übersicht auswählen (vgl. Abbildung 5-3).

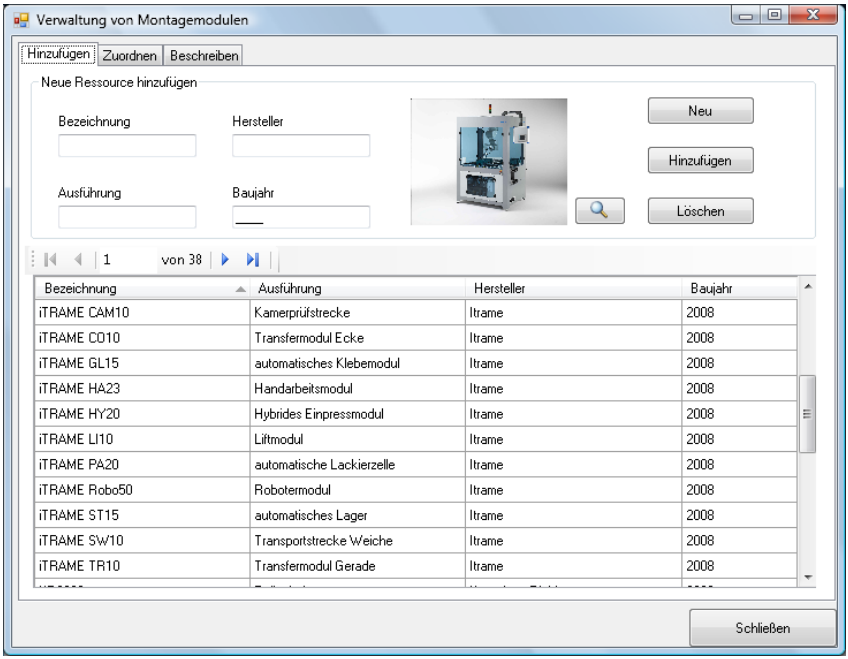


Abbildung 5-3 Hinzufügen neuer Module

Für die Zuordnung von Fähigkeiten zu Modulen wird der Reiter „Zuordnen“ verwendet. In diesem ist das entsprechende Modul auszuwählen, um anschließend die zuzuordnenden Fähigkeiten auszuwählen. Die Darstellung der auszuwählenden Fähigkeiten erfolgt dabei in einer Treeview-Ansicht, welche der in der generischen Beschreibungsmethode entwickelten hierarchischen Struktur entspricht. Zur Unterstützung beim Auswahlvorgang wird die jeweils ausgewählte Fähigkeit in einem Textfeld beschrieben. Durch Betätigen der Funktion „Zuordnen“ wird die Zuordnung der Fähigkeit zu dem Montagemodul ausgeführt, worauf diese Kombination in der nebenstehenden Übersicht angezeigt wird. Durch den Zuordnungsvorgang werden auch die Merkmale der Fähigkeit an das Modul vererbt. Zusätzlich zu diesem Vorgang wird in diesem Reiter auch die Zuordnung von Merkmalen zu Fähigkeiten aufgerufen. In der sich durch diesen Aufruf öffnenden Anwendung „Einstellungen Merkmale“ kann ebenfalls in einer Treeview-Ansicht die jeweils gewünschte

Fähigkeit ausgewählt werden. Für die mögliche Zuordnung von Produkt- beziehungsweise Prozessmerkmalen stehen zwei Dropdown-Listen zur Verfügung, aus denen die Merkmale gewählt werden können. Änderungen werden erst bei Schließen dieser Anwendung in der Datenbank wirksam.

Die Modulbeschreibung mittels Merkmalen wird im Reiter „Beschreiben“ ausgeführt, wobei die Modulauswahl über eine Treeview-Ansicht erfolgt. In dieser Treeview-Ansicht werden zusätzlich die jeweiligen Fähigkeiten dem Modul untergeordnet angezeigt (ein Modul kann mehrere Fähigkeiten besitzen). Die zu bearbeitende Fähigkeit wird daraus ausgewählt, wodurch automatisch die entsprechend möglichen Produkt- und Prozessmerkmale in den dazugehörigen Reitern dargestellt werden. Durch Auswahl des Merkmals und Angabe der jeweiligen Ausprägung kann durch das Betätigen der Funktion „Hinzufügen“ die Beschreibung des Moduls mittels Fähigkeit und Merkmal erfolgen. Falls Einträge wieder gelöscht werden sollen, kann dies durch das Betätigen der „Löschen“-Funktion geschehen.

Als zusätzliche Funktion steht noch die Möglichkeit zur Verfügung, die gesamte Datenbank über eine Internetverbindung (über einen entsprechenden Server) zu aktualisieren. Dies ist dann von Interesse, wenn der oder die Nutzer auf eine zentral gepflegte Datenbank zurückgreifen möchten. Durch das Nutzen von Wissen und Erfahrungen der Planer erreicht die Methode eine hohe Qualität.

5.2.3 Modul zur Erstellung von Fähigkeitsfolgen

Das Modul zur Erstellung von Fähigkeitsfolgen ist das erste Modul der Anwendung, welches der Planer nach der Präzisierung der Rahmenbedingungen nutzt, da die Erstellung und Pflege der Datenbank nicht zu den eigentlichen Planungsaufgaben zählt. Als Eingangsgröße für diesen Schritt dienen vor allem die Produktinformationen, mithilfe derer auf Grundlage der in der Literatur vorhandenen Methoden (vgl. Kapitel 3.1) die Produktstruktur erarbeitet und entsprechend der Vorgehensweise in Kapitel 4.5.3 in eine Fähigkeitsfolge umgewandelt wird.

Die Erstellung einer Fähigkeitsfolge ist die erste Aufgabe des Planers in der systemtechnischen Realisierung und kann direkt in dem beim Start der Software geöffneten Anwendung bearbeitet werden. Auf dieser Benutzeroberfläche kann vom Planer mittels einfachen Einstellungen eine Fähigkeitsfolge erstellt werden, die keinen festen Ablauf darstellt, sondern entsprechend einem Vorranggraphen die zeitlichen Abhängigkeiten der Fähigkeiten abbildet. Die Benutzeroberfläche ist dabei so aufgebaut, dass sie aus einem Bereich mit Bearbeitungssymbolen und einem Arbeitsbereich besteht. So können die einzelnen Fähigkeiten durch Ziehen des Symboles „Teileverrichtung“ mit der Maus im Arbeitsbereich platziert werden. Dabei wird die entsprechende Fähigkeit aus einer Treeview-Ansicht ausgewählt, welche durch das Betätigen der rechten Maustaste (RMT) im vergrößerten Teileverrichtungssymbol erscheint. Durch das Anwenden des Liniensymbols können Verbindungen zwischen den einzelnen Teileverrichtungen beziehungsweise Fähigkeiten dargestellt werden. Des Weiteren ist eine Gruppierung von Fähigkeiten durch Verwendung des Gruppierungssymboles möglich. Eine weitere Funktionalität stellt die Möglichkeit zur Erstellung von Kommentaren im Bereich der Teileverrichtungen dar.

Im nächsten Schritt erfolgt, aufbauend auf der Fähigkeitsfolge, die Erarbeitung von Fähigkeitsabläufen in einer neuen Anwendung mit der Bezeichnung „Montageablauf“. In diesen Fähigkeitsabläufen werden die Reihenfolgen der Fähigkeiten und daher der späteren Prozesse festgelegt. Daher können mehrere dieser Anwendungen erstellt werden und als Grundlage für die nächsten Planungsschritte dienen. Die grundsätzliche Funktionalität des Planungssystematiks entspricht dabei der zuvor beschriebenen Benutzeroberfläche zur Erzeugung von Fähigkeitsfolgen (siehe Abbildung 5-4).

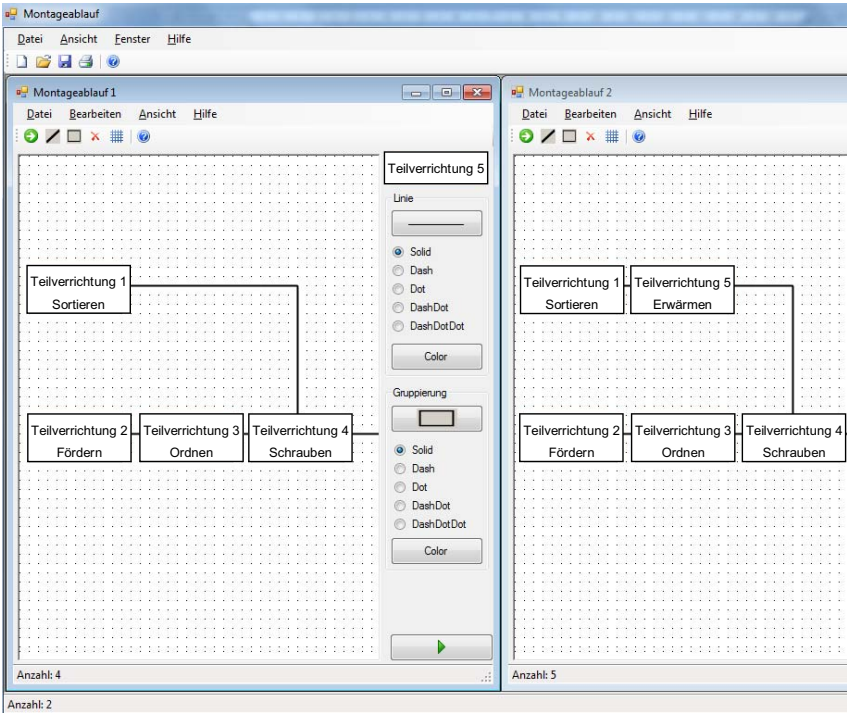


Abbildung 5-4 Erstellung von Montageabläufen

5.2.4 Modul zur Ressourcenauswahl

Aufbauend auf den einzelnen, definierten Fähigkeitsabläufen wird die Auswahl von Ressourcen im nächsten Schritt begonnen. Hierzu öffnet sich das Planungssystematik „Systemkonfiguration“, in dem zu jeder Fähigkeit, die im Fähigkeitsablauf definiert wurde, die möglichen Ressourcen automatisch angezeigt werden (siehe Abbildung 5-5). Diese Lösungsvorschläge basieren auf den in der Modulbibliothek hinterlegten Informationen. Dieses Modul der systemtechnische Realisierung bildet daher den wesentlichen Baustein der Umsetzung vor dem Hintergrund der Anwendung der generischen Beschreibungssystematik zur Konfiguration von Montagesystemen. Falls neue Module für spezielle Aufgaben entwickelt werden müssen, steht über den Menüpunkt „Manuelle

Verwaltung“ im Menü Modellbibliothek die Möglichkeit zur Verfügung, neue Module einzupflegen beziehungsweise bestehende Module hinsichtlich ihrer Fähigkeiten zu erweitern.

Auf Grundlage der Modulbibliothek kann dann in einem weiteren Planungssystematik ein Detailvergleich der vorgeschlagenen Ressourcen für jede Fähigkeit im Einzelnen erfolgen. Zu diesem gelangt man, indem neben den für die jeweilige Fähigkeit vorgeschlagenen Ressourcen die Funktion „Detailvergleich“ genutzt wird. Im Planungssystematik „Details“ werden dem Planer die zur Planung notwendigen Informationen aus der Modulbibliothek zur Verfügung gestellt. Durch eine Filterfunktion können bestimmte Merkmale zur Unterstützung bei der Auswahl herangezogen werden und die Module anhand dieser verglichen werden. Die Module können zur Auswahl in einen Auswahlkorb gelegt werden, wobei bei Auswahl mehrerer Module deren Anzahl überschaubar sein sollte. Nach der Detailauswahl können daher für verschiedene Fähigkeiten mehrere Ressourcen alternativ geeignet sein. Die Darstellung der daraus resultierenden unterschiedlichen Konfigurationsmöglichkeiten erfolgt über die Anwendung. In einer zusätzlichen Ansicht werden alle Konfigurationen angezeigt, und der Planer kann aus diesen die in der Leistungs- und Layoutplanung weiter zu detaillierende(n) auswählen.

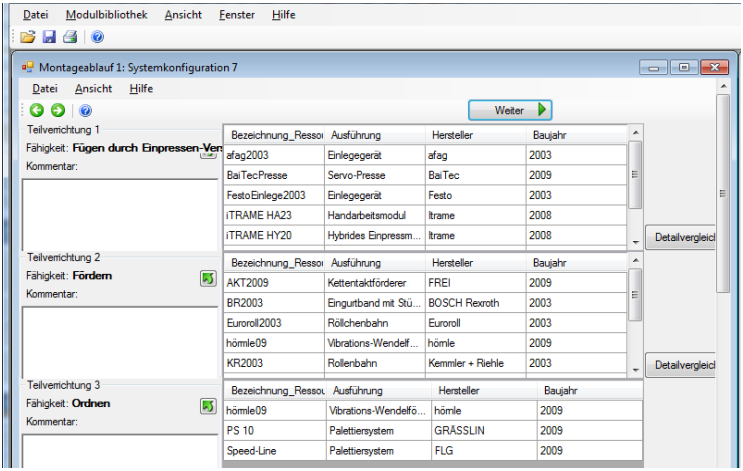


Abbildung 5-5 Ressourcenauswahl

5.2.5 Modul zur Leistungsabstimmung und Layoutplanung

Im letzten Modul der systemtechnischen Realisierung erfolgen die Leistungsabstimmung und eine erste grobe Layoutplanung. Im Planungssystematik Montagesystemstruktur erfolgt die Leitungsabstimmung, wobei dieses einen oberen Bereich und einen unteren Bereich besitzt. Im oberen Bereich sind die Montagemodule entsprechend der festgelegten Reihenfolge aufgelistet sowie die Taktzeit für den jeweiligen Prozess angegeben (siehe Abbildung 5-6). Diese wird aus der Datenbank übernommen, kann anschließend angepasst werden oder

wird manuell eingegeben. Das im unteren Bereich (Zuordnungsbereich) jeweils dargestellte Modul-Steuerelement wird in seiner Höhe dem Wert der jeweils angegebenen Taktzeit angepasst. Die Modul-Steuerelemente können innerhalb des Zuordnungsbereiches durch Verschieben zusammengefasst sowie farblich angepasst werden, um den Planer zu unterstützen. Durch dieses Zuordnen von Prozessen zu Stationen kann eine kapazitive Nivellierung erfolgen, wobei durch Einzeichnen einer Grenzlinie die vorgegebene Taktzeit visualisiert werden kann. Zur weiteren kapazitiven Anpassung lässt sich die Anzahl paralleler Stationen angeben. Es ist die Möglichkeit gegeben, über einen Skalierungsfaktor die Auflösung des Zuordnungsbereiches zu verändern, um verschiedene Taktzeitbereiche mit der Anwendung abdecken zu können.

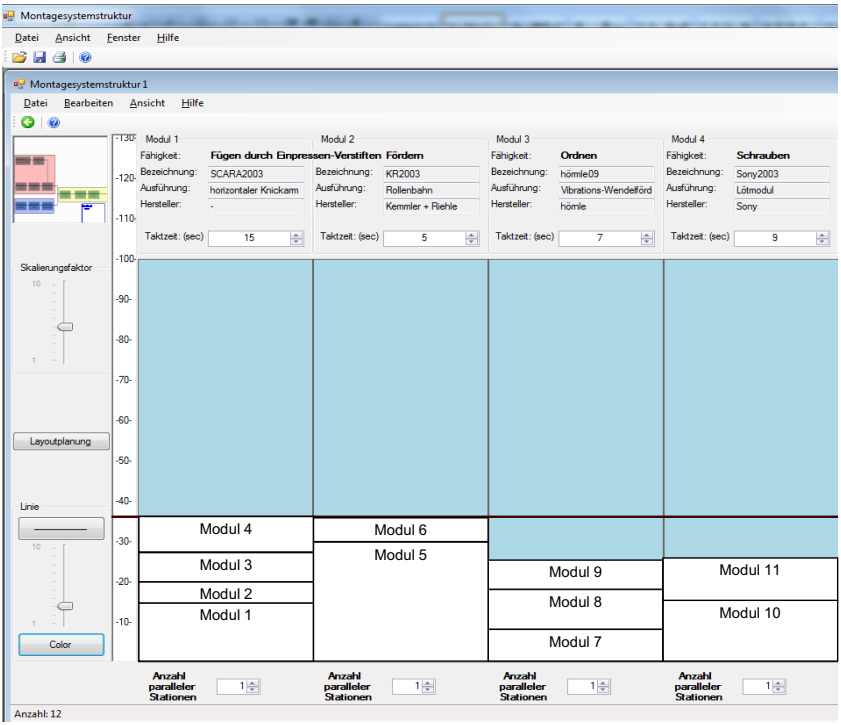


Abbildung 5-6 Leistungsabstimmung

Über die Funktion Layoutplanung wird die Anwendung zur groben Layoutplanung geöffnet. In dieser Anwendung können die automatisch mit Symbolen dargestellten Module sowie weitere vorhandene Elemente (bspw. Transportmodule) per Drag and Drop auf einer Layoutfläche angeordnet werden.

5.2.6 Vorauswahl

Anschließend erfolgt die bereits in Kapitel 4.7.1 vorgestellte szenariobasierte Vorauswahl von Ausbaustufenfolgen. Das Ziel dieser nicht zwangsweise notwendigen Vorauswahl ist, im Hinblick auf eine effiziente Vorgehensweise, die hohe Zahl an möglichen Ausbaustufenfolgen vor der Bewertung zu reduzieren. Diese Vorauswahl erfolgt dabei von den Spezialisten des Anlagenherstellers und dem Kunden. Die Vorgehensweise innerhalb der Vorauswahl gliedert sich dabei in die Schritte Auswahl von Szenarien, Terminierung von Phasen für die jeweiligen Ausbaustufen und Selektion von Ausbaustufenfolgen mit der Identifikation von Alternativenfeldern.

Die Auswahl von Szenarien erfolgt durch den Kunden auf Grundlage der Szenarien selbst, deren Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie den weiteren neu erarbeiteten Informationen. Der Kunde erhält in diesem Schritt vom Anlagenhersteller Informationen über mögliche Konfigurationen im Kontext der Szenarien und Kapazitätsbereiche. Wichtiges Ziel ist, dabei einen möglichst breiten Bereich der Entwicklungsmöglichkeiten abzudecken. Durch das Entfernen von Szenarien ist anschließend noch eine erneute Festlegung der Eintrittswahrscheinlichkeiten notwendig, um eine Normierung auf 100% sicherzustellen.

Die entwickelten Systemkonfigurationen sind hinsichtlich der Kapazitätsbereiche und der Szenarien (vgl. Kapitel 5.1) noch zu kombinieren und die Phasen für deren Einsatz zu definieren. Dazu wird, abhängig von der angestrebten Kapazitätsstrategie (vgl. Kapitel 2.5), festgelegt, wann die entwickelten Konfigurationen beziehungsweise Ausbaustufen in einzelnen Zeiträumen eingesetzt werden können, um die kapazitiven Anforderungen der Szenarien abzudecken. Es erfolgt somit die Definition der Einsatzdauer für jede Ausbaustufe und das Generieren von mehreren Ausbaustufenfolgen für jedes Szenario. Begonnen wird dabei nicht zwangsweise mit der ersten Ausbaustufe (Initialkonfiguration), sondern meist mit der Ausbaustufe für den wichtigsten Kapazitätsbereich, damit dieser mit möglichst wenig Restriktionen geplant werden kann. Auf diese Weise entstehen die in Kapitel 4.6 definierten Alternativenfelder (siehe auch Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8). Aus der Vielzahl an möglichen Ausbaustufenfolgen können bei Bedarf, durch Selektion, Folgen mit absehbar deutlich schlechterer Leistungsfähigkeit eliminiert werden. Dadurch können die für die Bewertung relevanten Alternativenfelder identifiziert werden.

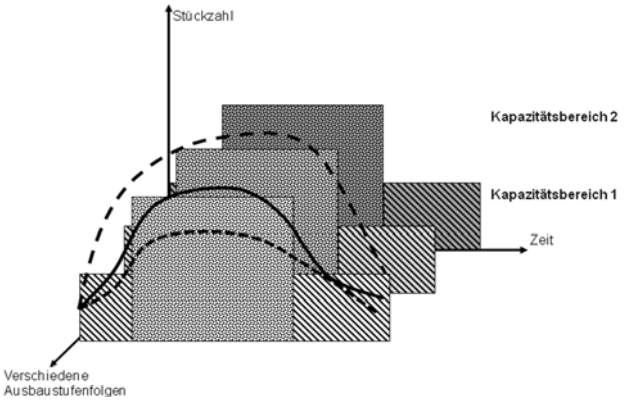


Abbildung 5-7 Beispiel 1 für Alternativenfelder

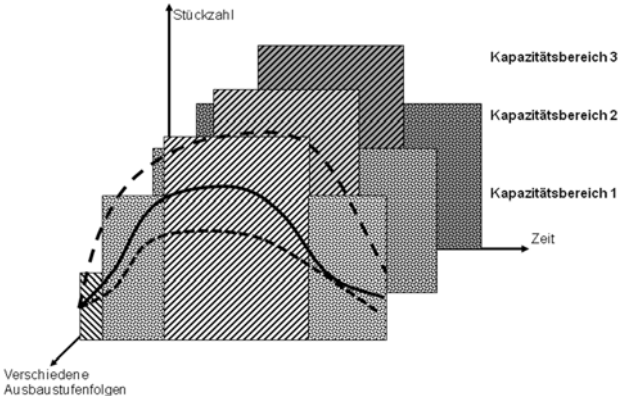


Abbildung 5-8 Beispiel 2 für Alternativenfelder

5.3 Umsetzung der szenariobasierten Bewertungssystematik

Die Umsetzung der szenariobasierten Bewertungssystematik erfolgt mithilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms, mit dem die Berechnungen ausgeführt werden und der Planer bei der Eingabe von Daten unterstützt wird. Im Rahmen der Tabellenkalkulation werden dem Planer auch bestehende Informationen zu Kosten bereitgestellt (bspw. vorhandene Parameter zur Montagemodulkostenrechnung). Außerdem wird der Planer durch die einzelnen Eingabeschritte bei Kostenrechnung und Systemwertermittlung geführt. Insgesamt wird bei der Systematik auf den Ergebnissen der Alternativengenerierung inklusive der Vorauswahl aufgebaut (vgl. Kapitel 4.7).

Im ersten Schritt erfolgt die Betrachtung der Kosten, welche mit der Festlegung von wichtigen Eingangsinformationen in Form von Kostenkennzahlen beginnt. Diese Kennzahlen werden dabei mit dem Kunden gemeinsam festgelegt oder von diesem vorgegeben, da diese kundenspezifisch zu berücksichtigen sind (Beispiele sind der Energiekostensatz oder der Raumkostensatz). Anschließend werden die Kosten für die einzelnen, zuvor geplanten Ausbaustufenfolgen berechnet. Dabei wird anhand der definierten Lebenszyklusphasen vorgegangen. Dies bedeutet, dass für jede Lebenszyklusphase (LZP) die entsprechenden Kosten berechnet werden. Dazu zählen die bereits vorgestellten Kostenberechnungen der Entstehungsphase, Betriebsphase, Rekonfigurationsphase und der indirekten Bereiche (siehe Kapitel 4.7.2). Für jede dieser Phasen existiert ein spezifischer Kalkulationsbereich, mithilfe dessen der Planer die Berechnungen ausführen kann. Existierende Informationen sind in der Kalkulation oder verknüpften, separaten Kalkulationen enthalten, wie beispielsweise in der Berechnung der Montagemodulkosten bei der Informationen des Anlagenherstellers mit einfließen. Als Ergebnis werden die Stückkosten für die einzelnen Ausbaustufen eines Alternativenfeldes in einer Übersicht dargestellt. In Tabelle 5-1 ist eine Kostenübersicht für eine Ausbaustufenfolge als Ausschnitt aus dem Übersichtsbereich der Kalkulation abgebildet. Die berechneten Stückkosten werden im Gesamtinformationsschema abgebildet, welches die Grundlage für die Entscheidung des Kunden bildet.

Tabelle 5-1 Übersicht der Kosten

			Dauer [Monate]	Kosten [€]	Fixkosten [€]	Stückzahlnachfrage [Stück]	Stückkosten
AF 1	LZP 1	Ausbaustufe 2	X Monate	**XXX**	**XXX**	100000	**XXX**
	LZP 2	Ausbaustufe 3	Y Monate	**XXX**	**XXX**	800.000	**XXX**
	LZP 3	Ausbaustufe 2	Z Monate	**XXX**	**XXX**	130000	**XXX**
	Summe		**0**	**XXX**	**XXX**	**1030000**	**XXX**

Ergänzend zu der in Kapitel 4.7 vorgestellten Vorgehensweise zur Berechnung der Kosten beziehungsweise im Speziellen der Stückkosten, wird im Folgenden die in der Kalkulation verwendete Berechnungsweise der Stückzahlen dargestellt. Aufgrund der vorhandenen Unschärfe in der Planung liegen die möglichen Stückzahlverläufe nicht in Funktionsform vor, weshalb eine zeitliche Integration dieser nicht vorgenommen werden kann. Daher erfolgt eine lineare Approximation, wobei ein praktikables Maß zwischen Detaillierungsgrad und Berechnungsaufwand spezifisch festgelegt wird. Auf Grundlage der damit erstellten Geraden in einem Zeit (t) – Stückzahl (St.) Koordinatensystem wird für alle Abschnitte (bspw. ein Abschnitt von n bis n+1) die Stückzahlmenge (M) mit nachstehender Formel berechnet.

$$M(t/St) = \frac{St_n + St_{n+1}}{2} \times \left(t_{n+1} - t_n\right) \tag{5.1}$$

Im zweiten Schritt der szenariobasierten Bewertungssystematik, der Systemwertermittlung, erfolgt die Bewertung der Ausbaustufenfolgen anhand nicht monetärer Kriterien (siehe Kapitel 4.7.3). Diese Kriterien wurden bereits bei der Präzisierung der Rahmenbedingungen,

direkt nach der Entwicklung der Szenarien, identifiziert (vgl. Kapitel 5.2.1). Die Gewichtung der Kriterien erfolgt dabei ebenfalls im Tabellenkalkulationsschema der Bewertungssystematik anhand der Kriterienpräferenzmatrix. Die Bewertung selbst erfolgt ebenfalls in der Tabellenkalkulation entsprechend dem Schema in Kapitel 4.7.3.

Wesentliche Vorteile der Nutzung einer Tabellenkalkulation sind die automatische Ausführung von Berechnungen und die automatische Erstellung von Diagrammen sowie die Möglichkeit, komplexe Zusammenhänge abzubilden. Diese werden sowohl bei der Kostenberechnung als auch bei der Systemwertermittlung durch die Methode genutzt.

Der letzte Schritt der Systematik ist die kompakte und übersichtliche Darstellung der wesentlichen Informationen in einer Zusammenfassung zur Entscheidungsfindung durch den Kunden. Diese Gesamtbewertung erfolgt somit mithilfe eines Gesamtinformationsschemas (siehe Kapitel 4.7.4), welches Kosten- und Systemwertinformationen bereitstellt und im Kontext der möglichen zukünftigen Entwicklungen erarbeitet wurde. Zudem besteht für den Planer die Möglichkeit, die Detaillierung der Darstellung entsprechend der Kundenwünsche anzupassen. Als ergänzende visuelle Entscheidungsunterstützung steht außerdem ein Gesamtwertigkeitsschaubild zur Verfügung. Dabei werden auf der Abszisse der Systemwert und auf der Ordinate die Kostenwertigkeit eingetragen. Die Kostenwertigkeit berücksichtigt dabei die Zielkosten, welche ins Verhältnis mit den durchschnittlichen Stückkosten für eine Ausbaustufenfolge gesetzt werden. Die Zielkosten werden in dieser Methode mit 60 % der für den Kunden gerade noch tragbaren Kosten festgelegt.

Das System stellt dem Anwender für die Gesamtbewertung auf diese Weise umfangreiche Informationen zur Verfügung, damit er eine fundierte Entscheidung hinsichtlich seiner individuellen Anforderungen treffen kann.

Die Entscheidung des späteren Anlagenbetreibers fällt somit auf eine Initialkonfiguration vor dem Hintergrund der Erwartungen hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen in Form einer angestrebten Ausbaustufenfolge. Neben dem Angebot für die Initialkonfiguration erhält der Kunde einen Investitionsplan für die geplante Ausbaustufenfolge. Dazu zählen neben der Dokumentation der durchgeführten Planung inklusive der geplanten Rekonfigurationszeitpunkte auch Informationen zu der stets zu überwachenden Stückzahlentwicklung. Hierfür ist ein ständiges Monitoring der Produktion beim Kunden notwendig, welches die Möglichkeit einer späteren Entscheidung für mögliche Ausbaustufen durch das Nutzen des Wissens über erste Verkaufszahlen ermöglicht (vgl. Spath, Scholtz 2007, S. 64). Somit kann, bei entsprechender Notwendigkeit, hinsichtlich der bisher erwarteten zukünftigen Entwicklung eine Korrektur erfolgen. Dies kann neben der Verschiebung des Zeitpunktes der Wandlung des Systems zu einer weiteren Ausbaustufe auch eine bisher nicht angedachte beziehungsweise verworfene Ausbaustufe als Wandlungsziel definieren oder sogar eine neue Planung bewirken.

Für dieses Monitoring werden vor dem Hintergrund des gewählten Szenarios Schwellwertbereiche und Schwellwerte festgelegt, welche eine erhöhte Aufmerksamkeit (Schwellwertbereiche) beziehungsweise eine Wandlungsempfehlung (Schwellwerte)

beinhalten. Auf diese Weise kann überprüft werden, ob eine Wandlung des Systems durchgeführt werden sollte. Bei dieser Betrachtung wird auch die Geschwindigkeit der Stückzahlveränderung (Steigung) integriert. Für das Monitoring werden die Schwellwertbereiche unter Berücksichtigung der Kapazitätsstrategie des Kunden festgelegt (vgl. Kapitel 2.5).

6 Validierung der Methodik

Nachdem die Umsetzung der Methodik im vorigen Kapitel vor allem vor dem Hintergrund der Vorgehensweise bei der Ausführung der Methodik detailliert wurde, erfolgt in diesem Kapitel die Anwendung der Methodik mit dem Ziel der Verifizierung dieser. Dazu wird zuerst das Vorgehen bei der Anwendung dargestellt, um anschließend den Anwendungsfall selbst zu beschreiben. Für den Anwendungsfall werden dabei zuerst die Ausgangssituation und anschließend die Ausführung der Planungsmethodik erläutert. Abschließend erfolgt die Darstellung der Erkenntnisse aus der Anwendung.

6.1 Vorgehen

Zur Validierung der Methodik erfolgte eine Anwendung dieser im Kontext der Planungen des virtuellen Bürobedarfherstellers EMARTi AG, welcher im Rahmen der Lernfabrik aIE des Transferbereichs 59 entwickelt wurde und ein wichtiges Element für die Forschung bildete (vgl. Westkämper, Zahn 2008, S. 125-127) sowie mit Hilfe des virtuellen Montagesystemherstellers Modular Assembly GmbH. Die Ausführung der Methodik dient dazu, die Anwendbarkeit dieser vor allem hinsichtlich der in Kapitel 2.6.2 definierten Anforderungen zu verifizieren. Hauptziel der Anwendung ist somit, die Eignung der Methodik für die Planung von modularen Montagesystemen zu prüfen. Dabei erfolgt anhand der beiden genannten Unternehmen die Ausführung einer beispielhaften Planung, wobei alle Schritte der Methodik durchgeführt und abschließend hinsichtlich der definierten Anforderungen reflektiert werden (siehe Kapitel 6.3). Dabei wird sowohl geprüft, ob die Voraussetzung der Handhabbarkeit hinsichtlich Umfang und Komplexität erfüllt werden konnte, als auch, ob die Planung hinreichend präzise und trotzdem anwendbar ist.

