FLEXIBILITÄTSOPTIMIERUNG ZUR AUSLASTUNGSSTEIGERUNG IM AUTOMOBILROHBAU

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Nils Wemhöner, M. Sc.,
aus Herford

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Günther Schuh
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Tag der mündlichen Prüfung: 22.12.2005

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

RWTH AACHEN

Fraunhofer Institut Produktionstechnologie

Berichte aus der Produktionstechnik

Nils Wemhöner

Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau

Herausgeber:
Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Dipl.-Wirt. Ing. W. Eversheim
Prof. Dr.-Ing. F. Klocke
Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Prof. h. c. T. Pfeifer
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. M. Weck
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. Schmitt

Band 12/2006
Shaker Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2006
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5111-1
ISBN-13: 978-3-8322-5111-6
ISSN 0943-1756

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen in einer Zeit, in der ich viel arbeiten, viel lernen und mit vielen Vorbildern zusammenarbeiten durfte. Das kreative, aber auch fordernde Umfeld am Institut, in dem stets praxisnahe und herausfordernde Problemstellungen zu bewältigen waren, hat mir ein vielseitiges und spannendes Aufgabengebiet eröffnet.

Bei den Menschen, die mich auf dem Weg zu dieser Arbeit in vielfältiger Weise unterstützt haben, möchte ich mich an dieser Stelle bedanken.

Zunächst danke ich Herrn Professor emeritus Walter Eversheim, der mir als Inhaber des Lehrstuhls für Produktionssystematik die Chance gab, am WZL zu promovieren. Er war mir sowohl als Lehrstuhlinhaber während meiner ersten Jahre am Werkzeugmaschinenlabor als auch nach seiner Emeritierung stets ein wichtiger Lehrer und Mentor.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Günther Schuh, dem Nachfolger von Professor Eversheim, für die wohlwollende Förderung und Unterstützung, die gewährten Freiräume und das Vertrauen in mich während meiner gesamten Zeit am Institut. Professor Schuh war im besten Sinne professoraler Förderer und Forderer, der kritisch hinterfragt, aber nie aufgezwungen hat. Sein Tatendrang schuf ein inspirierendes Umfeld. Seine Gedanken haben mir neue Wege eröffnet und mich wesentlich geprägt.

Herrn Professor Peter Nyhuis, Leiter des Instituts für Fabrikanlagen (IFA) der Universität Hannover, danke ich für die Übernahme des Korreferates und die eingehende Durchsicht der Dissertation. Für die Übernahme von Vorsitz und Beisitz in der Prüfungskommission danke ich Herrn Professor Stefan Pischinger und Herrn Professor Dirk Abel.

Meinen studentischen Mitarbeitern Fernanda Ribeiro Almeida Bispo, Dominic Brenner, Annette Eilenfeld, Thomas Gartzen, Torsten Jambor, Daniel Kupke und Kristin Schmelter gebührt mein großer Dank für die intensive, vertrauensvolle und stets zuverlässige Unterstützung meiner Tätigkeiten am Institut – und für Aufmunterung, wenn sie nötig war. Insbesondere Daniel Kupke danke ich sehr herzlich für seine Einsatzbereitschaft zu fast jeder Tages- und Nachtzeit.

Ich danke weiterhin meinen Studien- und Diplomarbeitern Christian Friedrich, Thomas Gartzen, Alexander Gulden und Daniel Kupke. Besonders Christian Friedrich hat mit seiner exzellenten Diplomarbeit, durch zahlreiche Ideen und intensive Diskussionen erheblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Der Gruppe Produktionsmanagement des DaimlerChrysler Forschungszentrums in Ulm, insbesondere Dr. Stephan Bürkner, Markus Friese und Jörg Roscher, bin ich Dank schuldig für zahlreiche Ideen zur Flexibilitätsbewertung.

Ferner möchte ich mich bei allen Kollegen und Freunden bedanken, die meine Arbeit am Lehrstuhl in verschiedenster Form begleitet und unterstützt haben. Hervorheben möchte ich Hendrik Riedel, Ingo Abels, Roland König, Stephan Ripp und Bastian Franzkoch.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern und meinen Großeltern, die meine Entwicklung entscheidend geprägt haben – ihr stetes Vertrauen in mich und meine Vorhaben, das Interesse an meinen Aktivitäten und die liebevolle Unterstützung, mit der sie meinen bisherigen Lebensweg begleitet haben, waren der Grundstein für meine wissenschaftlichen Arbeiten.

Der größte Dank schließlich gilt meiner Frau Julia für den Ansporn, für den Ausgleich, für den Rückhalt und für das Verständnis für viele entgangene gemeinsame Stunden. Ihr und unserem Sohn Wendelin danke ich für die nötigen Freiräume zum Erstellen dieser Arbeit, aber auch für die stete Erinnerung daran, dass das Leben nicht nur aus Produktionstechnik besteht. Ihre Liebe und ihre unentwegte Unterstützung auch in schwierigen Zeiten haben diese Arbeit erst möglich gemacht.

Aachen, im Dezember 2005

Nils Weinhöner

Inhaltsübersicht

Inhaltsverzeichnis ..... **III**

Abbildungsverzeichnis ..... **VIII**

Abkürzungsverzeichnis ..... **XI**

1 Einleitung **1**

1.1 Ausgangssituation 1

1.2 Problemstellung 3

1.3 Zielsetzung der Arbeit 4

1.4 Forschungskonzeption 6

1.5 Forschungsfrage 13

1.6 Aufbau der Arbeit 15

2 Flexibilität im Automobilrohbau **18**

2.1 Grundlegendes zu den Begriffen 18

2.2 Anforderungen an den Automobilrohbau 41

2.3 Flexibilität als Lösung 54

2.4 Fazit: Handlungsbedarf aus der Praxis 68

3 Optimierung der Flexibilität im Automobilrohbau **70**

3.1 Anforderungen an eine Methodik zur Flexibilitätsoptimierung 70

3.2 Kritische Würdigung bestehender Optimierungsansätze 78

3.3 Defizite bestehender Optimierungsansätze und Konkretisierung des Handlungsbedarfs 93

4 Entwurf einer Methodik zur Flexibilitätsoptimierung im Automobilrohbau **98**

4.1 Anwendungsraum 98

4.2 Annahmen 103

4.3 Rahmenwerk zur Flexibilitätsoptimierung 105

5 Detaillierung der Methodik **110**

5.1 Externe Forderungen an den Rohbau 110

5.2 Generierung von Szenarien für die Optimierung 114

5.3 Gestalt des Produktionssystems 121

5.4 Modellbildung 124

5.5 Simulation 132

5.6 Produktionssystemoptimierung 134

5.7 Ergebnisaufbereitung zur Entscheidungsunterstützung 155
5.8 Zusammenfassende Darstellung der Methodik 160
6 Anwendung und kritische Reflexion 164
6.1 Aufgabenstellung 165
6.2 Anwendung der Methodik und Ergebnisse 167
6.3 Bewertung und kritische Reflexion 186
7 Zusammenfassung 192
Literaturverzeichnis 196

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ..... **VIII**
Abkürzungsverzeichnis ..... **XI**
1 Einleitung **1**
1.1 Ausgangssituation 1
1.2 Problemstellung 3
1.3 Zielsetzung der Arbeit 4
1.4 Forschungskonzeption 6
1.5 Forschungsfrage 13
1.6 Aufbau der Arbeit 15
2 Flexibilität im Automobilrohbau **18**
2.1 Grundlegendes zu den Begriffen 18
2.1.1 Automobilrohbau 18
2.1.1.1 Einbindung des Rohbaus in die Automobilproduktion 18
2.1.1.2 Struktur eines Rohbaus 19
2.1.1.3 Prozesse im Rohbau 22
2.1.1.4 Bedeutung des Automobilrohbaus 24
2.1.1.5 Der Planungsprozess im Automobilrohbau 26
2.1.2 Flexibilität 27
2.1.2.1 Grundlegendes Begriffsverständnis 28
2.1.2.2 Arten von Flexibilität 33
2.2 Anforderungen an den Automobilrohbau 41
2.2.1 Gegenwärtige Trends in der Automobilindustrie 41
2.2.1.1 Produkttrends 41
2.2.1.2 Technologie- und Prozesstrends 44
2.2.1.3 Markttrends 46
2.2.2 Dynamik und Risiko 48
2.2.2.1 Dynamik der Nachfrage: Der Lebenszyklus eines Rohbaus 48
2.2.2.2 Nachfragerisiken 49
2.2.3 Resultierende Forderungen an den Automobilrohbau 51
2.3 Flexibilität als Lösung 54
2.3.1 Ziele und Nutzen von Flexibilität im Rohbau 54

2.3.2 Flexibilitätsarten im Rohbau ... 57
2.3.2.1 Nachfolgerflexibilität ... 59
2.3.2.2 Produktmixflexibilität ... 60
2.3.2.3 Volumenflexibilität ... 61
2.3.3 Flexible Rohbaukonzepte ... 62
2.3.3.1 Enabler für Flexibilität im Rohbau ... 62
2.3.3.2 Beispiel Modularisierung ... 64
2.3.3.3 Trends bei der Flexibilisierung des Automobilrohbaus ... 65
2.3.3.4 Beispiele für flexible Rohbauten ... 66
2.4 Fazit: Handlungsbedarf aus der Praxis ... 68
3 Optimierung der Flexibilität im Automobilrohbau ... 70
3.1 Anforderungen an eine Methodik zur Flexibilitätsoptimierung ... 70
3.1.1 Inhaltliche Anforderungen: Zweckeignung und Handlungsnutzen ... 72
3.1.2 Anforderungen an die Zielfunktion ... 73
3.1.2.1 Einbezug des Flexibilitätsbedarfs ... 73
3.1.2.2 Bewertung anhand der Zielsetzungen von Flexibilität ... 74
3.1.2.3 Multiple Bewertungskriterien ... 74
3.1.2.4 Ermittlung des Nutzens von Flexibilität ... 75
3.1.2.5 Monetäre Bewertungskriterien ... 75
3.1.2.6 Gegenüberstellung von Nutzen und Aufwand ... 75
3.1.2.7 Lebenszyklusbetrachtung ... 76
3.1.2.8 Risikobetrachtung ... 76
3.1.3 Methodische Anforderungen ... 76
3.1.3.1 Reproduzierbarkeit und Transparenz ... 76
3.1.3.2 Praxistauglichkeit ... 77
3.1.4 Zusammenfassung der Anforderungen ... 78
3.2 Kritische Würdigung bestehender Optimierungsansätze ... 78
3.2.1 Globale Optimierungsansätze für den Automobilrohbau ... 79
3.2.1.1 Simulationsuntersuchungen ... 79
3.2.1.2 Analytische Methoden ... 82
3.2.1.3 Zwischenfazit ... 83
3.2.2 Paradigmen und Strategien ... 83
3.2.3 Flexibilitätsoptimierung des Automobilrohbaus in der Praxis ... 84

3.2.4 Zwischenfazit: Ansätze zur Flexibilitätsoptimierung 86
3.2.5 Ansätze zur Berechnung einer Zielfunktion 86
3.2.5.1 Bewertungsmodell nach CHATTERJEE ET AL. 88
3.2.5.2 Bewertungsmodell nach JORDAN UND GRAVES 88
3.2.5.3 Bewertungsmodell nach SCHAUERHUBER 90
3.2.5.4 Bewertungsmodell nach SESTERHENN 91
3.2.5.5 Weitere Bewertungsansätze 91
3.2.5.6 Zwischenfazit: Handlungsbedarf bei der Flexibilitätsbewertung 92
3.3 Defizite bestehender Optimierungsansätze und Konkretisierung des Handlungsbedarfs 93
4 Entwurf einer Methodik zur Flexibilitätsoptimierung im Automobilrohbau 98
4.1 Anwendungsraum 98
4.1.1 Anwendung der Methodik im Fabrikplanungsprozess 98
4.1.2 Optimierungsdimensionen 99
4.1.3 Anwender 101
4.1.3.1 Rohbauplaner 102
4.1.3.2 Entscheider 102
4.2 Annahmen 103
4.3 Rahmenwerk zur Flexibilitätsoptimierung 105
4.3.1 Lösungsansatz 105
4.3.2 Lösungsgrobentwurf 106
4.3.3 Vorgehen zur Ausarbeitung 107
4.3.4 Detailstruktur der Optimierungsmethodik 108
5 Detaillierung der Methodik 110
5.1 Externe Forderungen an den Rohbau 110
5.1.1 Nachfragebezogene Forderungen 110
5.1.2 Unternehmensstrategiebezogene Forderungen 112
5.1.3 Weitere Forderungen 113
5.1.4 Zusammenfassung 113
5.2 Generierung von Szenarien für die Optimierung 114
5.2.1 Prognosebasierte Szenarien 117
5.2.1.1 Generierung auf Basis prognostizierter Ereignisse 117
5.2.1.2 Generierung auf Basis prognostizierter Verkaufszahlen 118

5.2.2 Empirische Standardszenarien ... 119
5.2.3 Theoretische Standardszenarien ... 121
5.3 Gestalt des Produktionssystems ... 121
5.4 Modellbildung ... 124
5.4.1 Zweck der Modellbildung ... 125
5.4.2 Betrachtungsbereich des Modells ... 126
5.4.3 Attribute des Modells: Morphologie der Lösungselemente ... 126
5.4.3.1 Produktallokation ... 126
5.4.3.2 Wiederverwendungsgrad ... 126
5.4.3.3 Technische Kapazitäten ... 127
5.4.3.4 Organisatorische Kapazitäten ... 127
5.4.3.5 Fertigungsfluss ... 127
5.4.3.6 Kostenstruktur ... 128
5.4.3.7 Anpassungszustände ... 130
5.5 Simulation ... 132
5.6 Produktionssystemoptimierung ... 134
5.6.1 Simulationsauswertung als Basis für die Optimierung ... 136
5.6.1.1 Kapazitätsauswertung ... 137
5.6.1.2 Monetäre Auswertung ... 138
5.6.1.3 Risikoauswertung: Darstellung von Unsicherheiten ... 139
5.6.1.4 Das Flexibilitätsfenster ... 141
5.6.2 Standardablauf zur Optimierung ... 144
5.6.2.1 Schritt 1: Grobe Optimierung der Kapazitäten ... 144
5.6.2.2 Schritt 2: Optimierung der Betriebsmodi ... 146
5.6.2.3 Schritt 3: Optimierung der Anpassungspfade über den Lebenszyklus des Produktionssystems ... 147
5.6.2.4 Schritt 4: Auswertung ... 148
5.6.2.5 Schritt 5: Detaillierte Optimierung der Kapazitäten ... 148
5.6.2.6 Schritt 6: Weitere Optimierung der Konzeptalternativen ... 148
5.6.3 Spezifische Optimierungsverfahren ... 148
5.6.3.1 Analyse von Karossenpfaden durch die Produktion ... 149
5.6.3.2 Analyse von Anpassungspfaden des Produktionssystems ... 149
5.6.3.3 Theoretische Standardszenarien ... 150
5.6.3.4 Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse ... 153

5.7 Ergebnisaufbereitung zur Entscheidungsunterstützung 155
5.7.1 Entscheidungsfindung mit dem Flexibilitätsfenster 156
5.7.1.1 Indifferente Entscheidungssituationen 156
5.7.2 Nutzwertanalyse 158
5.7.3 Stresstests 160
5.8 Zusammenfassende Darstellung der Methodik 160
6 Anwendung und kritische Reflexion 164
6.1 Aufgabenstellung 165
6.2 Anwendung der Methodik und Ergebnisse 167
6.2.1 Modellierung des Flexibilitätsbedarfs 168
6.2.2 Modellierung und erste Optimierung der Rohbaukonzepte 170
6.2.3 Simulation und Auswertung 176
6.2.4 Optimierung 177
6.2.5 Ergebnisaufbereitung und Entscheidung 182
6.3 Bewertung und kritische Reflexion 186
6.3.1 Bewertung im Anwendungszusammenhang 187
6.3.2 Kritische Reflexion 189
7 Zusammenfassung 192
Literaturverzeichnis 196

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Wissenschaftssystematik 6
Abbildung 1-2: Forschungsmethodologisches Vorgehen 10
Abbildung 1-3: Erster Entwurf des heuristischen Bezugsrahmens 11
Abbildung 1-4: Strategie angewandter Forschung und Aufbau der Arbeit 15
Abbildung 2-1: Einbindung des Rohbaus in eine Automobilfabrik 19
Abbildung 2-2: Struktur eines Rohbaus 20
Abbildung 2-3: Fischgräten-Rohbau 20
Abbildung 2-4: Layout eines Rohbaus am Beispiel der MERCEDES-BENZ C-Klasse, Bremen 21
Abbildung 2-5: Layout eines Zusammenbaus (Ausschnitt) am Beispiel des BMW 5er, Dingolfing 22
Abbildung 2-6: Framingstation mit Spannrahmen (Jigs) 23
Abbildung 2-7: Anteil des Rohbaus an den Herstellungskosten eines PKW 25
Abbildung 2-8: Veränderungstypen nach WIENDAHL 33
Abbildung 2-9: Strukturierung der Flexibilitätsarten nach SETHI UND SETHI 38
Abbildung 2-10: Nachfrageklassifizierung nach WIENDAHL 40
Abbildung 2-11: Steigende Modellvielfalt bei MERCEDES-BENZ 46
Abbildung 2-12: Entwicklung der durchschnittlichen Dauer eines Modell-Lebenszyklus' 47
Abbildung 2-13: Typischer Verlauf der Nachfrage über den Produktlebenszyklus 49
Abbildung 2-14: Risiken für produzierende Unternehmen nach ZIEGENBEIN 50
Abbildung 2-15: Konkurrierende Ziele der Produktionssteuerung nach WIENDAHL 51
Abbildung 2-16: Automobilproduktion deutscher Hersteller im In- und Ausland 52
Abbildung 2-17: Resultierende Forderungen an den Rohbau 53
Abbildung 2-18: Auslastung flexibler und nicht flexibler Automobilfabriken in den U.S.A. 55
Abbildung 2-19: Abnehmender Grenznutzen von Flexibilität 56
Abbildung 2-20: Flexibilität in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen und Systemzielen 56
Abbildung 2-21: Forderungen an den und relevante Flexibilitätsarten im Rohbau 58
Abbildung 2-22: Rahmenkonzept für Flexibilität nach CHANG 58

Abbildung 2-23: Beispiel für eine linienübergreifende Produktallokation 61
Abbildung 2-24: Enabler für Flexibilität im Rohbau 63
Abbildung 2-25: Modulares Layout eines Rohbaus 64
Abbildung 2-26: Anzahl der produzierten Modelle in europäischen Automobilfabriken 65
Abbildung 2-27: Durchschnittliche Anzahl der Derivate pro Linie 66
Abbildung 2-28: Wettbewerbsvergleich relevanter Flexibilitätsarten im Rohbau 67
Abbildung 2-29: Flexibilitätsarten im Rohbau sowie deren Bestimmungsgrößen 68
Abbildung 3-1: Anforderungen an die Optimierungsmethodik 78
Abbildung 3-2: Vor- und Nachteile von Simulationsverfahren und analytischen Methoden 82
Abbildung 3-3: Das St. Galler Management-Konzept 83
Abbildung 3-4: Produktallokationen nach JORDAN UND GRAVES 89
Abbildung 3-5: Anforderungen an die Zielfunktion und Erfüllungsgrad existierender Bewertungsmodelle 92
Abbildung 3-6: Einflussgrößen bei der Gestaltung eines Automobilrohbaus 94
Abbildung 3-7: Praxisanforderungen an eine Methodik zur Flexibilitätsoptimierung 95
Abbildung 3-8: Anforderungen an die Zielfunktion zur Flexibilitätsoptimierung 96
Abbildung 3-9: Anforderungen an die Bewertung und Optimierung 97
Abbildung 4-1: Unterschiedliche Rohbaukonzepte (schematisches Beispiel) 100
Abbildung 4-2: Erlaubte und nicht erlaubte Pfade durch den Rohbau (Beispiel) 100
Abbildung 4-3: Mögliche Rohbaukonzepte (Beispiele) 101
Abbildung 4-4: Rahmenkonzept der Methodik zur Flexibilitätsoptimierung 107
Abbildung 4-5: Struktur der Methodik zur Flexibilitätsoptimierung 108
Abbildung 5-1: Der Szenarienbegriff (am Beispiel Absatzzahlen) 116
Abbildung 5-2: Wahrscheinlichkeitskorridor der Produktnachfrage 119
Abbildung 5-3: Parametriertes Lebenszyklusmodell 120
Abbildung 5-4: Übersicht der grundlegenden Simulationsauswertungen 137
Abbildung 5-5: Wahrscheinlichkeitsverteilung am Beispiel Stückkosten 139
Abbildung 5-6: Das Flexibilitätsfenster 143
Abbildung 5-7: Beispiele für ISO-NPV-Linien im Flexibilitätsfenster 157
Abbildung 5-8: Methodik zur Flexibilitätsoptimierung von Rohbaukonzepten 160
Abbildung 6-1: Übersicht der im Fallbeispiel betrachteten Modelle 165