Bei der Anwendung werden die Anforderung der Handhabbarkeit unscharfer Produktinformationen mit dem Schwerpunkt auf der Produktstruktur sowie die der standardisierten Beschreibung von Ressourcen und Prozessen als Grundlage für die automatisierte Alternativengenerierung zur Betrachtung der Methodik herangezogen. Insbesondere ist die Unterstützung des Planers bei der Generierung von Alternativen durch automatisierte Schritte eine wichtige charakterisierende Anforderung. Aufgrund der spezifischen Ausrichtung der Methodik auf die Planung modularer Montagesysteme sind zudem die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des Montagesystems sowie die Berücksichtigung relevanter zukünftiger Entwicklungen elementare Anforderungen, deren Umsetzung analysiert und beschrieben werden muss. In diesem Kontext zählt auch die umfassende Betrachtung der Kosten über den Lebenszyklus zu einem wichtigen Element der Methodik. Darauf aufbauend ist die mehrdimensionale Bewertung hinsichtlich ihrer Handhabbarkeit zu betrachten. Zur Überprüfung dieser Anforderungen wird die Planungsmethodik für einen kompletten Planungsfall des Montagesystemherstellers angewandt. Anschließend werden die Erkenntnisse daraus festgehalten.

6.2 Anwendungsfall der Methodik

Der Anwendungsfall der Methodik wird auf Grundlage einer charakteristischen Ausgangssituation, welche zu Beginn beschrieben wird, ausgeführt. Die Anwendung der Planungsmethodik selbst erfolgt nach den in Kapitel 5 bei der Umsetzung dargestellten Schritten, beginnend bei der Entwicklung von Szenarien. Anzumerken ist, dass die quantitativen Darstellungen von Ergebnissen im diesem Anwendungsfall verfremdet wurden.

6.2.1 Ausgangssituation

Zur Beschreibung der Ausgangssituation wird zuerst der Anlagenhersteller selbst und das von ihm auf dem Markt angebotene modulare Montagesystem vorgestellt. Anschließend erfolgt die Beschreibung des späteren Anlagenbetreibers, um erste Informationen zum Unternehmen darzustellen, welche für die spätere Entwicklung von Szenarien einen Rahmen bilden. Abschließend wird die für die Planung relevante Produktfamilie „Schreibtischaccessoire“ charakterisiert, welche von der EMARTi AG neu auf dem Markt eingeführt werden soll.

6.2.1.1 Das System des Anlagenherstellers – iTRAME

Die Modular Assembly GmbH ist ein Hersteller von Montageanlagen, der sich auf modulare Montagesysteme spezialisiert hat. Sie bietet ein modulares Komplettsystem an, welches bestimmte Aspekte von Modulsystemen beinhaltet und aufgrund seiner Eigenschaften unter dem Namen „iTRAME“ (intelligent Transformable Reconfigurable Assembly and Manufacturing Equipment) vertrieben wird. Dieses besteht aus vielen verschiedenen Modulen, die projektspezifisch zu einer Montagezelle zusammengestellt werden können. Im Regelfall werden die einzelnen Module verkettet, weshalb ein automatischer Werkstücktransport vorhanden ist. Der Werkstücktransport an sich erfolgt mithilfe eines Werkstückträgers, der anforderungsspezifisch die jeweiligen Bauteile aufnimmt und zwischen den Stationen transportiert. Daher existieren im vorliegenden Fall auch reine Transportmodule. Jeder Werkstückträger besitzt zwei RFID-Chips zur Identifikation. Für die Durchführung von Montageprozessen können manuelle, hybride und vollautomatisierte Module verwendet werden. In Abbildung 6-1 ist eine Beispielkonfiguration aus einer Auswahl von Modulen dargestellt. Das iTRAME System besitzt in jedem Modul zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit und Reduktion der benötigten Produktionsfläche Ober- und Unterflurtransportbänder. Weitere Eigenschaften sind die standardisierten Abmessungen der Module (basierend auf einem 800 mm x 800 mm Raster) sowie standardisierte Schnittstellen für die Medienversorgung. Das Steuerungskonzept des Systems ist so gestaltet, dass durch eine dezentrale Steuerung (Steuerung auf jedem Modul vorhanden) eine hohe Flexibilität realisiert werden kann, wobei eine zentrale Datenbank dem Datenaustausch dient (vgl. Westkämper, Zahn 2008, S. 95-98).

Abbildung 6-1 iTRAME Beispielkonfiguration
(Foto von der Firma Festo Didactic GmbH & Co. KG)

6.2.1.2 Das Betreiberunternehmen EMARTi AG

Die EMARTi AG ist ein renommierter Mittelständler, welcher von den Charakteristika her einem KMU entspricht (vgl. Westkämper, Zahn 2008, S. 125f). Produktseitig existieren die Sparten Schreibtischbedarf, Büromaschinen und Organisationsmittel, innerhalb derer etwa 15 verschiedene Produkte mit mehr als 800 Varianten auf den Märkten allokiert sind. Zum Schreibtischbedarf zählen beispielweise Brieföffner, Bürohefter, Bürolocher, Karteikästen und Papierkörbe. Aktenvernichter, Beschriftungssysteme, Laminiergeräte und Thermobindegeräte gehören zum Spektrum der Büromaschinen. Die Sparte Organisationsmittel beinhaltet Aktenordner, Hängemappen und Ringordner. Die Produkte werden hauptsächlich in Europa und mit verstärktem Wachstum auf dem Weltmarkt vertrieben. In Relation zu den Konkurrenzprodukten liegen die der EMARTi AG im oberen Preissegment und sind bekannt für Innovation und Hochwertigkeit. Bezüglich der Produktion ist festzuhalten, dass die Herstellung der Organisationsmittel vollständig im eigenen Haus erfolgt. Beim Großteil der Produkte in den Sparten Büromaschinen und Schreibtischbedarf werden die Einzelteile von Lieferanten gefertigt, um anschließend intern montiert und versandt zu werden.

Der Vertrieb von Produkten fokussiert sich auf den Großhandel, wobei auch eigene Vertriebsbüros einen Direktvertrieb mit Mindestbestellmenge umsetzen. Im Vertrieb sind somit drei Marktbereiche zu unterscheiden: Zum einen sind dies der Großhandel sowie Unternehmen der Werbemittelbranche und zum anderen Industrieunternehmen unterschiedlicher Größe und Branche. Zu den Wettbewerbern zählen neben den Herstellern aus Billiglohnländern, die eine Kostenführerschaft mit günstigen Standardprodukten anstreben, im Wesentlichen weitere mittelständische Unternehmen, die gleichermaßen durch Flexibilität und individuelle Produkte sowie einen umfassenden Service Kunden gewinnen wollen. Eine Differenzierung gegenüber den Herstellern von Standardprodukten ist daher verhältnismäßig gut zu realisieren, wohingegen die Hersteller ähnlich hochwertiger Produkte im Fokus des Wettbewerbs stehen.

Entsprechend der Konkurrenzsituation zielt die Firmenstrategie auf Differenzierung vom Wettbewerb über Individualität der Produkte (Variantenreichtum), umfangreiche Funktionalität in den Produkten und herausragenden Service. Insgesamt soll dadurch ein Wachstum des Unternehmens ermöglicht werden. Zur Umsetzung sind neben Produktänderungen auch Neueinführungen notwendig.

6.2.1.3 Produktfamilie „Schreibtischaccessoire“

Die Produktfamilie „Schreibtischaccessoire“ stellt eine Neueinführung mit den Zielen einer wettbewerbsfähigen Produktion, der Erschließung neuer Märkte und des angestrebten Wachstums dar. Sie ist der Produktsparte Schreibtischbedarf zugeordnet und in ihrer Struktur bereits entwickelt. Die detaillierte Konstruktion der einzelnen Bauteile wurde noch nicht durchgeführt. Ein wichtiges Merkmal der Produktfamilie ist der modulare Aufbau, welcher dem Ziel einer hohen Variantenvielfalt mit gleichzeitig klarer und übersichtlicher Struktur dient. Ausgangspunkt für die Montage des Produkts soll die Basiseinheit bilden, welche aus einer Grundplatte und einem Deckel bestehen wird, wobei auch hierbei Varianten entstehen können. Die Grundplatte soll dabei so ausgearbeitet werden, dass sie zwei weitere Bauteile beziehungsweise Baugruppen (sogenannte Einsätze) aufnehmen kann, wohingegen auf dem Deckel ein weiterer Einsatz Platz finden sollte. Die Verbindung zwischen den Einsätzen und Grundplatte beziehungsweise Deckel soll standardisiert sein, sodass alle Einsätze an allen Positionen angebracht werden können. Die Einsätze können sowohl Einzelteile als auch vormontierte Baugruppen sein. Die Vormontage soll dabei entweder von Lieferanten oder im Haus, teilweise in der zu planenden Montagezelle stattfinden. So sollen Anzeigegeräte (Thermometer, Hygrometer und eine Uhr) mit einer Designaufnahme gefügt werden, bevor die dadurch entstehende Baugruppe montiert wird. Zur Produkteinführung soll von fünf Varianten ausgegangen werden, die alle charakteristischen Merkmale der Produktbreite abdecken und damit die Grundlage für den vorliegenden Planungsfall bilden. Dabei werden die Einsätze großer Becher (Aufnahme von Stiften), kleiner Becher (Aufnahme kleinerer Gegenstände), Thermometer, Hygrometer, Magnet (Aufnahme von Büroklammern) und Lampe verwendet.

Tabelle 6-1 Produktvarianten im Anwendungsfall

Variante	Position 1	Position 2	Position 3 (Deckel)
Variante A	Kleiner Becher	Großer Becher	Thermometer
Variante B	Lampe	Großer Becher	Hygrometer
Variante C	Magnet	Kleiner Becher	Großer Becher
Variante D	Magnet	Großer Becher	Uhr
Variante E	Lampe	Großer Becher	Kleiner Becher

6.2.2 Anwendung der Planungsmethodik

Im vorliegenden Anwendungsfall wird die Planungsmethodik entsprechend der in Kapitel 5 vorgestellten Schritte, beginnend bei der Entwicklung von Szenarien, eingesetzt. Nach der Präzisierung der Rahmenbedingungen werden systemgestützt Fähigkeitsfolgen erstellt und

Ressourcen ausgewählt, um Konfigurationen zu erarbeiten. Dazu erfolgen anschließend die Leistungsabstimmung und Vorauswahl von Ausbaustufenfolgen. Den Abschluss bildet die szenariobasierte Bewertung mit der Auswahl einer Lösung.

6.2.2.1 Entwicklung von Szenarien

Als erster Schritt bei der Anwendung der Methodik werden Szenarien als Grundlage für die weitere Planung entwickelt, wofür ein Workshop anhand der in Anhang E abgebildeten Formblätter durchgeführt wird. Zu Beginn sollen mehr Informationen über den späteren Betreiber erarbeitet und spezifisches Know-how als Grundlage für mögliche Produktlebenszyklen der Produktfamilie identifiziert werden. Dazu wird in der Aufgaben- und Problemanalyse nach dem bereits vorgestellten Schema das Unternehmen analysiert werden. Eine grobe Übersicht über das Ergebnis der Analyse ist in Tabelle 6-2 abgebildet.

Tabelle 6-2 Unternehmensanalyse

	Unternehmen	Montage
Leistungs-spektrum	Produktsparten: Schreibtischbedarf, Büromaschinen, Organisationsmittel	Alle Produkte werden von EMARTi GmbH montiert
Leitbild	Funktionalität und Service sind neben differenzierten, variantenreichen Produkten mit kurzen Lieferzeiten unsere Stärken	Handling vieler Varianten bei kurzen Lieferzeiten und hoher Flexibilität
Ziele und Strategien	Deutliches Wachstum mit Einführung neuer Produkte und Erweiterung der Wertschöpfungskette durch Fertigung	Reduzierung der Durchlaufzeit, um auftragsspezifische Liefertreue zu erhöhen sowie Reduzierung der Fixkostenbelastung und Erhöhung der Stückzahlflexibilität
Rahmen-bedingungen	Komplett neuer Aufbau der Montage für das neue Produkt, ausreichende Platzverhältnisse, Einstellung neuer Mitarbeiter in beliebiger Anzahl, Gesamtkosten sind relevant, geringe Fixkostenbelastung gewünscht	

Als Grundlage zur Entwicklung von Lebenszyklusverläufen sind Informationen über das Produkt zu erarbeiten, wobei in diesem Fall ein Lebenszyklus eines vergleichbaren Produkts vorliegt. Dieser Verlauf ist dem klassischen Produktlebenslauf recht ähnlich, weshalb keine untypischen Elemente erkennbar sind. Auf Basis dieses Verlaufes erfolgt eine vereinfachte Festlegung der für das neue Produkt zu betrachtenden Phasen, sodass die drei Phasen Einführung und Wachstum, Reife und Sättigung sowie Degeneration entstehen. Anhand des Lebenszyklusverlaufs des vergleichbaren Produkts sind im Anschluss Einflussfaktoren zu identifizieren. Bei Betrachtung von Einführung und Wachstum des Verlaufes lassen sich verschiedene Entwicklungen festhalten. So beginnen die Absatzzahlen auf einem niedrigen Niveau, um dann verhältnismäßig schnell und deutlich anzusteigen. Dies lässt sich durch die gute Annahme des Produktes bei den Endverbrauchern und der damit

zusammenhängenden stärkeren Nachfrage durch die Großhändler begründen, was durch den Neuheitsgrad des Produkts unterstützt wird. Zusätzlich erfolgten umfangreiche Marketingaktivitäten und der Start des Direktvertriebes. Da noch keine Nachahmerprodukte auf dem Markt waren, konnte dieser starke Anstieg realisiert werden. In der Reife- und Sättigungsphase stabilisierte sich der Absatz, wobei erste Konkurrenzprodukte auf dem Markt angeboten wurden und keine weiteren Zielgruppen erreicht werden konnten. Durch Preissenkungen und eine höheren Anzahl an Varianten konnten die Absatzzahlen länger gehalten werden. Die Degenerationsphase spiegelte dann das starke Auftreten von günstigeren Nachahmerprodukten auf dem Markt wider, was auch durch die höhere Qualität des eigenen Produkts nicht ausgeglichen werden konnte. Zudem empfanden die Kunden das Produkt nicht mehr als neu. Auf Basis dieser Informationen und der Übertragung dieser Aspekte auf das neue Produkt können die in Tabelle 6-3 abgebildeten Einflussfaktoren identifiziert werden.

Tabelle 6-3 Einflussfaktoren

	Einführung und Wachstum	Reife und Sättigung	Degeneration
Einflussfaktoren	Konkurrenz Marketing Neuheitsgrad Preis Produktqualität Trends Vertriebsstruktur	Konkurrenz Neuheitsgrad Preis Produktqualität Trends Varianten Zielgruppen	Konkurrenz Neuheitsgrad Preis Varianten

Auf Grundlage der von Marketing und Vertrieb bereits ermittelten Absatzmengen zu Markteintritt (500 St./Tag) und bei Maximalauslastung (2500 St./Tag) kann mithilfe des zuvor beschriebenen Lebenszyklus des vergleichbaren Produkts ein potenzieller Produktlebenszyklus ermittelt werden, siehe Abbildung 6-2.

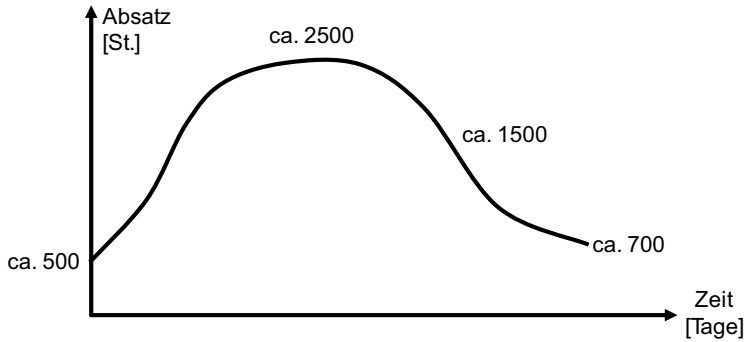


Abbildung 6-2 Potenzieller Produktlebenszyklus

Als nächstes werden in der Einflussanalyse Einflussfaktoren gesammelt und deren Vernetzung analysiert, um relevante Schlüsselfaktoren auszuwählen. Bei der Sammlung relevanter Einflussfaktoren wurden verschiedene Vorgehensweisen eingesetzt. So wurden die Einflussfaktoren beachtet, die bei der Betrachtung des Lebenszyklus des vergleichbaren Produktes identifiziert wurden. Zudem wurde mit Unternehmensexperten der EMARTi AG ein Brainstorming durchgeführt und die beim Anlagenhersteller vorhandene Checkliste berücksichtigt. Die auf diese Weise identifizierten Einflussfaktoren sind in Tabelle 6-4 aufgelistet.

Tabelle 6-4 Identifizierte Einflussfaktoren

Einflussbereich	Einflussfaktoren
Zustand der Kunden	Bestellverhalten Investitionsbereitschaft Kaufkraft
Zustand des Unternehmens	Marktstellung Serviceleistung Unternehmensziele Verkaufsförderungsmaßnahmen Vertriebsstruktur
Zustand der Umwelt	Konjunktur Marktstruktur Trends Wettbewerbsstruktur
Zustand des Produkts	Kosten Marketinginstrumente Neuheitsgrad Preis Übereinstimmung mit Verbraucherbedürfnissen Varianten

Nach der Identifikation erfolgt die Vernetzung der Einflussfaktoren, welche ebenfalls im Team ausgeführt wird. Dazu wird mittels einer Bewertungsmatrix (siehe Kapitel 5.1) die gegenseitige Beeinflussung der Faktoren bewertet. Das Ergebnis wird in dem bereits vorgestellten Aktiv-Passiv-Grid visualisiert (siehe Anhang F). Mithilfe dieser Darstellung werden die Einflussfaktoren abhängig von ihrer Aktivität beziehungsweise Passivität klassifiziert. Die durch diese Vernetzungsanalyse erhaltenen Informationen bilden die Ausgangsinformation für den intuitiven Entscheidungsprozess des Teams, welcher zur Auswahl von Schlüsselfaktoren aus den Einflussfaktoren dient. Das Ergebnis dieser Auswahl ist in Tabelle 6-5 dargestellt.

Tabelle 6-5 Ausgewählte Schlüsselfaktoren

Einflussbereich	Schlüsselfaktoren
Zustand der Kunden	Bestellverhalten des Großhandels Investitionsbereitschaft der Industrie Kaufkraft der Privatverbraucher
Zustand der Unternehmung	Marktstellung Unternehmensziele Vertriebsstruktur
Zustand der Umwelt	Marktstruktur Wettbewerbsstruktur
Zustand des Produkts	Marketinginstrumente Neuheitsgrad Preis Übereinstimmung mit Verbraucherbedürfnissen Varianten

Anschließend erfolgt die Trendprojektion bei der für die Schlüsselfaktoren jeweils die derzeitige Situation und mögliche zukünftige Entwicklungen beschrieben werden. Dabei werden im vorliegenden Anwendungsfall für jeden Schlüsselfaktor zwei alternative Entwicklungen definiert, die für zwei Zeiträume (für die ersten beiden Jahre und die Jahre drei bis fünf) beschrieben werden. Die Ergebnisse der Trendprojektion sind in Anhang F (Tabelle 10-1) dargestellt.

Mithilfe der unterschiedlichen Entwicklungsmöglichkeiten für die einzelnen Einflussfaktoren, die in der Trendprojektion erarbeitet wurden, können durch Kombination dieser Szenarien gebildet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass diese Projektionsbündel vor dem Hintergrund der gegenseitigen Beeinflussung der Einflussfaktoren konsistent sind. Dies bedeutet, dass die Vernetzung der Faktoren in der Form berücksichtigt wird, dass bestimmte Kombinationen von Ausprägungen der Faktoren sinnvoller sind als andere. Außerdem wird bei der Bündelung darauf geachtet, dass Trend- und Extremszenarien erarbeitet werden. Das Vorgehen erfolgt hierbei ebenfalls im Rahmen des Workshops innerhalb der Gruppe auf

intuitive Weise. Die durch die Projektionsbündel entstandenen Szenarien (siehe Tabelle 6-6) werden dann hinsichtlich der erwarteten Eintrittswahrscheinlichkeit bewertet. Im vorliegenden Fall werden die Wahrscheinlichkeiten der ersten beiden Szenarien mit 40% und des dritten Szenarios mit 20% bewertet.

Tabelle 6-6 Szenariobildung

Schlüsselfaktoren	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Investitionsbereitschaft	Ansteigend	Gering	Gering
Kaufkraft	Anstieg	Leichte Schwächung	Leichte Schwächung
Bestellverhalten	Langfristig, mehr	Vorsichtig	Vorsichtig
Unternehmensziele	Produkt unwichtig	Produkt wichtig	Produkt unwichtig
Marktstellung	Marktführer	Nicht Marktführer	Nicht Marktführer
Vertriebsstruktur	Neue Vertriebswege	Neue Vertriebswege	Alte Vertriebswege
Marktstruktur	Umkämpft	Umkämpft	Umkämpft
Wettbewerber	Weniger Mittelständler	Viele gleichartige Angebote	Viele gleichartige Angebote
Neuheitsgrad	Hoch	Gering	Gering
Marketinginstrumente	Viel	Viel	Wenig
Preis	Konstant	Fallend	Fallend
Varianten	Anstieg	Konstant	Konstant
Übereinstimmung mit Verbraucherbedürfnissen	Positiv	Unnötig	Unnötig

Abschließend sind die Auswirkungen der in den Szenarien abgebildeten möglichen zukünftigen Entwicklungen auf den potenziellen Produktlebenszyklus zu betrachten. Dabei wird der entstehende Verlauf gegenüber dem ursprünglichen vor allem über die Charakteristika Dauer, Niveau, Steigung und Verlaufsform beschrieben. Diese Beschreibung erfolgt phasenweise und wird in Tabellenform dargestellt, wobei das Ergebnis für den Anwendungsfall in Anhang F (Tabelle 10-2, Tabelle 10-3, Tabelle 10-4) aufgeführt wird. Die jeweiligen Auswirkungen der Schlüsselfaktoren werden für die einzelnen Phasen zusammengefasst. Darauf aufbauend der neue Verlauf für die Phase und durch Kombination für den kompletten Lebenszyklus erstellt. Im vorliegenden Fall wird zusätzlich zu den verschiedenen Verläufen von zwei unterschiedlichen Initialstückzahlen ausgegangen, sodass die Verläufe auf jeden Startpunkt übertragen werden (siehe Abbildung 6-3, Unterscheidung durch gestrichelte und durchgängige Linie). Durch die Berücksichtigung der unterschiedlichen Initialstückzahlen ist es möglich, ein sehr breites Spektrum von möglichen Lebenszyklen abzudecken.

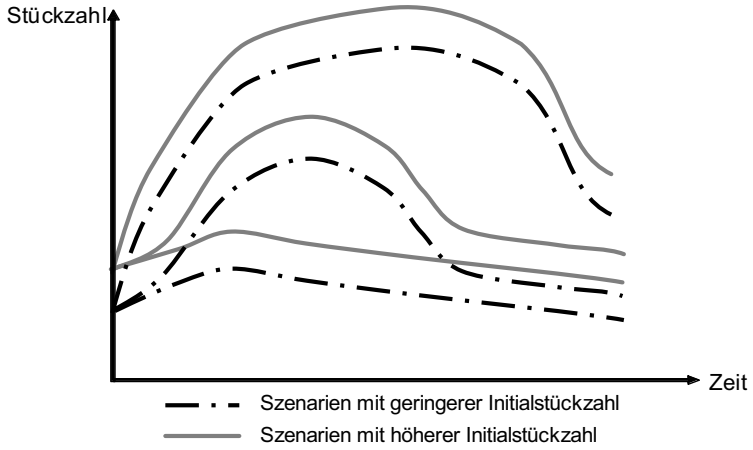


Abbildung 6-3 Entwickelte Produktlebenszyklen

6.2.2.2 Präzisierung der Rahmenbedingungen

Nachdem die Erwartungen der möglichen zukünftigen Entwicklungen hinsichtlich des Produktlebenszyklus entwickelt wurden, werden im Folgenden die Rahmenbedingungen als weitere Eingangsinformationen für die Planung erarbeitet. Im Fokus stehen dabei sowohl die Festlegung von Kapazitätsgrenzen, die als Rahmen für später zu entwickelnde Ausbaustufen dienen, als auch die Definition eines Zielsystems.

Für die Planung der Kapazitätsgrenzen wird von einer fixen Schichtzahl ausgegangen, da der Kunde keinen weiteren Lohnkostenanstieg aufgrund von Zuschlägen in Kauf nehmen möchte. Die Kapazitätsanpassungen in entsprechender Größenordnung sollen daher durch die jeweiligen Ausbaustufen erfolgen. Für die entwickelten Produktlebenszyklusszenarien wurden drei Kapazitätsbereiche definiert, wobei der erste bei bis zu 1500 Stück pro Tag liegt. Dieser Bereich zielt auf die niedrigen Anfangsstückzahlen und die Extremszenarien mit niedrigen Verläufen. Der nächste Bereich spiegelt die Anforderungen der Reifephase der Trendszenarien durch den mittleren Stückzahlbereich bis 2800 Stück pro Tag wider. Der Maximalbereich orientiert sich an den mit hohem Absatz versehenen Verläufen und fordert bis zu 4250 Stück pro Tag (vgl. Anhang F Abbildung 10-2).

Zur Definition des Zielsystems werden vor der eigentlichen Planung von Konfigurationen die Kriterien identifiziert. Dadurch können die Wünsche und Forderungen des Kunden als Information für den Planer dienen und in der späteren Bewertung Verwendung finden. Bei dieser Anwendung werden folgende Kriterien für das Zielsystem bestimmt: Flächenbedarf, Kostenflexibilität, mitarbeiterorientiertes Potenzial, strukturelle Wandlungsfähigkeit, Variantenflexibilität und Verfügbarkeit. Zur Gewichtung wird auf Kundenwunsch das Matrix-Verfahren eingesetzt, bei dem die Kriterien direkt miteinander verglichen werden. Durch Anwendung dieses Verfahrens werden in diesem Fall die Variantenflexibilität und die

strukturelle Wandlungsfähigkeit als die beiden wichtigsten Kriterien identifiziert (vgl. Tabelle 6-7).

Tabelle 6-7 Gewichtung der Kriterien

	Kriterien	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	Summe	Gewichtung [%]
K_1	Flächenbedarf		0,5	0	0	0	0	0,5	3%
K_2	Kostenflexibilität	0,5		1	0	0	0,5	2	13%
K_3	Mitarbeiterorientiertes Potential	1	0		0	0	0	1	7%
K_4	Strukturelle Wandlungsfähigkeit	1	1	1		0,5	0,5	4	27%
K_5	Variantenflexibilität	1	1	1	0,5		1	4,5	30%
K_6	Verfügbarkeit	1	0,5	1	0,5	0		3	20%
1 = wichtiger; 0,5 = gleichwichtig; 0 = unwichtiger									

6.2.2.3 Erstellung von Fähigkeitsfolgen

Nach der Präzisierung der Rahmenbedingungen wird die Planung von Montagekonfigurationen ausgehend von einer Fähigkeitsfolge erarbeitet. Diese kann direkt aus der Produktstruktur und der Kenntnis über die Gegebenheiten des modularen Montagesystems erstellt werden. Dazu sind im Wesentlichen produktabhängige Fähigkeiten, wie beispielsweise das Einlegen von Bauteilen, das Nasskleben oder Verstiften, in sehr geringem Maß aber auch anlagenspezifische Fähigkeiten, wie das Auflegen eines Werkstückträgers, von Relevanz. Dadurch dass eine hohe Anzahl an Varianten des Produkts angestrebt wird, wird eine Gesamtfähigkeitsfolge erstellt, die alle Aspekte der Varianten erfasst. Diese Fähigkeitsfolge kann direkt mithilfe der systemtechnischen Realisierung der Methodik auf Basis der generischen Beschreibungssystematik aufgebaut werden. Aufbauend auf dieser Fähigkeitsfolge sollen unterschiedliche Ausbaustufen konfiguriert werden, wobei nicht zwangsweise mit der Ausbaustufe für die erste Phase des Lebenszyklus begonnen wird, sondern mit der, die für das Gesamtsystem die höchste Bedeutung besitzt. Anschließend werden weitere Ausbaustufen unter Beachtung des Rekonfigrationsaufwands erstellt. Dieser Vorgang wird mehrmals durchgeführt, sodass verschiedene Ausbaustufenfolgen entstehen. Die für den Anwendungsfall erstellte Fähigkeitsfolge ist ausschnittsweise in Abbildung 6-4 dargestellt, wobei an dieser Stelle auf das Kommentarfeld im Kontext der Treeview-Ansicht hingewiesen sei, in welches zusätzliche Informationen eingetragen werden können. Aufbauend auf der Fähigkeitsfolge wird der Fähigkeitsablauf festgelegt, welcher zur automatischen Erzeugung von Vorschlägen von Ressourcen für die einzelnen Fähigkeiten dient.

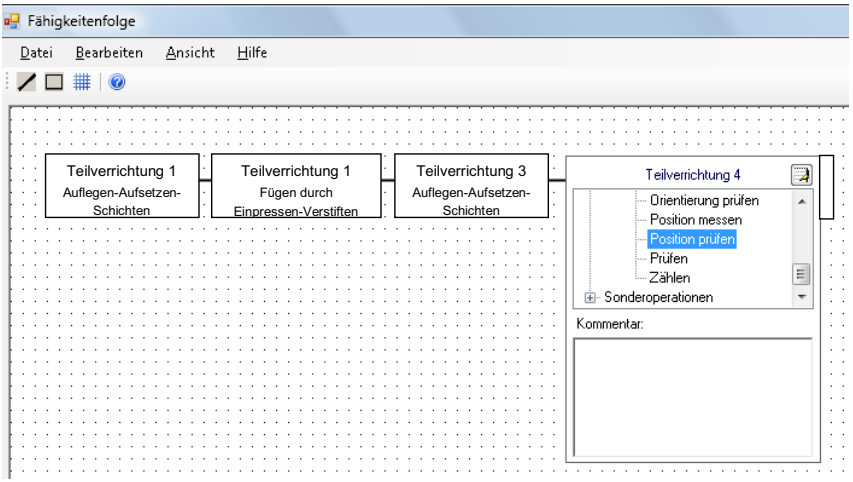


Abbildung 6-4 Fähigkeitsfolge

6.2.2.4 Auswahl von Ressourcen

Nach Festlegen des Fähigkeitsablaufs werden durch das System geeignete Module, die grundsätzlich die geforderten Fähigkeiten besitzen, automatisch vorgeschlagen. Zu jeder Fähigkeit können die vorgeschlagenen Module in einer detaillierteren Betrachtung anhand von Merkmalen hinsichtlich ihrer Charakteristika untersucht und geeignete ausgewählt werden. In Abbildung 6-5 ist eine Visualisierung der detaillierten Betrachtung von Modulen aus dem Anwendungsfall dargestellt. Die auf diese Weise ausgewählten Ressourcen sind in Tabelle 6-8 aufgelistet, wobei zum besseren Verständnis das relevante Bauteil mit aufgeführt ist. In diesem Fall werden für einzelne Fähigkeiten mehrere Ressourcen ausgewählt, sodass eine Menge an möglichen Ressourcen entsteht. Beispielsweise besitzen sowohl ein Handarbeitsplatz als auch ein automatisches Klebemodul die Fähigkeit Nasskleben und sind daher in der Auswahlmenge an möglichen Modulen für diese Fähigkeit abgebildet. Aufbauend auf dieser Auswahlmenge erstellt das System automatisch eine Übersicht aller Kombinationsmöglichkeiten der Module. Um eine effiziente Planung und eine überschaubare Anzahl an möglichen Kombinationen sicherzustellen, sollte der Planer die ausgewählten Module pro Fähigkeit auf wenige begrenzen. Im Anwendungsfall werden aus der vorgeschlagenen Menge drei alternative Kombinationen ausgewählt und weiter geplant. Weitere Alternativen entstehen durch Variation des Montageablaufs, was wiederum zu weiteren Kombinationen führt. Beim Festlegen der weiter zu planenden Kombinationen sollte eine vielfältige Auswahl an Ressourcen getroffen werden, um ein breites Spektrum abdecken zu können. Im Anwendungsfall unterscheiden sich die drei Initialkonfigurationen im Wesentlichen dadurch, dass die erste manuell, die dritte automatisiert beziehungsweise teilautomatisiert und die zweite diesbezüglich als Mittelweg zu charakterisieren sind. Auf diese Weise wird eine entsprechend große Bandbreite erreicht, wodurch auch bei der

späteren Kostenrechnung unterschiedliche Merkmale in den Kostenstrukturen deutlich werden sollen.

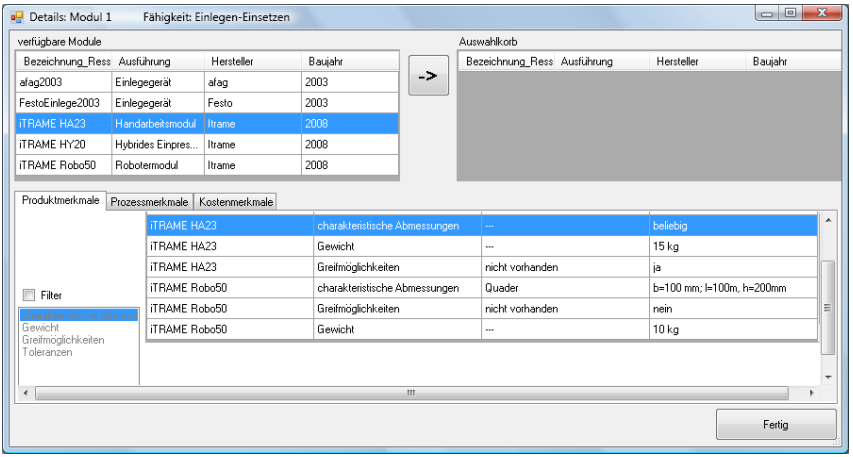


Abbildung 6-5 Detailvergleich von Modulen mittels Merkmalen

Tabelle 6-8 Auswahl an Ressourcen

Fähigkeit	Bauteil	Mögliche Ressourcen
Auflegen/ Aufsetzen	Werkstückträger, Grundplatte	Handarbeitsplatz
		Hybrides Einpressmodul
Einpressen/ Verstiften	Deckel und Grundplatte	Handarbeitsplatz
		Hybrides Einpressmodul
Position prüfen	Deckel auf Grundplatte	Handarbeitsplatz
		Kameraprüfstrecke
Einsetzen	Becher klein, Becher groß, Tischlampe, Aufnahme mit Messinstrument	Handarbeitsplatz
		Hybrides Einpressmodul
		Robotermodul
Einsetzen	Magnet	Handarbeitsplatz
		Hybrides Einpressmodul
Nasskleben	Messinstrument in Aufnahme	Handarbeitsplatz
		Automatisches Klebemodul
Lackieren und Einsetzen	Kleiner Becher	Robotermodul mit Lackierzelle
Teilgeordnetes Lagern	Werkstückträger inkl. Schreibtischset	Handarbeitsplatz
		Automatisches Lager

6.2.2.5 Leistungsabstimmung

Nach Auswahl der einzelnen Module für die Konfigurationen erfolgen die Leistungsabstimmung und die grobe Layoutbetrachtung. Durch diese Schritte erfolgt die Strukturierung der Montagezelle, wobei zuerst die Leistungsabstimmung anhand der Prozesszeiten durchgeführt wird. Die Prozesszeiten werden dabei mithilfe der vorhanden Informationen (Merkmale) zu den Modulen berechnet oder definiert, um dadurch die zu belegenden Kapazitäten für jedes Modul zu ermitteln. Eine Übersicht über die im Anwendungsfall ermittelten Prozesszeiten findet sich in Anhang F (Tabelle 10-5). Als für die Leistungsabstimmung notwendige Grundlage dient die Ziel-Taktzeit, welche sich aus der geforderten Kapazität und der stillstandsfreien Laufdauer berechnet. Im vorliegenden Fall, bei einer geforderten Kapazität von 1500 St./Tag und einer stillstandfreien Laufdauer von 7 h/Tag, ergibt sich eine Taktzeit von 16,8 s. Zur Erreichung dieser Ziel-Taktzeit wird im Anwendungsfall sowohl überprüft, ob eine Zusammenfassung von Modulen in einer einzigen Station möglich ist, als auch, ob zur Erhöhung der Kapazität Stationen parallel betrieben werden müssen. Bei diesem Schritt sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen, wie die Prozessfolge oder die Unterscheidung, ob die Prozesse variantenabhängig sind. Dementsprechend kann auch die Prozesszeit angepasst werden, wobei bei sich ersetzenden Prozessen die größere Prozesszeit verwendet wird. Auf diese Weise kann die komplette Montagezelle abgetaktet und somit der Ziel-Taktzeit angenähert werden. Die Zusammenfassung von Fähigkeiten auf einer Station kann außerdem noch in dem anfangs erstellten Montageablauf durch Gruppierung derselben visualisiert werden.

In einer ersten groben Layoutbetrachtung werden anschließend die ausgewählten Module sowie weitere Elemente (bspw. Transportmodule) in ihrer Struktur angeordnet. Dabei kann auf maßstäbliche Skizzen für die Elemente zurückgegriffen werden, welche per Drag and Drop auf dem Layoutraster angeordnet werden. Die Layoutplanung bildet den letzten Schritt für die Planung einer Konfiguration. Anschließend werden im Anwendungsfall die weiteren Konfigurationen dieser und zwei weiterer Initialkonfigurationen geplant (vgl. Anhang F Abbildung 10-3). Die Planung orientiert sich dabei, wie oben beschrieben, an den drei definierten Kapazitätsbereichen.

Als Ergebnis der Planung stehen drei verschiedene Initialopportunitäten zur Verfügung, die aus jeweils drei Konfigurationen als spätere Ausbaustufen bestehen. Dabei bilden die Konfigurationen der ersten Initialopportunität folgende erreichbare Kapazitäten ab: 1575 St./Tag, 2530 St./Tag (dies ist somit die zweite Konfiguration der ersten Initialopportunität) und 4380 St./Tag. Die zweite Gruppe an Konfigurationen kann 1400 St./Tag, 2800 St./Tag und 4200 St./Tag erreichen und die Konfigurationen der dritten Initialopportunität 1400 St./Tag, 2520 St./Tag sowie 4200 St./Tag.

6.2.2.6 Vorauswahl

Bei der Vorauswahl im Anwendungsfall werden von den sechs entwickelten Szenarien drei für die Erstellung von Ausbaustufenfolgen ausgewählt. Als das erste Szenario wird das mit den höchsten Stückzahlen und der höheren Anfangsstückzahl gewählt, wohingegen als drittes Szenario das gewählt wird, welches zwar ebenfalls durch die höhere

Anfangsstückzahl charakterisiert ist, allerdings einen pessimistischen Verlauf besitzt. Das zweite Szenario ist das Trendszenario der Szenarien mit geringerer Anfangsstückzahl (vgl. Abbildung 6-3). Die Szenarien werden wie folgt mit Wahrscheinlichkeiten bewertet: Szenario 1 mit 40%, Szenario 2 mit 40% und Szenario 3 mit 20%. Anschließend werden für jedes Szenario jeweils die Übergänge der späteren Ausbaustufen terminiert. Die Ausbaustufen werden durch eine kapazitätsabhängige Zuordnung der Konfigurationen der Initialopportunitäten zu den zuvor terminierten Phasen gebildet. Dadurch entsteht für jedes Szenario ein Alternativenfeld (vgl. Kapitel 4.6), sodass im vorliegenden Fall drei Alternativenfelder zu beschreiben sind (siehe Abbildung 6-6, Abbildung 6-7 und Abbildung 6-8). Für Szenario 1 beginnt das Alternativenfeld mit den Konfigurationen für den mittleren Kapazitätsbereich (zweite Konfiguration der ersten, zweiten und dritten Initialopportunität), um anschließend relativ früh zu den Konfigurationen des höchsten Kapazitätsbereiches zu wechseln. Gegen Ende des Verlaufes erfolgt dann wieder ein Rückbau auf die vorige Konfiguration.

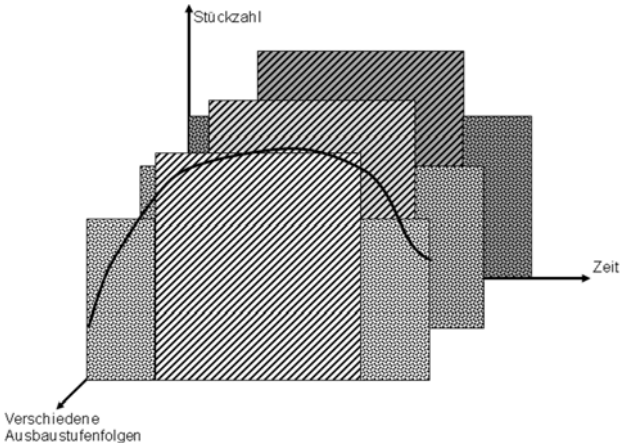


Abbildung 6-6 Schematische Darstellung der Alternativenfeld 1

Bei Szenario 2 werden die Konfigurationen der beiden niedrigeren Kapazitätsbereiche eingeplant, wobei nach einer kürzeren Anfangsphase (niedrigster Kapazitätsbereich) eine längere zweite Phase (mittlerer Kapazitätsbereich) folgt, bevor eine durchschnittliche Abschlussphase (niedrigster Kapazitätsbereich) folgt. Das dritte Alternativenfeld enthält keine Rekonfigurationen, sodass über den kompletten Zyklus hinweg die Konfigurationen des niedrigsten Kapazitätsbereiches eingesetzt werden. Diese Szenarien und Ausbaustufenfolgen bilden die Grundlage für die folgende Bewertung.

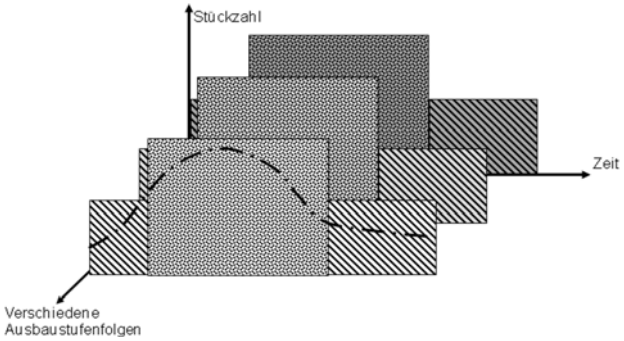


Abbildung 6-7 Schematische Darstellung der Alternativenfeld 2

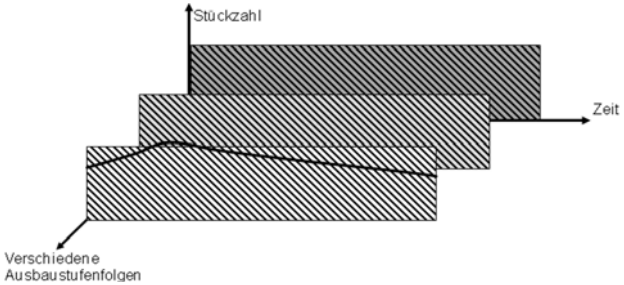


Abbildung 6-8 Schematische Darstellung der Alternativenfeld 3

6.2.2.7 Szenariobasierte Bewertung und Auswahl einer Lösung

Nach dem Generieren verschiedener Ausbaustufenfolgen auf Basis der entwickelten Szenarien werden die Initialopportunitäten (Grundlage der Ausbaustufenfolgen) bewertet, um den späteren Anlagenhersteller bei der Auswahl einer Initialkonfiguration zu unterstützen. Dazu erfolgen entsprechend dem in den Kapiteln 4.7 und 5.3 vorgestellten Schemata zuerst die Kostenbetrachtung und anschließend die Ermittlung eines Systemwertes.

In der Kostenbetrachtung werden für jedes Ausbaustufenfolge jedes Alternativenfeldes die Stückkosten berechnet. Dazu werden im Anwendungsfall in einem ersten Schritt grundlegende Kennzahlen für die Berechnung aufgelistet beziehungsweise definiert. Diese Auflistung, die beispielsweise den Raumkostensatz oder die stillstandsfreie Laufdauer beinhaltet, wird in Anhang F (Tabelle 10-6) aufgeführt. Mithilfe dieser Kennzahlen werden somit Lebenszykluskosten für neun verschiedenen Ausbaustufenfolgen berechnet. Daher werden Entstehungs-, Betriebs- und Rekonfigurationskosten sowie die Kosten der indirekten Bereiche für die entsprechenden Lebenszyklusphasen berechnet. Die Übersichten zu den einzelnen Berechnungswerten werden in Anhang F in Tabellenform dargestellt (Tabelle 10-7, Tabelle 10-8, Tabelle 10-9, Tabelle 10-10). In unten stehender Tabelle (Tabelle 6-9) sind

zusammenfassend die Kosten für die Lebenszyklusphasen abgebildet. Diese dienen wiederum als Eingangsinformationen für die Berechnung der Stückkosten.

Tabelle 6-9 Kosten der Lebenszyklusphasen

	Phasen	IO_1	IO_2	IO_3
Alternativenfeld 1 (Szenario 1)		ASF1 [IO_1 Sz_1]	ASF2 [IO_2 Sz_1]	ASF3 [IO_3 Sz_1]
	Phase 1	651.309 €	571.292 €	546.604 €
	Phase 2	4.961.818 €	4.622.089 €	4.463.638 €
	Phase 3	540.271 €	475.471 €	453.334 €
	Summe	6.153.398 €	5.668.852 €	5.463.576 €
Alternativenfeld 2 (Szenario 2)		ASF4 [IO_1 Sz_2]	ASF5 [IO_2 Sz_2]	ASF6 [IO_3 Sz_2]
	Phase 1	332.687 €	303.290 €	302.269 €
	Phase 2	2.513.549 €	2.190.729 €	2.084.192 €
	Phase 3	773.882 €	695.699 €	696.774 €
	Summe	3.620.118 €	3.189.717 €	3.083.235 €
Alternativenfeld 3 (Szenario 3)		ASF7 [IO_1 Sz_3]	ASF8 [IO_2 Sz_3]	ASF9 [IO_3 Sz_3]
	Phase 1	2.487.498 €	2.245.984 €	2.236.064 €
	Summe	2.487.498 €	2.245.984 €	2.236.064 €
IO = Initialopportunität; ASF = Ausbaustufenfolge; Sz_x = Szenario x;				

Für die Berechnung der Stückkosten werden neben den zuvor berechneten Kosten für die einzelnen Phasen auch die Stückzahlen benötigt. Die Bestimmung der Stückzahlen erfolgt entsprechend der in Kapitel 5.3 beschriebenen Vorgehensweise. Die dazu benötigte Bestimmung von zeitlichen Abschnitten für die Linearisierung ist beispielhaft in Abbildung 6-9 visualisiert. Auf diese Weise wird für Szenario 1 ein Stückzahlbedarf von 548.100 St. in der ersten Phase, in der zweiten Phase 5.191.305 St. und in der letzten Phase 603.435 St. ermittelt. Für Szenario 2 wird ein Bedarf für die erste Phase von 238.854 St., für die zweite Phase von 1.794.419 St. und für Phase drei 665.469 St. berechnet. Der Stückzahlbedarf von Szenario 3 wird auf diese Weise mit insgesamt 2.339.201 St. festgelegt. Hierbei ist zu beachten, dass die Stückzahlbedarfe der Phasen der verschiedenen Szenarien aufgrund der unterschiedlichen Zeitdauern nicht miteinander vergleichbar sind. Die durch die Montage verursachten Stückkosten können nun für die jeweiligen Phasen berechnet und für die Szenarien zusammengefasst werden. Die im Anwendungsfall berechneten Stückkosten sind in Anhang F (Tabelle 10-11) dargestellt. Als zusätzliche Informationen werden dem späteren Anlagenbetreiber noch eine Fixkostenbelastungsübersicht und eine Investitionsübersicht bereitgestellt (siehe Anhang F, Tabelle 10-12 und Tabelle 10-13), wovon die Fixkosteninformation mit in die Systemwertermittlung einfließen kann.

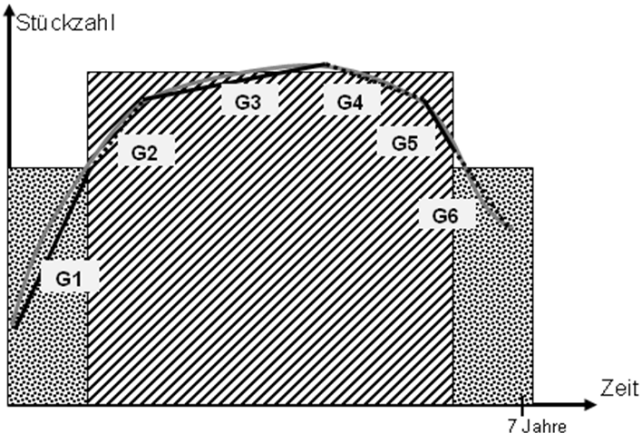


Abbildung 6-9 Bestimmung von Stückzahlen bei Szenario 1

Nach der Kostenbetrachtung folgt die analytische Systemwertbetrachtung, innerhalb der eine Bewertung der einzelnen Ausbaustufenfolgen durchgeführt wird. Anhand dieser Ergebnisse erfolgt eine Auswahl durch den späteren Anlagenbetreiber. Die Bewertung baut dabei auf den bei der Präzisierung der Rahmenbedingungen identifizierten und gewichteten Kriterien auf. Diese Kriterien werden noch hinsichtlich der Zielerfüllung analysiert, wobei Zielbereiche qualitativ oder quantitativ beschrieben und mit Punktwerten versehen werden (vgl. Anhang F, Tabelle 10-14). Mithilfe dieser Zielbereiche und deren Punktwerten werden die einzelnen Initialopportunitäten für die drei Alternativenfelder einzeln hinsichtlich ihrer Erfüllung der Kriterien bewertet und es wird ein Systemwert berechnet. Die Bewertung für Alternativenfeld 1 (Szenario 1) ist in Tabelle 6-10 dargestellt und die erarbeiteten Systemwerte für die Alternativenfelder 2 und 3 gehen aus dem Gesamtinformationsschema (siehe Tabelle 6-11) hervor. Das Gesamtinformationsschema wird als Gesamtübersicht aus den Informationen der Kostenbetrachtung und der Systemwertermittlung erstellt. Zusätzlich werden dabei der Gesamtsystemwert und ein Gesamtstückkostenwert auf Basis der festgelegten Wahrscheinlichkeiten (PSz_x) für die Szenarien erstellt, beides sind somit Erwartungswerte.

Als Unterstützung zur Entscheidungsfindung wird, wie bereits in Kapitel 5.3 vorgestellt, ein Gesamtwertigkeitsschaubild erstellt (siehe Anhang F, Abbildung 10-4). Daraus wird ersichtlich, dass keine eindeutig in allen Punkten überlegene Initialopportunität im Anwendungsfall vorliegt. Initialopportunität 1 besitzt zwar die höchste Systemwertigkeit, allerdings auch die schlechteste Kostenwertigkeit. Die beste Kostenwertigkeit besitzt hingegen Initialopportunität 3, wobei diese wiederum die schlechteste Systemwertigkeit aufweist. Auf Grundlage dieser Informationen liegt die Entscheidung beim späteren Anlagenbetreiber, der EMARTi AG. Trotz der höheren Stückkosten entscheidet sich die EMARTi AG aufgrund der Flexibilitätsvorteile und der geringeren Investitionskosten für

Initialopportunität 1. Abschließend wird mithilfe der Szenarien noch die Initialkonfiguration aus den möglichen Ausbaustufen von Initialopportunität 1 ausgewählt. Da durch Ausbaustufe 1 zwei Szenarien und somit eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 60% abgedeckt werden können, fällt die Entscheidung zugunsten dieser Konfiguration.

Tabelle 6-10 Systemwertermittlung Alternativenfeld 1

Kriterien	Gewicht %	IO1		IO2		IO3	
Flexibilität bezüglich Varianten	30%	4	1,20	3	0,90	2	0,60
Flächenbedarf	3%	2	0,07	2	0,07	2	0,07
Kostenflexibilität	13%	3	0,40	2	0,27	2	0,27
Spielraum Mitarbeitereinsatz	7%	4	0,27	3	0,20	2	0,13
Strukturelle Wandlungsfähigkeit	27%	3	0,80	2	0,53	2	0,53
Verfügbarkeit	20%	3	0,60	2	0,40	2	0,40
Summen	100%	19	**3,33**	14	**2,37**	12	**2,00**
			$SWIO_1Sz_1$		**$SWIO_2Sz_1$**		**$SWIO_3Sz_1$**

Tabelle 6-11 Gesamtinformationsschema

	Alternativenfeld 1			Alternativenfeld 2			Alternativenfeld 3			GSW	GSK [€]
	SW	SK [€]	Psz_1	SW	SK [€]	Psz_2	SW	SK [€]	Psz 3		
IO_1	3,33	1,074	40%	3,53	1,313	40%	3,60	1,152	20%	3,47	1,185 €
IO_2	2,37	1,002	40%	2,60	1,218	40%	2,33	1,063	20%	2,45	1,101 €
IO_3	2,00	0,968	40%	2,03	1,194	40%	1,97	1,057	20%	2,01	1,076 €

6.3 Erkenntnisse

Nach der Anwendung der Methodik in einem Planungsfall wird das Wissen, das dadurch bezüglich der Anwendbarkeit der Methodik entstanden ist, auf Grundlage der in Kapitel 2.6 definierten Anforderungen reflektiert. Diese Erkenntnisse werden im Folgenden dargestellt.

Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Methodik ist die Handhabbarkeit bezüglich Umfang und Komplexität. Diese Voraussetzung ist durch die vorliegende Methodik erfüllt. Zwar wurde durch die Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklungen durch Verwendung der Szenario-Methode ein zusätzlicher Aufwand generiert, allerdings kann dieser durch die systemtechnische Unterstützung des Planers bei der Erstellung von Konfigurationen wieder kompensiert werden. Die Methodik ist daher hinreichend präzise und anwendbar, wobei sie zur Grobplanung von modularen Montageanlagen der variantenreichen Serienproduktion eingesetzt wird.

Die entwickelte generische Beschreibungsmethode ermöglicht die standardisierte Beschreibung von Prozessen und damit die Handhabbarkeit unscharfer Produktinformationen. Zwar ist die Produktstruktur als wesentliche Information für die Planung erforderlich, allerdings kann eine fehlende konstruktive Ausarbeitung des Produkts gehandhabt werden. Zudem stellt die Beschreibungsmethode die Grundlage für die Alternativengenerierung dar. So können auf anwenderorientierte Weise mithilfe automatisierter Schritte, beispielsweise der automatisierten Erstellung möglicher Kombinationen von ausgewählten Modulen, unterschiedlichste Konfigurationen erstellt werden. Deutlich wurde im Anwendungsfall, dass die Pflege der Datenbank sehr gut zu handhaben ist, allerdings die Anwendung auf modulare Montagesysteme beschränkt bleiben sollte, da deren Standardisierung eine wichtige Voraussetzung für die Umsetzung der Methodik ist. Hervorzuheben ist außerdem, dass die Planungsebene auf Basis von Fähigkeiten relativ gut den benötigten Abstraktionsgrad zur Planung besitzt und durch die Merkmale zur Auswahl von geeigneten Ressourcen durch den Planer gut ergänzt wird.

Durch das Betrachten relevanter zukünftiger Entwicklungen mithilfe der Szenario-Methode und durch das entwickelte Kostenmodell wird der Anforderung entsprochen, eine Betrachtung des Lebenszyklus der zu planenden modularen Montageanlage zu realisieren. Dadurch können vor allem auch der Rekonfigurationsaufwand berücksichtigt und die sich verändernden Rahmenbedingungen beachtet werden. Dem späteren Anlagenbetreiber kann mehr Wissen über die Anlage, deren Grenzen und über mögliche Erweiterungen vermittelt werden. Neben den Kosten fließen noch weitere quantitative und qualitative Kriterien in die mehrdimensionale Bewertung mit ein. Die stärkere Integration der Bewertungssystematik in die systemtechnische Umsetzung der Methodik kann als Potenzial identifiziert werden. Zu berücksichtigen ist bei der Bewertung allerdings, dass nicht zwangsweise eine einzige Lösung als die alleinig richtige identifiziert werden muss, sondern auch Informationen am Ende der Planung stehen können, die die Entscheidung nicht eindeutig nahelegen. Diese Informationen stellen dann eine Hilfe für die Entscheidung dar, die der spätere Anlagenbetreiber treffen muss.

Die Einbindung des späteren Anlagenbetreibers in die Planung (Entwicklung von Szenarien) erfordert meist einen erhöhten Aufwand. Allerdings kann durch diese Beteiligung des Anlagenbetreibers am Planungsvorgang eine bessere emotionale Bindung dieses potenziellen Kunden an die Lösung realisiert werden und das zusätzlich erzeugte Wissen dem Anlagenbetreiber auch einen Zusatznutzen bieten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die turbulenter werdenden Veränderungen an den globalen Märkten erfordern von Produktionsunternehmen zur Sicherung des wirtschaftlichen Erfolgs wandlungsfähige Produktionsstrukturen. Gerade im meist letzten Glied der Wertschöpfungskette, der Montage, ist dies von besonderer Bedeutung, weshalb Lösungsmöglichkeiten wie modulare Montagesysteme entwickelt wurden. Solche Systeme sind bereits auf dem Markt verfügbar, erreichen allerdings ihre potenzielle Marktdurchdringung nicht. Zudem führt die vorhandene Entwicklung immer kürzerer Produktlebenszyklen nicht nur zu einer Verkürzung der Produktentwicklungszeiten, sondern auch zu einer Notwendigkeit der Beschleunigung von Anlagenplanungsprozessen. Zur Schließung dieser Lücke stand die Planung modularer Montagesysteme im Fokus dieser Arbeit. Dabei wurde festgestellt, dass die Modularität und die damit zusammenhängenden Möglichkeiten in der Planung, wie die standardisierte Beschreibung der standardisierten Elemente (Module), derzeit zu wenig Berücksichtigung finden. Auch die im Kontext der Wandlungsfähigkeit stehende Betrachtung von Lebenszyklen und zukünftigen Entwicklungen von Rahmenbedingungen werden nicht ausreichend berücksichtigt. Außerdem ist die durch die Parallelisierung von Produkt- und Produktionsprozessplanung auftretende Informationsunschärfe hinsichtlich des Produkts zu beachten. Von besonderer Bedeutung ist vor allem die Erweiterung der Planungsaufgaben des Anlagenherstellers. Vor diesem Hintergrund wurde deutlich, dass auch neue Ansätze zur Auswahl von Lösungen nötig sind. Als Ziel der Arbeit wurde daher definiert, eine Grobplanungsmethodik für modulare Montageanlagen zu entwickeln, die mithilfe einer generischen Beschreibungsmethode und unter Berücksichtigung unscharfer Informationen eine lebenszyklusorientierte, automatisierte Erstellung alternativer Konfigurationen umsetzt sowie eine Systematik für Bewertung und Auswahl beinhaltet.

Zur Erreichung dieser Zielsetzung wurden zuerst Begriffe geklärt und der Betrachtungsrahmen konkretisiert. Dabei erfolgte neben der Betrachtung der Montage im Kontext wandlungsfähiger Unternehmen eine Definition des Systems Montage sowie die Analyse unterschiedlicher Montagearten und der Inhalte der Montageplanung. Zudem wurde vor dem Hintergrund zeitlicher Veränderungen der Lebenszyklus modularer Systeme betrachtet. Aufbauend auf diesen Informationen und der Präzisierung des Betrachtungsbereichs wurden die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik erarbeitet.

Vor dem Hintergrund dieser Anforderungen wurden forschungsrelevante Ansätze diskutiert, wobei Inhalte zu Produktinformationen hinsichtlich der Produktstrukturierung und dem Ableiten von Montageabläufen unter Beachtung der Unschärfe betrachtet wurden. Die weiteren Diskussionspunkte bildeten Planungssystematiken für die Montage und Methoden zur Beschreibung von Ressourcen und Prozessen. Auf Basis dieser umfassenden Diskussion wurden die Schwerpunkte für die Entwicklung der Methodik identifiziert. Dazu zählt der Einsatz der Szenariotechnik in der Planung modularer Montagesysteme, wobei die Szenariotechnik dazu dient, mögliche zukünftige Entwicklungen über den Lebenszyklus hinweg bei Planung und Bewertung zu berücksichtigen. Des Weiteren wurde die

Notwendigkeit der Entwicklung einer standardisierten Beschreibungssystematik sowie einer darauf aufbauenden rechnergestützten Alternativengenerierung deutlich. Es erwies sich zudem als erforderlich, innerhalb der zu entwickelnden Methodik für die Auswahl von Lösungen eine Bewertungssystematik bereitzustellen, welche die Kostenvorteile modularer Systeme über den Lebenszyklus berücksichtigt.

Auf Grundlage der Zielsetzung und der Anforderungen an die Methodik sowie der identifizierten Schwerpunkte wurde die Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme entwickelt. Dabei wurde nach dem Festlegen von Prämissen, die der präziseren Beschreibung der Rahmenbedingungen dienten, das Gesamtkonzept der Methodik ausgearbeitet. Nach der Einordnung dieser Methodik in Relation zum klassischen Planungsablauf nach Konold und Reger erfolgte die Entwicklung der Teillösung zur Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen des Unternehmensumfeldes mittels Szenariotechnik. Der Schwerpunkt lag hierbei auf der Anpassung der Szenariotechnik an die Erfordernisse der Grobplanung der Montageplanung. Die darauffolgend erarbeitete Teillösung der generischen Beschreibungsmethode beinhaltet ein grundlegendes Modell auf Basis von Fähigkeiten, welches durch die Strukturierung und Analyse von Montageressourcen und -prozessen innerhalb der Deskription dieser flankiert wird. Ergänzt wird dieses Fähigkeitsmodell durch Merkmale zur detaillierteren Beschreibung von Ressourcen und Prozessen, wodurch eine Unterstützung des Planers bei Generierung und Auswahl von Konfigurationen ermöglicht wird. Anschließend wurde die Teillösung der Alternativengenerierung erarbeitet, welche vor allem als Grundlage für die spätere systemtechnische Umsetzung einer rechnergestützten Planung dient sowie eine beeinflussende Wirkung auf die Struktur der Bewertungssystematik besitzt. Diese Bewertungssystematik wurde als letzte Teillösung entwickelt und nutzt die im jeweiligen Planungsfall zu entwickelnden Szenarien für Analyse, Bewertung und Auswahl. Dies wird vor allem in der Kostenbetrachtung über den Lebenszyklus und der Struktur der Bewertungssystematik deutlich.