Abbildung 6-2: Übersicht der im Fallbeispiel betrachteten Rohbaukonzepte 166
Abbildung 6-3: Wichtige Kenngrößen der im Fallbeispiel betrachteten Rohbaukonzepte 167
Abbildung 6-4: Abbildung des Flexibilitätsbedarfs im ScenarioGenerator 169
Abbildung 6-5: Definition der Linienstruktur 170
Abbildung 6-6: Definition der Produktallokation mit Hilfe der Fähigkeitsmatrix 171
Abbildung 6-7: Definition der Materialflussrouten und Routenprioritäten 172
Abbildung 6-8: Anpassungszustände des Rohbaukonzeptes 2 173
Abbildung 6-9: Kostenstruktur des Rohbaukonzeptes 2 174
Abbildung 6-10: Optimierte Kapazitäten der Zusammenbauten des Rohbaukonzeptes 2 175
Abbildung 6-11: Generierung der Anpassungspfade 176
Abbildung 6-12: Ermittlung der Stückzahlverteilung 177
Abbildung 6-13: Produktionsvolumen in den Zusammenbauten 178
Abbildung 6-14: Auslastungen in den Zusammenbauten 179
Abbildung 6-15: Kenngrößen der Kapazitätsbewertung für Konzept 2 179
Abbildung 6-16: Optimierte Kapazitäten des Rohbaukonzeptes 2 180
Abbildung 6-17: Anpassungspfade der Konzepte 1 und 2 181
Abbildung 6-18: Histogramm der Vergleichsstückkosten für Konzept 2 183
Abbildung 6-19: Monetäre Kenngrößen für Konzept 2 183
Abbildung 6-20: Kennzahlen der betrachteten Konzeptalternativen 184
Abbildung 6-21: Flexibilitätsfenster der betrachteten Investitionsalternativen 185

Abkürzungsverzeichnis

AGV	automatic guided vehicle
AHP	analytic hierarchy process
C-BAL	Circulation Body Assembly Line (MAZDA)
CFK	Carbonfaserverstärkte Kunststoffe
DIN	Deutsches Institut für Normung
FBL	Flexible Body Line (TOYOTA)
IBAS-Rohbau	Intelligent Body Assembly System (NISSAN)
IT	Informationstechnologie
LicoPro	Lifecycle design for global collaborative production (EU-Forschungsprojekt IST-2001-37603)
MAG-Schweißen	Metall-Aktiv-Gas-Schweißen
MIG-Schweißen	Metall-Inert-Gas-Schweißen
MIG-Löten	Metall-Inert-Gas-Löten
NPC	net present cost
NPV	net present value
OEM	original equipment manufacturer
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (Aachen)
SUV	sport utility vehicle
WZL	Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der RWTH Aachen

1 Einleitung

Automobilproduzenten sehen sich derzeit der Herausforderung gegenüber, eine wachsende Anzahl von Marktnischen mit geringen Absatzvolumina bedienen zu müssen. Eine Möglichkeit, dennoch eine kostengünstige Fertigung zu gewährleisten, besteht in der Flexibilisierung sowie der Steigerung der Wandlungsfähigkeit der Produktionssysteme. Dabei gilt es, sowohl auf schwankende Absatzzahlen reagieren zu können, als auch die Herstellung von Nachfolge- bzw. ähnlichen Produkten auf den gleichen Produktionsanlagen zu ermöglichen.

Einer erhöhten Flexibilität und Wandlungsfähigkeit stehen jedoch zumeist höhere Investitionen und Betriebskosten der Produktionsanlagen gegenüber; dies gilt insbesondere für kostenintensive Fertigungsbereiche wie den Rohbau. Daher müssen Art und Ausmaß der zu implementierenden Flexibilität und Wandlungsfähigkeit optimal auf Unternehmen und Produktionsaufgabe abgestimmt sein. Außerdem muss die Vorteilhaftigkeit von Investitionen in Flexibilität und Wandlungsfähigkeit vor einer Umsetzung nachgewiesen werden. Daher soll mit der vorliegenden Arbeit eine Methodik entwickelt werden, die unterschiedliche Fertigungskonzepte im Automobilrohbau hinsichtlich ihrer Flexibilität und des zu erwartenden Nutzens bewertet und optimiert und damit sowohl Rohbauplaner als auch Entscheider bei der Planung flexibler Produktionsanlagen unterstützt.

1.1 Ausgangssituation

Die deutsche Automobilindustrie ist mit etwa 5,5 Mio. produzierten PKW und einem Umsatz von 209 Mrd. Euro im Jahr 2004 nicht nur der weltweit drittgrößte Hersteller von Automobilen, sondern mit einer Beschäftigtenzahl von 773.000 Mitarbeitern[1] auch der größte Arbeitgeber in Deutschland[2]. Über 80 % des gesamten deutschen Außenhandelsüberschusses von 95 Mrd. Euro entfallen auf automobile Erzeugnisse[3]. Maßgebliche Innovationen der Produktionsgestaltung wurden vielfach zuerst in der Automobilindustrie umgesetzt, bevor sie auch auf andere Industriezweige übertragen wurden, wie beispielsweise das Prinzip schlanker Produktionen oder die Optimierung des Arbeitskräfteeinsatzes durch progressive Arbeitszeit- und Betriebszeitmodelle. Dies alles macht den Automobilbau zu einer Schlüsselindustrie in Deutschland.

---

1 vgl. VDA: Auto Jahresbericht 2004, 2004, S. 202ff.

2 Der Anteil der (direkt oder indirekt) in der deutschen Automobilindustrie Beschäftigten an den Beschäftigten in der Gesamtindustrie hat sich im Laufe der letzten zehn Jahre von 9,5 auf 12,9 Prozent stetig erhöht; vgl. ebd., S. 204.

3 ebd., S. 205.

Gegenwärtig unterliegt die Automobilindustrie einer Reihe weitreichender Veränderungen. Neben einem andauernden Konzentrationsprozess auf der Herstellerseite[4] ist der Automobilbau auf der Nachfrageseite vor allem durch zwei Trends gekennzeichnet: die zunehmende Modellvielfalt durch neu entstehende Produktnischen wie beispielsweise Minivans oder SUVs[5] auf der einen und immer kürzere Lebenszyklen der Produkte[6] auf der anderen Seite. Beim Automobilhersteller DAIMLERCHRYSLER AG zum Beispiel stieg die Anzahl neu eingeführter PKW-Modelle der Marke MERCEDES-BENZ in den letzten 15 Jahren von durchschnittlich einem neuen Modell auf derzeit 2,5 Modelle pro Jahr[7]; zugleich verkürzte sich die durchschnittliche Dauer des Produktlebenszyklus' eines Fahrzeugs von ehemals neun auf gegenwärtig fünf bis sieben Jahre[8]. Da der Gesamtabsatz von Neufahrzeugen im gleichen Zeitraum weitgehend konstant blieb, folgt hieraus unmittelbar, dass die Modelle in immer kleineren Stückzahlen gefertigt werden müssen[9].

Zusätzlich sehen sich die Automobilhersteller mit erheblichen Planungsunsicherheiten konfrontiert. Grundlage für alle Planungs- und Dimensionierungsaufgaben der Automobilproduktion ist die prognostizierte Nachfrage für die einzelnen Modelle über deren Produktlebenszyklus[10]. Allerdings stimmen die realisierten Absatzzahlen in den seltensten Fällen mit den von der strategischen Programmplanung und vom Vertrieb erstellten Prognosen überein. Ein Vergleich historischer Daten zeigt, dass die zum Zeitpunkt der Grobplanung einer Automobilfertigung verfügbaren Absatzprognosen von den letztlich eingetretenen Verkaufszahlen um bis zu 40 % sowohl nach oben als auch nach unten abweichen können[11]. Eine Folge unter anderem dieser Planungsunsicherheiten ist, dass die Auslastung von Rohbauten[12] im Durchschnitt bei unter 50 % liegt[13]. Bei Investitionsvolumina für einen typischen Automobilrohbau von mehreren hundert Millionen Euro[14] führt das zu enormen Kosten.

---

4 vgl. Burke *et al.*: Flexible Fertigung, 2003, S. 3.

5 vgl. Köpcke, Küppers: Skalierbare Karosserie, 2003, S. 2.

6 vgl. u. a. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 2, und Nilsson, Nordahl: Making Manufacturing Flexibility Operational, 1995, S. 4.

7 vgl. Burke *et al.*: Flexible Fertigung, 2003, S. 6.

8 vgl. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 5.

9 Darüber hinaus fordern die Kunden Fahrzeuge nach ihren Ausstattungsspezifikationen bei minimaler Lieferzeit; vgl. Köpcke, Küppers: Skalierbare Karosserie, 2003, S. 3.

10 vgl. DaimlerChrysler: Intranetsite des "Kompetenzfeld Rohbauplanung", 2004.

11 vgl. Muriel *et al.*: Impact of Partial Manufacturing Flexibility, 2003, S. 12.

12 über ihren gesamten Lebenszyklus betrachtet

13 vgl. Fleiner: Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Rohbaualternativen, 2003, S. 14.

14 Die Investitionskosten sind dabei annähernd proportional zur Kapazität des Rohbaus: Als Faustregel lässt sich mit Kosten von ca. 1 Mio. Euro pro pro Schicht produziertem Fahrzeug rechnen (vgl. ebd., S. 13).

Um trotz dieser Entwicklungen weiterhin wirtschaftlich konkurrenzfähige Fahrzeuge anbieten zu können, muss die Automobilproduktion flexibler werden[15]. Dies gilt insbesondere für kostenintensive Produktionsabschnitte mit hohen Anfangsinvestitionen wie den Karosserierohbau[16], da es vor allem in diesen Bereichen erforderlich ist, die Anlageninvestitionen auf möglichst große Produktionsstückzahlen zu verteilen, um die Stückkosten zu senken und Investitionsrisiken zu reduzieren.

Im Karosserierohbau ist die Fertigung der Rohkarossen auf hochautomatisierten solitären Einzellinien seit den sechziger Jahren Stand der Technik[17]; mit einem Automatisierungsgrad von über 90 % ist der Rohbau das Gewerk mit der geringsten Flexibilität[18]. Ein Nachteil solitärer Konzepte ist vor dem beschriebenen Hintergrund offenkundig: Die Auslastung und somit Wirtschaftlichkeit der Anlagen ist unmittelbar von der Nachfrage abhängig, Stückzahlschwankungen können nicht ausgeglichen werden. Angestoßen durch japanische Unternehmen wie Nissan[19] und Toyota[20] bemühen sich mehr und mehr Automobilhersteller darum, flexible Rohbaukonzepte in ihren Fabriken umzusetzen[21]. Eine erhöhte Flexibilität ermöglicht den Automobilbauern sowohl, eine größere Modellvielfalt auf ihren Produktionseinrichtungen herzustellen[22], als auch, sich gegen die Unsicherheiten der Umwelt abzusichern[23].

Es gilt als unbestritten, dass die Flexibilisierung der Produktion eine wichtige Aufgabenstellung ist und ihre Bedeutung in der Zukunft noch zunehmen wird[24].

1.2 Problemstellung

Einer Umsetzung von erhöhter Flexibilität in der Produktion stehen jedoch die damit verbundenen Investitionen für Produktionsmittel entgegen, da diese zumeist signifikant höher

---

15 vgl. Wallentowitz *et al.*: Technologie-Trends in der Automobilindustrie, 2002, S. 175, Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 1, sowie Nilsson, Nordahl: Making Manufacturing Flexibility Operational, 1995, S. 4.

16 Die hier entstehenden Kosten besitzen außerdem eine hohe Relevanz für Automobil-OEMs: Auf den Rohbau entfallen ca. 15-20 % der Produktionskosten eines Automobils; 80 % der Wertschöpfung des body in white (Rohkarosserie) liegen beim OEM selbst. Vgl. Bleines, Nestle: Idealrohbau, 2004, S. 6.

17 vgl. Shimokawa *et al.*: Automobile Assembly, 1997, S. 22f.

18 vgl. Fleiner: Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Rohbaualternativen, 2003, S. 4, sowie Tanase *et al.*: Production of the NSX at Honda: An Alternative Direction for Assembly Organization, 1997, S. 111.

19 NISSAN IBAS (Intelligent body assembly system), vgl. Naitoh *et al.*: Intelligent Body Assembly System, 1997, S. 128ff.

20 TOYOTA New global body line, vgl. MacDuffie, Pil: Automation and Work Organization Trends, 1997, S. 246.

21 vgl. Shimokawa *et al.*: Automobile Assembly, 1997, S. 25ff.

22 vgl. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 1.

23 vgl. Shi, Daniels: Survey of Manufacturing Flexibility, 2003, S. 416.

24 vgl. Nilsson, Nordahl: Making Manufacturing Flexibility Operational, 1995, S. 6.

sind als für vergleichbare[25] nichtflexible Lösungen[26]. Zudem sind (Nachfrage-)Risiken sowie, in der Folge, die Vorteile erhöhter produktionstechnischer Flexibilität teilweise schwer zu erfassen und zu quantifizieren, so dass die Entscheidungsträger häufig auf intuitive Beurteilungen angewiesen sind[27]. Dies führt oft zu impliziten Entscheidungen gegen Flexibilität.

Um unter der beschriebenen Unsicherheit optimale Entscheidungen über Art und Ausmaß zu implementierender Flexibilität zu treffen, müssen aber Unsicherheit und Dynamik modelliert und in Bewertungen einbezogen werden. Die Entscheidung, in welchem Maße in welche Arten von Flexibilität investiert werden soll, erfordert daher eine Analyse und Gegenüberstellung des Nutzens erhöhter Flexibilität und der dadurch entstehenden Mehrkosten[28].

Methoden dafür fehlen bisher. Zwar wurden in der wissenschaftlichen Literatur bereits verschiedene Ansätze diskutiert, wie Flexibilität zu messen sei[29], doch sind diese entweder wegen mangelnder Praxistauglichkeit von rein akademischem Interesse, beschränken sich auf die Beschreibung eines Rahmenkonzeptes oder erweisen sich als ungeeignet, weil sie wichtige Einflussgrößen und Auswirkungen von Flexibilität nicht berücksichtigen. Kernprobleme der meisten Ansätze sind ihre Kontext*un*bezogenheit sowie ihr nicht-pekuniärer Charakter[30]. Unter anderem wegen fehlender Bewertungsansätze existieren keine praxistauglichen Ansätze zur Optimierung von Flexibilität in Produktionssystemen.

Für den Rohbau, der den Engpass bei der Implementierung von Flexibilität in der Automobilproduktion darstellt und daher von besonderem Interesse ist[31], fehlen pragmatische Methodiken, die in nachvollziehbarer Weise und bei angemessenem Aufwand die Bewertung von Flexibilisierungsvorhaben erlauben und die Optimierung von Flexibilität gezielt unterstützen.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Um die im vorhergehenden Abschnitt skizzierten Probleme zu lösen, sollen mit der vorliegenden Arbeit ein Rahmenwerk und ein operables Instrumentarium zur Flexibilitätsplanung entwickelt werden, mit deren Hilfe alternative Produktionssysteme hinsichtlich ihrer Flexibilität sowie des zu erwartenden Nutzens bewertet und optimiert werden können.

---

[25] bei gleicher Kapazität des betrachteten Produktionssystems

[26] vgl. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 2.

[27] vgl. Shi, Daniels: Survey of Manufacturing Flexibility, 2003, S. 417.

[28] vgl. Jordan, Graves: Manufacturing Process Flexibility, 1995, S. 578.

[29] vgl. z. B. ebd. sowie Fine, Freund: Optimal Investment in Product-Flexible Manufacturing Capacity, 1990.

[30] Schauerhuber: Produktionswirtschaftliche Flexibilität, 1998, S. 27.

[31] vgl. Naitoh *et al.*: Intelligent Body Assembly System, 1997, S. 122.

Die zu entwickelnde Methodik soll im Rahmen der Rohbauplanung Anwendung finden. Sie richtet sich gleichermaßen an Planer, die dadurch bei der Prüfung und zielgerichteten Verbesserung von Konzeptideen unterstützt werden, als auch an Entscheidungsträger, die auf Basis der erzeugten Flexibilitätsauswertungen und wirtschaftlichen Kennzahlen im Auswahlprozess alternativer Rohbaukonzepte unterstützt werden. Am Ende des unterstützten Prozesses steht eine Investitionsentscheidung für eines der betrachteten Rohbaukonzepte.

Die zu entwickelnde Methodik soll den Anwender zielgerichtet durch die notwendigen Arbeitsschritte leiten, beginnend mit der Erhebung aller für die Flexibilitätsoptimierung relevanten Einfluss- und Zielgrößen, der Modellierung von Absatzerwartungen und -risiken sowie der vom Planer konzipierten Rohbauentwürfe[32]. Daran schließt sich die Bewertung und Optimierung der Entwürfe an. Ergebnis der Bewertung sind Auswertungen und Kennzahlen, die im Rohbau relevante Flexibilitätsarten aussagekräftig beschreiben und die Erfüllung der verfolgten Flexibilisierungsziele widerspiegeln. Aufgrund des multidimensionalen Charakters von Flexibilität ist neben flexibilitätsbeschreibenden Kennzahlen insbesondere der Nachweis des wirtschaftlichen Nutzens im Sinne einer Investitionsrechnung erforderlich. Basierend auf diesen Auswertungen wird der Anwender anschließend bei der zielgerichteten Optimierung der Rohbauentwürfe unterstützt.

Kernpunkte der Entwicklung des Rahmenwerks sind demgemäß die Modellierung von Anforderungen an den Rohbau inkl. bestehender Nachfragerisiken, die Identifikation und Modellierung flexibilitätsrelevanter Eigenschaften automobiler Rohbauten sowie das grundsätzliche Vorgehen zur Bewertung und Optimierung der Rohbaukonzepte. Kernpunkte der Methodik sind die Simulations- und Optimierungsmodule. Weil die Festlegung der flexibilitätsrelevanten Eigenschaften des Automobilrohbaus in frühen Planungsphasen stattfindet, muss die Methodik für die Anwendung in diesen Planungsphasen konzipiert werden. Dieser Anforderung müssen insbesondere Zeit- und Datenbedarf für die Anwendung Rechnung tragen.

Wegen des eingangs dargelegten hohen Potenzials sowie der aktuellen Relevanz von Flexibilität im Automobilrohbau sollen Rahmenwerk und Instrumentarium in dieser Arbeit für das Beispiel der Planung von Rohbaukonzepten in der Automobilindustrie ausgearbeitet werden, jedoch eine möglichst generische Struktur und Vorgehensweise aufweisen, um so eine spätere Übertragung auf andere (insbesondere kapitalintensive) produzierende[33] Bereiche zu ermöglichen. Im Fokus der Betrachtung liegt die Linienebene; betrachtet werden dementsprechend einzelne Zusammenbauten, nicht jedoch einzelne Arbeitsplätze.

---

[32] Die Methodik den Anwender bei der Bewertung und heuristischen Optimierung, nicht jedoch bei der initialen Entwicklung von Rohbaukonzepten unterstützten; Rohbaukonzepte sind also Eingangsgrößen für das Verfahren. Solche initialen Rohbaukonzepte werden von Experten, also von Rohbauplanern, erarbeitet.

[33] Fertigungs- und Montage-

Schwerpunktmäßig ebenfalls nicht betrachtet wird die Netzwerkebene, d. h. das Zusammenspiel automobiler Rohbauten an unterschiedlichen Standorten.