Danach erfolgte die Umsetzung der Methodik, welche sich in drei wesentliche Abschnitte untergliedern lässt. Dies ist im ersten Abschnitt die Umsetzung der Szenariotechnik in der Montagegrobplanung, welche unter anderem auf Basis der entsprechenden Teillösung durch die Erstellung eines Leitfadens für einen Workshop erfolgte. Der zweite Abschnitt baut auf diesen Szenarien auf und stellt die rechnergestützte Planung dar, welche auf der generischen Beschreibungsmethode und der Grundlagen der Alternativengenerierung aufbaut. Die Umsetzung dieser Teillösungen erfolgte dabei in einer systemtechnischen Realisierung, die die rechnergestützte Planung auf Grundlage einer Ressourcenbibliothek über mehrere Schritte hinweg bis hin zur Erstellung von Konfigurationen ermöglicht. Der dritte Abschnitt der Umsetzung beinhaltet die Realisierung der szenariobasierten Bewertungssystematik mithilfe eines Tabellenkalkulationsprogrammes, worin auch die umfangreiche Kostenbetrachtung erfolgt.

Zur Validierung der Methodik erfolgte eine Anwendung derselben in der Lernfabrik aIE des Instituts für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart. Dabei wurde auf

das im Transferbereich 59 entwickelte, virtuelle Unternehmen EMARTi AG als Anlagenbetreiber und auf die virtuelle Modular Assembly GmbH in Form des Anlagenherstellers zurückgegriffen. Im Anwendungsfall wurde ein modulares Montagesystem für die Montage einer Produktfamilie „Schreibtischaccessoire“ mithilfe der Methodik geplant und ausgewählt.

Durch die systemtechnische Umsetzung und die Lösung des Anwendungsfalls konnte die Realisierbarkeit und Funktionsfähigkeit der Planungsmethodik verifiziert werden. Die Methodik verdeutlicht die Vorteile modularer Systeme unter anderem durch die Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungsmöglichkeiten des Unternehmensumfeldes bei der Planung. Die Planungsmethodik ist bezüglich Umfang und Komplexität handhabbar und ermöglicht durch die Analyse möglicher Anlagenlebenszyklen eine umfassende Kostenbetrachtung. Die generische Beschreibungsmethode ermöglicht eine rechnergestützte Alternativengenerierung, wodurch mehr Möglichkeiten in der Planung abgebildet werden können. Zudem kann dem späteren Anlagenbetreiber mehr Wissen über die Anlage zur Verfügung gestellt werden.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist somit eine Methodik zur Grobplanung modularer Montagesysteme, die erstmalig die Modularität in der Montageplanung vor dem Hintergrund des Lebenszyklus von Montageanlagen mithilfe der Szenariotechnik und einer fähigkeitsbasierten Beschreibungssystematik berücksichtigt sowie der Verlagerung von Planungsaufgaben auf den Anlagenhersteller gerecht wird.

Forschungsansätze für weiterführende Arbeiten lassen sich aus den Erkenntnissen des Anwendungsfalls und den Beschränkungen der Planungsmethodik ableiten. Im Folgenden seien hierzu Beispiele genannt:

- Die Erweiterung der Funktionalitäten der Methodik im Hinblick auf einzusetzende Hardware wie beispielsweise interaktive Anzeigegeräte, die während des Szenario-Workshops eingegebene Daten (Grafiken) direkt erfassen und darauf aufbauend Ergebnisse berechnen.
- Die Entwicklung einer herstellerübergreifenden Online-Plattform, auf der Anlagenhersteller ihre Produkte für die Planung digital bereitstellen. Dadurch könnten Kunden eine erste Konzeptplanung herstellerunabhängig selbst ausführen, bevor eventuell eine Grobplanung mit dem Hersteller gemeinsam erfolgt.
- Die Entwicklung einer umfassenden softwaretechnischen Integration, die über eine einfache Verknüpfung einzelner Systeme hinausgeht und eine durchgängig anwenderfreundliche Oberfläche bietet. Dadurch könnten alle Arbeitsunterlagen und Vorgehensweisen in einem Softwaretool zusammengeführt und verwaltet werden.
- Eine Erweiterung des Betrachtungsrahmens um den Aspekt der Betreibermodelle im Bereich der Geschäftsmodelle würde neue, speziell zu beleuchtende Gesichtspunkte in das Themengebiet einbringen.

Des Weiteren könnten sich Forschungsansätze aus der Einbindung der Methodik in die Werkzeuge der digitalen Fabrik ergeben, wenn beispielsweise davon ausgegangen wird,

dass unternehmensinterne Spezialbereiche in Großunternehmen einen Anlagenhersteller vollständig substituieren.

8 Summary

Increasing turbulent changes on global markets require transformable production structures to secure economic success of production enterprises in Central Europe. This has high importance especially for the typically last element of the value added chain, assembly division. Therefore solutions like modular assembly systems have been developed. Although being available on markets, such systems do not reach their full potential for market penetration. Furthermore the existing trend of shortening product-life-cycles leads not only to reduction of product developing times. It also leads to a necessity of accelerating planning processes for production equipment. Therefore this work concentrates on planning modular assembly systems. Thereby it was established that modularity and interrelated planning opportunities obtain insufficient consideration e.g. the opportunity of a standardized description for standardized assembly elements. The consideration of life-cycles and future changes of general conditions in context of transformability is also insufficient. Moreover the inaccuracy of product information which is caused by parallelization of product planning and production process planning has to be considered. The shifting of planning tasks to equipment manufacturer is of particular importance. The necessity of new approaches for choosing solutions is a perception based on this background. Therefore the objective of this work was defined as the development of a methodology for the rough planning process of modular assembly systems using a generic description method, considering inaccuracy of product information and including a life-cycle oriented, automated creation of alternative configurations and a system for evaluation and selection.

To achieve this objective the first step was to characterize some of the most important terms used and to substantiate the field of consideration. In this process among the consideration of the term assembly in context of transformable enterprises, the term assembly system was defined and an analysis was performed of different assembly forms and the procedure of assembly planning. Furthermore the life-cycle of modular assembly systems based on possible changes was considered. With this information and a more precise field of consideration requirements for the methodology were generated.

With respect to these requirements scientific approaches were discussed, considering inaccurate product information, product structure and deduced assembly sequence. Further points of discussion are methods for assembly planning and for describing resources and processes. Based on this comprehensive discussion key issues for the development of the methodology were identified. This includes the application of scenario planning for the rough planning of modular assembly systems, in which scenario planning serves for taking possible further changes during the life-cycle into account at the planning and evaluation stage. Furthermore the necessity emerged of developing a standardized description which should form the basis for a computerized solution to generate alternatives. Within the methodology it proved to be necessary to provide an evaluation system for the selection of solutions which takes into account the cost advantages of modular systems during life-cycle.

Based on the objective and the requirements for the methodology as well as the identified key issues, the method for capability-based planning of modular assembly systems was developed. In doing so - after establishing premises serving the more precise description of general conditions - the overall concept of the methodology was created. After having related the methodology to the standard planning process of Konold and Reger using scenario planning the solution for considering possibly changing business conditions was developed as a first core part of the overall solution. In this process the core issue was to adapt scenario planning to the demands of rough assembly planning. The second core part a generic description method uses a fundamental model based on capabilities which is supplemented by description, structuring and analyzing assembly resources and processes. This capability model is supplemented by characteristics used for a detailed description of resources and processes which supports the planner while generating and selecting assembly configurations. Afterwards – as the third core part – the generation of alternatives was developed which is used as foundation for the subsequent computerized realization of assembly planning and also is an influencing factor for the structure of the evaluation system. This evaluation system was developed in the last core part and is using the scenarios of each planning case for analysis, evaluation and selection. The use of scenarios primarily becomes apparent in the reflection of assembly costs during the life-cycle and the structure of the evaluation system.

Afterwards the implementation of the methodology was developed, which is organized in three main sections. In the first section the implementation is characterized by the realization of scenario planning in the rough assembly planning based on the according core part with generating a guideline for execute a workshop. The second section is using the generated scenarios for the computerized planning which is based on the generic description method and the generation of alternatives. The implementation of these core parts used a software module which allows a computerized planning in several steps up to the point of creating configurations based on a resource data base. The third section of implementation is characterized by realizing a scenario based evaluation system within a spreadsheet program which includes the comprehensive cost analysis.

In order to validate the methodology it was applied to the learning factory called advanced Industrial Engineering of the Institute of Industrial Manufacturing and Management of the University of Stuttgart. In doing so the EMARTi AG a virtual enterprise developed in the Transfer Centre 59 was used as plant operator whereas the virtual Modular Assembly GmbH represented the plants manufacturer. In this use case, a modular assembly system for assembling a product family (desk accessory) was planned and selected by the methodology developed.

The technical feasibility and operability of the planning methodology was verified by the computerized realization and the solution of the use case. The developed methodology clarifies the advantages of modular assembly systems e.g. via considering possibly changing business conditions. Concerning comprehensiveness and complexity the planning methodology is manageable and enables a comprehensive cost analysis using the analysis

of equipment life-cycle. The generic description method facilitates a computerized generation of alternatives offering a wider range of opportunities in the planning process. Furthermore there is the possibility to provide further information to the future plant operator.

The result of this work is represented by a methodology for rough planning of modular assembly systems which for the first time takes into account the modularity in assembly planning using a life-cycle view on assembly equipment with scenario-planning as well as an capability based description method. Moreover the methodology fulfills the changes based on the shifting of planning tasks to the equipment manufacturer.

Research approaches for further scientific work are deduced from findings of the use case and the premises of the planning methodology. Examples are illustrated with the following points:

- The extension of functionalities of the methodology using special hardware like interactive display equipment which directly records data created during the scenario workshop (e.g. graphics) and calculates results based on the data.
- The development of an multivendor web application where equipment manufacturer offer data on their products for digital planning.
- The development of a comprehensive software integration which offers a completely integrated software with a user-friendly interface rather than connecting single applications. Thus the complete procedure documentation and proceeding can be merged and administrated.
- The extension of the field of consideration with operator models in context of business models will create new, emerging aspects to be specially examined.

In addition there are possible scientific approaches resulting from an implementation of the methodology in the tools of the digital factory. For example if you assume that special in-house departments of large-scale enterprises substitute the equipment manufacturer completely.

9 Literaturverzeichnis

Aichele 2006 AICHELE, Christian: *Intelligentes Projektmanagement.* Stuttgart: Kohlhammer, 2006. – ISBN 978-3-17-019094-8

Aldinger 2009 ALDINGER, Lars Alexander: *Methode zur strategischen Leistungsplanung in wandlungsfähigen Produktionsstrukturen des Mittelstandes.* Stuttgart, Univ., Diss., 2009

AlGeddawy, ElMaraghy 2008 ALGEDDAWY, T.; ELMARAGHY, Hoda A.: Assembly System Design for Delayed Product Differentiation. In: ELMARAGHY, Hoda A.; BLEY, H.; KARA, S.; WESTKÄMPER, E. (Hrsg.): *2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems: Advances in Assembly: better & faster: Book of Abstracts. Toronto, 21-23 September 2008.* Toronto, Ontario, Canada, 2008, S. 115-125

Ammer 1985 AMMER, Ernst-Dieter: *Rechnerunterstützte Planung von Montageablaufstrukturen für Erzeugnisse der Serienfertigung.* Stuttgart, Univ., Diss., 1985

Anderl 1989 ANDERL, Reiner: *Integriertes Produktmodell.* In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 84 (1989), Nr. 11, S. 640-644

Avgoustinov, Bossmann, Bley 2006 AVGOUSTINOV, N.; BOSSMANN, Marc; BLEY, Helmut: Supporting the Assembly Planning by Means of Features and their Influence on the Development Process. In: BUTALA, P. (Hrsg.): *The morphology of innovative manufacturing systems: 39th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Ljubljana, June 7th - 9th, 2006.* Ljubljana, 2006. – ISBN 961-6536-10-9, S. 55-62

Bäßler 1988 BÄßLER, Rudolf: *Integration der montagegerechten Produktgestaltung in den Konstruktionsprozess.* Stuttgart, Univ., Diss., 1988

Berkholz 2008 BERKHOLZ, Daniel: Einleitung: Wandlungsfähige Produktionssysteme - der Zukunft einen Schritt voraus. In: NYHUIS, Peter; REINHART, Gunther; ABELE, Eberhard (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten.* Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2008. – ISBN 978-3-939026-96-9, S. 13-18

Beumelburg 2005 BEUMELBURG, Katharina: *Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation.* Stuttgart, Univ., Diss., 2005.

Bick 1992 BICK, Werner: *Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter besonderer Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades.* München, Techn. Univ., Diss., 1992.

Biege, Schröter, Vielhaber 2007 BIEGE, Sabine; SCHRÖTER, Marcus; VIELHABER, Wolfgang: *Lebenszyklusbegleitende Dienstleistungen senken Kosten: Richtige Planung sichert langfristige Wirtschaftlichkeit.* In: VDI-Z Integrierte Produktion 149 (2007), Nr. 11/12, S. 59-61

Bley, Bossmann 2005 BLEY, Helmut; BOSSMANN, Marc: *Standardisierte Produktmodelle für die automatisierte Montageplanung.: Featurebasierte Montageplanung unterstützt den Simultaneous-Engineering-Prozess. Standardized product modells with respect to an automized assembly planning.* In: wt Werkstattstechnik online 95 (2005), Nr. 9, S. 627-631

Bley, Franke 2004 BLEY, Helmut; FRANKE, Christina: Integration of product design and assembly planning in the digital factory. In: *54th General Assembly of CIRP in Krakow, Poland.* Wabern: Edition Colibri; Elsevier, 2004 (CIRP Annals, 53,1). – ISBN 3-905277-41-7, S. 25-30

Bley, Fritz, Zenner 2006 BLEY, Helmut; FRITZ, Jürgen; ZENNER, Christian: *Die zwei Seiten der Digitalen Fabrik: Software-Werkzeug und Methode.* In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006), Nr. 1/2, S. 19-23

Bley, Zenner 2006 BLEY, Helmut; ZENNER, Christian: Variant-oriented assembly planning. In: *56th General Assembly of CIRP: Kobe, JP, Aug 20-26, 2006.* Amsterdam: Elsevier, 2006 (Cirp Annals, 55), S. 23-28

Boothroyd, Dewhurst, Knight 2002 BOOTHROYD, Geoffrey; DEWHURST, Peter; KNIGHT, Winston Anthony: *Product design for manufacture and assembly.* 2nd ed., rev. and expanded. New York: M. Dekker, 2002. (Manufacturing engineering and materials processing 58). – ISBN 0-8247-0584-X

Bracht, Eckert, Masurat 2005 BRACHT, Uwe; ECKERT, Clemens; MASURAT, Thomas: *Ein umfassender Ansatz für Planung und Betrieb: Ursprünge und Visionen der Digitalen Fabrik*. In: Intelligenter Produzieren (2005), Nr. 1, S. 8-10

Bullinger 1993 BULLINGER, Hans-Jörg; RIETH, Dieter (Mitarb.); EULER, Hanns Peter (Mitarb.): *Planung entkoppelter Montagesysteme: Puffer in der Montage.* Stuttgart: Teubner, 1993. – ISBN 3-519-06365-4

Bullinger, Ammer 1986 BULLINGER, Hans-Jörg; AMMER, Dieter: *Systematische Montageplanung: Handbuch für die Praxis.* München: Hanser, 1986. – ISBN 3-446-14606-7

Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. 2005 BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN INDUSTRIE e.V.: *Intelligenter produzieren: 32 Thesen zur Forschung für die Zukunft der industriellen Produktion.* Berlin, 2005

Corsten 2007 CORSTEN, Hans: *Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement.* 11., vollst. überarb. Aufl. München: Oldenbourg, 2007. (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre). – ISBN 978-3-486-58298-7

Cuiper 2000 CUIPER, Ralf: *Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen.* München, Techn. Univ., Diss., 2000

Dieckhoff 1995 DIECKHOFF, Carsten: *Darstellung und Bewertung alternativer Automobil-Montagestrukturen mit einem parallelrechnerunterstützten Simulationssystem.* Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1995

DIN Norm 8593 DIN 8593 T. 0-8, 01.06.2003: *Fertigungsverfahren Fügen*

DIN Norm 31051 DIN 31051, 01.06.2003: *Grundlagen der Instandhaltung*

Dombrowski, Tiedemann, Quack 2005 DOMBROWSKI, Uwe; TIEDEMANN, Hauke; QUACK, Sebastian: *Einführung der Digitalen Fabrik bei KMU: Introduction of the digital factory at SME.* In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Band 100 (2005), Nr. 1/2, S. 10-13

Drunk 2006 DRUNK, Gerhard: *Wie viel Modularität braucht die Montage?: Zehn Jahre modulare Plattformen für Montageanlagen.* In: Automation-online (2006), Nr. 15, S. 1-7. URL http://www.xpertgate.de/magazin/report/Montageanlagen.pdf – Überprüfungsdatum 2009-08-22

Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann 2007 EHRLENSPIEL, Klaus; KIEWERT, Alfons; LINDEMANN, Udo: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung.* 6., überarb. und korr. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-74222-7

Enderlein, Hildebrand, Müller 2003 ENDERLEIN, Hartmut; HILDEBRAND, Torsten; MÜLLER, Egon: *PLUG+PRODUCE: Die Fabrik mit Zukunft aus dem Baukasten.* In: wt Werkstattstechnik online 93 (2003), Nr. 4, S. 282-286

Evers 2002 EVERS, Karsten: *Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage.* Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2002

Eversheim 1986 EVERSHEIM, Walter: Maschinelle Montagesysteme: Bauformen maschineller Montagesysteme. In: SPUR, Günter; STÖFERLE, Theodor (Hrsg.): *Fügen, Handhaben und Montieren.* München: Hanser, 1986 (Handbuch der Fertigungstechnik, Bd. 5). – ISBN 3-446-12536-1, S. 683-772

Eversheim 1987 EVERSHEIM, Walter (Hrsg.): *Strategien zur Rationalisierung der Montage: Einzel- u. Kleinserienproduktion komplexer Produkte.* Düsseldorf: VDI-Verlag, 1987. – ISBN 3-18-400791-X

Eversheim 1998 EVERSHEIM, Walter: *Konstruktion.* 3., vollst. überarb. Aufl. Berlin: Springer, 1998. (Studium und Praxis; Bd. 2). – ISBN 3-540-62650-6

Eversheim 2002 EVERSHEIM, Walter: *Arbeitsvorbereitung.* 4., bearb. und korr. Aufl. Berlin: Springer, 2002. (Organisation in der Produktionstechnik; Bd. 3). – ISBN 3-540-42016-9

Eversheim, Kettner, Merz 1983 EVERSHEIM, Walter; KETTNER, P.; MERZ, K. P.: *Ein Baukastensystem fuer die Montage konzipieren: A concept of standardized units for assembly.* In: Industrie Anzeiger 105 (1983), Nr. 92, S. 27-30

Eversheim, Schuh 2005 EVERSHEIM, Walter; SCHUH, Günther: *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung.* Berlin: Springer, 2005. – ISBN 3-540-21175-6

Eversheim, Witte, Peffekoven 1981 EVERSHEIM, Walter; WITTE, Karl-Werner; PEFFEKOVEN, Karl-Heinz: *Montage richtig planen: Methoden und Hilfsmittel zur rationellen Gestaltung der Montage*

in Unternehmen mit Einzel- und Serienfertigung. Düsseldorf: VDI-Verl., 1981. (Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften 2; 45). – ISBN 3-181-44502-9

Fahrenwaldt 2006 FAHRENWALDT, Hans J.; SCHULER, Volkmar (Mitarb.): *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe Prozesse Fertigung.* 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2006. – ISBN 978-3-871-55970-9

Fallböhmer 2000 FALLBÖHMER, Markus: *Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung.* Aachen: Shaker, 2000. (Berichte aus der Produktionstechnik 2000,23). – ISBN 3-826-57794-9

Feldmann, Slama 2001 FELDMANN, Klaus; SLAMA, Stefan: Highly flexible assembly - scope and justification: Hochflexible Montage - Anwendungsbereich und Wirtschaftlichkeitsnachweis. In: *51st General Assembly of CIRP:* Nancy, FR, Aug 19-25. Bern: Edition Colibri, Elsevier, 2001 (CIRP Annals, 50). – ISBN 3-905277-35-2, S. 489-498

Feldmann, Slama 2003 FELDMANN, Klaus; SLAMA, Stefan: *Planen von flexiblen Montagesystemen: Rechnergestützte Konzeptfindung für Klein- und mittelständische Unternehmen.* In: wt Werkstattstechnik online 93 (2003), Nr. 9, S. 592-598

Feldmann, Slama, Junker 2002 FELDMANN, Klaus; SLAMA, Stefan; JUNKER, S.: *Mit marktorientierten Strukturen zur effizienten Montage.* In: wt Werkstattstechnik online 92 (2002), Nr. 9, S. 399-403

Fichtmüller 1996 FICHTMÜLLER, Niklas: *Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme.* München, Techn. Univ., Diss., 1996

Fiedler 2005 FIEDLER, Rudolf: *Controlling von Projekten: Mit fünf konkreten Beispielen aus der Unternehmenspraxis - alle Aspekte der Projektplanung, Projektsteuerung und Projektkontrolle.* 3., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2005. – ISBN 3-528-25740-7

Firchau, Franke 2002 FIRCHAU, Norman L.; FRANKE, Hans-Joachim: Methoden zur Variantenbeherrschung in der Produktentwicklung. In: FRANKE, Hans-Joachim; HESSELBACH, Jürgen; HUCH, Burkhard; FIRCHAU, Norman L. (Hrsg.): *Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung.* München; Wien: Hanser, 2002. – ISBN 3-446-21730-4, S. 52-86

Firchau u. a. 2002 FIRCHAU, Norman L.; FRANKE, Hans-Joachim; HUCH, Burkhard; MENGE, Marc: Variantenmanagement: Variantenvielfalt in Produkten und Prozessen erfolgreich beherrschen. In: FRANKE, Hans-Joachim; HESSELBACH, Jürgen; HUCH, Burkhard; FIRCHAU, Norman L. (Hrsg.): *Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung.* München; Wien: Hanser, 2002. – ISBN 3-446-21730-4, S. 1-25

Fisser u. a. 2009 FISSER, Frank; HEISEL, Uwe; KIRCHER, Christian; KLEMM, Peter; LE BLOND, Jan; LEHR, Patricia; MEITZNER, Martin; PRITSCHOW, Günter; WESTKÄMPER, Engelbert; WURST, Ulrich: Technik und Strukturen, Kapitel 5.3. In: WESTKÄMPER, Engelbert; ZAHN, Erich (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2009. – ISBN 978-3-540-21889-0, S. 115-138

Frank 1975 FRANK, Hans-Eberhard: *Handhabungseinrichtungen: Grundlagen, Übersicht, Beispiele.* Mainz: Krausskopf, 1975. (Produktionstechnik heute 13). – ISBN 3-7830-0101-3

Franke 2003 FRANKE, Christina: *Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik.* Saarbrücken, Univ. des Saarlandes, Diss., 2003

Fremerey 1993 FREMEREY, Felix: *Erhöhung der Variantenflexibilität in Mehrmodell-Montagesystemen durch ein Verfahren zur Leistungsabstimmung.* Berlin u. a.: Springer, 1993. (IPA-IAO-Forschung und Praxis 173). – ISBN 3-540-56549-3 zugl. Stuttgart, Univ., Diss., 1993

Fresner, Bürki, Sittel 2009 FRESNER, Johannes; BÜRKI, Thomas; SITTEL, Henning, H: *Ressourceneffizienz in der Produktion: Kosten senken durch Cleaner Production.* 1. Aufl. Düsseldorf: Symposion Publ., 2009. – ISBN 978-3-939707-48-6

Friese 2008 FRIESE, Markus: *Planung von Flexibilitäts- und Kapazitätsstrategien für Produktionsnetzwerke der Automobilindustrie.* Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2008

Fusch 2005 FUSCH, Thomas: *Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie.* München, Techn. Univ., Diss., 2005

Gagsch, Herbst 2001 GAGSCH, Bernd; HERBST, Claus: Ausrichtung der Montage auf den Markt mit Hilfe der Simulation. In: WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.): *Montageplanung - effizient und*

marktgerecht. Berlin u.a.: Springer, 2001 (VDI). – ISBN 3-540-66647-8, S. 37-56

Gausemeier, Fink, Schlake 1996 GAUSEMEIER, Jürgen; FINK, Alexander; SCHLAKE, Oliver: *Szenario-Management: Planen und Führen mit Szenarien.* 2., bearb. Aufl. München; Wien: Hanser, 1996. – ISBN 3-446-18721-9

Gerst u. a. 2006 GERST, Detlef; HEINS, Michael; MÜLLER-SEEGERS, Marius; PACHOW, Julia; BATTMER, Dieter: *Synergetische Montageplanung: Konzept und Praxis eines ganzheitlichen Planungsansatzes.* In: wt Werkstattstechnik online 96 (2006), Nr. 9, S. 575-581

Göbel 1999 GÖBEL, Gerd: *Konstruktionsbegleitende Montageprozeßplanung - ein Beitrag zur Qualitätsverbesserung in der automatisierten Montage.* Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 1999

Gottschalk 2006 GOTTSCHALK, Sebastian Friedrich: *Dedicated flexibility: Komplexitätsoptimale Gestaltung manueller Serienmontage.* Aachen, RWTH, Diss., 2006

Grabowski 2002 GRABOWSKI, Hans (Hrsg.): *Rechnerunterstützte Produktentwicklung und -herstellung auf Basis eines integrierten Produkt- und Produktionsmodells: Ausgewählte Beiträge des Sonderforschungsbereichs 346 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).* Aachen: Shaker, 2002. (Berichte aus der Konstruktionstechnik). – ISBN 3-8322-0440-7

Grabowski, Anderl, Schmitt 1989 GRABOWSKI, Hans; ANDERL, Reiner; SCHMITT, Michael: *Das Produktmodellkonzept von STEP.* In: VDI-Z Integrierte Produktion 131 (1989), Nr. 12, S. 84-96

Grabowski, Leutsch 2002 GRABOWSKI, Hans; LEUTSCH, Marc: Die Entwicklung des integrierten Produkt- und Produktionsmodells (PPM) des SFB 346 hinsichtlich der Reduzierung der Modellkomplexität. In: GRABOWSKI, Hans (Hrsg.): *Rechnerunterstützte Produktentwicklung und -herstellung auf Basis eines integrierten Produkt- und Produktionsmodells: Ausgewählte Beiträge des Sonderforschungsbereichs 346 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).* Aachen: Shaker, 2002 (Berichte aus der Konstruktionstechnik). – ISBN 3-8322-0440-7, S. 66-82

Grabowski, Leutsch 2003 GRABOWSKI, Hans; LEUTSCH, Marc: Integrierte Produkt- und Produktionsmodelle als Grundlage für eine wissensbasierte Produktentwicklung. In: NAGL, Manfred (Hrsg.): *Modelle, Werkzeuge und Infrastrukturen zur Unterstützung von Entwicklungsprozessen: Symposium.* Weinheim: Wiley-VCH, 2003. – ISBN 3-527-27769-2, S. 45-58

Graf 1984 GRAF, Bernhard: *Flexibilität und Kapazität von Werkstückspeichersystemen.* Stuttgart, Univ., Diss., 1984

Grosse u. a. 1997 GROSSE, A. G.; HARTROTH, J.; HILLEBRAND, G.; KOTTMANN, A.; KRÜGER, G.; LOCKEMANN, P. C.: Integrationstechnologie als Innovationsmotor für Maschinenbauanwendungen. In: JARKE, Matthias (Hrsg.): *Informatik '97: Informatik als Innovationsmotor; 27. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik; Aachen, 24. - 26. September 1997.* Berlin: Springer, 1997 (Informatik aktuell, 27). – ISBN 3-540-63066-X, S. 185-194

Große-Heitmeyer, Wiendahl 2004a GROßE-HEITMEYER, Volker; WIENDAHL, Hans-Peter: Einführung. In: WIENDAHL, Hans-Peter (Hrsg.): *Variantenbeherrschung in der Montage: Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe*. Berlin u.a.: Springer, 2004 (VDI). – ISBN 3-540-14042-5, S. 3-17

Große-Heitmeyer, Wiendahl 2004b GROßE-HEITMEYER, Volker; WIENDAHL, Hans-Peter: Grundansatz des Produktionsstufenkonzeptes. In: WIENDAHL, Hans-Peter (Hrsg.): *Variantenbeherrschung in der Montage: Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe*. Berlin u.a.: Springer, 2004 (VDI). – ISBN 3-540-14042-5, S. 19-40

Grundig 2006 GRUNDIG, Claus-Gerold: *Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen.* 2., aktual. Aufl. München; Wien: Hanser, 2006. – ISBN 3-446-40642-5

Grunwald 2002 GRUNWALD, Stefan: *Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung.* München, Techn. Univ., Diss., 2002

Hack, Thomas Klaus Paul 1997 HACK, THOMAS KLAUS PAUL: *Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Montage unter Berücksichtigung der Unschärfe.* Aachen, RWTH, Diss., 1997

Harfensteller u. a. 2005 HARFENSTELLER, Mark; STEINBEIß, Heinz; ZÄH, Michael Friedrich; HOFFMANN, Hartmut: *Montage von Probekörpern für die Mikro-CT: Aufbau von rissförmigen*

Teststrukturen zur Analyse der Detailerkennbarkeit von Mikro-CT-Anlagen. In: wt Werkstattstechnik online 95 (2005), Nr. 3, S. 131-135

Hartel, Lotter 2006 HARTEL, Marko; LOTTER, Bruno: Planung und Bewertung von Montagesystemen. In: LOTTER, Bruno (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin u.a.: Springer, 2006 (VDI). – ISBN 978-3-540-21413-7, S. 407-432

Hartmann 1993 HARTMANN, Michael: *Entwicklung eines Kostenmodells für die Montage: Ein Hilfsmittel zur Montagenanlagenplanung.* Aachen, RWTH, Diss., 1993

Hausknecht 1989 HAUSKNECHT, Matthias: *Expertensystem zur Konfigurationsplanung flexibler Fertigungsanlagen.* Hannover, Leibniz Univ., Diss., 1989

Heilala, Helin, Montonen 2006 HEILALA, Juhani; HELIN, K.; MONTONEN, J.: *Total cost of ownership analysis for modular final assembly systems.* In: International Journal of Production Research 44 (2006), Nr. 18-19, S. 3967-3988

Heilala, Montonen, Väätäinen 2008 HEILALA, Juhani; MONTONEN, J.; VÄÄTÄINEN, O.: *Life cycle and unit-cost analysis for modular reconfigurable flexible light assembly systems.* In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part B – Journal of Engineering Manufacture 222 (2008), Nr. 10, S. 1289-1299. doi 10.1243/09544054JEM1034

Heilala, Voho 2001 HEILALA, Juhani; VOHO, Paavo: *Modular reconfigurable flexible final assembly systems.* In: Assembly Automation 21 (2001), Nr. 1, S. 20-28

Heinen 1983 HEINEN, Edmund: *Industriebetriebslehre: Entscheidungen im Industriebetrieb.* 7., vollst. überarb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 1983. – ISBN 3-409-33149-2

Heinen, Rimpau, Wörn 2008 HEINEN, Tobias; RIMPAU, Christoph; WÖRN, Arno: Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: NYHUIS, Peter; REINHART, Gunther; ABELE, Eberhard (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten.* Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2008. – ISBN 978-3-9-39026-96-9, S. 19-32

Heisel 2006 HEISEL, Uwe: Intelligente Produktion - Rekonfiguration von Produktionssystemen. In: GEIßINGER, Jürgen (Hrsg.): *Forschung stärken - Produktion sichern: Festschrift zum 60. Geburtstag von Professor Engelbert Westkämper*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006. – ISBN 3-540-32660-X, S. 129-142

Hernández Morales 2002 HERNÁNDEZ MORALES, Roberto: *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung.* Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2002

Hesse 1993 HESSE, Stefan: *Montagemaschinen: Grundlagen und Prinzipien in Aufbau, Funktion, Antrieb und Steuerung montierender Maschinen.* 1. Aufl. Würzburg: Vogel, 1993. (Kamprath-Reihe Vogel-Fachbuch). – ISBN 3-8023-1405-0

Hesse 2006a HESSE, Stefan: Automatische Montagemaschinen. In: LOTTER, Bruno (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006 (VDI). – ISBN 978-3-540-21413-7, S. 219-308

Hesse 2006b HESSE, Stefan: *Grundlagen der Handhabungstechnik.* München; Wien: Hanser, 2006. – ISBN 978-3-446-40473-1

Hesse 2006c HESSE, Stefan: Montagegerechte Produktgestaltung. In: LOTTER, Bruno (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006 (VDI). – ISBN 978-3-540-21413-7, S. 11-57

Hesse, Mittag 1989 HESSE, Stefan; MITTAG, Gerhard: *Handhabetechnik: Technische Lösungen für Konstrukteure.* 1. Aufl. Heidelberg: Hüthig, 1989. – ISBN 3-7785-1799-6

Hildebrand 2005 HILDEBRAND, Torsten: *Theoretische Grundlagen der bausteinbasierten, technischen Gestaltung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen nach dem PLUG+PRODUCE-Prinzip.* Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2005

Hiller-Brod 2005 HILLER-BROD, Andrea: Die 11 Schritte zum kontinuierlichen Fluss: 11 steps for creating continuous flow. In: FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK UND AUTOMATISIERUNG IPA (Hrsg.): *Der Weg zum kontinuierlichen Fluss: Flexibler One-Piece-Flow in der Montage, Stuttgart, 2. Juni 2005.* Stuttgart, 2005, S. 1-23

Hoeschen 1978 HOESCHEN, Rolf-Dieter: *Planung von Montagesystemen im Rahmen der technischen Investitionsplanung: Ein Beitr. z. Montageplanung für Unternehmen mit Einzel- und Serienfertigung.* Aachen, RWTH, Diss., 1978

Hoitsch 1993 HOITSCH, Hans-Jörg: *Produktionswirtschaft: Grundlagen einer industriellen Betriebswirtschaftslehre.* 2., völlig überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen, 1993. – ISBN 3-8006-1619-X

Holle 2002 HOLLE, Wolfgang: *Rechnerunterstützte Montageplanung: Montageplanung und Simultaneous Engineering.* München: Hanser, 2002. – ISBN 3-446-21986-2

Horn 2005 HORN, Volker: *Die neue Fabrik entsteht wie ein Puzzle: Aus der Vielzahl von Werkzeugen und Methoden zusammengesetzt: Anforderungen aus der Sicht des Maschinenbaus.* In: Intelligenter Produzieren (2005), Nr. 1, S. 20-22

Hummel, Westkämper 2009 HUMMEL, Vera; WESTKÄMPER, Engelbert: Grundlagen des Stuttgarter Unternehmensmodells. In: WESTKÄMPER, Engelbert; ZAHN, Erich (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2009. – ISBN 978-3-540-21889-0, Kap. 4, S. 47-66

Jodlbauer 2008 JODLBAUER, Herbert: *Produktionsoptimierung: Wertschaffende sowie kundenorientierte Planung und Steuerung.* 2., erw. Aufl. Wien: Springer, 2008. (Springers Kurzlehrbücher der Wirtschaftswissenschaften). – ISBN 978-3-211-78140-1

Jodlbauer 2009 JODLBAUER, Herbert: *Werkzeuge zur Kapazitätsflexibilisierung: Kundenorientierte Kapazitätssteuerung.* In: Industrie Management 25 (2009), Nr. 3, S. 16-19.

Jonas 2000 JONAS, Christian: *Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen.* München, Techn. Univ., Diss., 2000

Kapp, Constantinescu 2006 KAPP, Ralf; CONSTANTINESCU, Carmen: *Digitales Engineering: Neue Werkzeuge und Trends.* In: Intelligenter Produzieren (2006), Nr. 3, S. 9-11

Katalinic, Visekruna, Kordic 2002 KATALINIC, Branko; VISEKRUNA, Vojo; KORDIC, Vedran: Bionic Assembly Systems: Design and Scheduling of Next Generation of Self-organising Complex Flexible Assembly System in CIM environment. In: *Manufacturing Technology in the Information Age, 35th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems: Proceedings, Seoul, KR, May 13-15, 2002.* Seoul, KR, 2002, S. 155-162

Kern 1962 KERN, Werner: *Die Messung industrieller Fertigungskapazitäten und ihrer Ausnutzung: Grundlagen und Verfahren.* Köln [u.a.]: Westdt. Verl., 1962. (Beiträge zur betriebswirtschaftlichen Forschung 15)

Kern 1996 KERN, Werner: *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft.* 2., völlig neu gestaltete Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1996. (Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre 7). – ISBN 3-7910-8044-X

Kettner, Schmidt, Greim 1984 KETTNER, Hans; SCHMIDT, Jürgen; GREIM, Hans-Robert: *Leitfaden der systematischen Fabrikplanung.* München; Wien: Hanser, 1984. – ISBN 3-446-13825-0

Kirchner u. a. 2009 KIRCHNER, Sören; BRIEL, Ralf von; WIENDAHL, Hans-Hermann; WINKLER, Ralph: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Anhang. In: WESTKÄMPER, Engelbert; ZAHN, Erich (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell*.. Berlin; Heidelberg: Springer, 2009. – ISBN 978-3-540-21889-0, Kap. 7, S. 271-310

Kluge, Hummel, Westkämper 2006 KLUGE, Stefan; HUMMEL, Vera; WESTKÄMPER, Engelbert: Assembly Configuration in a Virtual Environment. In: WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.): *First CIRP International Seminar on Assembly Systems: November 15 - 17 2006.* Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 2006. – ISBN 978-3-8167-7213-2, S. 233–238

Kluge u. a. 2009 KLUGE, Stefan; PFLÜGER, Thorsten; WESTKÄMPER, Engelbert; PEDELL, Burkhard: *Modulare Montagesysteme: Potential zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit.* In: wt Werkstattstechnik online 99 (2009), Nr. 9, S. 592-597

Kluge u. a. 2007 KLUGE, Stefan; RIFFELMACHER, Philipp; HUMMEL, Vera; WESTKÄMPER, Engelbert: *Montagesystemplanung - ein Handlungsfeld der Lernfabrik für aIE: Assembly System Configuration - A field of activity within the learning factory for aIE.* In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007), Nr. 3, S. 150-156.

Knoche 2005 KNOCHE, Katarina: *Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien.* Aachen, RWTH, Diss., 2005

Kobylka 2000 KOBYLKA, Andrea: *Simulationsbasierte Dimensionierung von Produktionssystemen mit definiertem Potential an Leistungsflexibilität.* Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2000

Konold, Reger 2009 KONOLD, Peter; REGER, Herbert: *Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung, Systemgestaltung.* 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2009. (Vieweg Praxiswissen)

Korte 2005 KORTE, Hans Hermann: Wandlungsfähige Betriebsmittel, Herausforderungen an die Hersteller. In: WIENDAHL, Hans-Peter; u.a.: *Planung modularer Fabriken*. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München; Wien: Hanser, 2005. – ISBN 3-446-40045-1, S. 141-156

Kössel 2005 KÖSSEL, Oliver: Einführung und Grundlagen der Einzelstückfließfertigung: Introduction and Basic Principles of "One Piece Flow". In: FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK UND AUTOMATISIERUNG IPA (Hrsg.): *Der Weg zum kontinuierlichen Fluss: Flexibler One-Piece-Flow in der Montage, Stuttgart, 2. Juni 2005.* Stuttgart, 2005, S. 24-44

Krajewski, Ritzman 1999 KRAJEWSKI, Lee J; RITZMAN, Larry P: *Operations management: Strategy and analysis.* 5. ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1999. (World student series). – ISBN 0-201-47431-X

Kratzsch 2000KRATZSCH, Sabine: *Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen.* Braunschweig, Techn. Univ. Carolo-Wilhelmina, Diss., 2000

Krause, Jansen, Langenberg 2004 KRAUSE, Frank-Lothar; JANSEN, Helmut; LANGENBERG, Dirk: Potenziale der Virtualisierung für eine verbesserte Produktentstehung. In: *Innovative Vernunft: ein kritischer Diskurs über die Zukunft der Produktionswirtschaft, 100 Jahre IWF.* Berlin, 2004, S. 75-91

Krüger 2004 KRÜGER, Alexander: *Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme.* München: Utz, 2004. (Forschungsberichte iwb / Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München 186). – ISBN 3-8316-0371-5

Kuhn 2007 KUHN, Dietmar: *Modulare Montagesysteme sind Garant für Produktivität und Sicherheit.* In: Maschinenmarkt Industrieportal URL http://www.maschinenmarkt.vogel.de/index.cfm?pid=1574&pk=57947 – Überprüfungsdatum 2011-08-25

Küpper 2005 KÜPPER, Hans-Ulrich: *Controlling: Konzeption, Aufgaben, Instrumente.* 4., überarb. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2005. – ISBN 3-7910-2299-7

Lange 30.09.2005 LANGE, E.: *Die digitale Fabrik weitet ihr Netzwerk aus.* In: VDI Nachrichten 2005, Nr. 39, S. 17

Lauke 1928 LAUKE, Herbert L.: *Die Leistungsabstimmung bei Fließarbeit.* München: R. Oldenbourg, 1928

Lay, Schirrmeister 2000 LAY, Gunter; SCHIRRMEISTER, Elna: *Sackgasse Hochautomatisierung?: Praxis des Abbaus von Overengineering in der Produktion.* Karlsruhe: ISI, 2000. (Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung Nr. 22)

Lebefromm 2003 LEBEFROMM, Uwe: *Produktionsmanagement.* 5., völlig neubearb. u. erw. Aufl. München: Oldenbourg, 2003. (Managementwissen für Studium und Praxis). – ISBN 3-486-27352-3

Liker 2006 LIKER, Jeffrey K.: *Der Toyota-Weg: 14 Managementprinzipien des weltweit erfolgreichsten Automobilkonzerns.* 1. Aufl. München: FinanzBuch-Verl., 2006. (Financial times Deutschland). – ISBN 978-3-89879-188-5

Loferer 2002 LOFERER, Michael: *Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen.* München, Techn. Univ., Diss., 2002

Löhr 1977 LÖHR, Hans-Günter: *Eine Planungsmethode für automatische Montagesysteme.* Stuttgart, Univ., Diss., 1977

Lotter 1982 LOTTER, Bruno: *Arbeitsbuch der Montagetechnik: Feinwerktechnik Elektromechanik Armaturen Gerätebau Kraftfahrzeugelemente Zubehör.* Mainz: Vereinigte Fachverlage Krausskopf, 1982. – ISBN 3-7830-0185-4

Lotter 1992 LOTTER, Bruno: *Wirtschaftliche Montage: Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik*. 2., erw. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl., 1992. – ISBN 3-18-400709-X

Lotter 2006a LOTTER, Bruno: Einführung. In: LOTTER, Bruno; WIENDAHL, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006 (VDI). – ISBN 978-3-540-21413-7, S. 1-8

Lotter 2006b LOTTER, Bruno: Manuelle Montage von Großgeräten. In: LOTTER, Bruno; WIENDAHL, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006 (VDI). – ISBN 978-3-540-21413-7, S. 173-192

Lotter 2006c LOTTER, Bruno (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis.* Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006. (VDI). – ISBN 978-3-540-21413-7

Lotter, Wiendahl 2006 LOTTER, Bruno; WIENDAHL, Hans-Peter: Zusammenfassung. In: LOTTER, Bruno; WIENDAHL, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006 (VDI). – ISBN 978-3-540-21413-7, S. 517-521

Lotter 2006d LOTTER, Edwin: Hybride Montagesysteme. In: LOTTER, Bruno; WIENDAHL, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006 (VDI). – ISBN 978-3-540-21413-7, S. 193-217

Marczinski 2004 MARCZINSKI, Götz: *Digitale Fabrik – anspruchsvolle Technologien sinnvoll einsetzen.* In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 99 (2004), Nr. 11, S. 666-669

März, von Langsdorff 2001 MÄRZ, Lothar; LANGSDORFF, Philipp von: Flexibilität und Marktorientierung in der Montage. In: WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.) u.a.: *Montageplanung - effizient und marktgerecht*. Berlin u.a.: Springer, 2001 (VDI). – ISBN 3-540-66647-8, S. 3-10

Matthes 1999 MATTHES, Jürgen: *Entwicklung einer gestaltelementierten Produktbeschreibung zur konstruktionsbegleitenden Programmierung von Montagerobotern.* Stuttgart, Univ., Diss., 1999

Matthes, Bullinger, Warschat 1997 MATTHES, Jürgen; BULLINGER, Hans-Jörg; WARSCHAT, J.: Featureorientierte Produktbeschreibung zur konstruktionsbegleitenden Montageplanung. In: SEEL, Uwe; BLEY, Helmut (Hrsg.): *Features verbessern die Produktentwicklung: Integration von Prozessketten; Tagung Berlin, 20./21. Februar 1997*. Düsseldorf: VDI-Verl., 1997 (VDI-Berichte, 1322). – ISBN 3-18-091322-3, S. 135-160

Meier 2005 MEIER, Klaus-Jürgen: *Montage in Hochlohnländern.* In: wt Werkstattstechnik online 95 (2005), Nr. 4, S. 232-235

Metzger 1977 METZGER, Helmut: *Planung und Bewertung von Arbeitssystemen in der Montage.* Stuttgart, Univ., Diss. 1977

Miese 1973 MIESE, Manfred: *Systematische Montageplanung in Unternehmen mit Einzel- und Kleinserienproduktion,* Aachen, RWTH, Diss., 1973

Miese 1976 MIESE, Manfred: *Systematische Montageplanung in Unternehmen mit Kleinserienproduktion.* 1. Aufl. Essen: Girardet, 1976. – ISBN 3-7736-0401-7

Minolla 1975 MINOLLA, Wolfgang: *Rationalisieren in der Arbeitsplanung: Schwerpunkt Organisation.* Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1975

Mital u. a. 2008 MITAL, Anil; DESAI, Anoop; SUBRAMANIAN, Anand; MITAL, Aashi: *Product development: A structured approach to consumer product development, design, and manufacture.* Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2008. – ISBN 978-0-7506-8309-8

Mörtl 2008 MÖRTL, Mathias: *Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung.* München, Techn. Univ., Diss., 2008

Montage 2002 SCHRAFT, Rolf Dieter (Fachl. Leitung); FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK UND AUTOMATISIERUNG IPA; MANAGEMENT CIRCLE: *Montage 2002: Kostengünstiger, schneller und flexibler montieren. 18. und 19. Februar 2002,* Stuttgart

Muckenhirn 2005 MUCKENHIRN, Ralf: *Konfigurierbares Leitsystem für modulare Montagezellen am Beispiel von Festplatten.* Stuttgart, Univ., Diss., 2005

Mühlenbruch 2008 MÜHLENBRUCH, Helge: *Produktmodell für globale Produktionsstufen.* Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2008

Müller, Brecher 2009 MÜLLER, Rainer; BRECHER, Christian: *Studie Strategien und Trends in der Montagetechnik und -organisation: Cluster of excellence integrative production technology for high wage countries.* Aachen: Apprimus, 2009. (Excellence in materials and production). – ISBN 978-3-940565-27-3

Müller 2002 MÜLLER, Reinhard: *Planung hybrider Montagesysteme auf Basis mehrschichtiger Vorranggraphen.* Karlsruhe, Techn. Hochsch., Diss. 2002

Müller 2008 MÜLLER, Stefan: *Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen.* München, Techn. Univ., Diss., 2008

Nahmias 2001 NAHMIAS, Steven: *Production and operations analysis.* 4. ed. Boston, Mass. [u.a.]: McGraw-Hill, 2001. – ISBN 0-07-241662-9

Nofen, Klußmann, Löllmann 2005 NOFEN, Dirk; KLUßMANN, Jan Hinrich; LÖLLMANN, Frederik: Komponenten und Aufbau einer wandlungsfähigen modularen Fabrik. In: WIENDAHL, Hans-Peter u.a.: *Planung modularer Fabriken*. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München; Wien: Hanser, 2005. – ISBN 3-446-40045-1, S. 17-30

Nurcahya 2009 NURCAHYA, Erwin Zahari: *Ein Produktdatenmodell für das rechnerunterstützte Variantenmanagement.* Aachen, RWTH, Diss. 2009

Nyhuis u. a. 2009 NYHUIS, Peter; FRONIA, Philip; PACHOW-FRAUENHOFER, Julia; WULF, Serjosha: *Wandlungsfähige Produktionssysteme: Ergebnisse der BMBF-Vorstudie „Wandlungsfähige Produktionssysteme".* In: wt Werkstattstechnik online 99 (2009), Nr. 4, S. 205-210

Nyhuis u. a. 2008 NYHUIS, Peter; HEINEN, Tobias; REINHART, Gunther; RIMPAU, Christoph; ABELE, Eberhard; WÖRN, Arno: *Wandlungsfähige Produktionssysteme: Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen.* In: wt Werkstattstechnik online 98 (2008), Nr. 1/2, S. 85-91

Nyhuis, Mühlenbruch, Heins 2004 NYHUIS, Peter; MÜHLENBRUCH, Helge; HEINS, Michael: *Altersgerechte Qualifizierung für die Montage: Lebendige Qualifizierung mit dem Production Trainer.* In: wt Werkstattstechnik online 94 (2004), Nr. 9, S. 426-432

Nyhuis, Zoleko 2007 NYHUIS, Peter; ZOLEKO, Felix: *Variantenbeherrschung in einer mobilen Montage: Ergebnis einer „Integrativen Montageplanung".* In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007), Nr. 4, S. 244-248

Olhager, Rudberg, Wikner 2001 OLHAGER, Jan; RUDBERG, Martin; WIKNER, Joakim: *Long-term capacity management: Linking the perspectives from manufacturing strategy and sales and operations planning.* In: International Journal of Production Economics Volume 69 (2001), Nr. 2, S. 215-225

von der **Osten-Sacken 1999** OSTEN-SACKEN, Detlev von der: *Lebenslauforientierte, ganzheitliche Erfolgsrechnung für Werkzeugmaschinen.* Stuttgart, Univ., Diss., 1999

Pahl u. a. 2007 PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung.* 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007. (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3-540-34060-7

Patron 2005 PATRON, Christian: *Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung.* München, Techn. Univ., Diss., 2005

Petersen 2005 PETERSEN, Ties: *Organisationsformen der Montage: Theoretische Grundlagen, Organisationsprinzipien und Gestaltungsansatz.* Rostock, Univ., Diss., 2005

Ponn, Lindemann 2008 PONN, Josef; LINDEMANN, Udo: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Optimierte Produkte - systematisch von Anforderungen zu Konzepten.* Berlin: Springer, 2008. (VDI). – ISBN 978-3-540-68562-3

REFA 1991 REFA: *Methodenlehre der Betriebsorganisation (2): Planung und Steuerung.* 1. Aufl., München: Hanser, 1991. – ISBN 3-446-16350-6

REFA 1993 REFA: *Lexikon der Betriebsorganisation.* 1. Aufl., München: Hanser, 1993. (Methodenlehre der Betriebsorganisation). – ISBN 3-446-17523-7

Reibnitz 1987 REIBNITZ, Ute: *Szenarien - Optionen für die Zukunft.* Hamburg, New York: McGraw-Hill, 1987. – ISBN 3-89028-082-X

Reibnitz 1992 REIBNITZ, Ute: *Szenario-Technik: Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung.* 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 1992. – ISBN 3-409-23431-4

Reinhart 1998 REINHART, Gunther: *Montage-Management: Lösungen zum Montieren am Standort Deutschland.* München: TCW, 1998. (TCW-Report 6). – ISBN 3-931511-53-7

Reinhart u. a. 2008 REINHART, Gunther; THIEMANN, Christian; SPILLNER, Rüdiger; SCHILP, Johannes: *Demographische Herausforderungen in der Montage: Technische Hilfsmittel und effiziente Montagesystemstrukturen für die Unterstützung und Integration älterer Mitarbeiter in der Montage.* In: wt Werkstattstechnik online 98 (2008), Nr. 9, S. 681-686

Reinhart, Zäh 2007 REINHART, Gunther; ZÄH, Michael Friedrich: *Intelligente und effiziente Automatisierung der Montage.* In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007), Nr. 9, S. 602

Richter 2006 RICHTER, Michael: Gestaltung der Montageorganisation. In: LOTTER, Bruno; WIENDAHL, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*.. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006 (VDI). – ISBN 978-3-540-21413-7, S. 95-125

Riffelmacher u. a. 2008 RIFFELMACHER, Philipp; KLUGE, Stefan; HUMMEL, Vera; WESTKÄMPER, Engelbert: *Fabriken müssen schnell auf Einflüsse reagieren.* In: Intelligenter Produzieren (2008), Nr. 2, S. 12-14

Riffelmacher, Kluge, Westkämper 2009 RIFFELMACHER, Philipp; KLUGE, Stefan; WESTKÄMPER, Engelbert: *Wandlungsfähige Produktion durch integrierten Einsatz digitaler Werkzeuge.* In: Industrie Management 25 (2009), Nr. 3, S. 29-32

Rimpau, Wiedemann 2009 RIMPAU, Christoph; WIEDEMANN, Markus: Methoden zur Gestaltung der Auftragsabwicklung für kundenindividuelle Produkte: Angebotserstellung. In: REINHART, Gunther; SPATH, Dieter (Hrsg.): *Auftragsprozesse in der kundenintegrierten Montage: MUSKIM.* Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 2009. – ISBN 978-3-8167-7882-0, S. 19-39

Rockland 1994 ROCKLAND, Markus: *Flexibilisierung der automatischen Teilebereitstellung in Montageanlagen.* München, Techn. Univ., Diss., 1994

Röhrig 2002 RÖHRIG, Martin: *Variantenbeherrschung mit hochflexiblen Produktionsendstufen.* Hannover, Univ., Diss., 2002

Roscher 2008 ROSCHER, Jörg: *Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie.* Stuttgart, Univ., Diss., 2008

Roß 2002 ROß, Paul: *Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung.* München, Techn. Univ., Diss., 2002

Roßgoderer 2002 ROßGODERER, Ulrich: *System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen.* München, Techn. Univ., Diss., 2002

Rudolf 2007 RUDOLF, Henning: *Wissensbasierte Montageplanung in der digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie.* München, Techn. Univ., Diss., 2007

Sanft 1994 SANFT, Christian: *Entwicklung von Werkzeugmaschinen auf der Basis eines integrierten Produktmodells.* Berlin, Techn. Univ., Diss., 1994

Sasse 2002 SASSE, Alexander: *Ganzheitliches Qualitätskostenmanagement: Ein Konzept zur wirtschaftlichen Planung, Steuerung und Umsetzung.* Erlangen, Friedrich-Alexander-Univ., Diss., 2002

Schanz, Frede 2003 SCHANZ, R.; FREDE, A.: Konfigurierbare modulare Montagesysteme. In: GESELLSCHAFT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK U.A. (Hrsg.): *Stuttgarter Impulse: Zukunft gestalten - Zeichen setzen.* Stuttgart, 2003, S. 77-87

Scharf 09.09.2005 SCHARF, Achim: *Modulare Montagelinien halten mit kurzen Handy-Modezyklen schritt.* In: VDI Nachrichten 2005, Nr. 36, S. 16

Scheer 1998 SCHEER, August-Wilhelm: *Wirtschaftsinformatik: Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse.* Studienausg., 2., durchges. Aufl. Berlin u.a.: Springer, 1998. – ISBN 3-540-63728-1

Schenk 2007 SCHENK, Wolfgang-D: *Halbautomatische Montageanlage: Modulares Konzept: schnelle Reaktion auf wechselnde Marktanforderungen.* In: VDI-Z Integrierte Produktion 149 (2007), Nr. 9, S. 118-120

Schilling, Brandes 1989 SCHILLING, Werner; BRANDES, Hanno: *Systematische technologische Montagevorbereitung: Beitrag zur Methodik der Fertigungsgestaltung.* Karl-Marx-Stadt, Techn. Univ., Diss., 1989

Schmaus 1993 SCHMAUS, Thomas: *Rationalisierungspotential der montagegerechten Produktgestaltung bei der Montage mit Industrierobotern.* Stuttgart, Univ., Diss., 1993

Schmid 2006 SCHMID, Stefan: *Automatisierte Ordnungs- und Kommissionierzelle zur hochflexiblen Bereitstellung von Werkstücken in der Montage.* Stuttgart, Univ., Diss., 2006

Schmidt 1992 SCHMIDT, Maximilian: *Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme.* München, Techn. Univ., Diss., 1992

Schraft 2003 SCHRAFT, Rolf Dieter: *Von der Vision zur Realität durch die Digitale Fabrik.* In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 98 (2003), Nr. 6, S. 268-269

Schreiber 2008 SCHREIBER, Werner: *Das Bindeglied zwischen digitaler und realer Fabrik: Augmented Reality als effizientes Werkzeug für den Soll-Ist-Vergleich in der Planung.* In: Intelligenter Produzieren (2008), Nr. 2, S. 8-10

Schuh 2005 SCHUH, Günther: *Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools.* 2., überarb. und erw. Aufl. München: Hanser, 2005. – ISBN 978-3-446-40043-6

Schuh u. a. 2008a SCHUH, Günther; BRECHER, Christian; MÜLLER, Rainer; GIEHLER, Florian; GÖBEL, Martin: *Modulare Systeme zur temporären Montageautomation: Mietroboter zur Erhöhung der Flexibilität in der automatisierten Produktion.* In: wt Werkstattstechnik online 98 (2008), Nr. 9, S. 727-732

Schuh u. a. 2008b SCHUH, Günther; GOTTSCHALK, Sebastian Friedrich; GULDEN, Alexander; HILCHNER, Rick; PYSCHNY, Nicolas; BUCHNER, Tilman; HAUBRICH, Thorsten: *Strategien und Trends in der Montagetechnik und -organisation: Lösungsansätze aus der Praxis zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der Montage am Standort Deutschland.* In: wt Werkstattstechnik online 98 (2008), Nr. 9, S. 670-674

Schuh u. a. 2007 SCHUH, Günther; GOTTSCHALK, Sebastian Friedrich; LÖSCH, Felix; WESCH, Cathrin: *Fabrikplanung im Gegenstromverfahren.* In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007), Nr. 4, S. 195-199

Schuh u. a. 2008c SCHUH, Günther; GOTTSCHALK, Sebastian Friedrich; PULZ, C.; HOESCHEN, A.: Decision-based Organizational Design. In: ELMARAGHY, Hoda A.; BLEY, H.; KARA, S.; WESTKÄMPER, E. (Hrsg.): *2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems: Advances in Assembly: better & faster: Book of Abstracts. Toronto, 21-23 September 2008.* Toronto, Ontario, Canada, 2008, S. 210-219

Schuh u. a. 2006 SCHUH, Günther; GULDEN, Alexander; GOTTSCHALK, Sebastian Friedrich; KAMPKER, Achim: *Komplexitätswissenschaft in der Fabrikplanung.* In: wt Werkstattstechnik online 96 (2006), Nr. 4, S. 167-170

Schuh u. a. 2004 SCHUH, Günther; HARRE, Jan; GOTTSCHALK, Sebastian Friedrich; KAMPKER, Achim: *Design for Changeability (DFC) – Das richtige Maß an Wandlungsfähigkeit finden: Ergebnisse des EU-Verbundforschungsprojektes „Modular Plant Architecture“.* In: wt Werkstattstechnik online 94 (2004), Nr. 4, S. 100-106

Schuh, Wemhöner, Friedrich 2006 SCHUH, Günther; WEMHÖNER, Nils; FRIEDRICH, C.: *Scenario-based lifecycle analysis of manufacturing systems.* In: CIRP Journal of Manufacturing Systems 35 (2006), Nr. 2, S. 129-135

Schuh, Wemhöner, Kampker 2004 SCHUH, Günther; WEMHÖNER, Nils; KAMPKER, Achim: *Lebenszyklusbewertung flexibler Produktionssysteme: Kennzahlen und Verfahren für langfristig optimale Entscheidungen in einer dynamischen Umwelt.* In: wt Werkstattstechnik online 94 (2004), Nr. 4, S. 116-121

Schulz 2005 SCHULZ, Rüdiger Eberhard: *Simulationsintegrierte Grobplanung von Montagesystemen für die Serienmontage am Beispiel der Automobilzulieferindustrie.* Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2005

Schuster 1992 SCHUSTER, Gerd: *Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage.* München, Techn. Univ., Diss., 1992

Schweizer 2008 SCHWEIZER, Peter: *Systematisch Lösungen finden: Eine Denkschule für Praktiker.* 3., überarb. Aufl. Zürich: vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH, 2008. – ISBN 978-3-7281-3087-7

Seidel 1998 SEIDEL, Uwe A.: *Verfahren zur Generierung und Gestaltung von Montageablaufstrukturen komplexer Serienerzeugnisse.* Stuttgart, Univ., Diss., 1998

Sesterhenn 2003 SESTERHENN, Marc: *Bewertungssystematik zur Gestaltung struktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme.* Aachen, RWTH, Diss., 2003

Slama 2000 SLAMA, Stefan: Modulare, reaktionsfähige Montagekonzepte für die variantenreiche Montage. In: FELDMANN, Klaus (Tagungsleitung); SCHRAFT, Rolf Dieter (Tagungsleitung); FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK UND AUTOMATISIERUNG IPA; SCHALL KONGREß (Hrsg.): *Flexible Montagekonzepte hoher Produktivität: Fachseminar begleitend zur 19. Motek, 19.-20. September, 2000, Sinsheim.* Sinsheim, 2000 (Band 2).