Aufgrund der Komplexität der Aufgabenstellung und des gewählten Ansatzes zur Bewertung und Optimierung von Flexibilität bietet sich der Einsatz IT-technischer Hilfsmittel an. Die Methodik soll daher in einem anwendungsfreundlichen prototypischen IT-Tool als operablem Instrumentarium umgesetzt werden.

1.4 Forschungskonzeption

Einordnung in die Wissenschaftssystematik

Zur Klärung der grundlegenden Erkenntnisperspektive ist die Arbeit zunächst in das Spektrum der Wissenschaften einzuordnen. Wissenschaften lassen sich grundlegend in Formalwissenschaften und Realwissenschaften unterteilen (Abbildung 1-1).

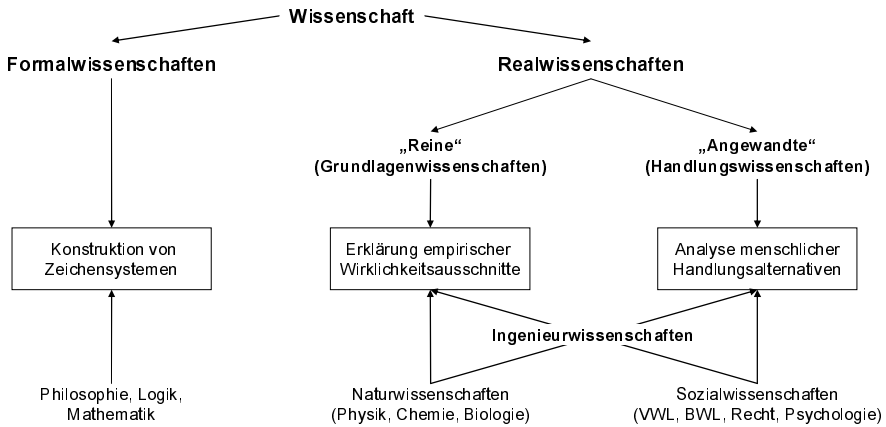


Abbildung 1-1: Wissenschaftssystematik[34]

Ziel der Formalwissenschaften (Philosophie, Logik, Mathematik) ist die Konstruktion von Zeichensystemen mit Regeln zur Verwendung dieser Zeichen[35]. Aussagen der Formalwissenschaften beziehen sich nicht auf tatsächlich existierende Objekte; daher kann die Prüfung ihrer Richtigkeit sich allein auf die Suche nach logischen Widersprüchen beschränken[36].

---

[34] Ulrich, Hill: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I), 1976, S. 305.

[35] ebd., S. 305.

[36] vgl. Schanz: Wissenschaftstheoretische Grundlagen, 1987, Sp. 2039.

Realwissenschaften bemühen sich um die Beschreibung, Erklärung und Gestaltung empirisch (sinnlich) wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte[37]. Sie lassen sich weiter in Grundlagenwissenschaften („reine“ Wissenschaften) und Handlungswissenschaften („angewandte“ Wissenschaften) untergliedern[38]. Während die Grundlagenwissenschaften (Physik, Chemie, Biologie) versuchen, Erklärungsmodelle zu bilden, versuchen die Handlungswissenschaften, Entscheidungsmodelle bzw. Entscheidungsprozesse zur Gestaltung sozialer und technischer Systeme zu entwickeln[39]. Die Handlungswissenschaften umfassen u. a. die angewandten Sozialwissenschaften, zu denen nach der vorherrschenden Auffassung auch die Betriebswirtschaftslehre gerechnet wird; auch die Ingenieurwissenschaften werden, trotz zahlreicher grundlagenorientierter Forschungsbereiche[40], eher den Handlungswissenschaften zugeordnet. Im Gegensatz zu den Formalwissenschaften müssen Realwissenschaften zusätzlich dem Kriterium der faktischen Wahrheit unterworfen werden[41].

Aufgrund ihres Anspruchs, Menschen konstruktiv bei der Gestaltung und Auswahl von Handlungsalternativen zu unterstützen, sowie aufgrund ihres Praxisbezugs ist die vorliegende Arbeit den Handlungswissenschaften zuzuordnen; sie befindet sich an der Schnittstelle zwischen Ingenieurwissenschaften und Betriebswirtschaftslehre.

Forschungsansatz

Wissenschaftliche Forschung ist letztlich nie ohne Wertungen und wertende Entscheidungen möglich[42]. ULRICH schreibt: „Jeder Ansatz stellt ja ein Vor-Urteil dar, mit dem der wissenschaftliche Erkenntnisprozess in Angriff genommen wird, und er begrenzt zwangsläufig die möglichen Erkenntnisse, die man durch diesen Prozess gewinnt.“[43] Deshalb ist vor der Vorstellung der Forschungsergebnisse die Weltsicht des Autors oder das Vorverständnis[44], das der Arbeit zugrunde liegt, zu erläutern. Diese grundlegende Sichtweise, oder der Satz erster Prinzipien, auf dem die Forschungsarbeit beruht[45], ist nach GUBA UND LINCOLN ein nicht weiter begründbares „belief system“, dessen ultimative Wahrheit nicht nachgewiesen werden kann; es muss als grundlegende Überzeugung akzeptiert werden[46].

---

37 Ulrich, Hill: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I), 1976, S. 305.

38 ebd., S. 305.

39 ebd., S. 305.

40 vgl. Ulrich, Hill: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II), 1976, S. 305.

41 ebd., S. 305f.

42 Binder, Kantowsky: Technologiepotentiale, 1996, S. 3.

43 Ulrich: Der systemorientierte Ansatz in der Betriebswirtschaftslehre, 1971, S. 43.

44 vgl. Rößl: Die Entwicklung eines Bezugsrahmens, 1990, S. 100.

45 LAKATOS (vgl. Lakatos: Falsifikation, 1974) verwendet dafür den Begriff des Forschungsprogramms. ALBERT (vgl. Albert: Marktsoziologie und Entscheidungslogik, 1998) spricht vom Erkenntnisprogramm, während KUHN (vgl. Kuhn: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, 2003) den Begriff Paradigma verwendet.

46 vgl. Guba, Lincoln: Competing Paradigms, 1994, S. 107.

ULRICH UND HILL sehen in der Sozialwissenschaft neben dem *faktortheoretischen Ansatz* von GUTENBERG[47] den *systemtheoretischen Ansatz* nach ULRICH[48] und den *entscheidungstheoretischen Ansatz* nach HEINEN[49] als mögliche Paradigmen an[50].

Der systemtheoretische Ansatz nach ULRICH ist interdisziplinär und kann als praxisnah, offen und integrativ bezeichnet werden[51]. Er richtet sich auf Probleme der Gestaltung, Lenkung und Entwicklung zweckgerichteter, sozialer Systeme (Unternehmen), erkennt deren Komplexität und Dynamik an und gibt den Standpunkt einer totalen Beherrschbarkeit betrieblicher Problemstellungen auf[52]. Er versteht sich nicht als reine Theorie, sondern als umfassende, angewandte Managementlehre[53], und weist eine große Nähe zu den Ingenieurwissenschaften auf. Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaft werden demgemäß als interdisziplinäre Wissenschaften aufgefasst, die Erkenntnisprogramme verschiedener Disziplinen vereinen und diese auf die Probleme der Praxis ausrichten.

Dem Verständnis des Autors von Unternehmen und Handlungsoptionen in wirtschaftlichen Systemen kommt der systemorientierte Ansatz nach ULRICH am nächsten. Er liegt daher der vorliegenden Arbeit zugrunde und stellt im Sinne der positiven Heuristik nach LAKATOS[54] den festen Kern der Arbeit dar.

Entstehungszusammenhang und Erkenntnisstrategie

Die angewandten Wissenschaften und die Grundlagenwissenschaften unterscheiden sich grundsätzlich in der Antwort auf die Frage, welcher Probleme sich die Wissenschaft annehmen soll (*Entstehungszusammenhang wissenschaftlicher Probleme*). Nach POPPER ist dieser Entstehungszusammenhang von hoher Relevanz für den gesamten Erkenntnisprozess. Er schreibt: „Die Erkenntnis beginnt nicht mit Wahrnehmungen oder Beobachtungen oder der Sammlung von Daten oder von Tatsachen, sondern sie beginnt mit Problemen.“[55] Während die Probleme der Grundlagenwissenschaften im Theoriezusammenhang entstehen, entstehen diejenigen der angewandten Wissenschaften im Praxiszusammenhang[56].

In den Grundlagenwissenschaften strebt man nach Erkennen um des Erkennens willen[57]. Ausgangspunkt für die Forschung sind Diskrepanzen zwischen Theorien und Beobach-

---

47 vgl. Gutenberg: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, 1951.

48 vgl. Ulrich: Die Unternehmung als produktives soziales System, 1968.

49 vgl. Heinen: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre, 1968.

50 vgl. Ulrich, Hill: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I), 1976, S. 308ff.

51 ebd., S. 308.

52 vgl. Ulrich: Betriebswirtschaftslehre, 1984, S. 168.

53 Der Ansatz wird deshalb oft auch als „systemorientierte Managementlehre“ bezeichnet; vgl. Ulrich, Schwaninger: Systemorientiertes Management, 2001.

54 vgl. Lakatos: Falsifikation, 1974, S. 93.

55 Popper: Die Logik der Sozialwissenschaften, 1969, S. 104.

56 Ulrich: Management, 1984, S. 173.

57 vgl. Schanz: Wissenschaftstheoretische Grundlagen, 1987, Sp. 2041.

tungen; Praxisbezug kann bestehen, ist aber zum Fortschritt der Forschung nicht notwendig[58]. Ziel der angewandten Wissenschaften ist hingegen die Gewinnung praktisch nützlichen Wissens[59]: Probleme praktisch handelnder Menschen, für deren Lösung kein befriedigendes Wissen zur Verfügung steht, sollen gelöst werden[60]. Es wird also ein pragmatisches Wissenschaftsziel verfolgt[61].

Für die grundlagenorientierte Forschung ist also der Begründungszusammenhang von zentraler Bedeutung[62]. Der Prozess der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung ist daher ein unaufhörlicher Prozess der Elimination von falschen Behauptungen, die nur durch einen ständigen Prozess der empirischen Forschung, d. h. der Überprüfung von Hypothesen durch streng kontrollierte Beobachtungen der Realität, erfolgen kann[63]. KUBICEK nennt diese Strategie *Prüfstrategie empirischer Forschung*[64].

Das Ziel insbesondere anwendungsorientierter Forschung besteht nun allerdings nicht darin, vorliegende allgemeine, intuitive Vermutungen über Zusammenhänge solcherart abzusichern. Fortschritt vollzieht sich hier vielmehr durch die Gewinnung kontra-intuitiver Erkenntnis, durch die Analyse unbeabsichtigter Wirkungen planvoller Handlungen sowie durch das Aufzeigen von Perspektiven, die Gemeinsamkeiten von zuvor als kategorial verschiedenartig angesehenen Phänomenen erkennen lassen[65]. Daher ist die Prüfstrategie empirischer Forschung zur Erreichung des pragmatischen Wissenschaftsziels der Handlungswissenschaften eher hinderlich[66].

KUBICEK fordert daher in Abgrenzung zur Prüfstrategie empirischer Forschung eine *Konstruktionsstrategie empirischer Forschung*, auch *explorative Forschung* genannt[67]. Kern eines solchen Prozesses ist nicht die Überprüfung theoriegeleiteter Hypothesen, sondern die Konstruktion wissenschaftlicher Aussagesysteme zur Schaffung neuer Realitäten[68]; diese Konstruktion stellt einen iterativen Lernprozess dar, der auf systematischem Erfahrungswissen basiert[69]. Im Verlauf dieses Prozesses werden durch Fragen an die Realität und die Aufarbeitung des dabei gewonnen Erfahrungswissens neue Fragen generiert und

---

58 Ulrich: Management, 1984, S. 172.
59 vgl. Schanz: Wissenschaftstheoretische Grundlagen, 1987, Sp. 2041.
60 Ulrich: Management, 1984, S. 172.
61 vgl. Kubicek: Heuristische Bezugsrahmen, 1977, S. 5.
62 vgl. Hermann, Schuh: Wertorientiertes Ressourcenmanagement, 1996, S. 7.
63 Ulrich: Management, 1984, S. 173.
64 Kubicek: Heuristische Bezugsrahmen, 1977, S. 6.
65 ebd., S. 7.
66 vgl. ebd., S. 7, sowie Ulrich: Management, 1984, S. 174f.
67 vgl. Kubicek: Heuristische Bezugsrahmen, 1977, S. 13ff.
68 vgl. Kromrey: Empirische Sozialforschung, 2002, S. 21.
69 vgl. Kubicek: Heuristische Bezugsrahmen, 1977, S. 13.

damit neue Erkenntnisse gewonnen[70]. Fortschrittsmedium sind bei diesem Prozess also nicht Hypothesen, sondern Fragen[71].

Forschungsmethodologisches Vorgehen und heuristischer Bezugsrahmen

Die Einordnung in die Wissenschaftssystematik und der Forschungsansatz bestimmen die zu wählende Forschungsmethodologie. Gemäß der zuvor getroffenen Einordnung dieser Arbeit in die anwendungsorientierte Forschung sowie dem gewählten systemtheoretischen Forschungsansatz orientiert sich der Forschungsprozess daher an der Methodologie der explorativen Forschung. Abbildung 1-2 zeigt den Prozess in der Übersicht.

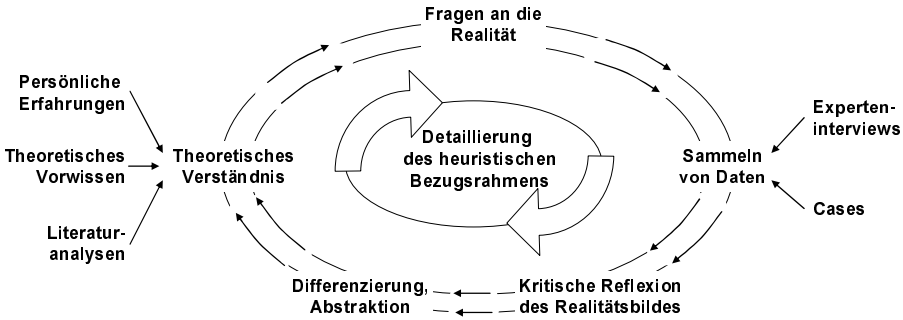


Abbildung 1-2: Forschungsmethodologisches Vorgehen[72]

Im Mittelpunkt des iterativen Lernprozesses steht ein heuristischer Bezugsrahmen bzw. ein provisorisches Erklärungsmodell, das das Vorverständnis des Autors abbildet[73], den Forschungsprozess steuert und Orientierungshilfen für die Lösung praktischer Probleme liefern soll[74].

Den Ausgangspunkt bei der Entwicklung eines heuristischen Bezugsrahmens stellt ein generelles Phänomen dar, das nicht genügend verstanden bzw. unzureichend beherrscht wird und als theoretisches Problem bezeichnet wird[75]. Dieses Problem ist geprägt vom Vorverständnis des Forschers; ausgehend von einer bestimmten Perspektive wird die

---

70 vgl. ebd., S. 14.

71 vgl. ebd., S. 15., sowie Hermann, Schuh: Wertorientiertes Ressourcenmanagement, 1996, S. 9.

72 i. A. a. Kubicek: Heuristische Bezugsrahmen, 1977, S. 14, Tomczak: Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft, 1992, S. 84, sowie Zohm: Management von Diskontinuitäten, 2004, S. 9.

73 vgl. Rößl: Die Entwicklung eines Bezugsrahmens, 1990, S. 101.

74 vgl. Tomczak: Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft, 1992, S. 84, sowie Kubicek: Heuristische Bezugsrahmen, 1977, S. 16.

75 vgl. Tomczak: Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft, 1992, S. 84, sowie Kubicek: Heuristische Bezugsrahmen, 1977, S. 16.

Realität betrachtet und gedanklich strukturiert[76]. Für die vorliegende Arbeit wurde dieses Problem in der Einleitung kurz erläutert.

Der Bezugsrahmen identifiziert

- die relevanten Größen
  (Welche theoretischen Analyseeinheiten und welche Dimensionen sind geeignet, das betrachtete Problem erkenntnisfördernd darzustellen und zu lösen?),
- die relevanten Beziehungen sowie
  (Welche der betrachteten Größen hängen wie zusammen?)
- die relevanten Mechanismen
  (Warum hängen diese Größen zusammen?)

des betrachteten Problems[77].

Ein erstes Konzept des heuristischen Bezugsrahmens, basierend auf den Ausführungen zum theoretischen Problem der Dissertation in der Einleitung, zeigt Abbildung 1-3.

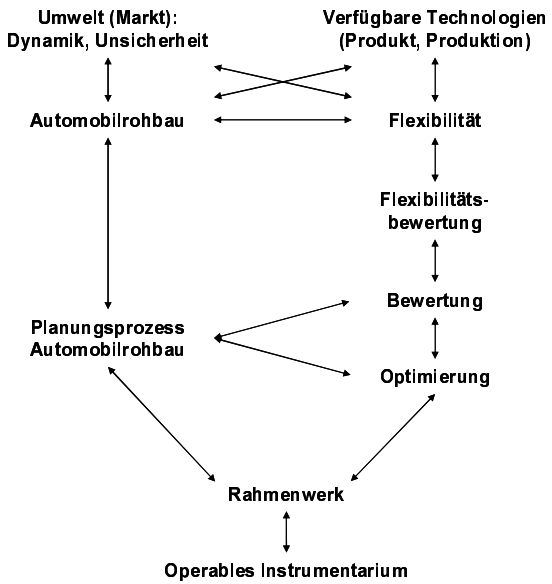


Abbildung 1-3: Erster Entwurf des heuristischen Bezugsrahmens

[76] vgl. Tomczak: Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft, 1992, S. 84.

[77] Kubicek: Heuristische Bezugsrahmen, 1977, S. 18f, sowie Tomczak: Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft, 1992, S. 84.

Daran wird deutlich[78], dass auf Basis des Problemverständnisses zunächst nur die Frage nach den relevanten Analyseeinheiten zu beantworten ist[79]. Eine Präzisierung der Größen, Beziehungen und Mechanismen muss im weiteren Verlauf der Dissertation erfolgen, indem im Sinne des iterativen Lernprozesses durch ständige Interaktion zwischen Fragen an die Realität, der Sammlung von Daten und der kritischen Reflexion des so gewonnenen Realitätsbildes Erfahrungswissen aufgebaut wird, das eine Modifikation des Bezugsrahmens ermöglicht und somit zur Formulierung weiterer Fragen führt[80]. Diese Iteration aus Frageformulierung, Modifikation des Bezugsrahmens und Formulierung weiterführender Fragen zur Gewinnung neuer Erkenntnis wird bei der Veröffentlichung der Dissertation pragmatisch „eingefroren“[81].

Der Bezugsrahmen stellt für den Forschungsprozess lediglich ein heuristisches Potenzial zur Verfügung, das durch das Vorgehen des Forschers bei der Datenerhebung und -analyse genutzt oder nicht genutzt werden kann[82]. Ein möglichst großes heuristisches Potenzial kann durch Pluralismus, d. h. die Nutzung unterschiedlicher Perspektiven, Erklärungsansätze usw., sowie durch situative Relativierung, d. h. den Vergleich des Bezugsrahmens unter verschiedenen Bedingungen, erreicht werden[83]. Wichtig für die Nutzung dieses dem Bezugsrahmen innewohnenden Potenzials ist aufgrund des pragmatischen Wissenschaftsziels daher die intensive Einbeziehung der Praxis. Die vorliegende Dissertation ist daher geprägt durch Erfahrungsgewinn und Dialog in und mit der Praxis. Der heuristische Bezugsrahmen und das gewählte forschungsmethodische Vorgehen bilden den Rahmen für diesen Dialog[84].