Slama 2004 SLAMA, Stefan: *Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz.* Erlangen, Friedrich-Alexander-Univ., Diss., 2004

Slama u. a. 2004 SLAMA, Stefan; JUNKER, S.; HORZ, T.; SCHMAUCH, E.: Konzeption und Betrieb agiler, hybrider Montagesysteme. In: FELDMANN, Klaus (Hrsg.): *Montage strategisch ausrichten - Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen.* Berlin u.a.: Springer, 2004. – ISBN 3-540-40304-3, S. 201-232

Spath 2009 SPATH, Dieter: Grundlagen der Organisationsgestaltung. In: BULLINGER, Hans-Jörg; SPATH, Dieter; WARNECKE, Hans-Jürgen; WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.): *Handbuch Unternehmensorganisation: Strategien, Planung, Umsetzung*. 3., neu bearb. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2009 (VDI). – ISBN 978-3-540-72136-9, S. 3-24

Spath, Rally, Scholtz 2008 SPATH, Dieter; RALLY, Peter; SCHOLTZ, Oliver: *Geschäftsstrategien und wandlungsfähige Montagen: Die Kunden bestimmen den Einsatz produktionsorientierter Geschäftsstrategien.* In: wt Werkstattstechnik online 98 (2008), Nr. 9, S. 675-680

Spath, Scholtz 2007 SPATH, Dieter; SCHOLTZ, Oliver: *Wandlungsfähigkeit für eine wirtschaftliche Montage in Deutschland: Aktuelle Erkenntnisse und anstehende Forschungsfragen.* In: Industrie Management 23 (2007), Nr. 2, S. 61-64

Spath u. a. 2007 SPATH, Dieter; SCHOLTZ, Oliver; RALLY, Peter; BENDER, Manfred: *Montagesystem-Check: Produkt und Montageaufgabe bestimmen die Auswahl des Montagesystems.* In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007), Nr. 9, S. 625-632

Specht, Möhrle 2002 SPECHT, Dieter; MÖHRLE, Martin G: *Gabler Lexikon Technologiemanagement: Management von Innovationen und neuen Technologien im Unternehmen.* 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2002. – ISBN 3-409-11822-5

Spur, Helwig 1986 SPUR, Günter; HELWIG, H. -J: Einführung in die Montagetechnik. In: SPUR, Günter; STÖFERLE, Theodor (Hrsg.): *Fügen, Handhaben und Montieren.* München: Hanser, 1986 (Handbuch der Fertigungstechnik Bd. 5). – ISBN 3-446-12536-1, S. 591-606

Spur, Krause 1997 SPUR, Günter; KRAUSE, Frank-Lothar: *Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik.* München: Hanser, 1997. – ISBN 3-446-19176-3

Spur, Stöferle 1986 SPUR, Günter (Hrsg.); STÖFERLE, Theodor (Hrsg.): *Fügen, Handhaben und Montieren.* München: Hanser, 1986. (Handbuch der Fertigungstechnik Bd. 5). – ISBN 3-446-12536-1

Strohmayr 1993 STROHMAYR, Rudolf: *Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeeinrichtungen.* München, Techn. Univ., Diss., 1993

Sutanto, Schmuck 2003 SUTANTO, A.; SCHMUCK, T.: Konzeptioneller Ansatz einer virtuellen Umgebung zur rechnergestützten Planung modularer Montagesysteme, Bd. 13. In: HOHMANN, Rüdiger (Hrsg.): *Frontiers in Simulation: 17. Symposium in Magdeburg, September 2003.* Delft: SCS-European Publ. House, 2003 (ASIM-Fortschritte in der Simulationstechnik, FS 13). – ISBN 3-936150-27-3, S. 391-396

Takeda, Meynert 2006 TAKEDA, Hitoshi; MEYNERT, Andreas: *Das synchrone Produktionssystem: Just-in-time für das ganze Unternehmen.* 5., aktual. Aufl. Landsberg am Lech: mi-Fachverl., 2006. – ISBN 978-3-6360-3077-1

Thommen, Achleitner 2009 THOMMEN, Jean-Paul; ACHLEITNER, Ann-Kristin: *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht.* 6., überarb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2009. – ISBN 978-3-8349-1325-8

Trommer 2001 TROMMER, Gunnar: *Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen.* Aachen, RWTH, Diss., 2001

Ullrich 2006 ULLRICH, Benjamin: *Entwicklung eines Systems zur simultanen Optimierung der Montagegerechtigkeit und des Produktionsablaufs.* Hohenheim, Univ., Diss., 2006

Vahrenkamp, Siepermann 2004 VAHRENKAMP, Richard; SIEPERMANN, Christoph: *Produktionsmanagement.* 5., vollst. überarb. Aufl. München: Oldenbourg, 2004. – ISBN 3-486-27545-3

VDI-Richtlinie VDI 2411 01.06.1970: *Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen.* zurückgezogen

VDI-Richtlinie VDI 2222 Blatt 1 01.06.1997: *Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*

VDI-Richtlinie VDI 2221 01.05.1993: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*

VDI-Richtlinie VDI 2860 01.05.1990: *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*

VDI-Richtlinie VDI 3423 01.01.2002: *Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen; Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung*

Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW) 02.09.2005 VEREIN DEUTSCHER WERKZEUGMASCHINENFABRIKEN (VDW): *Die "Digitale Fabrik" lässt Schwachstellen in der Produktion keine Chance.* In: VDI Nachrichten 2005, Nr. 35, S. 30

Vogel, Jongmanns 2004 VOGEL, Bernd; JONGMANNS, Georg: *Wissenschaftlich-technische Dienstleistungen: Reorganisation und Ressourcenplanung für Natur- und Ingenieurwissenschaften an Universitäten.* Hannover: HIS, 2004. (Hochschulplanung 168). – ISBN 3-930447-59-2

Vollmers 2008VOLLMERS, Florian: *Montageautomaten aus dem Baukasten: Mehr Flexibilität in der Produktion.* URL http://www.handelsblatt.com/unternehmen/mittelstand_aktuell/montageautomaten-aus-dem-baukasten;1434961 – Überprüfungsdatum 2009-10-31

Wagner 2006 WAGNER, Harry: *Kollaboratives Bedarfs- und Kapazitäts-Management am Beispiel der Automobilindustrie: Lösungsansatz zur Sicherstellung.* Stuttgart, Univ., Diss., 2006

Wahlers 1998 WAHLERS, Thomas: *Modellgestützte Analyse und Verbesserung der logistischen Merkmale komplexer Serienprodukte.* Hannover, Univ., Diss., 1998

Warnecke 1986 WARNECKE, Hans-Jürgen: Ablauf der Montage. In: SPUR, Günter; STÖFERLE, Theodor (Hrsg.): *Fügen, Handhaben und Montieren.* München: Hanser, 1986 (Handbuch der Fertigungstechnik Bd. 5). – ISBN 3-446-12536-1, S. 607-620

Warnecke, Löhr, Kiener 1975 WARNECKE, Hans-Jürgen; LÖHR, Hans-Günter; KIENER, Waldemar: *Montagetechnik: Schwerpunkt der Rationalisierung.* Mainz: Krausskopf, 1975. (Produktionstechnik heute Bd. 7). – ISBN 3-7830-0098-X

Wegener 2003WEGENER, Eberhard: *Montagegerechte Anlagenplanung.* Weinheim: Wiley-VCH, 2003. – ISBN 3-527-30626-9

von der Weiden 19.09.2008 WEIDEN, Silvia von der: *Modulare Montagesysteme erobern den Mittelstand.* In: VDI Nachrichten 2008, Nr. 38, S. 20

Westkämper 2001a WESTKÄMPER, Engelbert: *Modulare Produkte - Modulare Montage. Modular products - modular assembly.* In: wt Werkstattstechnik online Band 91 (2001), Nr. 8, S. 479-482

Westkämper 2001b WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.): *Montageplanung - effizient und marktgerecht.* Berlin u.a.: Springer, 2001. (VDI). – ISBN 3-540-66647-8

Westkämper 2002a WESTKÄMPER, Engelbert: Stuttgart Model of Virtual Enterprises: Das Stuttgarter Modell Virtueller Unternehmen. In: *Manufacturing technology in the information age:*

Proceedings of the 35th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Seoul, KR: Elsevier, 2002, S. 25-31

Westkämper 2002b WESTKÄMPER, Engelbert: Wandlungsfähigkeit - Herausforderungen und Lösungen im turbulenten Umfeld: Transformability Challenges and Solutions in Turbulent Enviroment. In: WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.): *Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion: Forschungsstrategien, Ergebnisse, Anwendungen; Forschungskolloquium SFB 467, 16. April 2002, Stuttgart.* Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 2002 (Forschung im Dialog). – ISBN 3-8167-6128-3, S. 17-45

Westkämper 2004a WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.); DUNKER, Thomas (Mitarb.): *Sonderforschungsbereich 467: Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen.* Lampertheim: Alpha Informations GmbH, 2004

Westkämper 2004b WESTKÄMPER, Engelbert: Wandlungsfähige Unternehmen. In: WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.): *Sonderforschungsbereich 467: Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen.* Lampertheim: Alpha Informations GmbH, 2004, S. 3-14

Westkämper 2005 WESTKÄMPER, Engelbert: *Mächtige Hilfsmittel stehen bereit: Chancen der deutschen Produktionstechnik: Veränderungen schneller und präziser erreichen.* In: Intelligenter Produzieren (2005), Nr. 1, S. 11-13

Westkämper 2006a WESTKÄMPER, Engelbert: Allgemeiner Teil. In: WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.): *Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion: Sonderforschungsbereich 467 - Abschlußbericht 1997-2005.* Stuttgart, 2006, S. 11-66

Westkämper 2006b WESTKÄMPER, Engelbert: *Produktion: Wandlungsfähigkeit der industriellen Produktion.* München: TCW Transfer-Centrum, 2006. (TCW-Report 44). – ISBN 3-931511-88-X

Westkämper 2006c WESTKÄMPER, Engelbert: Research for Adaptive Assembly. In: WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.): *First CIRP International Seminar on Assembly Systems: November 15 - 17 2006.* Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 2006. – ISBN 978-3-8167-7213-2, S. 9-15

Westkämper 2006d WESTKÄMPER, Engelbert: Unterstützung der Montagekonfigurierung mit Hilfe Virtueller Realität: Teilprojekt C5. In: WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.): *Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion: Sonderforschungsbereich 467 - Abschlußbericht 1997-2005.* Stuttgart, 2006, S. 465-508

Westkämper 2006e WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.): *Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion: Sonderforschungsbereich 467 - Abschlußbericht 1997-2005.* Stuttgart, 2006

Westkämper 2008a WESTKÄMPER, Engelbert: Digitales Engineering von Fabriken und Prozessen. In: GESELLSCHAFT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK (Hrsg.): *Stuttgarter Impulse - Fertigungstechnik für die Zukunft: Schriftliche Fassung der Vorträge zum Fertigungstechnischen Kolloquium am 10. bis 11. September 2008 in Stuttgart.* Stuttgart, 2008. – ISBN 978-3-00-025623-3, S. 427-452

Westkämper 2008b WESTKÄMPER, Engelbert: Sustainable Manufacturing and Assembly. In: ELMARAGHY, Hoda A.; BLEY, H.; KARA, S.; WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.): *2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems: Advances in Assembly: better & faster: Book of Abstracts. Toronto, 21-23 September 2008.* Toronto, Ontario, Canada, 2008, S. 2-15

Westkämper 2009 WESTKÄMPER, Engelbert: Turbulentes Umfeld von Unternehmen. In: WESTKÄMPER, Engelbert; ZAHN, Erich (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2009. – ISBN 978-3-540-21889-0, Kap. 2, S. 7-23

Westkämper, Decker 2006 WESTKÄMPER, Engelbert; DECKER, Markus: *Einführung in die Organisation der Produktion.* Berlin: Springer, 2006. (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3-540-26039-4

Westkämper, Zahn 2008 WESTKÄMPER, Engelbert; ZAHN, Erich: Aufbau einer Lernfabrik für advanced Industrial Engineering: Transferprojekt T1. In: WESTKÄMPER, Engelbert (Hrsg.): *Wandlungsfähigkeit in der variantenreichen Serienfertigung: Abschlussbericht des Transferbereiches 059 2005-2008*. Stuttgart, 2008, S. 25-166

Westkämper u. a. 2000 WESTKÄMPER, Engelbert; ZAHN, Erich; BALVE, Patrick; TILEBEIN, Meike: *Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen: Ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld.* In: wt Werkstattstechnik online 90 (2000), Nr. 1/2, S. 22-26

Weule, Buchholz 2000 WEULE, Hartmut; BUCHHOLZ, Carsten: Re-use of Assembly Systems: A Great Ecological and Economic Potential for Facility Suppliers. In: Proc. of SPIE 4193, 44 (2001) URL http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.17.3148&rep=rep1&type=pdf – Überprüfungsdatum 2010-03-14

Weule, Schmälzle, Trender 2000 WEULE, Hartmut; SCHMÄLZLE, Andreas; TRENDER, Lutz: *Remanufacturing and Re-Use of Assembly Systems and New Distribution Concepts for Facility Suppliers.* In: Production Engineering: Research and Development: Annals of the German Academic Society for Production Engineering 7 (2000), Nr. 1, S. 103-106

Whitney 2004 WHITNEY, Daniel E: *Mechanical assemblies: Their design, manufacture, and role in product development.* New York: Oxford Univ. Press, 2004. (Oxford series on advanced manufacturing). – ISBN 0-19-515782-6

Wiechers, Schneider April 2010 WIECHERS, Ralph; SCHNEIDER, Gesine: *VDMA Maschinenbau in Zahl und Bild 2010.* April 2010

Wiedenmann 2001 WIEDENMANN, Harald: *Modellierung von Produktionsprozessen als Beitrag zur Generierung von Termin- und Kapazitätsplanungs-Systemen bei variantenreicher Serienfertigung.* Stuttgart, Univ., Diss., 2001

Wiendahl 1997 WIENDAHL, Hans-Peter: *Betriebsorganisation für Ingenieure.* 4., vollst. überarb. Aufl. München; Wien: Hanser, 1997. – ISBN 3-446-18776-6

Wiendahl, Harms 2001 WIENDAHL, Hans-Peter; HARMS, Thomas: *Betreibermodelle.* In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 96 (2001), Nr. 6, S. 324-327

Wiendahl, Hegenscheidt 2006 WIENDAHL, Hans-Peter; HEGENSCHEIDT, Matthias: Verfügbarkeit von Montagesystemen. In: LOTTER, Bruno; WIENDAHL, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006 (VDI). – ISBN 978-3-540-21413-7, S. 369-406

Wiendahl, Heger 2003 WIENDAHL, Hans-Peter; HEGER, Christoph Lutz: *Die Wandlungsfähige Fabrik: Zukunftsrobustheit in turbulenten Märkten.* Darmstadt, 2003 (Praxisseminar "Neuordnung von Produktionsstandorten")

Wiendahl, Heger 2004 WIENDAHL, Hans-Peter; HEGER, Christoph Lutz: Quantification of Changeability: Procedures and Methods, CIRP Working Group on Changeability. In: *54th General Assembly of CIRP in Krakow, Poland.* Wabern: Edition Colibri, Elsevier, 2004 (CIRP annals, 53,1). – ISBN 3-905277-41-7, S. 1-17

Wirth 2000 WIRTH, Siegfried (Hrsg.): *"Flexible, temporäre Fabrik": Arbeitsschritte auf dem Weg zu wandlungsfähigen Fabrikstrukturen; Ergebnisbericht der Vordringlichen Aktion.* Karlsruhe, 2000. (Rahmenkonzept Forschung für die Produktion von morgen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung)

Wirth 2003 WIRTH, Siegfried: *Entwicklungsetappen wandlungsfähiger Produktions-, Kooperations- und Fabrikstrukturen.* In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 98 (2003), Nr. 1-2, S. 11-16

Witte, Vielhaber 2003 WITTE, Karl-Werner (Hrsg.); VIELHABER, Wolfgang (Hrsg.): *Flexible und wirtschaftliche Serienmontage: Wege zu zukunftsstabilen Montagesystemen.* Aachen: Shaker, 2003. – ISBN 3-8322-1957-9

Zäh 2004 ZÄH, Michael Friedrich: *Fundamentale Kostensenkung in der Montage!* In: wt Werkstattstechnik online 94 (2004), Nr. 9, S. 383

Zäh u. a. 2007 ZÄH, Michael Friedrich; HAGEMANN, Florian; BRANNER, Gregor; SCHILP, Johannes: *Formflexibilität als Ansatz zur Wiederverwendbarkeit.* In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007), Nr. 11/12, S. 837-841

Zäh, Möller, Vogl 2005 ZÄH, Michael Friedrich; MÖLLER, Niklas; VOGL, Wolfgang: Symbiosis of Changeable and Virtual Production: The Emperor´s New Clothes or Key Factor for

Future Success? In: *1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable, and Virtual Production.* Munich, Germany, 22-23 September 2005, S. 3-10

Zäh, Patron, Fusch 2003 ZÄH, Michael Friedrich; PATRON, Christian; FUSCH, Thomas: *Die Digitale Fabrik.* In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 98 (2003), Nr. 3, S. 75-77

Zäh, Wagner, Prasch 2005 ZÄH, Michael Friedrich; WAGNER, Wolfgang; PRASCH, Martin: *Montagestrukturen für alternde Belegschaften: Systematische Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in Wertschöpfungsprozesse.* In: wt Werkstattstechnik online 95 (2005), Nr. 9, S. 637-642

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

Zäpfel 2000 ZÄPFEL, Günther: *Strategisches Produktions-Management.* 2., unwesentlich veränd. Aufl. München; Wien: Oldenbourg, 2000. (Internationale Standardlehrbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften). – ISBN 3-486-25450-2

Zehbold 1995 ZEHBOLD, Cornelia: *Lebenszykluskostenrechnung.* Erlangen, Friedrich-Alexander-Univ., Diss., 1995

Zeile 1995 ZEILE, Ulrich: *Montagestrukturplanung für variantenreiche Serienprodukte.* Stuttgart, Univ., Diss., 1995

Zweck u. a. 2008 ZWECK, Axel; EICKENBUSCH, Heinz; HOLTMANNSPÖTTER, Dirk; KAISER, Oliver S.; KORTE, Sabine; WAGNER, Volker: *Technologiestudie: "Zukunft der Montage- und Handhabungstechnik".* Düsseldorf, 2008. – Im Auftrag des VDMA

10 Anhang

Anhang A: Planungssystematik nach Konold und Reger

1 Aufgabenstellung
- 1.1 Ziele festlegen
- 1.2 Projektverantwortlichen benennen
- 1.3 Terminrahmen vorgeben
- 1.4 Planungsdaten beschaffen zu:
  - Erzeugnis, Mengengerüst, Montagesystem-Flexibilität, Arbeitsorganisation, Montageablauf, Produktionslogistik
- 1.5 Situationsanalyse durchführen
- 1.6 Aufgaben abgrenzen
- 1.7 Verfügbare Hallenfläche vorgeben
- 1.8 Zeitlichen Ablauf des Projektes festlegen

2 Grobplanung
- 2.1 Montagesystem-Ausbringung berechnen
- 2.2 Arbeitsabläufe festlegen und Montagestruktur entwickeln
- 2.3 Montageabschnitte bilden
  - Nach den Gesichtspunkten: Arbeitsteilung (Artteilung), Mengenteilung, Baugruppen- und Variantenteilung
- 2.4 Montagesystem-Alternativen entwickeln
  - Zu berücksichtigende Einflussfaktoren: Stückzahlbereich, Verfügbare Zeitspanne, Laufzeit des Erzeugnisses, Typen- und Variantenvielfalt, Arbeitsinhalt, Schwierigkeitsgrad, Erzeugnistransport
  - Abhängigkeiten bei der Festlegung der Grundform eines Montagesystems: Art der Arbeitsorganisation, Anbindung an den innerbetrieblichen Materialfluss, Flussprinzip, Teilebereitstellung am Arbeitsplatz
  - Mögliche Arten von Montagesystemen: Manuelle Montagesysteme ohne automatisierten Werkstück-Umlauf, Manuelle und teilautomatisierte Montagesysteme mit automatischem Werkstück-Umlauf, Automatische Montagesysteme (mit loser oder starrer Verkettung oder kombiniert)
  - Weitere Punkte: Festlegung des Werkstückträgers, Festlegung von Informations- und Datenspeichersystemen
- 2.5 Notwendige Hallenfläche ermitteln
- 2.6 Personalbedarf planen
  - Montage an Einzelarbeitsplätzen bzw. Parallelarbeitsplätzen, Montage in Gruppenarbeit, Verkettete Arbeitsplätze in einem Fließsystem
- 2.7 Lösungsvarianten bewerten und auswählen
- 2.8 Projektkalkulation und Wirtschaftlichkeitsrechnung durchführen
  - Berechnung der Montagekosten, Berechnung der Kapitalrückflussdauer

3 Feinplanung
- 3.1 Gesamtsystem und Teilsysteme im Detail ausarbeiten
  - Pflichtenheft ausarbeiten
  - Gesamtmontagesystem und Montageabschnitte konstruktiv ausarbeiten (Arbeitsinhalte überprüfen, Montagelage überprüfen, Werkstückträgergestaltung überarbeiten, Gestaltung manueller Arbeitsplätze und automatischer Stationen, Verkettungssystem festlegen)
  - Auftragsplanungs- und Steuerungssystem festlegen
- 3.2 Terminplan erstellen
- 3.3 Ausschreibung durchführen
- 3.4 Kritische Prozesse absichern
- 3.5 Personaleinsatz planen

- 3.6 Wirtschaftlichkeitsnachweis überprüfen

4 Realisierung

- 4.1 Beschaffung veranlassen
- 4.2 Arbeitsplätze nach MTM gestalten
- 4.3 Personal schulen
- 4.4 Montagesystem installieren
- 4.5 Dokumentation erstellen
- 4.6 Ausprobe

5 Fertigungsanlauf

- 5.1 Systemanlauf analysieren
- 5.2 Fehler beseitigen
- 5.3 Dokumentation gegebenenfalls korrigieren
- 5.4 Abnahme durchführen

Anhang B: Grafische Übersichten zur Bewertung

Planungssystematiken

Kriterium / Planungssystematik	Betriebstypologie	manuelle Montage	hybride Montage	automatische Montage	Flexibilität	Wandlungsfähigkeit	Modulare Elemente	Standardisierung	Montagevorranggraph	Ausbringung	Rechnerunterstützung	Lebenszyklusbetrachtung	Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen	Kostenkalkulation
Bullinger	●	●	◔	●	◔	○	○	◔	●	◕	◕	○	○	●
Konold/ Reger	●	●	●	●	◕	○	◔	◔	●	●	○	◔	○	●
Lotter	●	○	◕	●	○	○	○	●	●	●	●	◕	○	●
Warnecke	●	●	◕	◕	◔	○	○	○	●	◕	○	○	○	◕
Beumelburg	○	○	●	○	●	○	○	○	●	◔	●	◔	○	○
Loferer	◔	◕	◕	◕	●	◕	●	●	◕	◕	●	◔	○	◔
Kratzsch	●	◕	◕	◕	●	○	○	○	◔	○	○	◔	○	●
Slama	◔	●	●	●	●	●	●	●	◕	◔	●	●	○	●
Holle	●	●	●	●	◔	◔	◔	○	●	◕	●	○	○	○
Cuiper	◕	◕	◕	●	◔	○	●	○	◕	◔	●	○	○	○
Jonas	◕	◕	◕	◕	◕	○	●	◕	●	◔	●	○	○	○
Fusch	●	●	○	●	●	○	●	○	◔	○	●	◔	◔	●
Grunwald	●	●	●	●	●	○	●	◕	○	○	●	○	◔	○
Patron	◕	●	●	●	●	○	○	○	○	○	●	○	○	○
Rudolf	●	●	●	●	●	○	◔	○	●	○	●	○	○	○
Roßgoderer	●	●	●	●	◔	○	○	○	○	◔	●	○	○	○
Evers	●	◕	◕	◕	●	○	●	○	○	◕	●	◔	○	◔
Müller	◕	●	●	●	◕	○	◕	◔	●	◕	●	○	○	○
Schulz	●	◕	◕	◕	●	○	◕	○	◕	◔	◕	○	○	○
Hack	◔	◕	◕	◕	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Gerst	○	●	○	○	○	○	○	◔	●	○	○	○	○	○
Müller/Brecher	◔	◔	◔	◔	◔	●	○	○	○	○	●	◕	○	○
Gottschalk	●	●	◕	◔	●	○	○	◔	◕	●	●	○	○	◔
Sutanto/Schmuck	○	◔	◔	◔	●	●	●	◕	○	○	●	◕	◔	●
Krüger	●	●	●	●	●	○	○	○	◕	◕	○	○	●	○
Hernandez Morales	○	○	○	○	●	●	●	◕	○	○	○	◕	●	○
Röhrig	●	◔	◔	◔	●	●	◔	○	○	○	○	○	○	●
Mörtl	●	○	○	○	●	◕	●	●	○	◔	◕	○	○	◔
Hildebrand	●	○	○	○	●	●	●	●	○	○	○	●	○	◔

Skala: ○ nicht erfüllt …● voll erfüllt

Beschreibungsmethoden

Kriterium / Methodik	manuelle Montage	hybride Montage	automatische Montage	Flexibilität	Wandlungsfähigkeit	Modulare Montage / Elemente	Rechnerunterstützung	Lebenszyklusbetrachtung	Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen	Kostenkalkulation	Ressourcen: Betriebsmittel	Ressourcen: Personal	Ressourcen: Material	Ressourcen: Sonstiges	Beschreibung von Prozessen	Beschreibung von Ressourcen	Unscharfe Produktinformationen	Produktionsalternativen
Eversheim	●	◔	◔	◔	○	◔	●	○	○	◕	●	◕	●	●	◔	◔	○	◕
REFA	◕	◔	◔	○	○	○	○	○	○	◔	◔	○	◔	○	○	○	○	○
Dieckhoff	◕	◔	◔	◕	◔	◔	●	◔	◔	◔	◕	◔	◕	◔	●	◕	◔	◕
SFB 467	●	●	◔	●	●	●	●	○	○	◔	●	◔	◕	◔	●	●	◔	◕
Müller	●	●	●	◕	◔	●	●	○	○	◔	◕	◔	◕	◔	◕	◕	●	●
Fallböhmer	◔	◔	◔	◕	◕	◕	●	●	◔	◔	◕	○	◔	◕	●	◕	●	●
Trommer	◔	◔	◔	◕	◕	◕	●	◕	◔	◕	◕	◔	◔	◕	●	●	◕	●
Knoche	◕	◕	◕	◔	◔	◕	●	○	○	●	●	○	●	○	●	●	●	●
Bullinger	●	◔	◕	◔	○	○	◕	○	○	●	◔	◔	◔	○	◕	◔	◔	◔
Loferer	◕	◕	◕	●	◕	●	●	◔	○	◔	●	◔	◕	◔	●	●	●	◕
Konold/ Reger	●	●	●	◕	○	◔	○	◔	○	●	◕	◔	●	◔	◕	◔	◕	◕
Rudolf und Jonas	●	●	●	◕	◔	◕	●	◔	○	○	◕	◔	◔	◕	●	◕	◔	●
Mörtl	◔	◔	◔	●	◕	◔	●	◔	○	◕	●	●	●	◔	◔	●	◕	◕
Roßgoderer	●	●	●	◔	○	○	●	○	○	○	◕	○	○	○	◔	◕	◔	◕
Hildebrand	◔	◔	◔	◕	◕	○	○	●	○	○	●	●	◔	●	◔	●	○	○
VDI 2411 und 2860	◕	◔	◕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◕	○	○	○
DIN 8580-8593	◕	◔	◕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◕	○	○	○
Rockland	◕	◔	◕	○	○	○	○	○	○	○	◔	○	◔	○	◕	○	○	○
Fiedler	◕	◔	○	●	●	○	◔	○	○	◕	◔	●	◔	◔	◔	◔	○	○
Aichele	○	○	○	◔	◔	○	●	○	◔	◕	◔	●	◔	●	◔	◔	◔	○
Jodlbauer	○	○	○	◔	◔	○	●	◔	○	◔	◕	◕	◕	◔	◕	◕	◕	◕
Fresner	○	○	○	◔	○	○	○	●	○	●	◔	○	●	●	○	◕	○	◕

Skala: ○ nicht erfüllt …● voll erfüllt

Anhang C: Fähigkeiten

Montagegrundfunktion	Fügen	
Montageprozess	Zusammensetzen	
Montagefähigkeiten	Auflegen, Aufsetzen, Schichten	Fügen zusammenpassender Teile unter Nutzung der Schwerkraft, im Allgemeinen in Verbindung mit Formschluss.
	Einlegen, Einsetzen	Fügen, bei dem das eine Fügeteil in ein Formelement des anderen Fügeteiles eingelegt wird.
	Ineinanderschieben	Fügen, bei dem das eine Fügeteil in das andere oder über das andere geschoben wird.
	Einhängen	Fügen, bei dem das eine Fügeteil in das andere eingehängt wird, wobei die Fügeverbindung durch eine Zugkraft (Federkraft, Schwerkraft) gesichert wird.
	Einrenken	Fügen durch Ineinanderschieben zweier Fügeteile, wobei die Fügeverbindung durch eine Druckkraft gesichert wird.
	Federnd Einspreizen	Fügen durch vorheriges elastisches Verformen, damit das Fügeteil nach dem Einlegen oder Aufschieben und anschließendem Rückfedern durch Formschluss gehalten wird.
Montagegrundfunktion	Fügen	
Montageprozess	Füllen	
Montagefähigkeiten	Einfüllen	Das Einbringen von gas- bzw. dampfförmigem, flüssigem oder festem Stoff in hohle Körper.
	Tränken-Imprägnieren	Das Ausfüllen eines porenhaltigen oder eines aus faserigem Stoff bestehenden Körpers mit einem flüssigen Stoff.
Montagegrundfunktion	Fügen	
Montageprozess	Anpressen, Einpressen	
Montagefähigkeiten	Schrauben	Fügen durch Anpressen mittels selbsthemmenden Gewindes.
	Klemmen	Fügen durch Anpressen mittels Hilfsteilen (Klemmen), wobei die Fügeteile elastisch oder plastisch verformt werden, während die Hilfsteile starr sind.
	Klammern	Fügen mittels federnder Hilfsteile (Klammern), die die überwiegend starren Fügeteile aneinanderpressen.

	Fügen durch Einpressen-Verstiften	Fügen durch Ineinanderschieben eines Innenteils und eines Außenteils, wobei zwischen beiden ein Übermaß besteht.
	Fügen durch Schrumpfen	Fügen durch loses Ineinanderschieben eines Innenteils und eines vorher erwärmten Außenteils. Der Kraftschluss wird durch Abkühlen des Außenteiles auf Raumtemperatur aufgrund des zwischen beiden Fügeteilen bestehenden Übermaßes erzielt.
	Fügen durch Dehnen	Fügen durch loses Ineinanderschieben eines vorher unterkühlten Innenteiles und eines Außenteils. Der Kraftschluss wird durch Erwärmen des Innenteils auf Raumtemperatur aufgrund des zwischen beiden Fügeteilen bestehenden Übermaßes erzielt.
	Nageln, Einschlagen	Fügen durch Einschlagen oder Einpressen von Nägeln (Drahtstiften) als Hilfsteile ins volle Material. Hierbei werden mehrere Fügeteile durch Aneinanderpressen miteinander verbunden. Beim Einschlagen ist das eingeschlagene Teil selbst ein Fügeteil, z.B. Einschlagen eines Hakens.
	Verkeilen	Das Anpressen zweier Fügeteile mit Hilfe selbsthemmender keilförmiger Hilfsteile.
	Verspannen	Kraftschlüssiges Fügen einer Nabe mit einer Welle mit Hilfe eines Konus oder mit Hilfe ringförmiger, geschlitzter Keile (Spannelemente), wobei die erforderliche Axialkraft über Gewinde aufgebracht wird.
Montagegrundfunktion	Fügen	
Montageprozess	Fügen durch Urformen	
Montagefähigkeiten	Ausgießen	Fügen durch Urformen derart, dass zu einem Werkstück durch Ausgießen mit formlosem Stoff ein Ergänzungsstück erzeugt wird.
	Umspritzen	Einbetten, wobei ein festes Innenteil mit einem Außenteil aus Kunststoff durch Spritzgießen gefügt wird.
	Eingießen, Umgießen	Einbetten, wobei ein festes Innenteil mit einem Außenteil durch Gießen gefügt wird.

	Einvulkanisieren	Einbetten, wobei der formlose Stoff ein gummiartiger Werkstoff ist, der durch Vernetzen (Vulkanisieren) fest wird.
	Vergießen	Fügen zweier Teile mit Hilfe eines flüssigen, später fest werdenden Hilfsstoffs.
	Eingalvanisieren	Fügen, wobei die Fügeteile durch galvanisch erzeugte Hilfsteile formschlüssig verbunden werden.
	Ummanteln	Fügen durch Urformen einer Umhüllung aus formlosem Stoff mit einem draht-, band-, seil- oder rohrförmigen Fügeteil unter Verwendung eines formgebenden Werkzeugs.
	Kitten	Fügen von meist verschiedenartigen Werkstoffen mit Hilfe von Kitt, wobei häufig größere Zwischenräume gefüllt, verschieden große Dehnungs-koeffizienten überbrückt und häufig auch die Dichtung der gekitteten oder verkitteten Fugen bewirkt werden muss.
Montagegrundfunktion	Fügen	
Montageprozess	Fügen durch Umformen	
Montagefähigkeiten	Drahtflechten	Fügen von Drähten durch gegenseitiges Umschlingen oder Verdrillen zur Herstellung von flächenhaften oder räumlichen Drahtgeflechten.
	gemeinsam Verdrehen	Fügen durch schraubenförmiges Umeinanderbiegen zweier drahtförmiger Fügeteile.
	Verseilen	Fügen durch Umformen von Drähten, Litzen und Seilen, die in Form einer Schraubenlinie umeinander gelegt werden.
	Spleißen	Fügen durch Umformen von Seilenden miteinander oder eines Seilendes mit demselben Seil zur Bildung einer Schlaufe derart, dass entsprechende Litzen kraftschlüssig und formschlüssig über- und untereinander geführt werden.
	Knoten	Fügen durch Umformen derart, dass zwei Drähte und Ähnliches formschlüssig oder kraftschlüssig umeinander gebogen werden.
	Wickeln mit Draht	Fügen eines Innenteils mit einem Draht durch dessen fortlaufendes Biegen um das Innenteil.