Die Auseinandersetzung mit dem Themenfeld „Flexibilität in der Produktion“ sowie ihrer Bewertung und Optimierung waren ein Schwerpunkt der Arbeit des Autors am Werkzeugmaschinenlaboratorium. Ausgangspunkt des Forschungsprozesses war der Antrag für das EU-Forschungsprojekt *LicoPro* („Lifecycle design for global collaborative production“), den der Autor zu Beginn seiner Assistentenzeit gemeinsam mit Kollegen verfasst hat. Als Projektleiter im genannten EU-Forschungsprojekt konnte der Autor zahlreiche Erfahrungen im Bereich der Planung, der Implementierung und des Managements von Flexibilität in der Produktion sammeln. In enger Zusammenarbeit mit der Praxis u. a. durch eine Umfrage, gezielte Interviews und zahlreiche Fallstudien wurden im Rahmen des Projektes Lösungsansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung von Flexibilität sowohl innerhalb produ-

---

78 Dieses erste Konzept des Bezugsrahmens zeigt die relevanten Analyseeinheiten, nicht aber, wie genau und vor allem warum sie zusammenhängen.

79 Zohm: Management von Diskontinuitäten, 2004, S. 10.

80 vgl. Kubicek: Heuristische Bezugsrahmen, 1977, S. 28.

81 vgl. ebd., S. 28.

82 Tomczak: Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft, 1992, S. 84.

83 vgl. ebd., S. 84, sowie Zohm: Management von Diskontinuitäten, 2004, S. 10.

84 Zohm: Management von Diskontinuitäten, 2004, S. 11.

zierender Unternehmen als auch unternehmensübergreifend untersucht und umgesetzt. Gemäß dem Ansatz der Aktionsforschung[85] und der Forderung ULRICHs nach einer Prüfung der Gestaltungsmodelle im Anwendungszusammenhang[86] wurden erfolgversprechende Lösungsansätze dabei direkt in der Praxis angewendet und evaluiert. Insbesondere eine Fallstudie zum Thema Flexibilitätsplanung im Automobilrohbau hat wesentlich zum in der vorliegenden Arbeit geschilderten Erkenntnisprozess beigetragen.

Der Autor hat mit zahlreichen Veröffentlichungen zur wissenschaftlichen Diskussion zum Thema Flexibilität in der Produktion beigetragen. Diskussionen mit Kollegen haben zu einer Erweiterung des Erfahrungsfeldes auf angrenzende Bereiche der Produktionssystemplanung geführt und damit von der theoretischen Seite zur Erfüllung der Forderung nach Pluralismus zur Nutzung des heuristischen Potenzials des verwendeten Bezugsrahmens beigetragen. Im Rahmen einer Literaturanalyse wurde die forschungs- und praxisrelevante Literatur in den Bereichen Fabrikplanung (insbesondere Planung automatisierter Montageanlagen), Gestaltung und Betrieb von Automobilrohbauten sowie Flexibilitätsbewertung, -planung und -optimierung ausgewertet.

Neben seiner Forschungstätigkeit wirkte der Autor im Rahmen vieler Industrieprojekte an der Implementierung von Konzepten der Lean production bei produzierenden Unternehmen und der Beratung der Praxis mit. Diese Projekte ermöglichten tiefere Einblicke in die Aufbau- und Ablaufstrukturen der betrachteten produzierenden Unternehmen und haben damit sowohl zu einer Präzisierung als auch zur geforderten situativen Relativierung des Bezugsrahmens aus Sicht der Praxis beigetragen.

1.5 Forschungsfrage

Wie oben dargelegt, orientiert sich der in diesem Dissertationsvorhaben konzipierte Forschungsprozess unter Einbeziehung eines pragmatischen Wissenschaftsziels am explorativen Forschungsansatz[87]. In diesem Prozess bewirkt die Formulierung grundlegender Forschungsfragen basierend auf dem theoretischen Problem der Praxis eine Eingrenzung des Betrachtungsfeldes und richtet damit die weiteren Untersuchungen aus[88].

Gemäß der zuvor erarbeiteten Zielsetzung des in dieser Arbeit dokumentierten Erkenntnisprozesses lässt sich folgende grundlegende und handlungsleitende Forschungsfrage formulieren:

---

[85] vgl. Mayring: Qualitative Inhaltsanalyse, 2003, S. 50.

[86] vgl. Ulrich: Management, 1984, S. 175 und S. 179. Ulrich schreibt dort: „Die empirische Forschung dient in den Grundlagenwissenschaften der Prüfung von Hypothesen, in den angewandten Wissenschaften der Erfassung typischer Probleme der Praxis und der Prüfung der von ihr entwickelten Gestaltungsmodelle im Anwendungszusammenhang."

[87] vgl. Kubicek: Heuristische Bezugsrahmen, 1977, S. 18f.

[88] vgl. Rumelt *et al.*: Fundamental Issues in Strategy, 1994, S. 39.

Welcher Gestalt sind ein Rahmenwerk und operables Instrumentarium, die die Bewertung und heuristische Optimierung der Flexibilität von Automobilrohbauten effektiv unterstützen?

Aus dieser grundlegenden Fragestellung lassen sich präzisere Fragestellungen als Kernpunkte des wissenschaftlichen Vorgehens ableiten. Sie stellen eine erste Konkretisierung des heuristischen Bezugsrahmens dar und geben damit die Struktur des Forschungsvorhabens vor.

Die Beantwortung der gestellten Forschungsfrage führt über die Beantwortung folgender fünf abgeleiteter Fragen:

1. Was sind flexibilitätsrelevante Anforderungen an den Automobilrohbau?
   Das heißt: Was sind aktuelle Anforderungen an den Automobilrohbau? Mit welchen Risiken sind sie behaftet? Wie kann Flexibilität dazu beitragen, diese Anforderungen zu erfüllen? Welche Arten von Flexibilität sind dafür erforderlich?

2. Wie wird die Flexibilität von Automobilrohbauten geplant und festgelegt?
   Das heißt: In welchen Phasen des Planungsprozessen werden flexibilitätsrelevante Entscheidungen getroffen? Wer trifft diese Entscheidungen? Auf Basis welcher Informationen werden Entscheidungen gefällt?

3. Welche Anforderungen sind also an eine Methodik zur Flexibilitätsplanung im Automobilrohbau zu stellen?
   Das heißt: Welche inhaltlichen und methodischen Anforderungen müssen berücksichtigt werden? Wie muss insbesondere die verwendete Zielfunktion bei einer Optimierung aussehen? Welche Anforderungen werden von existierenden Ansätzen erfüllt, und welche Defizite bestehen?

4. Welches sind die seine Flexibilität bestimmenden Eigenschaften eines Automobilrohbaus?
   Das heißt: Welche (von vielen einzustellenden) flexibilitätsbezogenen Parametern sind die Kernparameter? Welche Eigenschaften eines Rohbaus müssen also modelliert, welche dürfen vernachlässigt werden?

5. Welcher Gestalt sind ein Rahmenwerk und operables Instrumentarium zur Optimierung von Flexibilität im Automobilrohbau, die Flexibilitätspotenziale und -kosten angemessen berücksichtigen?
   Das heißt: Wie können Aufwand und Nutzen von Flexibilität quantifiziert werden? Wie lassen sich Dynamik und Unsicherheiten angemessen berücksichtigen? Wie können aus Auswertungsergebnissen konstruktive Empfehlungen zur Optimierung von Rohbaukonzepten abgeleitet werden? Wie kann sichergestellt werden, dass die Ergebnisse des Optimierungsprozesses angemessen in Investmententscheidungen

einfließen, wie kann also die Bewertung der optimierten Rohbaukonzepte anwendergerecht aufbereitet werden?

1.6 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit orientiert sich an der oben beschriebenen Strategie der angewandten Forschung nach ULRICH[89]. Ebenso wie beim explorativen Ansatz nach KUBICEK steht dabei der Praxisbezug im Vordergrund; allerdings legt ULRICH besonderen Wert auf den Anwendungszusammenhang: Nach einer Analyse der Praxis und der analytisch-induktiven Ableitung entsprechender Regeln und Modelle stehen am Ende des Forschungsprozesses, nach einer erfolgreichen Prüfung der vorgeschlagenen Lösungen in der Praxis, die Implementierung dieser Lösungen sowie die Beratung der Praxis, zunächst am Beispiel des automobilen Rohbaus. Der Forschungsprozess findet damit sein vorläufiges Ende[90]. Dementsprechend beschreibt diese Dissertation nicht den vollzogenen Forschungsprozess, sondern sein vorläufiges Ergebnis.

Abbildung 1-4 zeigt den Aufbau der Arbeit und spiegelt ihn an ULRICHS Strategie der angewandten Forschung.

Abbildung 1-4: Strategie angewandter Forschung und Aufbau der Arbeit[91]

---

[89] vgl. Ulrich: Betriebswirtschaftslehre, 1984, S. 193.

[90] vgl. Ulrich: Management, 1984, S. 192.

[91] i. A. a. Ulrich: Betriebswirtschaftslehre, 1984, S. 193.

In **Kapitel 1** wurden zunächst Ausgangssituation und Problemstellung geschildert, die Zielsetzung der Arbeit erläutert und die Forschungskonzeption dargestellt.

Anschließend werden in **Kapitel 2** die Anforderungen aus der Praxis ausgearbeitet und der Bedarf für Flexibilität im Automobilrohbau präzisiert. Dazu werden die in der Einleitung aufgeworfenen Probleme sowie der Entdeckungszusammenhang entlang des Bezugsrahmens spezifiziert. Zunächst werden die Begriffe *Automobilrohbau* und *Flexibilität* erläutert. Darauf aufbauend werden gegenwärtige Trends in der Automobilindustrie und daraus resultierende Anforderungen an den Automobilrohbau abgeleitet. Es wird aufgezeigt, wie Flexibilität dazu beitragen kann, die identifizierten Anforderungen zu erfüllen, und welche Arten von Flexibilität dafür benötigt werden.

Gemäß der gewählten Forschungsmethodik werden in **Kapitel 3** die problemrelevanten Theorien erfasst und interpretiert[92]. Zunächst werden dafür die Anforderungen an eine Methodik zur Flexibilitätsoptimierung hergeleitet; dabei wird insbesondere auf die Auswahl der richtigen Zielfunktion eingegangen. Anschließend werden bestehende Optimierungsansätze beschrieben und untersucht. Deren Nichterfüllung wichtiger Anforderungen wird nachgewiesen. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenführung der Herausforderungen aus der Praxis mit den bestehenden Ansätzen sowohl aus der Wissenschaft als auch aus der Praxis; darauf aufbauend werden die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik konkretisiert.

In **Kapitel 4** wird, aufbauend auf den Erkenntnissen der vorhergehenden Kapitel, das Rahmenwerk zur heuristischen Optimierung von Flexibilität im Automobilrohbau grob entworfen und für den weiteren Forschungsprozess in seinen Grundzügen festgeschrieben. Ein wesentliches Element dieses Rahmenwerkes stellt ein Konzept zur wirtschaftlichen Bewertung von Flexibilität im Rohbau dar.

Der Entwurf der Methodik wird anschließend in **Kapitel 5** konkretisiert. Dazu werden die einzelnen Elemente der Optimierungsmethodik detailliert und für die Anwendung in der Praxis ausgearbeitet. Es stehen zunächst die Modellierung von Anforderungen – unter Berücksichtigung von Unsicherheit und Dynamik – an den Rohbau, die Modellierung flexibilitätsrelevanter Eigenschaften von Automobilrohbauten und die Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Rohbauten im unsicheren Marktumfeld im Fokus. Anschließend werden die Auswertung flexibilitätsrelevanter Kennzahlen der Wirtschaftlichkeitsberechnung und darauf aufbauende Ansätze zur heuristischen Optimierung der Flexibilität im Rohbau dargestellt.

In **Kapitel 6** wird die entwickelte Methodik anhand eines Fallbeispiels im Anwendungszusammenhang geprüft. Dabei werden auch eine Vorgehensweise zur Anwendung der Me-

[92] vgl. ebd., S. 193.

thodik aufgezeigt und diskutiert sowie das zur Unterstützung der Anwendung der Methodik in der Praxis implementierte IT-Tool beschrieben.

Am Ende der Darlegung des Forschungsprozesses werden abschließend in **Kapitel 7** die wichtigsten Ergebnisse der Dissertation zusammengefasst.

2 Flexibilität im Automobilrohbau

In diesem Kapitel werden zunächst der Objektbereich des Automobilrohbaus sowie der Begriff der Flexibilität in der Produktion erläutert. Darauf aufbauend werden aktuelle Anforderungen an den Automobilrohbau sowie die Möglichkeiten, diese Anforderungen mit Hilfe produktionswirtschaftlicher Flexibilität zu erfüllen, geschildert. Daraus wird abschließend die Notwendigkeit, Flexibilität bewerten und optimieren zu können, abgeleitet.

2.1 Grundlegendes zu den Begriffen

2.1.1 Automobilrohbau

„The body shop is 15 years behind assembly in terms of flexibility.“[93]
HERSTELLER VON PRODUKTIONSANLAGEN (2004)

Im Folgenden soll eine bündige Einführung in die Grundlagen des Rohbaus gegeben werden. Neben der Einbindung des Rohbaus in die Automobilfabrik sollen die Struktur eines Rohbaus sowie die im Rohbau eingesetzten Prozesse beschrieben werden. Weiterhin wird die für die Flexibilitätsfragestellungen wichtige Nutzung des Rohbaus über seinen Lebenszyklus beschrieben. Die abschließende Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung des Automobilrohbaus unterstreicht die Wichtigkeit einer Auslastungsoptimierung im Rohbau. Zunächst wird bei der Beschreibung von einem solitären Rohbau ausgegangen, der den heutigen Standard in der Automobilindustrie darstellt; flexible Rohbaukonzepte werden in Abschnitt 2.3.3 beschrieben.

2.1.1.1 Einbindung des Rohbaus in die Automobilproduktion

Der Rohbau ist das erste der drei Gewerke einer Automobilfabrik. Aus den Zwischenerzeugnissen des Presswerks wird hier in mehreren Arbeitsschritten die Rohkarosse zusammengefügt. Nach dem Zusammenfügen werden die Rohkarossen zunächst gewaschen, um dann an das zweite Gewerk, die Oberfläche, übergeben zu werden. Nach Grundierungen und der Oberflächenveredelung, beispielsweise durch Verzinken, werden die Rohkarossen hier lackiert. Anschließend wird die Rohkarosse im dritten Gewerk, der Montage, mit Innenraum, Antriebsstrang und Fahrwerk komplettiert[94]. Zwischen den einzelnen Gewerken befinden sich Puffer; sie werden dafür benötigt, unterschiedliche Taktzeiten oder Arbeitszeitmodelle in den einzelnen Gewerken auszugleichen und Störungen

[93] McKinsey/WZL: Tomorrow's Automotive Production, 2005.

[94] vgl. Fleiner: Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Rohbaualternativen, 2003, S. 4.

abzufangen. Insbesondere zwischen den letzten beiden Gewerken werden sie außerdem für eine Sortierung der Karosserien genutzt und ermöglichen damit effizientere Produktionsreihenfolgen in Oberfläche und Montage. Dieser Prozessfluss ist schematisch in Abbildung 2-1 gezeigt.

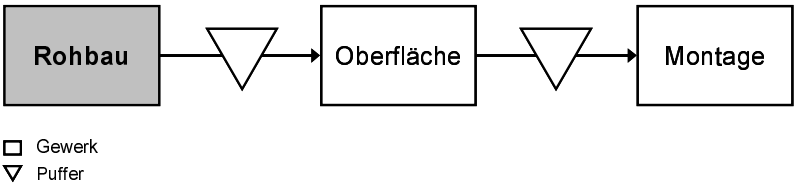


Abbildung 2-1: Einbindung des Rohbaus in eine Automobilfabrik

2.1.1.2 Struktur eines Rohbaus

Die Struktur eines Rohbaus lässt sich in mehrere Ebenen gliedern.

Zunächst besteht ein Rohbau aus einer oder mehreren Linien. In der Vergangenheit waren dies – von Ausnahmen abgesehen (siehe Abschnitt 2.3.3) – solitäre Linien, die also für die Produktion eines einzigen Produktes maßgeschneidert waren.[95]

Zur Herstellung einer Rohkarosse werden auf einer solchen Linie drei Aufbaustufen nacheinander durchlaufen, die so genannten Zusammenbauten Z1 bis Z3. In der ersten Aufbaustufe, dem Zusammenbau 1, werden die Baugruppen Vorderbau, Hinterbau und Bodenblech gefertigt und anschließend zur kompletten Bodengruppe zusammengesetzt. In der zweiten Aufbaustufe, dem Zusammenbau 2, wird aus den Seitenrahmen, dem Dach und der Rückwand sowie der Bodengruppe der Karosse das Karosseriegerippe zusammengesetzt. Dazu werden die Einzelteile zunächst durch wenige Schweißpunkte verbunden, dann in eine Ausschweißstation weitergeleitet, dort in Spannvorrichtungen fixiert und ausgeschweißt[96]. In der letzten Aufbaustufe, dem Zusammenbau 3, wird die Rohkarosse mit Anbauteilen wie Kotflügeln, Türen und Klappen komplettiert. Abbildung 2-2 zeigt schematisch die Arbeitsinhalte der drei Zusammenbauten.

Jeder der drei Zusammenbauten besteht aus mehreren Stationen mit verschiedenen Arbeitsinhalten, diese wiederum aus einzelnen Funktionsmodulen, z. B. Heftmodul, Ausschweißmodul oder Einlegemodul.

---

[95] Einzelne Linien innerhalb eines Rohbaus können dabei durchaus unabhängig voneinander und für unterschiedliche zu produzierende Modelle ausgelegt sein.

[96] vgl. Naitoh *et al.*: Intelligent Body Assembly System, 1997, S. 122.

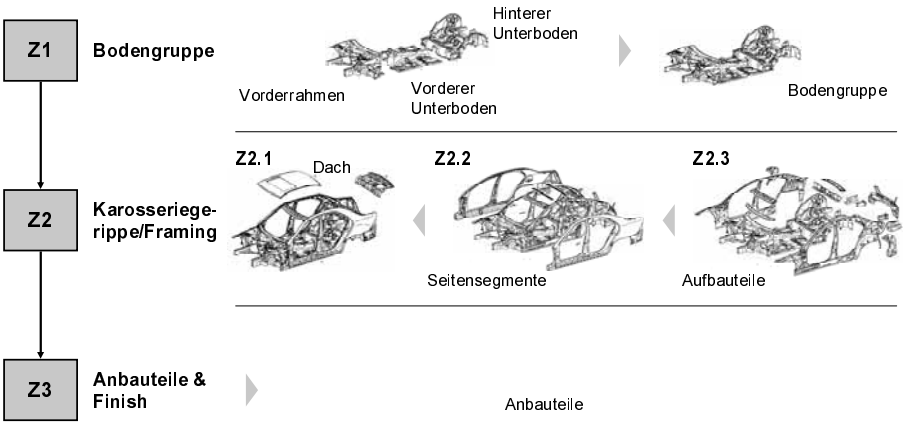


Abbildung 2-2: Struktur eines Rohbaus

Neben der aus den drei Zusammenbauten Z1 bis Z3 bestehenden Hauptlinie sind die Seitenlinien, in denen in der Hauptlinie benötigte Baugruppen und Unterbaugruppen gefertigt werden[97], Teil eines Automobilrohbaus. Das in der Automobilindustrie am häufigsten anzutreffende Rohbaukonzept ist der so genannte Fischgräten-Rohbau, wie er z. B. bei der Produktion der MERCEDES-BENZ S-Klasse am Standort Sindelfingen zum Einsatz kommt[98]. Seinen Namen verdankt der Fischgräten-Rohbau der in Abbildung 2-3 gezeigten Anordnung der Seitenlinien an die Hauptlinie. Durch diese Anordnung wird ein durchgängig gerichteter Materialfluss sichergestellt, der eine schnelle Taktung der Hauptlinie und damit einen hohen Durchsatz ermöglicht.

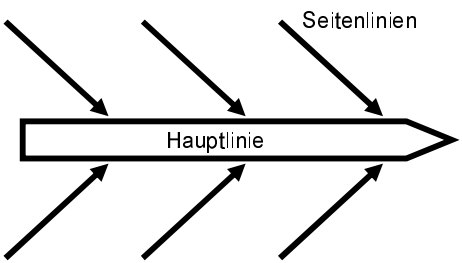


Abbildung 2-3: Fischgräten-Rohbau

[97] vgl. Fleiner: Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Rohbaualternativen, 2003, S. 4.

[98] vgl. ebd., S. 6.

Im Gegensatz zum einfachen Grundaufbau gestaltet sich das tatsächliche Fabriklayout eines Rohbaus sehr komplex, da bei der Planung versucht wird, sowohl den Flächenbedarf zu minimieren als auch den Materialfluss zu optimieren. Zudem existieren häufig räumliche Restriktionen durch vorhandene Werksstrukturen. Abbildung 2-4 zeigt beispielhaft und grob maßstabsgetreu das Layout des Rohbaus der MERCEDES-BENZ C-Klasse im DAIMLERCHRYSLER-Werk Bremen. Die einzelnen Aufbaustufen sind zur Verdeutlichung gekennzeichnet.

An der Abbildung lässt sich erkennen, dass die drei Zusammenbauten Z1 bis Z3 unterschiedliche Flächenbedarfe aufweisen. Der typische Flächenbedarf für ein Volumenmodell wie die MERCEDES-BENZ C-Klasse beträgt 30.000 bis 35.000 m². Davon entfallen etwa ein Drittel auf den Zusammenbau Z1, die Hälfte auf Z2 und die verbleibenden 20 % auf die dritte Aufbaustufe[99]. Die Unterschiede in den Flächenbedarfen lassen sich durch die verschiedenen Arbeitsinhalte in den einzelnen Aufbaustufen erklären.

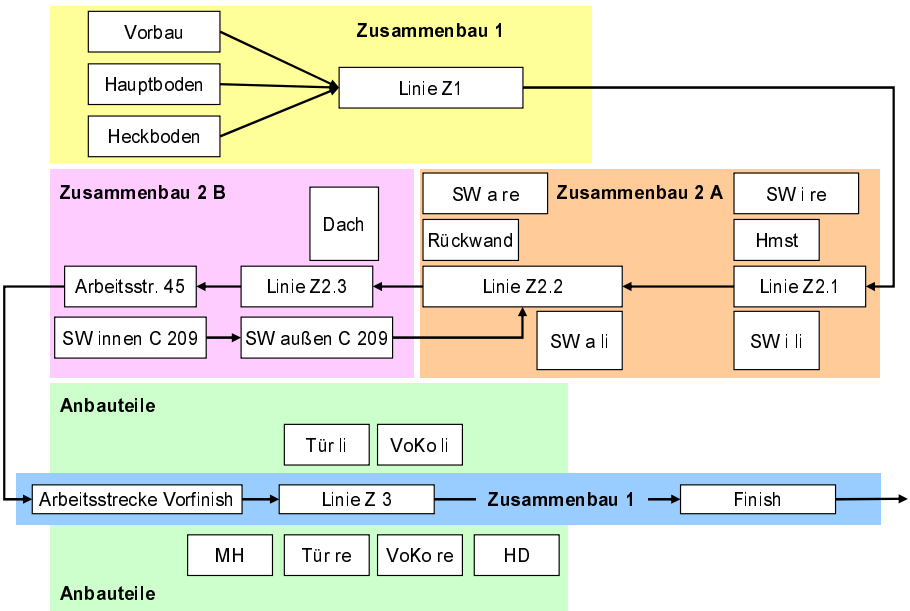


Abbildung 2-4: Layout eines Rohbaus am Beispiel der MERCEDES-BENZ C-Klasse, Bremen

[99] vgl. Bleines, Nestle: Idealrohbau, 2004, S. 35.

Abbildung 2-5 zeigt in einem größeren Maßstab einen Ausschnitt des Zusammenbaus Z1 (Vorderbau und Radhaus) der BMW-5er-Produktion in Dingolfing und verdeutlicht die Komplexität realer Rohbaulayouts.

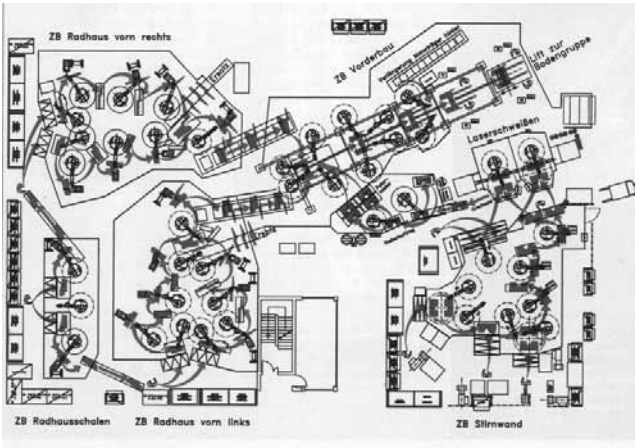


Abbildung 2-5: Layout eines Zusammenbaus (Ausschnitt) am Beispiel des BMW 5er, Dingolfing[100]

2.1.1.3 Prozesse im Rohbau

Der dominierende Prozess im Rohbau ist nach wie vor das Widerstandspunktschweißen. Dabei werden die zu verbindenden Einzelteile oder Baugruppen mithilfe überwiegend robotergeführter Schweißzangen zusammengedrückt und punktuell durch einen elektrischen Strom verflüssigt[101]. Das Widerstandspunktschweißen zeichnet sich durch geringe Betriebskosten, hohe Prozesssicherheit und eine gute Automatisierbarkeit aus[102]. In letzter Zeit gewinnen jedoch auch andere Verbindungsmethoden an Bedeutung, siehe Abschnitt 2.3.3. Insgesamt wird eine Rohkarosse aus 300-500 Einzelteilen mit etwa 3500-5000 Schweißpunkten gefügt. Manuelle Schweißarbeiten werden nur an schwer zugänglichen Stellen der Karosserie ausgeführt[103].

---

[100] vgl. McKinsey/WZL: Tomorrow's Automotive Production, 2005.

[101] vgl. Köpcke, Küppers: Skalierbare Karosserie, 2003, S. 3, und Naitoh *et al.*: Intelligent Body Assembly System, 1997, S. 121.

[102] vgl. Fleiner: Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Rohbaualternativen, 2003, S. 12.

[103] vgl. ebd., S. 4.

Der Zusammenbau Z1 sowie die dazugehörigen Seitenlinien zur Fertigung der Unterbaugruppen Vorderbau, Hinterbau und Bodenblech sind bestimmt von nahezu vollautomatisierten Fügeoperationen.

Um die Form der Rohkarosse zu sichern, werden im Zusammenbau Z2 so genannte Framingstationen (auch Geometriestationen genannt) eingesetzt. Bodengruppe, Seitenwände, Rückwand und Dach werden zunächst mit ca. 60-70 Schweißpunkten vorläufig verbunden und anschließend in die Framingstationen wie in eine Form eingelegt, durch Spannelemente darin fixiert und exakt ausgerichtet. In den Framingstationen werden die Baugruppen durch weitere Schweißpunkte geometriesicher miteinander verbunden. Bisher werden in den Framingstationen in der Regel modellspezifische Spannrahmen verwendet, die oft, wie in Abbildung 2-6 skizziert, beidseitig mit Spannelementen versehen und dadurch für maximal zwei Varianten nutzbar sind: Durch eine 180-Grad-Drehung werden sie für das jeweils andere Modell einsatzfähig. Beide Spannelemente sind physisch an den Spannrahmen fixiert; dadurch ist die Flexibilität auf zwei Varianten beschränkt. Aufgrund der Komplexität der gefertigten Produkte und der in den Framingstationen durchgeführten Prozesse ist die Spanntechnik der Framingstation sehr aufwendig[104].

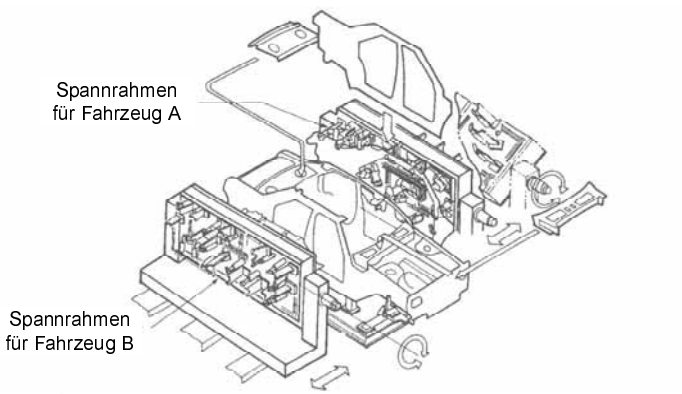


Abbildung 2-6: Framingstation mit Spannrahmen (Jigs)

Nach Durchlaufen der Framingstation wird die so zusammengesetzte Struktur mithilfe einer Reihe von Schweißrobotern ausgeschweißt, d. h. durch weitere Schweißpunkte und -nähte final miteinander verbunden[105]. Der Prozess des Ausschweißens ist durch den Einsatz immer leistungsfähigerer Roboter bereits größtenteils als flexibel zu bezeichnen[106].

---

[104] vgl. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 4.

[105] vgl. ebd.: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, , S. 4f.

[106] vgl. Naitoh *et al.*: Intelligent Body Assembly System, 1997, S. 121.

Im Zusammenbau Z3 werden die Anbauteile wie Kotflügel, Türen, Motorhaube und Heckklappe an die Rohkarosserie montiert. Die Aufbaustufe Z3 ist der personalintensivste Bereich des Automobilrohbaus: Zwar fällt für seine Produktionseinrichtungen nur etwa ein Viertel der gesamten Rohbauinvestitionen an, aber fast die Hälfte der Mitarbeiter des Gewerks ist hier beschäftigt[107].

Neben der grundlegenden Struktur des Rohbaus steht bei der Entwicklung flexibler Rohbaukonzepte meist die zweite Aufbaustufe Z2 im Fokus der Betrachtungen: Das Framingkonzept bestimmt wesentlich Flexibilität und Kosten eines Rohbaus. Insbesondere für den Zusammenbau Z2 wurden auch bereits alternative Konzepte entwickelt und eingesetzt (siehe Abschnitt 2.3.3).

2.1.1.4 Bedeutung des Automobilrohbaus

Die Automobilindustrie gilt aufgrund ihrer wirtschaftlichen Bedeutung und ihres wegweisenden Charakters als Schlüsselindustrie in Deutschland. Innerhalb der Automobilproduktion nimmt das Gewerk Rohbau eine herausragende Stellung ein, da es sowohl die größte Eigenleistungstiefe innerhalb der Wertschöpfungskette aufweist als auch das kostenintensivste Gewerk der Kette ist.

2.1.1.4.1 Wirtschaftliche Bedeutung des Automobilbaus

Die deutsche Automobilindustrie ist mit jährlich etwa 5,5 Mio. produzierten PKW und einem Umsatz von 208,6 Mrd. Euro der drittgrößte Automobilproduzent der Welt und der bedeutendste Wirtschaftszweig in Deutschland[108]. Während die Branche in den Neunziger Jahren ein stetes Wachstum aufwies, stagnieren Absatzzahlen und Umsatz in den letzten vier Jahren[109].

Dennoch hat sich der Anteil der Beschäftigten der deutschen Industrie, die in der Automobilbranche arbeiten, in den letzten zehn Jahren von 9,5 % auf 12,9 % erhöht; im Jahr 2003 waren 773.200 Menschen in der Automobilindustrie beschäftigt[110]. Gegenüber 12 % in 1993 erwirtschaftete die Automobilindustrie 2003 über 18 % des Gesamtumsatzes der deutschen Industrie[111]. Über 80 % des gesamten deutschen Außenhandelsüberschusses von 95 Mrd. Euro entfielen im Jahr 2004 auf automobile Erzeugnisse[112].

---

[107] vgl. Bleines, Nestle: Idealrohbau, 2004, S. 16.
[108] vgl. VDA: Auto Jahresbericht 2004, 2004, S. 202ff.
[109] ebd., S. 44ff.
[110] ebd., S. 204.
[111] ebd., S. 204f.
[112] ebd., S. 205.

2.1.1.4.2 Bedeutung des Rohbaus innerhalb der Automobilproduktion

Dem Rohbau kommt innerhalb der Wertschöpfungskette einer Automobilfabrik aus mehreren Gründen eine besondere Bedeutung zu.

Zum einen bestimmt der Rohbau, in dem die Rohkarosserie zusammengesetzt und damit die Außenhaut eines Automobils gefügt wird, maßgeblich das Erscheinungsbild eines Automobils und seiner Marke. Deshalb wird die Fertigung der Rohkarosse auch bei fast allen Herstellern als Kernkompetenz betrachtet. Das erklärt die hohe Eigenleistungstiefe im Rohbau, die mit 80-100 % fast dreimal so hoch wie im Durchschnitt aller Gewerke einer Automobilfabrik (30-35 %) ist[113].

Zum anderen sind im Rohbau, nicht zuletzt wegen des hohen Automatisierungsgrades von[114] in der Regel über 90 %, für jedes neu eingeführte Modell Investitionen im dreistelligen Millionenbereich erforderlich[115]. Nach einer Faustregel erfordert Produktionskapazität für ein Auto pro Schicht eine Investition von ca. 1 Mio. Euro[116]. Die im Durchschnitt geringe Auslastung des Rohbaus von, über die gesamte Lebensdauer gerechnet, ca. 50 % (siehe auch Abschnitt 2.2.2.1) fällt bei so hohen Investitionskosten besonders ins Gewicht.

Der hohe Investitionsbedarf und die niedrige Auslastung schlagen sich unmittelbar in den Herstellkosten der Fahrzeuge nieder, die mit 15-20 % zum größten Teil vom Rohbau verursacht werden[117] (siehe Abbildung 2-7).

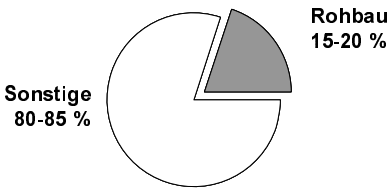


Abbildung 2-7: Anteil des Rohbaus an den Herstellungskosten eines PKW

Die Automobilhersteller versuchen deshalb, die Investitionen für den Rohbau auf eine möglichst große Anzahl produzierter Einheiten zu verteilen. Das kann beispielsweise durch flexible Rohbaukonzepte geschehen[118]. Wegen der hohen Kosten für die Flexibilisierung einer hochautomatisierten Produktionsanlage wie dem Rohbau sind Rohbauten in der Regel jedoch noch wenig flexibel; häufig ist der Rohbau das unflexibelste Gewerk ei-

[113] Bleines, Nestle: Idealrohbau, 2004, S. 6.
[114] in Westeuropa
[115] vgl. Spieckermann *et al.*: Simulation-Based Optimization, 2000, S. 276.
[116] vgl. Fleiner: Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Rohbaualternativen, 2003, S. 14.
[117] vgl. Lorek *et al.*: Business Value of Manufacturing Flexibility, 2002, S. 11.
[118] vgl. N. N.: Outsourcing, 2002, S. 20. Siehe auch Abschnitt 2.3.

ner Automobilfabrik. Bestrebungen, eine Automobilfabrik flexibler zu gestalten, sollten deshalb im Rohbau ansetzen.

2.1.1.5 Der Planungsprozess im Automobilrohbau

Für fast jedes neu eingeführte Modell muss eine neue Produktionslinie im Rohbau geplant und gebaut werden[119].

Die Planung eines Automobilrohbaus setzt sich im Wesentlichen aus den drei Kernaufgaben Anlagen-, Layout- und Arbeitskräfteplanung zusammen[120].

Inhalt der *Anlagenplanung* sind zunächst die Festlegung des Produktionsablaufs und die Planung der erforderlichen Produktionseinrichtungen sowie zu einem späteren Zeitpunkt die Auftragsvergabe, Konstruktion und Inbetriebnahme der Produktionsmittel. Zunächst wird der Produktionsablauf festgelegt und mit Hilfe von Flussdiagrammen visualisiert. Gemeinsam mit der Produktentwicklung wird die Fügefolge festgelegt, die vorgibt, in welcher Reihenfolge die einzelnen Bauteile zu einer Rohkarosse zusammengesetzt werden. Dabei findet bereits eine grobe Zuordnung der Teile und Baugruppen zu den einzelnen Aufbaustufen und Zusammenbauten statt (z. B. „Das Dach wird in Zusammenbau Z2.3 montiert."). Nachdem die Fügefolge detailliert vorliegt, wird ein genaues Anlagenkonzept mit sämtlichen Einsatzfaktoren erstellt[121].

Bei der *Layoutplanung* unterscheidet man mehrere Stufen der Detaillierung, die begleitend zur Anlagenplanung durchlaufen werden: die Erstellung eines Blocklayouts, die Festlegung des Groblayouts sowie die Ausarbeitung des Feinlayouts und später des Ausführungslayouts. Ein Blocklayout stellt die Anordnung von Fertigungslinien dar und ist die gröbste Stufe der Layoutplanung. Es dient der Veranschaulichung des Fertigungsablaufs und ist Grundlage für eine erste Abschätzung der Einsatzfaktoren. Das hierbei erzeugte Layout wird in den folgenden Layoutplanungsschritten sukzessive verfeinert.

Durch das Blocklayout sind Fertigungsablauf und grobe Kapazitäten festgelegt; die Flexibilität eines Rohbaus wird also weitestgehend schon in dieser frühen Planungsphase definiert. Eine Methodik zur Optimierung der Flexibilität von Rohbaukonzepten muss daher bereits in der Phase der Anlagenplanung bei der Festlegung des Produktionsablaufes und der groben Kapazitätsplanung der Produktionseinrichtungen ansetzen.

---

[119] vgl. Spieckermann *et al.*: Simulation-Based Optimization, 2000, S. 276.

[120] In der wissenschaftlichen Literatur existieren zahlreiche Bezeichnungen für die unterschiedlichen Phasen der Planung von Produktionssystemen (vgl. bspw. Felix: Unternehmens- und Fabrikplanung, 1998, S. 37ff und S. 72f, sowie Aggteleky: Fabrikplanung, 1987, S. 30ff). In dieser Arbeit werden die in der *Praxis* der Rohbauplanung üblichen Begriffe verwendet.

[121] vgl. DaimlerChrysler: Intranetsite des "Kompetenzfeld Rohbauplanung", 2004.

Genauere Aussagen über den Bedarf an Einsatzfaktoren sind in dieser Planungsphase nicht möglich. Auch die *Arbeitskräfteplanung* kann in dieser frühen Phase lediglich eine Abschätzung des Arbeitskräftebedarfs liefern.

Üblicherweise werden für die Planung eines Rohbaus etwa zwei bis vier Jahre benötigt[122]; der Planungsprozess beginnt also zwei bis vier Jahre vor der Fertigung des ersten und ca. sieben bis elf Jahre vor der Fertigung des letzten Automobils in der geplanten Anlage. Generell sind Einflussfaktoren auf das Produktionssystem in den frühen Phasen der Planung nur schwer prognostizierbar[123]; die zum Zeitpunkt der Planung verfügbaren Daten für das prognostizierte Absatzvolumen sind vergleichsweise ungenau. Ein Vergleich historischer Daten zeigt, dass die zum Zeitpunkt der Grobplanung einer Automobilfertigung verfügbaren Absatzprognosen von den letztlich eingetretenen Verkaufszahlen um bis zu 40 % sowohl nach oben als auch nach unten abweichen können[124]. Die Kapazitäten eines Rohbaus müssen also auf einer sehr unsicheren Datenbasis dimensioniert werden.

Wegen der Komplexität und des hohen Automatisierungsgrades eines Automobilrohbaus lassen sich zudem im Laufe des Rohbau-Lebenszyklus' weder dessen Kapazitäten reduzieren, noch lässt er sich einer erhöhten Nachfrage durch Ausbau anpassen[125]; auch Kompetenzen einzelner Linien (Welches Modell/Welche Variante kann auf welcher Linie gefertigt werden?) sind nicht änderbar.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass in der Rohbauplanung weitreichende und nicht änderbare Entscheidungen in sehr frühen Planungsphasen auf Basis ungenauer und unsicherer Daten getroffen werden müssen. Daher ist in dieser Planungsphase eine optimale Entscheidungsunterstützung, die alle verfügbaren Daten so gut wie möglich nutzt, aufbereitet und damit für Entscheidungen nutzbar macht, von großer Bedeutung.