	Drahtweben	Das Verkreuzen von Drähten nach einer bestimmten Ordnung, wobei ein Drahtgewebe entsteht.
	Heften	Fügen durch Umbiegen von drahtförmigen Hilfsfügeteilen.
	Körnen oder Kerben	Fügen durch Umformen derart, dass das freie Ende eines durch ein Werkstück gesteckten Teiles oder ein dünnwandiges Werkstück in eine freie Stelle des Gegenstücks punkt- oder linienförmig eingedrückt wird.
	gemeinsam Fließpressen	gemeinsames Fließpressen zweier auf- oder ineinander gelegter Ausgangsformen durch einen Formgebungsspalt.
	gemeinsam Ziehen, Ummanteln	Fügen durch Umformen derart, dass durch gemeinsames Ziehen zweier ineinandergeschobener rohrförmiger Teile durch einen Ziehring eine kraftschlüssige Verbindung hergestellt wird.
	Rohreinwalzen	Fügen durch Weiten derart, dass ein in ein Außenteil, z. B. Kesselwand, eingeführter Rohrabschnitt oder Ring durch Walzen geweitet wird, bis er fest anliegt.
	Weiten mit Innendruck	Fügen durch Weiten derart, dass ein durch das Loch eines oder mehrerer Fügeteile durchgestecktes Rohr außerhalb der Fuge durch Innendruck, z. B. durch ein nachgiebiges Werkzeug oder Druckflüssigkeit oder Knickbauchen aufgeweitet wird.
	Rundkneten	Fügen durch Engen derart, dass ein rohrförmiges Außenteil über dem Umfang in Vertiefungen am Innenteil eingedrückt wird und somit einen Formschluss erhält; es können auch mehrere ineinandergeschobene dünnwandige Werkstücke gemeinsam rundgeknetet werden; der Zusammenhalt kann auch in einem Kraftschluss bestehen.
	Einhalsen	Fügen durch Engen derart, dass ein über ein Innenteil geschobenes Außenteil am Ende verengt wird.
	Sicken	Fügen durch Engen derart, dass ein Werkstück eine Sicke erhält, die in eine vorgesehene Vertiefung am zu fügenden Werkstück eingreift.

	Bördeln	Fügen durch Umformen derart, dass ein Ende eines rohrförmigen Werkstückes durch Borde mit dem zu fügenden Werkstück formschlüssig verbunden wird.
	Falzen	Fügen durch Umformen derart, dass an ihren Rändern vorbereitete Blechteile ineinandergelegt oder ineinandergeschoben werden und durch Umlegen der Ränder einen Formschluss erhalten.
	Wickeln, Umwickeln, Bewickeln	Fügen eines Innenteiles mit Band durch dessen fortlaufendes Biegen um das Werkstück.
	Verlappen	Fügen durch Umformen derart, dass das freie Ende eines durch ein Werkstück gesteckten flachen Teils oder überstehenden Lappens gebogen, z. B. Biegeverlappen, oder aus seiner Ebene herausgedreht wird, z. B. Drehverlappen, sodass ein Formschluss entsteht.
	Umformendes Einspreizen	Fügen durch Umformen derart, dass durch Einpressen oder Einwalzen eines Werkstückes dieses in einen Hohlraum des Gegenstückes verdrängt wird.
	Verpressen	Das Fügen zweier Seilenden oder einer Seilschlaufe mit Hilfe einer Presshülse, die beide Stränge umschließt und nach dem Verformen in einer Presse eine kraft- und formschlüssige Verbindung herstellt.
	Durchsetzfügen	Fügen von Werkstücken aus Blech-, Rohr- oder Profilteilen durch gemeinsames Durchsetzen in Verbindung mit Einschneiden und nachfolgendem Stauchen.
	Quetschen	Das Fügen eines Seils oder einer Litze mit einem Endstück, z. B. Seilschuh, Kabelschuh, Crimphülse usw., das das Seil oder die Litze umschließt und durch Verformen kraft- und formschlüssig mit diesem verbunden wird.
	Nieten	Fügen durch Stauchen eines bolzenförmigen Hilfsfügeteils.
	Hohlnieten	Fügen durch Umlegen überstehender Teile eines Hohlniets.
	Zapfennieten	Fügen durch Stauchen des zapfenförmigen Endes an einem der beiden Fügeteile.

	Hohlzapfennieten	Fügen durch Umlegen überstehender Teile des hohlzapfenförmigen Endes an einem der beiden Fügeteile.
	Zwischen-zapfennieten	Fügen durch Stauchen eines Zwischenzapfens an einem der beiden Fügeteile.
	Stanznieten	Fügen durch Einspreizen eines Hilfsfügeteils (z. B. Halbhohl- oder Vollstanzniet).
Montagegrundfunktion	Fügen	
Montageprozess	Fügen durch Schweißen	
Montagefähigkeiten	Pressschweißen durch festen Körper	Erstellung einer metallischen Verbindung durch Wärmeerzeugung (z.B. Stromfluss, Reibung) und Druckeinwirkung.
	Pressschweißen durch Flüssigkeit	Erstellung einer metallischen Verbindung durch Wärmeerzeugung (z.B. Stromfluss, Reibung) und Druckeinwirkung.
	Pressschweißen durch Gas	Erstellung einer metallischen Verbindung durch Wärmeerzeugung (z.B. Stromfluss, Reibung) und Druckeinwirkung.
	Pressschweißen durch elektrische Gasentladung	Erstellung einer metallischen Verbindung durch Wärmeerzeugung (z.B. Stromfluss, Reibung) und Druckeinwirkung.
	Pressschweißen durch Strahlung	Erstellung einer metallischen Verbindung durch Wärmeerzeugung (z.B. Stromfluss, Reibung) und Druckeinwirkung.
	Pressschweißen durch Bewegung von Masse	Erstellung einer metallischen Verbindung durch Wärmeerzeugung (z.B. Stromfluss, Reibung) und Druckeinwirkung
	Pressschweißen durch elektrischen Strom	Erstellung einer metallischen Verbindung durch Wärmeerzeugung (z.B. Stromfluss, Reibung) und Druckeinwirkung.
	Schmelzschweißen durch Flüssigkeit	Erstellung einer metallischen Verbindung allein im Schmelzfluss der Fügeflächen (ggf. Zusatzwerkstoff) ohne zusätzliche Druckeinwirkung.
	Schmelzschweißen durch Gas	Erstellung einer metallischen Verbindung allein im Schmelzfluss der Fügeflächen (ggf. Zusatzwerkstoff) ohne zusätzliche Druckeinwirkung.
	Schmelzschweißen durch elektrische Gasentladung	Erstellung einer metallischen Verbindung allein im Schmelzfluss der Fügeflächen (ggf. Zusatzwerkstoff) ohne zusätzliche Druckeinwirkung.

	Schmelzschweißen durch Strahlung	Erstellung einer metallischen Verbindung allein im Schmelzfluss der Fügeflächen (ggf. Zusatzwerkstoff) ohne zusätzliche Druckeinwirkung.
	Schmelzschweißen durch elektrischen Strom	Erstellung einer metallischen Verbindung allein im Schmelzfluss der Fügeflächen (ggf. Zusatzwerkstoff) ohne zusätzliche Druckeinwirkung.
Montagegrundfunktion	Fügen	
Montageprozess	Fügen durch Löten	
Montagefähigkeiten	Verbindungsweichlöten durch feste Körper	Verbindung von Werkstücken durch Stoffschluss.
	Verbindungsweichlöten durch Flüssigkeit	Verbindung von Werkstücken durch Stoffschluss.
	Verbindungsweichlöten durch Gas	Verbindung von Werkstücken durch Stoffschluss.
	Verbindungsweichlöten durch Strahl	Verbindung von Werkstücken durch Stoffschluss.
	Verbindungsweichlöten durch elektrischen Strom	Verbindung von Werkstücken durch Stoffschluss.
	Ofen Weichlöten	Verbindung von Werkstücken durch Stoffschluss.
	Verbindungshartlöten durch Flüssigkeit	Verbindung von Werkstücken durch Stoffschluss.
	Verbindungshartlöten durch Gas	Verbindung von Werkstücken durch Stoffschluss.
	Verbindungshartlöten durch elektrische Gasentladung	Verbindung von Werkstücken durch Stoffschluss.
	Verbindungshartlöten durch Strahl	Verbindung von Werkstücken durch Stoffschluss.
	Verbindungshartlöten durch elektrischen Strom	Verbindung von Werkstücken durch Stoffschluss.
	Verbindungshoch-temperaturlöten	Verbindung von Werkstücken durch Stoffschluss.
Montagegrundfunktion	Fügen	
Montageprozess	Fügen durch Kleben	
Montagefähigkeiten	Nasskleben	Kleben mit Klebstoffen, die durch Abkühlen oder Verdunsten von Lösungs- oder Dispersionsmitteln abbinden.
	Kontaktkleben	Kleben, bei dem beim Berühren scheinbar trockene Klebstofffilme unter Druckeinwirkung vereinigt werden.
	Aktivierkleben	Kleben, bei dem Klebstofffilme durch äußere Einwirkung klebfähig gemacht (aktiviert) werden.

	Haftkleben	Kleben, bei dem Klebstofffilme nach beliebiger Zeit schon unter geringem Druck haften.
	Reaktionskleben	Kleben mit Klebstoffen, die durch chemische Reaktion, z. B. durch Vernetzen, abbinden (Reaktionsklebstoff).
Montagegrundfunktion	Fügen	
Montageprozess	Textiles Fügen	
Montagefähigkeit	Textiles Fügen	
Montagegrundfunktion	Kontrollieren	
Montageprozess	Kontrollieren	
Montagefähigkeiten	Prüfen	Prüfen ist Feststellen, ob Körper vorgegebene Bedingungen erfüllt.
	Anwesenheit prüfen	Anwesenheit prüfen ist Feststellen, ob Körper in einem definierten Bereich vorhanden sind.
	Identität prüfen	Identität prüfen ist Feststellen, ob Körper vorgegebene Eigenschaften erfüllt.
	Form prüfen	Form prüfen ist Feststellen, ob Körper eine vorgegebene Form haben.
	Größe prüfen	Größe prüfen ist Feststellen, ob Körper eine vorgegebene Größe bzw. vorgegebene Abmessungen haben.
	Farbe prüfen	Farbe prüfen ist Feststellen, ob Körper oder bestimmte Körperflächen vorgegebene Farben haben.
	Gewicht prüfen	Gewicht prüfen ist Feststellen, ob Körper ein vorgegebenes Gewicht haben.
	Position prüfen	Position prüfen ist Feststellen, ob sich Körper an vorgegebenen Punkten in einem Bezugskoordinatensystem befinden.
	Orientierung prüfen	Orientierung prüfen ist Feststellen, ob Körper eine vorgegebene Orientierung im Hinblick auf ein vorgegebenes Bezugskoordinatensystem haben.
	Messen	Messen ist Feststellen eines Wertes als Vielfaches einer Bezugsgröße.
	Zählen	Zählen ist Feststellen einer Vielzahl von Körpern.
	Orientierung messen	Orientierung messen ist zahlenmäßiges Feststellen der Ist-Orientierung von Körpern in einem Bezugskoordinatensystem.
	Position messen	Position messen ist zahlenmäßiges Feststellen der Ist-Position von Körpern in einem Bezugskoordinatensystem.

Montagegrundfunktion	Justieren	
Montageprozess	Justieren	
Montagefähigkeiten	Justieren durch Einformieren	
	Justieren durch Umformen	
	Justieren durch Trennen	
	Justieren durch Fügen von Ausgleichsstellen	
	Justieren durch Einstellen	
	Justieren durch Nachbehandeln	
Montagegrundfunktion	Handhaben	
Montageprozess	Speichern	
Montagefähigkeiten	geordnetes Speichern	geordnetes Speichern ist das Aufbewahren geometrisch bestimmter Körper, wobei Orientierung und Position der Körper in allen Freiheitsgraden definiert sind.
	teilgeordnetes Speichern	Teilgeordnetes Speichern ist das Aufbewahren geometrisch bestimmter Körper, wobei Orientierung und Position der Körper nur in einem Teil ihrer Freiheitsgrade definiert sind.
	ungeordnetes Speichern	Ungeordnetes Speichern ist das Aufbewahren geometrisch bestimmter Körper, wobei Orientierung und Position der Körper in allen Freiheitsgraden beliebig sind.
Montagegrundfunktion	Handhaben	
Montageprozess	Menge verändern	
Montagefähigkeiten	Teilen	Teilen ist das Bilden von Teilmengen aus einer Menge.
	Vereinigen	Vereinigen ist das Bilden von Mengen aus Teilmengen.
	Abteilen	Abteilen ist das Bilden von Teilmengen definierter Größe oder Anzahl aus einer Menge.
	Zuteilen	Zuteilen ist das Bilden von Teilmengen definierter Größe oder Anzahl und das Bewegen dieser Teilmenge zu definierten Zielorten.
	Verzweigen	Verzweigen ist das Auflösen eines Mengenstromes in Teilmengenströme.
	Zusammenführen	Zusammenführen ist das Bilden eines Mengenstromes aus Teilmengenströmen.

	Sortieren	Sortieren ist das Zuordnen und Teilen einer Menge von unterschiedlichen Körpern nach bestimmten Merkmalsklassen (Sorten).
Montagegrundfunktion	Handhaben	
Montageprozess	Bewegen	
Montagefähigkeiten	Drehen	Drehen ist das Bewegen eines Körpers aus einer bestimmten in eine andere bestimmte Orientierung um eine durch einen körpereigenen Bezugspunkt verlaufende Achse. Die Position des Körpereigenen Bezugspunktes bleibt dabei unverändert.
	Schwenken	Schwenken ist das Bewegen eines Körpers aus einer vorgegebenen Orientierung und Position durch Rotation um eine körperferne Achse.
	Verschieben	Verschieben ist das Bewegen eines Körpers aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Position durch Translation entlang einer Geraden. Die Orientierung des Körpers bleibt dabei unverändert.
	Orientieren	Orientieren ist das Bewegen eines Körpers aus einer unbestimmten in eine vorgegebene Orientierung. Die Position des Körpers bleibt dabei außer Betracht.
	Positionieren	Positionieren ist das Bewegen eines Körpers aus einer unbestimmten in eine vorgegebene Position. Die Orientierung des Körpers bleibt außer Betracht.
	Ordnen	Ordnen ist das Bewegen von Körpern aus einer unbestimmten in eine vorgegebene Orientierung und Position bzw. Bewegungsrichtung.
	Führen	Führen ist das Bewegen von Körpern aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Position entlang einer definierten Bahn. Die Orientierung der Körper ist in jedem Punkt der Bewegung definiert.
	Fördern	Fördern ist das Bewegen von Körpern oder Fördergut aus einer beliebigen in eine andere beliebige Position. Bewegungsbahn und Orientierung der Körper während der Bewegung sind nicht notwendigerweise definiert.

	Weitergeben	Weitergeben ist das Bewegen von Körpern aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Position entlang einer nicht definierten Bahn. Der Orientierungsgrad der Körper bleibt dabei unverändert.
Montagegrundfunktion	Handhaben	
Montageprozess	Sichern	
Montagefähigkeiten	Halten	Halten ist das vorübergehende Sichern eines Körpers in einer bestimmten Orientierung und Position.
	Lösen	Lösen ist die Umkehrung des Haltens.
	Spannen	Spannen ist das vorübergehende Sichern eines Körpers in einer bestimmten Orientierung und Position unter Beteiligung von Kraftschluss
	Entspannen	Entspannen ist die Umkehrung des Spannens.
Montagegrundfunktion	Sonderoperationen	
Montageprozess	Sonderoperationen	
Montagefähigkeiten	Markieren	
	Erwärmen	
	Kühlen	
	Reinigen	
	Entgraten	
	Bedrucken	
	Abdecken	
	Abziehen	
	Auspacken	
	Ölen	
	Einsprühen	
	Abdichten	

Anhang D: Produkt- und Prozessmerkmale

Produktmerkmale				
Bauteilform	Bauteilgeometrie	Physikalische Eigenschaften	Ruheverhalten	Förderverhalten
Fließgut	Anschlag	Abkühldauer	Bearbeitungslage	Gleitfähigkeit
Flüssigkeit	Befestigungsmöglichkeiten	Anlieferungszustand	Einzelverhalten	Richtungsstabilität
Formelement	Charakteristische Abmessungen	Anzahl Prüfmerkmale	Hängefähigkeit	Rollfähigkeit
Schüttgut	Durchmesser	Belastbarkeit	Lagestabilität	Schüttfähigkeit
Stückgut	Freiraum für Werkzeug	Besondere Eigenschaften	Ordnungswahrscheinlichkeit	
Verhaltens-typ	Greifempfindlichkeit	Elastische Verformung	Ordnungszustand	
Wickelgut	Greifmöglichkeiten	Elektrische Leitfähigkeit	Sicherung des Ordnungszustandes	
Wirrgut	Größe der Bearbeitungsfläche	Empfindlichkeit	Standsicherheit	
	Größenklassen	Gewicht	Stapelfähigkeit	
	Hauptausdehnungen	Härte	Unordnungsgrad	
	Hauptträgheitsachsen	Korrosionsbeständigkeit	Verhaken	
	Hüllvolumen	Magnetismus	Verhaken im Verband	
	Innenkonturen	Oberflächenbeschaffenheit		
	Kontaktstellen	Qualitätsniveau		
	Kontur	Reibungskoeffizient		
	Modifikationselemente	Saugfähigkeit		
	Orientierung	Schlüpfrigkeit		
	Passungen	Schwerpunkt		
	Seitenverhältnisse	Steifheit		
	Schwerpunktlage	Streckgrenze		
	Stand- und Auflageflächen	Temperatur		
	Symmetrie	Umwelteinflüsse		
	Toleranzen	Verschmutzungsgrad		
	Zentriermöglichkeiten	Viskosität		
	Zugänglichkeit	Wärmeleitfähigkeit		
		Werkstoff		
		Zerbrechlichkeit		
		Zugfestigkeit		

Prozessmerkmale		
Bauteilorientierte Merkmale	Direkt prozessbestimmende Merkmale	Globale Merkmale
Anzahl Elemente/Teile	Abkühlzeit	Antriebleistung
Arbeitslage	Art des Bewegungsweges	Antriebsart
Art des Prozesshilfsmittel	Bahngeschwindigkeit	Automatisierungsgrad
Bauteilorientierung	Beschleunigung	Emissionen
Bauteilverbindungsart	Bewegungsweg	Energieart
Empfindlichkeit	Drehmoment	Erfassungsart
Formstabilität	Drehzahl	Funktion des Prozesses/Speichers
Greifmöglichkeiten	Kraftdauer	Genauigkeit
Nahtcharakteristik	Kraftverlauf	Hilfsstoffe nötig
Position	Prozessfrequenz	Losgröße
Viskosität	Prozessgeschwindigkeit	Menge der Prozesshilfsmittel
Vor- und Nachbehandlungen	Prozesskraft	Prozesshilfsmittel
	Prozesstemperatur	Prozessvolumen
	Prozessweg	Stückzahl
	Prozesszeit	Zusatzwerkstoffe nötig
	Richtungsart	
	Schwingungsamplitude	
	Umgebungstemperatur	
	Vor- und Nachbehandlungszeit	
	Vorrichtungskraft	
	Wegstrecke	

Anhang E: Workshop Lebenszyklusszenarien

Dieser Workshop dient der Erstellung von Stückzahlszenarien und somit Lebenszyklusverläufen eines Produkts oder einer Produktfamilie als Eingangsinformation für die Grobplanung modularer Montagesysteme und die Bewertung möglicher Ausbaustufenfolgen. Dabei orientiert sich das Vorgehen an der bereits bewährten Szenariomethodik. Der Ablauf gliedert sich in 2 große Abschnitte, die bei Standardvorgehensweise jeweils zwischen 3 und 4 Stunden Zeit in Anspruch nehmen.

Die Teilnehmer bestehen aus erfahrenen Montageplanern des Montagesystemherstellers, welche die notwendige Methodenkompetenz bezüglich der Anwendung der Szenariomethodik bereitstellen und aus geeigneten Mitarbeitern aus Marketing und Vertrieb, der Montageplanung sowie der Geschäftsleitung des späteren Anlagenbetreibers.

Im Folgenden ist eine Standardagenda abgebildet, die kundenspezifisch auf den jeweiligen Planungsfall hinsichtlich Inhalten und zeitlichen Vorgaben angepasst wird.

Agenda	
Abschnitt 1	3 Stunden 15 Minuten
Aufgabenanalyse	90 Minuten
Pause	15 Minuten
Einflussanalyse	90 Minuten
Abschnitt 2	4 Stunden
Trendprojektion	90 Minuten
Szenariobündelung	45 Minuten
Pause	15 Minuten
Szenariotransfer	90 Minuten

Agenda

Abschnitt 1

1.1 Aufgabenanalyse

Ziel: Generierung von Wissen über das Unternehmen, die Montage im speziellen und über den Lebenszyklusverlauf vergleichbarer Produkte.

Benötigte Informationen: Lebenszyklus eines vergleichbaren Produktes, ungefähre geplante Absatzmengen, falls vorhanden: geplanter Lebenszyklusverlauf.

Dauer: 2 Stunden

Vorgehensweise:

1. Unternehmen und Montage analysieren (Formblatt 1.1)
2. Vergleichbaren Produktlebenszyklus untersuchen (Formblatt 1.2)
3. Ableiten von Einflussfaktoren dieses Verlaufs (Formblatt 1.3)
4. Festlegen des Betrachtungszeitraums (Formblatt 1.3)

1.2 Einflussanalyse

Ziel: Definition von relevanten Schlüsselfaktoren für den zukünftigen Produktlebenszyklusverlauf

Benötigte Informationen: Gesammelte Einflussfaktoren aus 1.1

Dauer: 2 Stunden

Vorgehensweise:

1. Einflussfaktoren sammeln (Formblatt 2.1)
   - Überprüfung Relevanz alter Faktoren
   - Neue Einflussfaktoren über Brainstorming finden
   - Anhand Checkliste Suche abschließen
2. Untersuchung der Einflüsse zwischen den Einflussfaktoren mit Hilfe einer Einflussmatrix (Formblatt 2.2)
3. Schlüsselfaktoren auswählen (Formblatt 2.1)

Abschnitt 2

2.1 Trendprojektion

Ziel: Projektion der gesammelten Schlüsselfaktoren in die Zukunft

Dauer: 90 Minuten

Vorgehensweise:

1. Ist Zustand der Schlüsselfaktoren Beschreiben (Formblatt 3.1)
2. Beschreiben von 2 alternativen Entwicklungen anhand von mindestens 2 Zeiträumen (Formblatt 3.1)

2.2 Szenariobündelung

Ziel: Erstellung von Szenarios durch Zusammenfassen von Ausprägungen unterschiedlicher Schlüsselfaktoren

Dauer: 45 Minuten

Vorgehensweise:

1. Definieren einer prägnanten Beschreibung für die unterschiedlichen Ausprägungen der Schlüsselfaktoren
2. Intuitives bündeln von unterschiedlichen Ausprägungen zu Szenarien (Formblatt 4.1) und festlegen von Eintrittswahrscheinlichkeiten

2.3 Szenariotransfer

Ziel: Produktlebenszyklusstückzahlverläufe erstellen

Dauer: 45 Minuten

Vorgehensweise:

1. Auswirkungen der einzelnen Ausprägungen von Szenarien auf den bereits in Formblatt 1.3 ermittelten Verlauf ermitteln
2. Visualisierung dieser Auswirkungen und den daraus entstehenden Produktlebenszyklusverläufen in einem Diagramm (Formblatt 5.1)

Formblatt 1.1

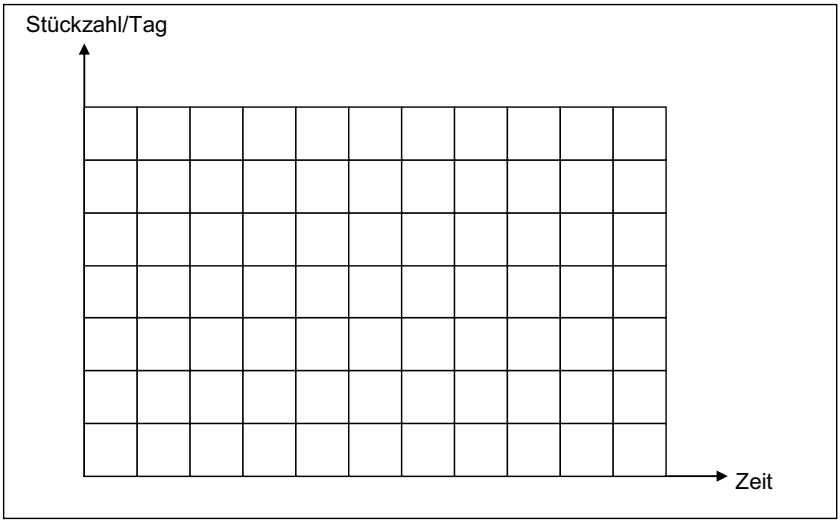
Die folgenden zwei Tabellen werden bezüglich des Unternehmens und der Montage ausgefüllt. Weitere Tabellen für eine Bereichserweiterung sind möglich.

	Unternehmen
Leistungsspektrum	
Leitbild	
Ziele und Strategien	
Stärken und Schwächen	
Rahmenbedingungen	

	Montage
Leistungsspektrum	
Leitbild	
Ziele und Strategien	
Stärken und Schwächen	
Rahmenbedingungen	

Formblatt 1.2

In folgendes Diagramm wird der Lebenszyklusverlauf des ausgewählten vergleichbaren Produktes eintragen.



Der Lebenszyklusverlauf wird in Phasen eingeteilt (maximal 5) und es werden Erklärungen für den Verlauf in den einzelnen Phasen gesucht. Dabei soll auf Besonderheiten, charakteristische Absatzwerte und besonders die Ursachen geachtet werden.

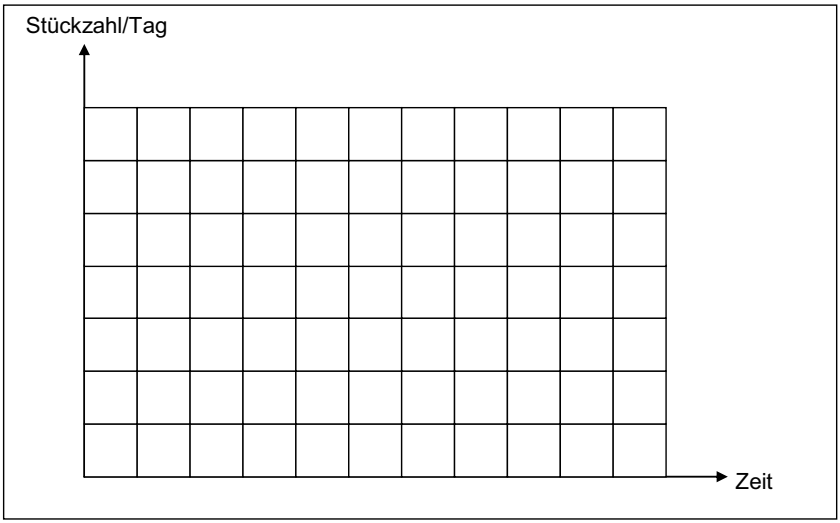
Phasen	Erklärung für Verlauf

Formblatt 1.3

Aus diesen Erklärungen werden einzelne Einflussfaktoren abgeleitet und in die Tabelle eingetragen.

Phase 1	Phase 2	Phase n
Einflussfaktoren:	Einflussfaktoren:	Einflussfaktoren:

Der entweder aus Marketing und Vertrieb bereits vorhandene oder intuitiv vom Team erstellte Lebenszyklusverlauf wird in folgendes Diagramm eingetragen.



Der Betrachtungszeitraum für die folgende Analyse muss definiert werden.

Betrachtungszeitraum:

Formblatt 2.1

Die ermittelten Einflussfaktoren aus Formblatt 1.3 werden eintragen und auf ihre Relevanz bezüglich des neuen Produktes untersucht.

Einflussfaktoren	Einflussbereich	Auch für neues Produkt relevant?

Die im Brainstorming und mit Hilfe der Checkliste ermittelten Einflussfaktoren werden in folgender Tabelle eintragen.

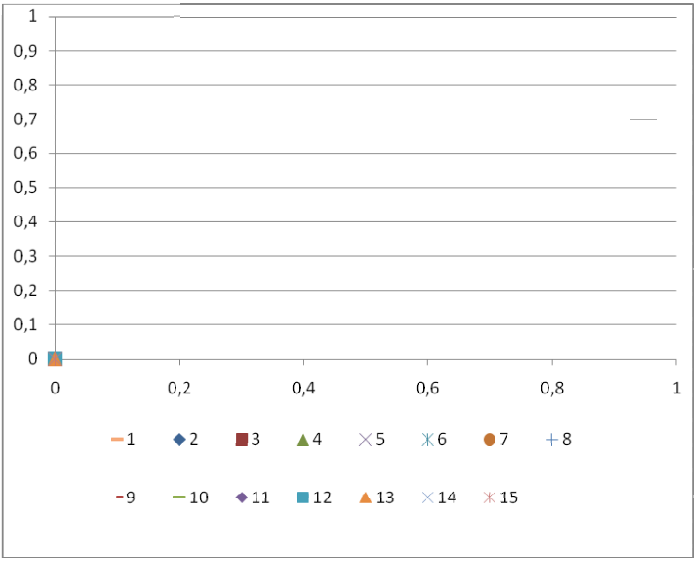
Einflussbereich	Neue Einflussfaktoren

Die in der Diskussion und mit der Einflussanalyse aus Formblatt 2.2 (s.u.) ausgewählten Schlüsselfaktoren werden in folgender Tabelle eingetragen.

Einflussbereich	Schlüsselfaktoren

Formblatt 2.2

Einflussmatrix **Wie stark beeinflusst Einflussfaktor (Zeile) Einflussfaktor (Spalte)** **0=kein Einfluss** **1=schwacher Einfluss** **2=mittlerer Einfluss**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	
1																0
2																0
3																0
4																0
5																0
6																0
7																0
8																0
9																0
10																0
11																0
12																0
13																0
14																0
15																0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	



Formblatt 3.1

In folgender Tabelle wird die Trendprojektion festgehalten. Dabei wird jeder einzelne Schlüsselfaktor in der IST-Situation sowie zwei Alternative Entwicklungen festgehalten.

Schlüsselfaktor	IST-Situation	Alter-nativen	Entwicklung Zeitraum 1	Entwicklung Zeitraum 2

Formblatt 4.1

Die gebildeten Szenariobündel werden in folgende Tabelle eingetragen. Dabei erfolgt die Beschreibung des Zustandes der Schlüsselfaktoren über einen prägnanten Begriff. Weiterhin werden die intuitiv in der Gruppe erarbeiteten Eintrittswahrscheinlichkeiten notiert.

Schlüsselfaktoren	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Wahrscheinlichkeiten			

Formblatt 5.1

Die Auswirkungen der Szenarien auf die einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus werden in folgender Tabelle eingetragen.