2.1.2 Flexibilität

Flexibilität wird seit langer Zeit als wichtiger Erfolgsfaktor im betriebswirtschaftlichen Umfeld und insbesondere im Bereich der Produktion diskutiert. Seit Ende der siebziger Jahre hat sich eine Vielzahl wissenschaftlicher Publikationen mit dem Thema produktionstechnischer Flexibilität beschäftigt[126]: In der Literatur lassen sich über fünfzig verschiedene Definitionen dafür finden[127]. Allerdings wurde bereits in mehreren Arbeiten (zum Beispiel von

---

[122] vgl. Sekine *et al.*: Intelligent Body Assembly System, 1991, S. 7.

[123] vgl. Aurich *et al.*: Produktionsstrategien, 2004, S. 220.

[124] vgl. Muriel *et al.*: Impact of Partial Manufacturing Flexibility, 2003, S. 12.

[125] Die Kapazität lässt sich lediglich durch die Errichtung komplett neuer Linien erhöhen.

[126] vgl. Shi, Daniels: Survey of Manufacturing Flexibility, 2003, S. 415.

[127] vgl. Shewchuk, Moodie: Manufacturing Flexibility Types, 1998, S. 326.

SCHAUERHUBER[128], SHI[129], CHANDRA[130] und VOKURKA UND O'LEARY-KELLY[131]) gezeigt, dass weder ein einheitliches Verständnis noch eine klare Definition des Begriffes „Flexibilität" im Kontext produzierender Unternehmen existieren.

Daher soll in diesem Abschnitt 2.1.2 zunächst die Ausgangslage in der Wissenschaft erläutert werden. Ziel ist dabei nicht eine vollständige Wiedergabe des Standes der Forschung[132]; vielmehr soll beim Leser ein grundlegendes Verständnis für produktionswirtschaftliche Flexibilität geschaffen werden. Dazu wird zunächst der Ausdruck Flexibilität definiert und von ähnlichen Begriffen abgegrenzt (Abschnitt 2.1.2.1). Anschließend gibt Abschnitt 2.1.2.2 einen bündigen Überblick über unterschiedliche Flexibilitätstaxonomien.

Darauf aufbauend erfolgt in Abschnitt 2.3 eine Eingrenzung auf die im Automobilrohbau relevanten Flexibilitätsarten.

2.1.2.1 Grundlegendes Begriffsverständnis

In diesem Abschnitt wird das Flexibilitätsverständnis, das dieser Arbeit zugrunde liegt, erarbeitet. Dazu werden die Begriffe Wandlungsfähigkeit, Reaktionsfähigkeit und Agilität, die häufig in verwandtem Kontext genannt werden, definiert und voneinander abgegrenzt.

2.1.2.1.1 Definition des Begriffes Flexibilität

Ursprünglich stammt das Wort „Flexibilität" aus dem Lateinischen („flectere": biegen) und bedeutet laut BROCKHAUS „Biegsamkeit; Fähigkeit, sich wechselnden Situationen anzupassen"[133]. Eine produktionsspezifische Definition von Flexibilität findet sich im APICS Dictionary: „The ability of the manufacturing system to respond quickly, in terms of range and time, to external or internal changes."[134]

Trotz unterschiedlicher Auffassungen über die Bedeutung produktionswirtschaftlicher Flexibilität teilen nahezu alle Autoren wissenschaftlicher Beiträge die Ansicht, dass Flexibilität als die Fähigkeit eines Systems zu interpretieren sei, sich an unterschiedliche oder sich verändernde Randbedingungen und Anforderungen anzupassen[135].

---

[128] Schauerhuber: Produktionswirtschaftliche Flexibilität, 1998.

[129] Shi, Daniels: Survey of Manufacturing Flexibility, 2003.

[130] Chandra, Tombak: Routing and Machine Flexibility, 1991.

[131] Vokurka, O'Leary-Kelly: A Review on Empirical Research on Manufacturing Flexibility, 2000.

[132] Das wäre, nach mehreren Jahrzehnten intensiver Forschung auf diesem Gebiet, ein schwieriges Unterfangen. Verwiesen sei allerdings auf Abschnitt 2.1.2.2, in dem Übersichtsarbeiten anderer Autoren analysiert werden.

[133] N. N.: Brockhaus Enzyklopädie. Band 7, 1989-1994, S. 377.

[134] Cox, Blackstone: APICS Dictionary, 2001, S. 45.

[135] vgl. Nilsson, Nordahl: Making Manufacturing Flexibility Operational, 1995, S. 5, und Schauerhuber: Produktionswirtschaftliche Flexibilität, 1998, S. 51.

MANDELBAUM lieferte eine der frühesten Definitionen, die in dieser Art immer wieder in der Literatur aufgegriffen wird, und erweitert obigen Gedanken um die Bedingung, dass die Anpassungen effektiv erfolgen müssen:

> *Flexibility is „the ability to respond effectively to changing circumstances“*[136].

Nahezu kongruent, aber mit expliziter Nennung des Charakters der Zukünftigkeit möglicher Veränderungen, definiert PFOHL:

> *Flexibilität ist die „Fähigkeit eines Systems, sich alternativen Situationen anzupassen, die in Zukunft eintreten können“*[137].

Nach TEMPELMEIER UND KUHN bedeutet Flexibilität „das Vorhandensein von Freiheitsgraden“, aufgrund derer es möglich ist, sich Veränderungen in der Umwelt anzupassen[138]. Weitere Autoren heben zudem die Unsicherheiten hervor, mit der zukünftige Entwicklungen verknüpft sind[139], sowie die Fähigkeiten, die Produktionssysteme benötigen, um sich an den Markt anzupassen[140].

Im weiteren Verlauf der Arbeit soll die folgende Definition, die alle für die betrachtete Fragestellung relevanten Aspekte von Flexibilität vereint, verwendet werden:

> *Flexibilität ist die Fähigkeit eines Systems, sich aufgrund von Freiheitsgraden an unterschiedliche oder sich verändernde, auch unsichere Anforderungen und Randbedingungen effektiv anzupassen.*

Potenzielle Anpassungen an neue Anforderungen und Randbedingungen im Rahmen der Flexibilität eines Produktionssystems weisen dabei drei Dimensionen auf: Anpassungsumfang, Anpassungszeit[141] sowie Anpassungskosten[142]. Der mögliche Anpassungsumfang ist festgelegt durch Anzahl und Ausmaß möglicher Konfigurationen des Produktionssystems. Die Anpassungszeit ist bestimmt durch die zeitlichen Ressourcen, die das System benötigt, um die Anpassung durchzuführen und in den neuen Anpassungszustand zu gelangen[143]. Die Anpassungskosten entsprechen dem monetären Aufwand, der zur Durchführung der Anpassung erforderlich ist oder hierdurch verursacht wird[144]. Bei der Bewertung

---

[136] Mandelbaum: Flexibility in Decision Making, 1978, S. 4.

[137] Pfohl: Logistiksysteme, 2000, S. 319.

[138] Tempelmeier, Kuhn: Flexible Fertigungssysteme, 1992, S. 18; vgl. auch Wolf: Investitionsplanung, 1989, S. 8ff.

[139] vgl. bspw. Buzacott, Mandelbaum: Flexibility and Productivity, 1985, S. 404, und Mascarenhas: Planning for Flexibility, 1981, S. 78.

[140] vgl. Witte *et al.*: Planung und Gestaltung wandlungsfähiger und wirtschaftlicher Fabriken, 2005, S. 227.

[141] vgl. Corsten: Produktionswirtschaft, 1999, S. 50.

[142] vgl. Haller: Flexibilitätsbewertung, 1999, S. 15, sowie Shi, Daniels: Survey of Manufacturing Flexibility, 2003, S. 417.

[143] Die Dimensionen Anpassungsumfang und Anpassungszeit stellt HELBERG anschaulich in einem Diagramm dar, vgl. Helberg: PPS als CIM-Baustein, 1987, S. 40.

[144] vgl. Slack: Flexibility as a Manufacturing Objective, 1984, S. 7 und Haller: Flexibilitätsbewertung, 1999, S. 15.

von Anpassungen müssen immer alle drei Dimensionen, also Umfang, Zeit und Kosten, gleichzeitig betrachtet werden[145].

Auf der sehr abstrakten Ebene der oben genannten in dieser Arbeit verwendeten Definition von Flexibilität stimmen viele Autoren damit überein. In der Literatur existiert jedoch eine Vielzahl von Weiterentwicklungen, Abwandlungen und Detaillierungen dieses grundsätzlichen Flexibilitätsbegriffs. Sie werden im Folgenden kurz erläutert.

2.1.2.1.2 Abgrenzung der Begriffe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

In der Diskussion um flexible Produktionssysteme insbesondere in der deutschsprachigen Literatur fällt immer wieder auch der Begriff der wandlungsfähigen Produktion oder der wandlungsfähigen Fabrik. Dabei ist mit Wandlungsfähigkeit die Fähigkeit eines Produktionssystems gemeint, sich entsprechend den Veränderungen der Umwelt zu wandeln und somit den neuen Randbedingungen und Anforderungen anzupassen. Auf dieser Ebene entspricht diese Darstellung also der zuvor ermittelten Definition von Flexibilität.

WESTKÄMPER allerdings versteht Wandlungsfähigkeit als „neue Dimension der Flexibilität“[146] und sieht die Notwendigkeit einer klaren Abgrenzung gegenüber „Flexibilität (im konventionellen Sinne)“[147]. Er definiert:

> *„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.“*[148]

Demgegenüber definiert WESTKÄMPER[149] Wandlungsfähigkeit wie folgt:

> *„Ein System wird als wandlungsfähig bezeichnet, wenn es aus sich selbst heraus über gezielt einsetzbare Prozess- und Strukturvariabilität sowie Verhaltensvariabilität verfügt. Wandlungsfähige Systeme sind in der Lage, neben reaktiven Anpassungen auch antizipative Eingriffe vorzunehmen. Diese Aktivitäten können auf Systemveränderungen wie auch auf Umfeldveränderungen hinwirken.“*[150]

Diese Sichtweise ist kongruent mit den Definitionen von Wandlungsfähigkeit und Flexibilität, wie sie WIENDAHL und SCHMIGALLA definieren: Demnach ist Wandlungsfähigkeit die Anpassungsfähigkeit eines Produktionssystems auch durch strukturelle Änderungen, beispielsweise durch das Hinzufügen von Produktionseinheiten oder durch Änderung der Ab-

---

[145] vgl. Dormayer: Konjunkturelle Früherkennung und Flexibilität im Produktionsbereich, 1986, S. 144.

[146] Westkämper *et al.*: Wandlungsfähigkeit, 2000, S. 24; vgl. Reinhart: Innovative Prozesse und Systeme, 1997.

[147] Westkämper *et al.*: Wandlungsfähigkeit, 2000, S. 24.

[148] ebd., S. 24.

[149] nach einer Definition des Begriffs der Wandelbarkeit eines technischen Systems, auf den hier nicht näher eingegangen werden soll; vgl. ebd., S. 24.

[150] ebd., S. 25.

lauflogik[151]. Flexibilität hingegen bedeutet die Anpassungsfähigkeit ohne strukturelle Änderung, wie zum Beispiel durch Anpassung der Taktzeit oder durch flexible Arbeitszeitmodelle[152].

Gemäß WESTKÄMPER und WIENDAHL ist Flexibilität damit lediglich eine Teilmenge der Wandlungsfähigkeit. Analog definiert REINHART Wandlungsfähigkeit als Kombination aus Flexibilität, die er als „Möglichkeit zur Veränderung in vorgehaltenen Dimensionen und Szenarien“[153] versteht, und Reaktionsfähigkeit. Für ihn ist „Reaktionsfähigkeit ein Potenzial, um jenseits vorgedachter Dimensionen und Korridore agieren zu können“[154].

BUZACOTT trifft eine ähnliche Unterscheidung, jedoch ohne den Begriff der Wandlungsfähigkeit zu verwenden. Er unterscheidet prinzipiell zwei Arten von Flexibilität: zum einen Flexibilitäten, die dem System durch Eingriffe von außen ermöglichen, auf Veränderungen zu reagieren; zum anderen eine Art innere Flexibilität als Eigenschaft des Systems, unter verschiedenen Randbedingungen und Anforderungen wirtschaftlich zu arbeiten[155].

2.1.2.1.3 Die Begriff Agilität

Insbesondere in englischsprachigen wissenschaftlichen Beiträgen zur Diskussion produktionswirtschaftlicher Flexibilität findet sich häufig auch der scheinbar alternativ verwandte Begriff Agilität („agility“), der rein sprachlich am ehesten als Antonym von Trägheit verstanden werden kann.

GOLDMAN, NAGEL und PREISS[156] haben den Begriff der „agilen Organisation“ geprägt. Diesem Konzept liegt die Annahme zugrunde, dass Unternehmen auf veränderte Randbedingungen reagieren müssen. Der Begriff der Agilität unterstreicht sehr stark den zeitlichen Aspekt von Anpassungen, also die Geschwindigkeit, mit der die Anpassungen an neue Situationen durchgeführt werden können. Außerdem werden von diesen Autoren solche Firmen als agile Unternehmen bezeichnet, die nicht nur auf Unsicherheiten und unvorhergesehene Veränderungen ihrer Umwelt *re*agieren, sondern zudem proaktiv versuchen, ihre Umwelt zu beeinflussen oder gar zu steuern.

Agilität kann also einerseits als die zeitliche Komponente von Flexibilität verstanden werden. Andererseits wird Agilität als Maxime der Unternehmensführung betrachtet[157] und

---

[151] vgl. Wiendahl: Wandlungsfähigkeit: Neues Zielfeld in der Fabrikplanung, 2000, S. 37.

[152] vgl. Schmigalla: Fabrikplanung, 1995, S. 7.

[153] vgl. Reinhart *et al.*: Reaktionsfähigkeit für Unternehmen, 1999.

[154] vgl. ebd.

[155] vgl. Buzacott, Yao: Flexible Manufacturing Systems, 1986, S. 897.

[156] vgl. Goldman *et al.*: Agile Competitors and Virtual Organizations, 1995, und Goldman *et al.*: Agil im Wettbewerb, 1996.

[157] vgl. Warnecke: Agilität und Komplexität: Gedanken zur Zukunft produzierender Unternehmen, 1997.

lässt damit die Fähigkeit zu Veränderung und Anpassung bereits auf der Ebene der Unternehmensstrategie und -kultur beginnen[158].

SHAW ET AL.[159] stellen eine Struktur zur Beschreibung von Agilität im Kontext der Unternehmensführung auf. Dieser zufolge stellt Flexibilität eine notwendige Voraussetzung für Agilität dar.

2.1.2.1.4 Weitere Verwendung der Begriffe

In der vorliegenden Arbeit wird durchgehend der Begriff Flexibilität verwendet; die Begriffe Wandlungsfähigkeit und Agilität bleiben unberücksichtigt:

Eine Differenzierung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit erscheint für Strukturierungszwecke sinnvoll, für diese Arbeit, deren Zielsetzung die Optimierung der Flexibilität im Automobilrohbau ist, jedoch nicht: Für die Erreichung der Zielsetzung von Flexibilisierungsvorhaben ist wichtig, *dass* ein Produktionssystem den vorgegebenen Anforderungen genügt; unerheblich ist dagegen, ob es die Anforderungen mit oder ohne strukturelle Anpassungen erfüllt. Wichtig ist weiterhin[160], dass bei der Bewertung alle Vor- und Nachteile, also alle relevanten Aufwände und Nutzen, vollständig erfasst und einander gegenübergestellt werden – unabhängig davon, ob es Aufwände im Rahmen von Flexibilität oder von Wandlungsfähigkeit sind.

Daher[161] soll in dieser Arbeit keine weitere Differenzierung der beiden Begriffe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit erfolgen. Die in Abschnitt 2.1.2.1.1 aufgestellte Definition für Flexibilität umfasst deshalb sowohl Anpassungen mit als auch solche ohne strukturelle Veränderungen des Produktionssystems; der Begriff Wandlungsfähigkeit wird nicht verwendet.

Agilität im Sinne einer Maxime oder Strategie der Unternehmensführung ist nicht Teil des Betrachtungsbereiches dieser Arbeit. Wird Agilität jedoch als die „Geschwindigkeit" von Flexibilität verstanden, so ist dieser Aspekt bereits durch die zeitliche Dimension von Flexibilität Teil des verwendeten Flexibilitätsbegriffes, so dass die Verwendung eines eigenständigen Ausdrucks für diese Arbeit weder erforderlich noch zielführend erscheint. Der Ausdruck Agilität wird daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verwendet.

---

[158] vgl. Chryssolouris: An Assessment of Flexibility in Manufacturing Systems, 1992, S. 107.

[159] vgl. Shaw *et al.*: Response Capabilitites, 2001, S. 2.

[160] siehe dafür auch Abschnitt 3.1.4.

[161] Für das Anwendungsbeispiel Automobilrohbau wurde außerdem in Abschnitt 2.2.2.1 gezeigt, dass der Rohbau im Allgemeinen über keine Wandlungsfähigkeit verfügt, sondern Anpassungen im Laufe des Lebenszyklus' ausschließlich über „weiche Parameter" wie das Schichtmodell erfolgen können, so dass auch aus diesem Grunde keine Differenzierung der Begriffe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit erforderlich ist.

2.1.2.2 Arten von Flexibilität

Selbst bei Zugrundelegen einer einheitlichen Definition für produktionswirtschaftliche Flexibilität, wie sie in Abschnitt 2.1.2.1.1 hergeleitet wurde, lässt sich eine Vielzahl von Flexibilitätsarten recherchieren. Wegen der Fülle an Arbeiten zum Thema produktionswirtschaftlicher Flexibilität und der daraus resultierenden Vielfalt an Begriffen ist es nicht erstaunlich, dass in der wissenschaftlichen Literatur mehrere Systematisierungsansätze veröffentlicht wurden.

Im Folgenden sollen einige der wichtigsten Flexibilitätsgliederungen vorgestellt und diskutiert werden, um darauf aufbauend in Abschnitt 2.3 eigene Überlegungen anzustellen und den Betrachtungsbereich für die weitere Bearbeitung im Rahmen dieser Arbeit einzugrenzen.

2.1.2.2.1 Veränderungstypen nach WIENDAHL

WIENDAHL schlägt eine „nach (betrieblichen) Ebenen gegliederte Betrachtung“ der Flexibilität vor[162]. Die unterste Ebene entspricht einem einzelnen Arbeitsplatz. Die nächste Ebene umfasst Fertigungs- bzw. Montagegruppen, z. B. Zellen oder Linien mit und ohne Puffer. Übergeordnet sind Produktionsbereiche, Werke und Standorte. Daran ausgerichtet definiert WIENDAHL Veränderungstypen einer Fabrik (siehe Abbildung 2-8). In ihrer detaillierten Literaturstudie bezeichnen DE TONI und TONCHIA diese Gliederung als vertikale Klassifizierung[163].

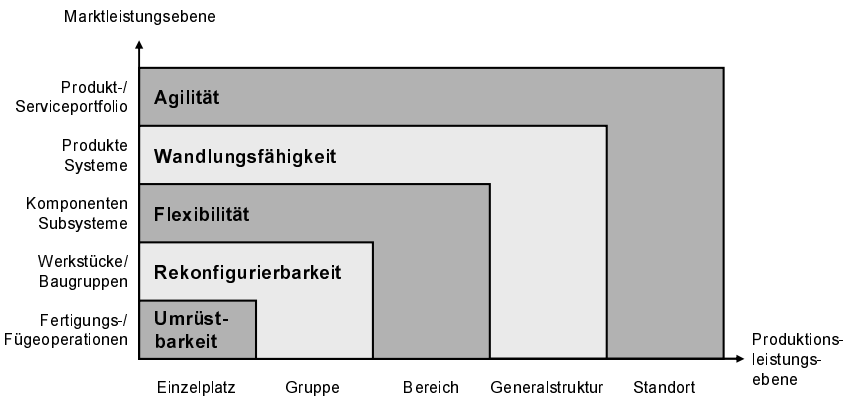


Abbildung 2-8: Veränderungstypen nach WIENDAHL[164]

[162] Wiendahl: Wandlungsfähigkeit, 2002, S. 126f.

[163] vgl. De Toni, Tonchia: Manufacturing Flexibility, 1998, S. 1592.

[164] Wiendahl: Wandlungsfähigkeit, 2002, S. 126.

2.1.2.2.2 Flexibilitätsdimensionen nach NILSSON UND NORDAHL

NILSSON UND NORDAHL entwickeln ein Rahmenkonzept zur Bewertung produktionswirtschaftlicher Flexibilität[165]. Dafür legen sie eine Charakterisierung von Flexibilitätsarten in drei generischen Dimensionen zugrunde: Flexibilitätsbezug, Flexibilitätsnutzung und Flexibilitätsübereinstimmung.

Der Flexibilitätsbezug gliedert Flexibilitätsarten in intern und extern. Die Autoren verstehen unter interner Flexibilität diejenigen Flexibilitätsarten, die allein innerhalb eines Unternehmens festgelegt werden, beispielsweise Bearbeitungsflexibilität. Interne Flexibilität wird weiter untergliedert in Ressourcen- und Systemflexibilitäten[166]. Unter externer Flexibilität wird die Flexibilität der Beziehungen von Unternehmen (oder Produktionssystemen) mit ihrem Umfeld verstanden.

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Kategorisierungen, die wie NILSSON UND NORDAHL bei der ersten Dimension Flexibilitätsbezug von der Ressourcenseite ausgehen, betrachten die beiden anderen vorgeschlagenen Dimensionen Flexibilitätsnutzung und Flexibilitätsübereinstimmung den Nutzen von Flexibilität.

2.1.2.2.3 Typologie nach GOTTSCHALK

In ähnlicher Weise leitet GOTTSCHALK aus dem eingenommenen Blickwinkel auf produktionswirtschaftliche Flexibilität eine grobe begriffliche Systematisierung ab. Er unterscheidet dabei *ressourcenorientierte*[167] Ansätze und Erklärungsmodelle von solchen, die vorwiegend auf bestimmte Problemstellungen ausgerichtet sind und die er als *zweck-* oder *nutzenorientierte* Flexibilitätsbegriffe bezeichnet[168].

Bei den ressourcenorientierten Flexibilitätsbegriffen steht die Betrachtung von Freiheitsgraden zur Veränderung von Produktionssystemen im Vordergrund. Die Unterscheidung der einzelnen Begriffe erfolgt dabei nach den betrachteten betrieblichen Funktionen, Objekten und Teilsystemen wie bspw. Maschinen und Anlagen, aber auch Personal oder Organisationsstrukturen.

Zweckorientierte Flexibilitätsbegriffe stellen die Erfüllung sich durch veränderte Anforderungen ergebender neuer Produktionsaufgaben in den Vordergrund. Sie stellen einen Zusammenhang zwischen Flexibilitätsbedarf und Flexibilität des Produktionssystems her. Die

---

[165] vgl. Nilsson, Nordahl: Making Manufacturing Flexibility Operational, 1995, S. 5.

[166] Diese beiden Gruppen decken sich mit den Grundflexibilitäten bzw. den Systemflexibilitäten nach Sethi und Sethi (vgl. Abschnitt 2.1.2.2.5).

[167] Der Begriff der Ressource bezeichnet bei Gottschalk die Gesamtheit von Material, Anlagen und Personal etc., die in einem Prozess zur Herstellung von Produkten benötigt wird.

[168] vgl. Gottschalk: Flexibilitätsprofile, 2005.

vom System bereitgehaltene Flexibilität wird dabei ins Verhältnis zur geforderten Flexibilität, dem Flexibilitätsbedarf, gesetzt[169].

Als eine dritte Begriffsgruppe identifiziert GOTTSCHALK Fähigkeiten von Betrieben bzw. Unternehmen, die im Zusammenhang mit der Kultur und sozialen Kompetenz einer Organisation stehen, sich als Wertschöpfungspartner flexibel in Produktions- und Logistiknetzwerke einzubringen.

2.1.2.2.4 Taxonomie nach BROWNE ET AL.

Die meisten Autoren von Flexibilitätstaxonomien greifen auf die Struktur von BROWNE ET AL. zurück[170]. Die Taxonomie von BROWNE ET AL. teilt die verschiedenen Arten von Flexibilität in acht Klassen ein[171]. Zwar war der Fokus bei der Entwicklung der Taxonomie auf flexible Fertigungssysteme gerichtet, doch lässt sich die Klassifikation auch auf jedes andere Produktionssystem, wie z. B. den Rohbau als ein Montagesystem, übertragen.

Die einzelnen Arten von Flexibilität, die BROWNE ET AL. identifizieren, sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden[172].

- *Bearbeitungsflexibilität (machine flexibility)* beschreibt die Fähigkeit einer Maschine oder eines Produktionssystems, eine Anzahl unterschiedlicher Fertigungsoperationen (z. B. Drehen, Bohren, Fräsen) auszuführen[173].
- *Produktflexibilität (product flexibility)*, oft auch *Produktmixflexibilität* genannt, ist die Fähigkeit eines Produktionssystems, verschiedene Produkte oder Produkte in unterschiedlichen Zusammenstellungen zu fertigen[174].
- Unter *Routenflexibilität (routing flexibility)* versteht man die Fähigkeit eines Systems, ein Produkt auf unterschiedlichen Materialrouten durch das System herzustellen. Der ursprüngliche Gedanke bei der Definition von Routenflexibilität war, redundante Wege im Produktionssystem für den Fall einer Störung vorzuhalten. Allerdings kann Routenflexibilität auch ohne Eintreten einer Störung positive Auswirkungen beispielsweise auf die Optimierung der Auslastung eines Produktionssystems haben.

---

[169] vgl. dazu auch den Begriff der Flexibilitätsübereinstimmung bei Nilsson und Nordahl (Nilsson, Nordahl: Making Manufacturing Flexibility Operational, 1995, S. 10).

[170] vgl. Parker, Wirth: Manufacturing Flexibility, 1999, S. 430.

[171] vgl. Browne *et al.*: Classification of Flexible Manufacturing Systems, 1984, S. 114.

[172] vgl. ebd., S. 115ff.

[173] vgl. auch die machine flexibility nach CHRYSSOLOURIS (vgl. Chryssolouris: Flexibility, 1996, S. 748f; Barad, Sipper: Flexibility in Manufacturing Systems, 1988, S. 238, und Buzacott: Principles of Flexibility, 1982, S. 13ff) und die Flexibilität auf Maschinenebene nach GUPTA (vgl. Gupta: Manufacturing Flexibility, 1993, S. 2949f).

[174] vgl. auch design flexibility nach ELANGO (vgl. Elango: Selecting a Flexible Manufacturing System, 1994, S. 122) und product flexibility nach Chryssolouris (vgl. Chryssolouris: Flexibility, 1996, S. 583).

- Die *Prozessflexibilität (process flexibility)* beschreibt die Anzahl verschiedener Werkstücke, die das Produktionssystem ohne Rekonfigurations- oder Umbaumaßnahmen produzieren kann[175].
- Als *Volumenflexibilität (volume flexibility)* wird die Fähigkeit eines Produktionssystems bezeichnet, bei unterschiedlichen Ausbringungsmengen wirtschaftlich zu produzieren[176]. Die betrachteten Produktionsvolumina müssen sich dabei innerhalb der technischen Kapazität bewegen.
- Volumenflexibilität bewegt sich ausschließlich innerhalb der technischen Kapazitätsgrenze. *Erweiterungsflexibilität (expansion flexibility)* hingegen beschreibt die Fähigkeit, diese technische Kapazitätsgrenze unter vertretbarem Aufwand zu erhöhen. Die Wirtschaftlichkeit ist in dieser Betrachtung außen vor gelassen. Andere Definitionen messen Erweiterungsflexibilität anhand des notwendigen Aufwandes, die Kapazität eines Systems zu erhöhen, wenn dies erforderlich wird.
- Sowohl eine Eigenschaft des Werkstücks als auch eine Fähigkeit des Produktionssystems ist die *Ablaufflexibilität (operation flexibility)*. Sie ist vorhanden, wenn ein Werkstück in unterschiedlichen technologischen Reihenfolgen bearbeitet werden kann und das Produktionssystem variabel in der Sequenz der Bearbeitungsschritte ist.
- *Produktionsflexibilität (production flexibility)* ist das Produkt der zuvor genannten sieben Flexibilitätsarten. Sie beschreibt die Vielzahl von Produkten, die ohne erhebliche Änderungen produziert werden können.

2.1.2.2.5 Strukturierung nach SETHI UND SETHI

Eine der umfassendsten Übersichten verschiedener Flexibilitätsbegriffe stammt von SETHI UND SETHI, die über fünfzig Begriffe für unterschiedliche Arten von Flexibilität identifizieren konnten[177]. SETHI UND SETHI erweitern in ihrer umfassenden Arbeit die Taxonomie von BROWNE ET AL. um Handhabungsflexibilität, Programmflexibilität und Marktflexibilität.

- *Handhabungsflexibilität (material handling flexibility)* beschreibt die Fähigkeit eines Systems, unterschiedliche Werkstücke effizient auf beliebigen Wegen durch das

---

[175] Häufig wird diese Art von Flexibilität auch als Einsatzflexibilität (vgl. Behrbohm: Flexibilität in der industriellen Produktion, 1985, S. 83) bezeichnet. Auch die Begriffe kurzfristige Flexibilität (vgl. Warnecke: Flexible Manufacturing Systems, 1982, S. 345) und job flexibility (vgl. Buzacott: Principles of Flexibility, 1982, S. 14ff) werden verwendet.

[176] vgl. auch ähnliche Definitionen von ELANGO (Elango: Selecting a Flexible Manufacturing System, 1994, S. 122), CHRYSSOLOURIS (Chryssolouris: Flexibility, 1996, S. 581) und GERWIN (Gerwin: Manufacturing Flexibility, 1993, S. 399) sowie WIENDAHL (Wiendahl: Produkt- und Produktionsflexibilität, 1981, S. 295), BOMM (Bomm: Zielsystem zum Investitionscontrolling, 1992, S. 78ff) und OST (Ost: Wirtschaftliche Bewertung der Produktionsflexibilität, 1995, S. 153).

[177] vgl. Sethi, Sethi: Flexibility in Manufacturing, 1990, S. 238.

Produktionssystem zu steuern[178]. Dazu gehört neben dem Transport der Teile auch die Fähigkeit, die Teile in den Maschinen zu laden beziehungsweise zu entladen und die Teile zu lagern.

- *Programmflexibilität (program flexibility)* ist die Fähigkeit eines Produktionssystems, lange Zeit unbeobachtet und ohne Einflussnahme von außen zu agieren. Auch diese Definition wurde mit Fokus auf flexible Fertigungssysteme entworfen und nimmt Bezug auf die Programmierung dieser Anlagen.
- Die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich leicht an wechselnde Marktanforderungen anzupassen, wird unter dem Begriff *Marktflexibilität (market flexibility)* zusammengefasst. Damit befähigt die Marktflexibilität ein Produktionssystem, neue Produkte zu fertigen und auf wechselnde Stückzahlnachfragen zu reagieren.

Die erweiterten Flexibilitätsarten gliedern SETHI UND SETHI auf Basis ihres Wirkungsbereiches in Grundflexibilitäten, Systemflexibilitäten und übergeordnete Flexibilitäten[179]:

- Bei den Grundflexibilitäten („component flexibilities“ oder „basic flexibilities“) handelt es sich um Flexibilitätsarten, über die die einzelnen Komponenten eines Produktionssystems verfügen können. Diese Komponenten sind Produktionseinrichtungen wie Maschinen, Fördersysteme oder auch ganze Produktionsbereiche. Zur Gruppe der Grundflexibilitäten gehören die Bearbeitungsflexibilität, die Handhabungsflexibilität und die Ablaufflexibilität.
- Während die Grundflexibilitäten Eigenschaften von Komponenten eines Produktionssystems sind, beschreiben die Systemflexibilitäten Fähigkeiten des gesamten Produktionssystems. Die Systemflexibilitäten sind Prozessflexibilität, Produktflexibilität, Routenflexibilität, Volumenflexibilität sowie Erweiterungsflexibilität.
- Die übergeordneten Flexibilitäten wiederum sind aggregierte Flexibilitätsformen: Programmflexibilität, Produktionsflexibilität sowie Marktflexibilität.

Die Zuordnung der einzelnen Flexibilitätsarten zu den von SETHI UND SETHI verwendeten Kategorien ist in Abbildung 2-9 veranschaulicht.

Gemäß der von GOTTSCHALK vorgeschlagenen Typologie handelt es sich bei den von SETHI UND SETHI als Grundflexibilitäten klassifizierten Flexibilitätstypen um ressourcenorientierte Flexibilitätsbegriffe und bei den von SETHI UND SETHI als übergeordnete Flexibilitäten klassifizierten Typen um zweckorientierte Flexibilitätsbegriffe. SETHI UND SETHIs Systemflexibilitäten umfassen sowohl ressourcen- als auch zweckorientierte Begriffe.

---

[178] vgl. auch die Transferflexibilität nach BARAD ET AL. (vgl. Barad, Sipper: Flexibility in Manufacturing Systems, 1988, S. 239).

[179] vgl. Sethi, Sethi: Flexibility in Manufacturing, 1990, S. 296f.

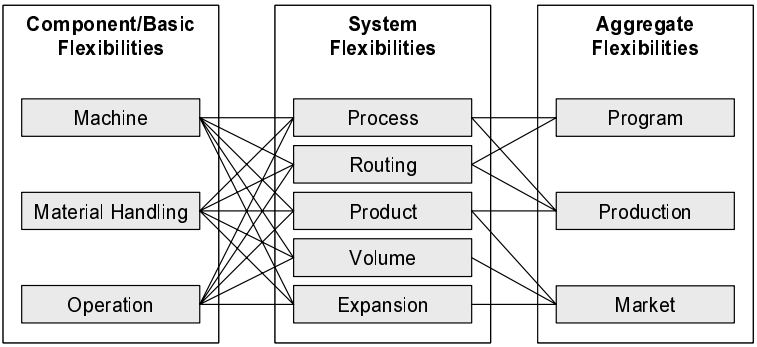


Abbildung 2-9: Strukturierung der Flexibilitätsarten nach SETHI UND SETHI

Zahlreiche Flexibilitätsmodelle anderer Autoren bauen auf der Klassifikation von SETHI UND SETHI auf[180].

2.1.2.2.6 Entscheidungsebenen nach CARLSSON und UPTON

In zwei voneinander unabhängigen Arbeiten stellen CARLSSON und UPTON heraus, dass Flexibilitätsentscheidungen auf drei Ebenen getroffen werden können: strategische, taktische und operative Entscheidungen[181].

Flexibilitätsentscheidungen auf der strategischen Ebene dienen der Bestimmung des angemessenen Investitionsaufwandes in Flexibilität und der Festlegung, in welche Arten von Flexibilität investiert werden soll.

Taktische Flexibilitätsentscheidungen betreffen die Erarbeitung von Konzepten und Prozessen zur Generierung oder Sicherung von Flexibilität in einem Produktionssystem. Durch taktische Flexibilitätsentscheidungen wird festgelegt, welche Art von Flexibilität im System geschaffen und an welchen Stellen im System sie installiert werden soll. Taktische Flexibilitätsentscheidungen erfordern daher Messgrößen für Flexibilität und Aussagen über den zu erwartenden Nutzen von Investitionen in Flexibilität.

Der operativen Ebene schließlich gehören alle Betrachtungen an, die auf die effiziente Nutzung bereits installierter Flexibilität eines Produktionssystems abzielen. Das Ziel operativer Flexibilitätsentscheidungen ist es, den maximalen Nutzen aus bereits getätigten Investitionen in Flexibilität zu ziehen[182].

---

[180] vgl. bspw. Narain *et al.*: Strategic Implications of Flexibility, 2000, S. 203, De Toni, Tonchia: Manufacturing Flexibility, 1998, S. 1600, und Barad, Sipper: Flexibility in Manufacturing Systems, 1988, S. 238ff.

[181] vgl. Carlsson: Flexibility, 1989, S. 73, sowie Upton: Management of Manufacturing Flexibility, 1994, S. 181f. Auch NARAIN ET AL. (vgl. Narain *et al.*: Strategic Implications of Flexibility, 2000) ordnen Flexibilität nach den sie erfordernden Problemstellungen in strategisch-langfristige, taktisch-mittelfristige und kurzfristig-operative Flexibilitätsarten.

[182] vgl. Upton: Management of Manufacturing Flexibility, 1994, S. 182f.

2.1.2.2.7 Qualitative und quantitative Flexibilität

Grundsätzlich lassen sich produktionswirtschaftliche Flexibilitätsarten in qualitative und quantitative Arten unterscheiden. Implizit oder explizit sind diese Kategorien in den verschiedensten Flexibilitätsklassifizierungen enthalten. Sie beschreiben grundlegend unterschiedliche Eigenschaften von Produktionssystemen oder -ressourcen:

Die qualitative Flexibilität beschreibt, ob bzw. in welchem Ausmaß Produktionsressourcen nur für einen einzigen oder für unterschiedliche Produktionsprozesse einsetzbar sind[183]. Weil das Spektrum zu produzierender Produkte und für deren Produktion benötigter Produktionsverfahren kontinuierlich größer wird, steigt die Bedeutung der qualitativen Flexibilität in der betrieblichen Praxis.

Die quantitative Flexibilität beschreibt die Fähigkeit von Produktionsressourcen, ihren mengenmäßigen Ausstoß zu verändern. Diese Veränderung kann entweder durch die Anpassung der Intensität eines Produktionsprozesses[184] oder durch die Verlängerung oder Verkürzung der Dauer der Ressourcennutzung erfolgen[185]. Der Ausstoß eines Montagesystems kann z. B. durch die Veränderung der Taktzeit (Anpassung der Intensität) oder durch Zusatz- oder Freischichten (Anpassung der Dauer der Ressourcennutzung) innerhalb der gegebenen Rahmenbedingungen verändert werden.

Häufig sind qualitative und quantitative Flexibilität von Produktionssystemen verknüpft. Die im Beispiel genannte Veränderung der Taktzeit führt in der Regel zu einem veränderten Personalbedarf. Kann beispielsweise ein zusätzlicher Bedarf an Arbeitskräften in der Montage durch den Einsatz auch für die Montage qualifizierter Mitarbeiter der Fertigung gedeckt werden (liegt also qualitative Flexibilität vor), so erhöht dies im genannten Beispiel offensichtlich in gewissem Maße auch die quantitative Flexibilität. In der Regel beeinflusst eine hohe qualitative Flexibilität eines Produktionssystems die quantitative Flexibilität des Systems positiv.

2.1.2.2.8 Weitere Ansätze zur Klassifizierung von Flexibilitätsarten

In der wissenschaftlichen Literatur existieren unzählige weitere Ansätze zur Kategorisierung von Flexibilität und Flexibilitätsverursachern, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen werden soll. Drei für die nachfolgenden Erwägungen relevanten Klassifizierungen seien jedoch kurz erwähnt:

---

[183] vgl. Schönsleben: Logistikmanagement, 2004, S. 165.

[184] Vielfach wird dafür der Begriff Produktionsintensität verwendet. Produktionsintensität ist eine Maß für die auf Dauer erreichbare Anzahl an Leistungsabgaben je Zeiteinheit; vgl. Stützle: Langfristige Kapazitätsplanung, 1987, S. 15ff sowie Böning: Controlling von Produktionssystemen, 1997, S. 22f und Corsten: Produktionswirtschaft, 1999, S. 16.

[185] vgl. Schönsleben: Logistikmanagement, 2004, S. 165f, sowie Zäpfel: Produktionswirtschaft, 1982, S. 10f.

Mehrere Autoren schlagen eine *zeitbezogene* Klassifizierung von Flexibilitätsarten vor. REFA z. B. unterscheidet zwischen kurzfristigen und langfristigen Flexibilitätsarten[186]. Auch NAREIN ET AL. verwenden diese Unterscheidung[187]. Vielfach werden allerdings die Zeitbezüge nicht näher definiert[188].

GUPTA UND GOYAL sehen in der Art der Messung und Bewertung der Produktionsflexibilität – etwa durch die Bestimmung des betriebswirtschaftlichen Nutzens, durch Performance-Kenngrößen oder durch entscheidungstheoretische Ansätze – eine geeignete Möglichkeit zur Systematisierung[189].