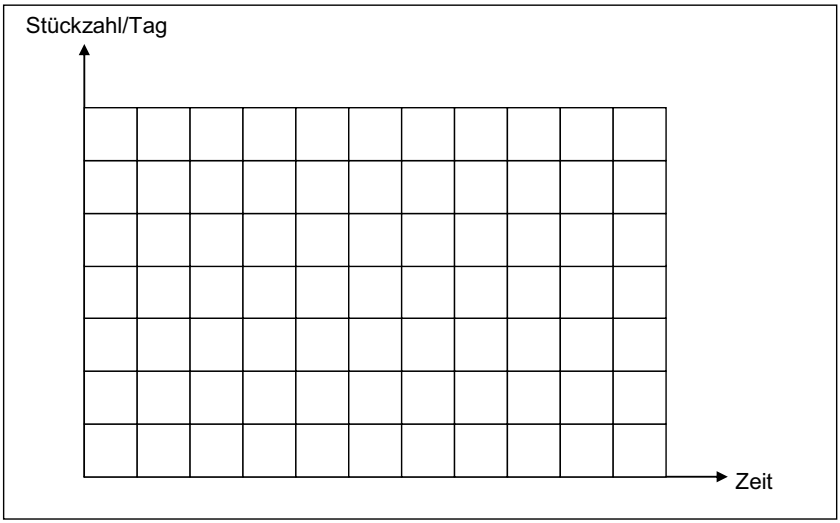
Szenario 1	Ausprägung	Auswirkungen Phase 1	Auswirkungen Phase 2	Auswirkungen Phase 3
Zusammenfassung				

Szenario 2	Ausprägung	Auswirkungen Phase 1	Auswirkungen Phase 2	Auswirkungen Phase 3
Zusammenfassung				

Formblatt 5.2

Szenario 3	Ausprägung	Auswirkungen Phase 1	Auswirkungen Phase 2	Auswirkungen Phase 3
Zusammenfassung				

Die Auswirkungen auf den in Formblatt 1.3 erstellten Verlauf werden in folgendem Diagramm visualisiert und ergeben die Produktlebenszyklusszenarien des Produktes.



Anhang F: Weiterführende Unterlagen zum Anwendungsfall

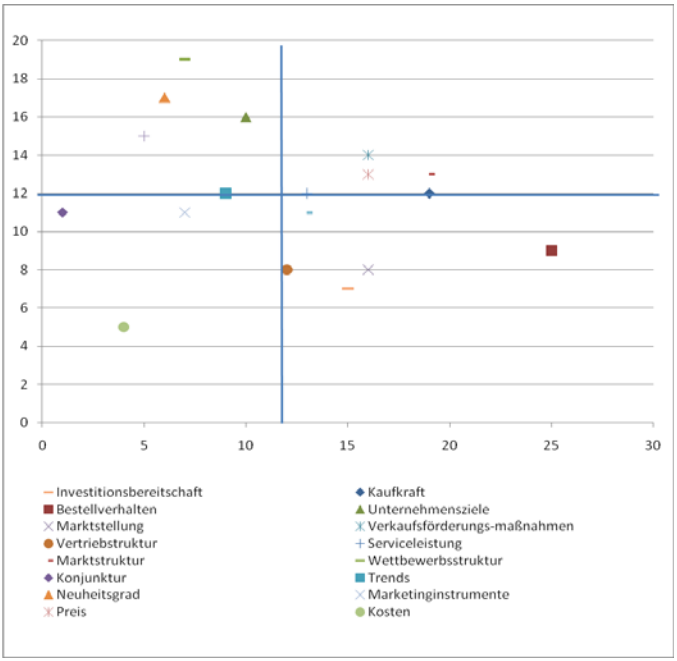


Abbildung 10-1 Aktiv-Passiv-Grid des Anwendungsfalls

Tabelle 10-1 Projektionen der Schlüsselfaktoren

Schlüsselfaktor	IST-Situation	Alter-native	Entwicklung 2 Jahre	Entwicklung 3-5 Jahre
Investitions-bereitschaft Werbekunden	Durch die Wirtschaftskrise sind nicht dringende Investitionen von vielen Unternehmen gestrichen worden. Daher momentan geringe Investitions-bereitschaft	A	Die Erholung aus der Krise erfolgt nur langsam und die Ausgaben für Werbemittel und Bürobedarf bleiben auf einem niedrigen Niveau	Auch nach der Krise steigt die Investitionsbereits chaft nicht deutlich an
		B	Durch die sich bessernde wirtschaftliche Lage steigt die Investitionsbereit-schaft deutlich an	Die Investitionsbereit-schaft in Werbemittel und Bürobedarf befindet sich auf einem hohen Niveau

Schlüsselfaktor	IST-Situation	Alter-native	Entwicklung 2 Jahre	Entwicklung 3-5 Jahre
Kaufkraft Endverbrau-cher	Die Kaufkraft ist relativ gut aber es wird weniger Geld in nicht zwingend benötigte Dinge investiert	A	Die Kaufkraft wird durch stagnierende Löhne leicht geschwächt	Kaufkraft bleibt auf geringem Niveau, da starke Konkurrenz aus Billiglohnländern keine Steigerung der Löhne ermöglicht
		B	Anstieg der Kaufkraft da Reallöhne wieder steigen	Die Kaufkraft steigt mit der verbesserten wirtschaftlichen Lage wieder deutlich an
Bestell-verhalten Großhandel	Vorsichtiges Bestellverhalten der Großhändler da in der aktuell schwierigen Situation kein finanzielles Risiko eingegangen wird	A	Großhändler geben wieder deutlich größere Bestellungen in Auftrag	Langfristige Abnahmeverträge sind wieder möglich
		B	Weiterhin vorsichtiges Bestellverhalten, Spekulative Produkte werden nur sehr ungern abgenommen	Bestellverhalten sehr kurzfristig und mit kleineren Volumina
Unternehmens-ziele	Deutliches Wachstum in Verbindung mit neuem Produkt	A	Das Produkt wird weiterhin als Chance für Wachstum gesehen und von der Geschäftsleitung unterstützt	Andere Produkte sollen den Wachstumsan-spruch des Unternehmens befriedigen
		B	Das Produkt bleibt wichtiges Element der Wachstumsstrategie	Das Produkt bleibt wichtiges Element der Wachstumsstrate gie
Marktstellung	Unternehmen hält enge Beziehungen zu seinen Kunden wird aber nicht als Marktführer oder Qualitätsführer/	A	Wachstum lässt Unternehmen zum Marktführer in Deutschland werden	Mit innovativen Produkten und Service wird das Unternehmen als deutlicher Marktführer in Deutschland gesehen

Schlüsselfaktor	IST-Situation	Alter-native	Entwicklung 2 Jahre	Entwicklung 3-5 Jahre
	Innovationsführer angesehen	B	Unternehmen kann sich neben seinen deutschen Mitbewerbern nicht eindeutig differenzieren	Ein anderes Unternehmen übernimmt Marktführerschaft in Deutschland
Vertriebs-struktur	Bestellungen werden teilweise über Großhändler sowie eigene Vertriebsbüros abgesetzt	A	Absatzorganisation bleibt erhalten	Absatzorganisation bleibt erhalten
		B	Neue Vertriebswege über B2C und B2B E-Commerce werden eingeführt	B2C und B2B haben sich etabliert
Marktstruktur	Stark umkämpfter Absatzmarkt mit vielen Standardprodukten und hohem Preisdruck durch Billiganbieter	A	Stark umkämpfter Absatzmarkt mit vielen Standardprodukten und hohem Preisdruck durch Billiganbieter	Stark umkämpfter Absatzmarkt mit vielen Standardpro-dukten und hohem Preisdruck durch Billiganbieter
Wettbewerbs-struktur	Viele Anbieter von Standardprodukten aus Billiglohnländern und andere mittelständische Unternehmen mit ähnlichem Angebot	A	Mittelständische Unternehmen auf dem Markt werden weniger. Wenige ähnliche Angebote	Mittelständische Unternehmen dünnen sich aus und nur wenige bleiben bestehen weiterhin Konkurrenten aus den Billiglohnländern
		B	Viele mittelständische Unternehmen sind mit ähnlichen Produkten und Leistungen auf dem Markt	Viele mittelständische Unternehmen sind mit ähnlichen Produkten und Leistungen auf dem Markt
Neuheitsgrad	Produkt nach heutigem Stand neuartig	A	Produkt wird durch modulartigen Aufbau und neuartige Inhalte sowie unterschiedlichen Varianten als neu empfunden	Neuheitsgrad sinkt, aber durch mangelnde gleichartige Produkte empfinden die Kunden es weiterhin als neuartiges Produkt

Schlüsselfaktor	IST-Situation	Alter-native	Entwicklung 2 Jahre	Entwicklung 3-5 Jahre
		B	Produkt wird als gewöhnliches Schreibtisch-accessoire und damit lediglich als zusätzliches neues Produkt der Firma gesehen	Produkt wird nicht mehr als neu empfunden
Marketing-instrumente	Keine Planung vorhanden	A	Umfangreiche Marketingaktivitäten	Marketingaktivi-täten stark verringert
		B	Geringe Marketingaktivitäten	Keine Marketing-aktivitäten mehr
Preis	Preis auf Niveau der deutschen Konkurrenten	A	Relativ stabile Preisentwicklung	Preise sinken leicht
		B	Preise sinken bereits zu Beginn aufgrund der starken Konkurrenz aus Billiglohnländern	Preis bleibt stabil auf niedrigem Niveau
Varianten	5 Varianten geplant	A	Keine Änderung der Varianten	Keine Änderung der Varianten
		B	Es werden zusätz-liche Varianten angeboten um den Absatz zu erhöhen	Weitere spezielle Varianten werden eingeführt
Übereinstim-mung mit Verbraucher-bedürfnissen	-	A	Neue Inhalte innerhalb des Schreitischacces-soires sowie Design mit modulartigem Aufbau werden positiv von den Kunden aufgenommen	Neue Inhalte innerhalb des Schreitischacces-soires sowie Design mit modulartigem Aufbau werden positiv von den Kunden aufgenommen
		B	Produkt wird als unnötig vom Kunden empfunden	Produkt wird als unnötig vom Kunden empfunden

Tabelle 10-2 Szenariotransfer Szenario 1

Szenario A	Ausprägung	Auswirkungen Phase 1	Auswirkungen Phase 2	Auswirkungen Phase 3
Investitions-bereitschaft	Ansteigend	Höhere Anfangsstück-zahl, stärkerer Anstieg	Länger, höheres Niveau	Höheres Niveau
Kaufkraft	Anstieg	Steilerer Anstieg	Höheres Niveau	Höheres Niveau
Bestellverhalten	Langfristig, mehr	Gleichmäßiger Verlauf, steilerer Anstieg	Höheres Niveau, länger	Fallend
Unternehmensziele	Produkt unwichtig	Flacher Anstieg	Geringeres Niveau	Stark fallend
Marktstellung	Marktführer	Höhere Anfangsstückzahl	Höheres Niveau	Langsam fallend
Vertriebsstruktur	Alte Vertriebs-wege	Verlauf ähnlich wie bisher	Verlauf ähnlich wie bisher	Verlauf ähnlich wie bisher
Marktstruktur	Umkämpft	Geringerer Anstieg	Geringeres Niveau	Steilerer Abfall
Wettbewerber	Weniger Mittelständler	Stärkerer Anstieg	Länger, höheres Niveau	Geringerer Abfall
Neuheitsgrad	Hoch	Steilerer Anstieg	Länger, höheres Niveau	-
Marketing-instrumente	Viel	Steilerer Anstieg	ähnliches Niveau	Ähnlicher Abfall
Preis	Konstant	-	Geringeres Niveau	Steilerer Abfall
Varianten	Leicht steigend	Steilerer Anstieg	Höheres Niveau	Geringerer Abfall
Übereinstimmung mit Verbraucher-bedürfnissen	Positiv	Steilerer Anstieg	Länger, höheres Niveau	Höheres Niveau
Zusammenfassung		Starker Anstieg auf hohes Niveau	Sehr hohes Niveau lang anhaltend	Deutlicher Abfall aber erst sehr spät, bis dahin trotzdem noch höheres Niveau

Tabelle 10-3 Szenariotransfer Szenario 2

Szenario 2	Ausprägung	Auswirkungen Phase 1	Auswirkungen Phase 2	Auswirkungen Phase 3
Investitionsbereitschaft	Ansteigend	Flacherer Anstieg	Geringeres Niveau	Geringeres Niveau
Kaufkraft	Anstieg	Flacherer Anstieg	Geringeres Niveau	Geringeres Niveau
Bestellverhalten	Langfristig, mehr	Sehr flacher Anstieg	Geringeres Niveau	Geringeres Niveau
Unternehmensziele	Produkt wichtig	Steilerer Anstieg	Höheres Niveau	Flacherer Abfall
Marktstellung	Nicht Marktführer	-	Geringeres Niveau, früherer Abfall	Stärkerer Abfall
Vertriebsstruktur	Neue Vertriebs-wege	Steilere Anstieg	Höheres Niveau	Höheres Niveau
Marktstruktur	Umkämpft	Geringerer Anstieg	Geringeres Niveau	Steilerer Abfall
Wettbewerber	Viele gleichartige Angebote	Flacherer Anstieg	Geringeres Niveau	Steilerer Abfall
Neuheitsgrad	Hoch	Steilerer Anstieg	Geringeres Niveau	Steilerer Abfall
Marketinginstrumente	Viel	Steilerer Anstieg	Höheres Niveau	Ähnlicher Abfall
Preis	Fallend	-	Höheres Niveau	Flacherer Abfall
Varianten	Konstant	-	Kürzere Phase	Flacherer Abfall
Übereinstimmung mit Verbraucherbedürfnissen	Unnötig	Flacherer Anstieg	Früher Abfall	Steilerer Abfall
Zusammenfassung		geringerer Anstieg typischer Verlauf	Mittleres Niveau kann sich nur kurz halten, früher Abfall	Gemäßigter Abfall aber bereits früh

Tabelle 10-4 Szenariotransfer Szenario 3

Szenario 3	Ausprägung	Auswirkungen Phase 1	Auswirkungen Phase 2	Auswirkungen Phase 3
Investitions-bereitschaft	gering	Flacherer Anstieg	Geringeres Niveau	Geringeres Niveau
Kaufkraft	Leichte Schwächung	Flacherer Anstieg	Geringeres Niveau	Geringeres Niveau
Bestellverhalten	vorsichtig	Sehr flacher Anstieg	Geringeres Niveau	Geringeres Niveau
Unternehmensziele	Produkt unwichtig	Flacherer Anstieg	Geringeres Niveau	Geringeres Niveau
Marktstellung	Nicht Marktführer	Flacherer Anstieg	Geringeres Niveau, leicht fallend	Geringeres Niveau, leicht fallend
Vertriebsstruktur	Alte Vertriebs-wege	Flacherer Anstieg	Geringeres Niveau	Geringeres Niveau
Marktstruktur	Umkämpft	Flacherer Anstieg	Geringeres Niveau, leicht fallend	Geringeres Niveau, leicht fallend
Wettbewerber	Viele gleichartige Angebote	Flacherer Anstieg, kürzere Phase	Geringeres Niveau, leicht fallend	Geringeres Niveau, nicht fallend
Neuheitsgrad	Gering	Flacherer Anstieg, kürzere Phase	Geringeres Niveau	Geringeres Niveau, nur leicht fallend
Marketing-instrumente	Wenig	Flacher Anstieg	Geringeres Niveau	Geringeres Niveau, nur leicht fallend
Preis	Fallend	-	Höheres Niveau	Höheres Niveau
Varianten	Konstant	-	Geringeres Niveau	Geringeres Niveau
Übereinstimmung mit Verbraucher-bedürfnissen	Unnötig	Flacherer Anstieg	Geringeres Niveau	Geringeres Niveau
Zusammenfassung		Nur sehr kurze Phase in der die Stückzahl nur geringfügig ansteigt	Absatz bleibt auf niedrigem Niveau und sinkt sogar noch weiter leicht ab	Absatz sinkt weiter leicht ab

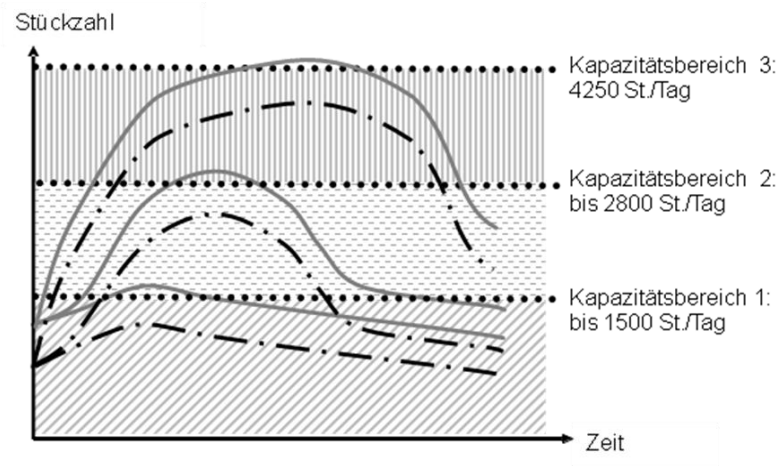


Abbildung 10-2 Kapazitätsbereiche im Anwendungsfall

Tabelle 10-5 Prozesszeiten

Fähigkeit	Ressourcen	Prozesszeit [s]
Auflegen/ Aufsetzen	Handarbeitsplatz	7
	Hybrides Einpressmodul	7
Einpressen/ Verstiften	Handarbeitsplatz	10
	Hybrides Einpressmodul	5
Auflegen/ Aufsetzen	Handarbeitsplatz	6
	Hybrides Einpressmodul	7
Position prüfen	Handarbeitsplatz	3
	Kamerastrecke	1
Einsetzen	Handarbeitsplatz	5
	Hybrides Einpressmodul	5
	Robotermodul	12
Einsetzen	Handarbeitsplatz	5
Nasskleben	Handarbeitsplatz	9
	Automatisches Klebemodul	15
Lackieren und Einsetzen	Robotermodul mit Lackierzelle	20
Teilgeordnetes Lagern	Handarbeitsplatz	10
	Automatisches Lager	30

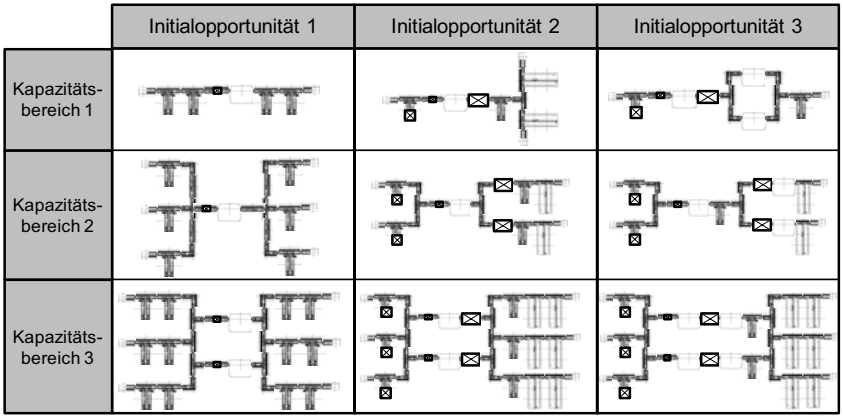


Abbildung 10-3 Layoutübersicht zu den Konfigurationen

Tabelle 10-6 Kennzahlen für die Kostenrechnung

Kennzahl	Wert
Stillstandsfreie Laufdauer	1757 Stunden (251 Tage à 7 Stunden)
Raumkostensatz	100 €/m²
Werkermischkostensatz	30 €/h
Energiekostensatz	0,1 €/kWh
Kalkulatorischer Zinssatz	5 %
Tagessatz Planer (indirekte Kosten)	500 €/Tag

Tabelle 10-7 Kosten indirekter Bereiche IO1

Indirekte Bereiche IO1	ASF 1		ASF 2		ASF 3		1→2	2→3	3→2	2→1
	Entstehungskosten [€]	Betriebskosten [€/Monat]	Entstehungskosten [€]	Betriebskosten [€/Jahr]	Entstehungskosten [€]	Betriebskosten [€/Jahr]	Rekonfigurationskosten [€]	Rekonfigurationskosten [€]	Rekonfigurationskosten [€]	Rekonfigurationskosten [€]
Arbeitsplanung										
Arbeitsablaufplanung										
Planungsvorbereitung	500		625				100	200	150	75
Stücklistenverarbeitung	1.000		1.500				250	350	200	200
NC-Programmierung	2.500	500	3.250	500		500	750	1.500	500	600
Montageablaufplanung	250		400				300	500	200	250
Arbeitssystemplanung										
Montagemittelplanung	-		-				-	-	-	-
Lagerplanung	350		400				150	250	125	100
Transportplanung	250		350				150	200	125	100
Personalplanung	375		500				250	325	150	175
Layoutplanung	125		200				100	150	50	75
Arbeitssteuerung										
Planung		750		1.250		1.750				
Festlegung Arbeitsvorrat										
Materialbereitstellung										
Informationsbereitstellung										
Personaleinsatzplanung										
Steuerung		1.250		1.750		2.500				
Reaktion auf Störungen										
Materialsteuerung										
Koordination										
Personaleinsatzsteuerung										
Überwachung		150		250		350				
Montagefortschritt										
Betriebs- und Maschinendatenerfassung		-								
Logistik										
Einlagerung		1.000		1.500		2.000				
Kommissionierung		1.000		1.500		2.000				
Transport		2.000		3.500		4.500				
Qualitätsmanagement										
Qualitätskosten										
Kosten der Schaffung, Erhaltung und Verbesserung der Potenzialqualität	500	300	600	400		500	500	500	-	-
Kosten der Qualitätsplanung	1.000		1.500				500	700	-	-
Kosten der Qualitätsregelung		200		300		450				
Kosten von Annahmeprüfungen		200		300						
Kosten von Zwischenprüfungen		-								
Kosten von Endprüfungen		150		250						
Abweichungskosten										
Behebung von Abweichungen		200		300		500				
Abweichungsbedingte Entsorgungskosten		100		150		225				
	6.850	**7.800**	**9.325**	**11.950**	**-**	**15.275**	**3.050**	**4.675**	**1.500**	**1.575**

Tabelle 10-8 Kosten indirekter Bereiche IO2

Indirekte Bereiche IO2	ASF 1		ASF 2		ASF 3		1→2	2→3	3→2	2→1
	Entstehungskosten [€]	Betriebskosten [€/Monat]	Entstehungskosten [€]	Betriebskosten [€/Jahr]	Entstehungskosten [€]	Betriebskosten [€/Jahr]	Rekonfigurationskosten [€]	Rekonfigurationskosten [€]	Rekonfigurationskosten [€]	Rekonfigurationskosten [€]
Arbeitsplanung										
Arbeitsablaufplanung										
Planungsvorbereitung	500		625				100	200	150	75
Stücklistenverarbeitung	1.000		1.500				250	350	200	200
NC-Programmierung	4.000	1.000	5.000	1.250		1.750	1.000	2.000	750	500
Montageablaufplanung	250		400				300	500	200	250
Arbeitssystemplanung										
Montagemittelplanung	-		-				-	-	-	-
Lagerplanung	350		400				150	250	125	100
Transportplanung	350		500				200	250	150	125
Personalplanung	300		400				250	325	150	175
Layoutplanung	125		200				100	150	50	75
Arbeitssteuerung										
Planung		750		1.250		1.750				
Festlegung Arbeitsvorrat										
Materialbereitstellung										
Informationsbereitstellung										
Personaleinsatzplanung										
Steuerung		1.750		2.250		3.000				
Reaktion auf Störungen										
Materialsteuerung										
Koordination										
Personaleinsatzsteuerung										
Überwachung		150		250		350				
Montagefortschritt										
Betriebs- und Maschinendatenerfassung										
Logistik										
Einlagerung		1.000		1.500		2.000				
Kommissionierung		1.000		1.500		2.000				
Transport		2.500		4.000		5.500				
Qualitätsmanagement										
Qualitätskosten										
Kosten der Schaffung, Erhaltung und Verbesserung der Potenzialqualität	600	300	700	400		500	600	600	-	-
Kosten der Qualitätsplanung	1.250		1.750				650	800	-	-
Kosten der Qualitätsregelung		300		300		450				
Kosten von Annahmeprüfungen		200		300						
Kosten von Zwischenprüfungen		-								
Kosten von Endprüfungen		150		250						
Abweichungskosten										
Behebung von Abweichungen		150		300		500				
Abweichungsbedingte Entsorgungskosten		100		150		225				
	8.725	**9.350**	**11.475**	**13.700**	**-**	**18.025**	**3.600**	**5.425**	**1.775**	**1.500**

Tabelle 10-9 Kosten indirekter Bereiche IO3

Indirekte Bereiche IO3	ASF 1		ASF 2		ASF 3		1→2	2→3	3→2	2→1
	Entstehungskosten [€]	Betriebskosten [€/Monat]	Entstehungskosten [€]	Betriebskosten [€/Jahr]	Entstehungskosten [€]	Betriebskosten [€/Jahr]	Rekonfigurationskosten [€]	Rekonfigurationskosten [€]	Rekonfigurationskosten [€]	Rekonfigurationskosten [€]
Arbeitsplanung										
Arbeitsablaufplanung										
Planungsvorbereitung	500		625				100	200	150	75
Stücklistenverarbeitung	1.000		1.500				250	350	200	200
NC-Programmierung	4.500	1.500	7.000	500		500	750	1.500	500	600
Montageablaufplanung	250		400				300	500	200	250
Arbeitssystemplanung										
Montagemittelplanung	-		-				-	-	-	-
Lagerplanung	350		400				150	250	125	100
Transportplanung	250		350				150	200	125	100
Personalplanung	250		350				250	325	150	175
Layoutplanung	125		200				100	150	50	75
Arbeitssteuerung										
Planung		750		1.250		1.750				
Festlegung Arbeitsvorrat										
Materialbereitstellung										
Informationsbereitstellung										
Personaleinsatzplanung										
Steuerung		2.000		2.500		3.250				
Reaktion auf Störungen										
Materialsteuerung										
Koordination										
Personaleinsatzsteuerung										
Überwachung		150		250		350				
Montagefortschritt										
Betriebs- und Maschinendatenerfassung										
Logistik										
Einlagerung		1.000		1.500		2.000				
Kommissionierung		1.000		1.500		2.000				
Transport		2.000		3.500		4.500				
Qualitätsmanagement										
Qualitätskosten										
Kosten der Schaffung, Erhaltung und Verbesserung der Potenzialqualität	500	300	600	400		500	500	500	-	-
Kosten der Qualitätsplanung	1.000		1.500				500	700	-	-
Kosten der Qualitätsregelung		200		300		450				
Kosten von Annahmeprüfungen		200		300						
Kosten von Zwischenprüfungen		-								
Kosten von Endprüfungen		150		250						
Abweichungskosten										
Behebung von Abweichungen		200		300		500				
Abweichungsbedingte Entsorgungskosten		100		150		225				
	8.725	**9.550**	**12.925**	**12.700**	**-**	**16.025**	**3.050**	**4.675**	**1.500**	**1.575**

Tabelle 10-10 Betriebskosten pro Jahr

	IO_1	IO_2	IO_3
Ausbaustufe 1	354.215 €	319.347 €	317.884 €
Ausbaustufe 2	639.709 €	556.687 €	530.219 €
Ausbaustufe 3	958.388 €	891.395 €	861.427 €

Tabelle 10-11 Stückkosten

	Phasen	IO_1	IO_2	IO_3
Alternativenfeld 1 (Szenario 1)		ASF1 [IO_1 Sz_1]	ASF2 [IO_2 Sz_1]	ASF3 [IO_3 Sz_1]
	Phase 1	1,222 €	1,108 €	1,074 €
	Phase 2	1,063 €	1,001 €	0,969 €
	Phase 3	1,039 €	0,911 €	0,868 €
	Durchschnitt	1,074 €	1,002 €	0,968 €
Alternativenfeld 2 (Szenario 2)		ASF4 [IO_1 Sz_2]	ASF5 [IO_2 Sz_2]	ASF6 [IO_3 Sz_2]
	Phase 1	1,365 €	1,324 €	1,316 €
	Phase 2	1,343 €	1,236 €	1,200 €
	Phase 3	1,215 €	1,131 €	1,132 €
	Durchschnitt	1,313 €	1,218 €	1,194 €
Alternativenfeld 3 (Szenario 3)		ASF7 [IO_1 Sz_3]	ASF8 [IO_2 Sz_3]	ASF9 [IO_3 Sz_3]
	Phase 1	1,152 €	1,063 €	1,057 €
	Durchschnitt	1,152 €	1,063 €	1,057 €

Tabelle 10-12 Fixkostenbelastungsübersicht

	IO_1	IO_2	IO_3
Alternativenfeld 1	6.153.398,15 €	5.668.851,95 €	5.463.575,85 €
Alternativenfeld 2	3.620.118,37 €	3.189.717,08 €	3.083.234,82 €
Alternativenfeld 3	2.487.497,80 €	2.245.984,00 €	2.236.064,40 €

Tabelle 10-13 Investitionsübersicht

	Zeitpunkt [Monat]	IO_1 [€]	IO_2 [€]	IO_3 [€]
Alternativenfeld 1	0	528.712,50 €	559.712,50 €	698.712,50 €
	12	463.137,50 €	976.637,50 €	973.137,50 €
Alternativenfeld 2	0	576.187,50 €	876.687,50 €	856.187,50 €
	11	528.712,50 €	559.712,50 €	698.712,50 €
Alternativenfeld 3	0	576.187,50 €	876.687,50 €	856.187,50 €

Tabelle 10-14 Beschreibung der Zielbereiche

Zielsystem				
Kriterien/ Punkte	4	3	2	1
Flexibilität bezüglich Varianten	Weitere Varianten ohne Umbau möglich	Weitere Varianten mit geringen Änderungen möglich	Weitere Varianten nur durch aufwändige Umstellungen	Weitere Varianten erfordern komplette Neuplanung
Flächenbedarf	Höchste Ausbaustufe <100m²	Höchste Ausbaustufe <120m²	Höchste Ausbaustufe <150m²	Höchste Ausbaustufe <200m²
Kosten-flexibilität	Geringste Fixkosten	>+10% zu 4	>+20% zu 4	>+30% zu 2
Mitarbeiter-orientiertes Potenzial	6 unter-schiedliche Arbeitsplätze	4 unter-schiedliche Arbeitsplätze	2 unter-schiedliche Arbeitsplätze	1 Arbeitsplatz
Strukturelle Wandlungs-fähigkeit	Strukturelle Anpassungen verursachen kaum Aufwand	Strukturelle Anpassungen verursachen wenig Aufwand	Strukturelle Anpassungen verursachen Aufwand	Strukturelle Anpassungen verursachen viel Aufwand
Verfügbarkeit	Keine bekannten Störungen bei allen Modulen	Bekannte Störungen bei wenigen Modulen	Bekannte Störungen bei einigen Modulen	Bekannte Störungen bei der Mehrzahl der Module

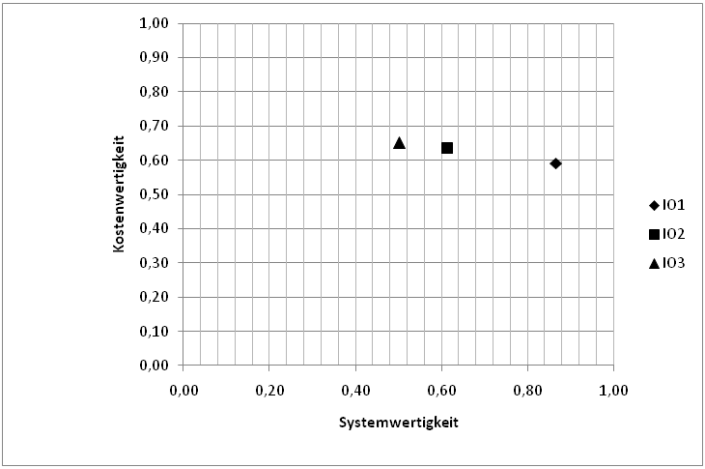


Abbildung 10-4 Gesamtwertigkeitsschaubild