WIENDAHL[190] schlägt eine Klassifizierung von Flexibilität erfordernden Nachfragearten vor. Er gliedert dabei die Nachfrage in den beiden Dimensionen Schwankungsausmaß und Vorhersagegenauigkeit; die vier resultierenden Nachfragearten (vier Quadranten im sich ergebenden Portfolio) bezeichnet er mit dynamisch, pseudo-turbulent, turbulent und stochastisch (vgl. Abbildung 2-10).

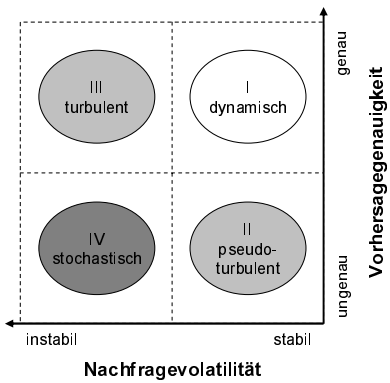


Abbildung 2-10: Nachfrageklassifizierung nach WIENDAHL[191]

Je nach vorherrschendem Nachfragetyp muss die angemessene Flexibilitätsstrategie gewählt werden.

---

186 vgl. REFA: Methodenlehre der Betriebsorganisation, 1990, S. 46.

187 vgl. Narain *et al.*: Strategic Implications of Flexibility, 2000. Die Autoren ordnen Flexibilität nach den sie erfordernden Problemstellungen in strategisch-langfristige, taktisch-mittelfristige und kurzfristig-operative Flexibilitätsarten.

188 vgl. bspw. Zelenovich: Flexibility, 1982, S321ff., und Merchant: Automation in the Metal Working Manufacturing Industry, 1983, S. 573f.

189 vgl. Gupta, Goyal: Flexibility of Manufacturing Systems: Concepts and Measurements, 1989. Siehe auch Kapitel 3.

190 vgl. Wiendahl: Dynamics Monitoring, 2004, S. 7f.

191 ebd., S. 7.

2.2 Anforderungen an den Automobilrohbau

„Das Problem zu erkennen ist wichtiger, als die Lösung zu finden, denn die genaue Darstellung des Problems führt fast automatisch zur richtigen Lösung."
ALBERT EINSTEIN, Physiker (1879-1955)

Die gegenwärtig vorherrschenden Trends auf dem Automobilmarkt und in der Automobilindustrie erfordern, dass Automobilfabriken sich weiterentwickeln. Dies gilt insbesondere für den kapazitätsstarren, kostenintensiven Rohbau.

In diesem Abschnitt werden zunächst für den Rohbau relevante Trends in der Automobilindustrie geschildert und daraus anschließend Anforderungen an den Automobilrohbau abgeleitet.

2.2.1 Gegenwärtige Trends in der Automobilindustrie

Für den Automobilrohbau lassen sich drei relevante Arten von Trends identifizieren:

- Produktbezogene Trends betreffen die Rohkarosse selbst. Dazu gehören unter anderem der Einsatz neuer Materialien wie z. B. höherfester Stähle oder Aluminium sowie Veränderungen der Karosseriestruktur wie z. B. die Space-Frame-Bauweise.
- Geänderte Fertigungstechnologien und -prozesse ermöglichen einerseits erst den Einsatz neuer Materialien und eine veränderte Produktgestaltung; andererseits machen sie eine kosteneffizientere Produktion möglich.
- Schließlich werden Markttrends, wie z. B. kürzere Typlaufzeiten und niedrigere Stückzahlen pro Modell, einen signifikanten Einfluss auf den Automobilrohbau haben.

2.2.1.1 Produkttrends

Treiber für Produktveränderungen sind neben verbesserter Wirtschaftlichkeit im Wesentlichen legislative Vorgaben[192], die u. a. eine höhere Crashsicherheit sowie eine bessere Recyclingfähigkeit[193], Verwertung und Entsorgung fordern[194].

Neue Materialien

Produktseitig wird vor allem der Einsatz neuer Materialien den Rohbau verändern. Mit dem Einsatz neuer Materialien wird das Ziel verfolgt, Rohkarossen leichter und zugleich steifer

[192] wie z. B. die sog. „Altautorichtlinie" der EU (vgl. N. N.: EU-Altautorichtlinie, 2000).
[193] Die EU fordert für 2015 95 % Recyclingfähigkeit.
[194] vgl. McKinsey/WZL: Tomorrow's Automotive Production, 2005.

zu gestalten sowie eine Verbesserung des Crash-Verhaltens zu erzielen[195]. Die Folge hieraus ist ein wachsender Materialmix.

Leichtbaumaterialien werden momentan vorwiegend für auf Schub beanspruchte Teile sowie für die Außenhaut des Automobils verwendet. Oft bietet sich die Verwendung in Form von „hang on"-Teilen wie z. B. Kotflügeln oder Motorhauben an, da diese nicht thermisch gefügt werden müssen, sondern in der Endmontage der Karosse formschlüssig montiert werden können. Bei großflächigen Teilen wie der Motorhaube kann so eine Gewichtsreduzierung von ca. 50 % erreicht werden[196].

Bedingt durch diese Vorteile nimmt der Einsatz von Aluminium im Automobil jährlich um etwa 5-6 % zu[197]: Waren 2002 durchschnittlich 90 kg Aluminium in einem europäischen Auto verbaut, werden es 2005 bereits 125 kg sein. Bei französischen Herstellern ist der Aluminium-Anteil bereits jetzt deutlich höher[198]. Technologieführer im Einsatz von Aluminiumbauweisen ist AUDI mit den Modellen A8 (18.000 Einheiten/Jahr) und A2 (50.000 Einheiten/Jahr), deren Rohkarossen vollständig aus dem Leichtmetall gefertigt sind.

Obwohl sich abzeichnet, dass AUDI in Zukunft nicht der einzige Hersteller sein wird, der Rohkarossen zu 100 % aus Aluminium fertigt[199], erscheint es unwahrscheinlich, dass ein wesentlicher Anteil der Rohkarossen zukünftig komplett aus Aluminium bestehen wird. Vielmehr wird der Aluminiumanteil am Materialmix einer Rohkarosse aus Kostengründen auf einen geringeren Anteil begrenzt bleiben[200].

Neben Aluminium kommt im Rohbau bereits heute eine Vielzahl anderer Materialien zum Einsatz. Insbesondere hoch- und höchstfeste Stähle, taylor made blanks und Sandwichbleche[201], andere Metalle, z. B. Magnesium, sowie Kunststoffe und Faserverbundwerkstoffe werden zunehmend eingesetzt werden[202]. Außerdem werden in Hohlräumen Strukturschäume zum Einsatz gelangen. Der Gewichtsanteil von Stahl an einer Rohkarosse wird von heute ca. 63 % bis 2020 auf ca. 55 % sinken[203]. Der zunehmende Materialmix wird zu immer neuen Herausforderungen für den Automobilrohbau führen.

---

[195] vgl. Wallentowitz *et al.*: Technologie-Trends in der Automobilindustrie, 2002, S. 174.

[196] vgl. N. N.: Aluminium: Automakers Rethink Production Processes, 2002, S. 15.

[197] vgl. N. N.: Aluminium: Automakers Rethink Production Processes, ebd., S. 14.

[198] Beim PEUGEOT 607 werden 190 kg Aluminium, beim CITROËN C5 150 kg Aluminium verbaut.

[199] vgl. N. N.: Aluminium: Automakers Rethink Production Processes, 2002, S. 14f.

[200] MCKINSEY erwartet einen Anteil von nicht über 25 %, vgl. McKinsey/WZL: Tomorrow's Automotive Production, 2005; BCG (THE BOSTON CONSULTING GROUP) rechnet mit ca. 13 %, vgl. Maurer, Stark: Steering Carmaking into the 21st Century, 2001, S. 22.

[201] Technologien wie Hydroforming, flexibles Walzen, Tiefziehen lackierter Bleche und die Verwendung von Strangpressprofilen unterstützen dabei den Einsatz neuer Materialien und Materialformen.

[202] vgl. Wallentowitz *et al.*: Technologie-Trends in der Automobilindustrie, 2002, S. 174.

[203] vgl. Maurer, Stark: Steering Carmaking into the 21st Century, 2001, S. 22.

Beispielhaft sei auf diese Herausforderungen an Hand der aktuellen BMW 5er-Baureihe eingegangen. Bei diesem Modell ist über die Anbauteile hinaus der komplette Vorderbau aus Aluminium gefertigt. Weil es an den Kontaktflächen von Aluminium und Stahl zu Korrosion kommen kann, müssen neue Fügetechnologien eingesetzt werden. Außerdem muss die Herstellung der Alustrukturen streng getrennt von den Stahlrohbauten erfolgen. Dies zeigt, dass insbesondere der kombinierte Einsatz neuer Materialien häufig auch neue Produktionstechnologien oder -strukturen erfordert und sich damit erheblich auf den Automobilrohbau auswirkt. Im Falle des 5er BMW folgen die Abläufe dennoch dem klassischen Rohbauschema[204]. Dies wird aller Voraussicht nach bei zukünftigen Modellen nicht mehr so sein.

Veränderungen in der Karosseriestruktur

Für Nischenprodukte ist die klassische Schalenbauweise nicht wirtschaftlich. Ein weiterer Trend im Karosseriebau ist deshalb die Trennung von Fahrzeugstruktur und designbestimmender Außenhaut. Diese Trennung soll ermöglichen, einerseits Skaleneffekte durch Gleichteile und standardisierte Prozesse zu generieren, andererseits jedoch ein eigenständiges Produktdesign zur Differenzierung zu erhalten[205].

Neben der bisher fast ausschließlich verwendeten selbsttragenden Karosserie wird deshalb zunehmend auch die Skelettbauweise[206] („space frame“[207]), bei der außer Rohmaterialien auch Halbzeuge (Profile) verwendet werden, zum Einsatz kommen[208, 209]. Die Automatisierbarkeit bleibt dabei ein wichtiges Kriterium in der Produktgestaltung.

Ein weiterer Ansatz, um die gewünschte, möglichst späte Variantenbildung der Rohkarossenkomponenten[210] zu erreichen, sind Plattformstrategien. Dabei wird die Bodengruppe („Plattform“) so entworfen, dass sie für mehrere Modelle verwendet werden kann – ohne dass dies vom Käufer wahrgenommen wird[211]. Durch eine Plattformstrategie und die Verwendung eines Gleichteilekonzeptes, bei dem baureihenübergreifende Gleich- sowie „free

---

[204] vgl. Fleiner: Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Rohbaualternativen, 2003, S. 7.

[205] vgl. Köpcke, Küppers: Skalierbare Karosserie, 2003, S. 10f.

[206] Bei dieser Bauweise trägt ein Skelett die Karosserie. An dieses Skelett werden Anbauteile und Außenhaut angehängt.

[207] Eingesetzt wird diese Technologie momentan vorwiegend für Nischenfahrzeuge. Erstmals in der Großserie verwendet wird das Konzept im FIAT Multipla sowie in den komplett aus Aluminium gefertigten AUDI-Modellen A8 und A2.

[208] In einigen wenigen Fahrzeugen werden auch meist in CFK-Bauweise realisierte Monocoques verwendet (Beispiele sind der MERCEDES/MCLAREN SLR, PORSCHE Carrera GT sowie Fahrzeuge der Formel 1). Allerdings ist diese Technologie für einen Einsatz in der Großserie zu teuer.

[209] THYSSENKRUPP hat in der Studie „NewSteelBody“ durch eine Kombination aus konventioneller Schalenbauweise und Profilbauweise mit Mehrphasenstählen eine Gewichtsreduktion von 24 % sowie eine Erhöhung der Torsionssteifigkeit um 12 % bei nur 2 % Mehrkosten erreicht (vgl. Osburg, Adam: NewSteelBody, 2003, S. 17).

[210] vgl. Köpcke, Küppers: Skalierbare Karosserie, 2003, S. 10f.

[211] Das Beispiel VOLKSWAGEN zeigt, dass eine vom Kunden zu sehr wahrnehmbare Plattformstrategie problematisch ist.

to design"-Teile definiert werden, können so neben einer Reduzierung der Entwicklungskosten um bis zu 30 % und der time to market um bis zu 10 % auch die für die Produktion nötigen Gesamtinvestitionen gesenkt werden[212].

Eine Weiterentwicklung der Plattformstrategie zur Reduktion der Herstellkosten ist die Modularisierung von Rohkarossen[213], die in Zukunft vermutlich noch stärker eingesetzt werden wird[214].

Weitere Trends sind die zunehmende Funktionsintegration und die damit sinkende Anzahl der Bauteile und Fügepunkte[215], die geringeres Gewicht erlauben sowie die Automatisierung erleichtern, sowie skalierbare Teile und Karosserien.

Schließlich wird auch die zunehmende Verbreitung brennstoffzellenbetriebener Fahrzeuge[216] zu grundlegenden Änderungen in der Karosseriestruktur führen: Die Brennstoffzelle wird wahrscheinlich am Fahrzeugboden untergebracht werden, was neben einer Änderung des Aufbaus der Fahrgastzelle auch ein anderes Design des gesamten Antriebsstrangs erfordern wird. BCG erwartet, dass, solange die Stückzahlen solcher Automobile niedrig bleiben, sie auf Basis einer Standard-Plattform realisiert werden werden; mit steigenden Stückzahlen werden die Automobilhersteller jedoch dazu übergehen, eigene Plattformen für brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge zu entwickeln und sie in eigenen Linien zu produzieren[217]; spätestens damit werden die Auswirkungen auf den Rohbau immens sein.

2.2.1.2 Technologie- und Prozesstrends

Der zunehmende Einsatz neuer Materialien im Karosseriebau, steigende Anforderungen an die Steifigkeit der Karosserie, neue Designkonzepte sowie die ständige Suche nach wirtschaftlicheren Verfahren führen dazu, dass im Rohbau vermehrt neue Fügetechnologien eingesetzt werden.

Die Fügestellen beeinflussen maßgeblich das Erscheinungsbild eines Automobils[218]. Die Anforderungen an die Fügetechnologien ergeben sich daher aus der gewünschten Nahtgeometrie, -qualität und -oberfläche, sowie ferner aus Gewichts-, Crash-Verhaltens- und Dämpfungserfordernissen. Daneben spielen Produktivitäts- und damit Kostenerwägungen eine wesentliche Rolle bei der Technologieauswahl.

---

[212] vgl. McKinsey/WZL: Tomorrow's Automotive Production, 2005.

[213] Beispiele sind, neben den „Plattformstrategien" von VOLKSWAGEN und TOYOTA, „Quartering the car" von DAIMLERCHRYSLER und „Mosaik" von OPEL (vgl. Kalmbach, Dannenberg: Automobiltechnologie 2010, 2001, S. 3).

[214] Mercer rechnet bis 2015 mit weltweit ca. 8 % modularen Fahrzeugen (vgl. ebd.).

[215] AUDI hat in der ersten AudiSpaceFrame-Generation die Anzahl der Einzelteile um 30 %, in der zweiten Generation nochmals um 16 % verringert.

[216] BCG rechnet damit, dass in Europa und Nordamerika im Jahr 2020 der Anteil brennstoffzellenbetriebener Fahrzeuge bei ca. 20 % liegen wird (vgl. Maurer, Stark: Steering Carmaking into the 21st Century, 2001, S. 23).

[217] vgl. ebd., S. 28.

[218] vgl. Fleiner: Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Rohbaualternativen, 2003, S. 4.

Generell versuchen die OEMs, die Anzahl der Schweißpunkte pro Fahrzeug zu reduzieren, zum einen, weil Punktschweißen vergleichsweise teuer ist, zum anderen, weil Punktschweißverbindungen korrosionsanfällig sind.

Besonderes Interesse ziehen derzeit Laserschweiß- und -lötverfahren auf sich. Obwohl das konventionelle Widerstandspunktschweißen (Punkt-, Buckel-, Bolzen-, Rollnahtschweißen) nach wie vor die dominierende Schweißtechnologie ist, wird z. B. Laser(punkt)schweißen bereits heute bei fast allen OEMs für ausgewählte Verbindungen eingesetzt. VOLKSWAGEN setzt bei der Produktion des Golf V Laserpunktschweißen erstmals im großen Umfang ein. Besonders vielversprechend ist die bisher kaum verwendete Technologie des *remote lasering*[219]: Die erhöhte Flexibilität dieses Verfahrens erlaubt, bei geringeren Investitionen, eine erhöhte Produktivität im Rohbau. Außerdem erhöht es die Festigkeit der Karosse. Das Verfahren befindet sich noch in der Entwicklungsphase[220]; mit einem flächendeckenden Einsatz im Automobilrohbau wird nicht vor 2015 gerechnet[221]. Neben der Weiterentwicklung der Technologie zur Einsatzreife für die Großserie sind dafür allerdings umfangreichere Anpassungen sowohl im Produkt- als auch im Prozessdesign notwendig. Damit wird sich die Einführung dieser Technologie auch auf die Struktur des Automobilrohbaus auswirken.

Neben Laserschweiß- und -lötverfahren gewinnt im Bereich des thermischen Fügens neben den bisher vorwiegend eingesetzten Lichtbogenschweißverfahren MIG-/MAG-Schweißen das MIG-Löten an Bedeutung.

Überdies nimmt die Bedeutung bisher im Wesentlichen für die Verbindung unterschiedlicher Materialien genutzter mechanischer Blechfügeverfahren (Falzen mit Werkzeugen in Pressen, Falzen mit Vorrichtungen, Rollfalzen; Stanznieten, Clinchen, Toxen) zu.

Bei der Verbindung unterschiedlicher Materialien kommen außerdem zur Erhöhung der Festigkeit zunehmend chemische (Klebe-)Fügeverfahren als Hybridverfahren zum Einsatz[222]. Während Klebeverbindungen bisher im Wesentlichen für Beplankungsteile, nicht aber für tragende Verbindungen eingesetzt wurden, ist das Verfahren inzwischen soweit ausgereift, dass es auch bei Strukturbauteilen eingesetzt werden kann[223].

Nach und nach wird ein immer größerer Anteil der bisher durch klassisches Punktschweißen hergestellten Verbindungen zukünftig mit anderen Verfahren hergestellt werden. Ob-

---

[219] Bei diesem Verfahren werden die Laserschweißköpfe nicht, wie beim Punktschweißen, direkt an die Schweißstelle herangeführt, sondern können über Umlenksysteme von einer zentralen Laserdiode zu verschiedenen Schweißpunkten gelenkt werden. Das Verfahren verringert die Anzahl der benötigten Laserdioden und erhöht deren Einsatzzeit; außerdem erhöht es die Flexibilität von Schweißrobotern.

[220] Unter anderem die hohen Kosten von Festkörperlasern verhindern bisher eine weite Verbreitung des Verfahrens.

[221] vgl. McKinsey/WZL: Tomorrow's Automotive Production, 2005.

[222] vgl. Ladwig, Petz: Herstellung von Modulen, 2003, S. 8f.

[223] vgl. N. N.: Adhesives: Production Solutions Hampered by Unpredictable Behaviour, 2002, S. 16f.

wohl der Anteil der Punktschweißverbindungen auf absehbare Zeit bei über 50 % liegen wird[224], wird sich die Einführung dieser neuen Verbindungstechnologien stark auf die Struktur automobiler Rohbauten auswirken.

Ebenso wie die Produkte (siehe Abschnitt 2.2.1.1) werden auch Produktionssysteme im Automobilrohbau zunehmend standardisiert werden und modular aufgebaut sein.

2.2.1.3 Markttrends

Der größte Einfluss auf die Gestaltung zukünftiger Rohbauten geht jedoch von den vorherrschenden Markttrends aus.

Der offenkundigste Trend ist die wachsende Anzahl unterschiedlicher Fahrzeugmodelle bei allen Herstellern. Insbesondere durch die Einführung von Nischenprodukten wie SUVs, Minivans oder sogenannter Cross-over-Modelle, die die Charakteristika unterschiedlicher Fahrzeuggattungen zu verknüpfen versuchen[225], erlebt die Automobilindustrie derzeit eine bisher beispiellose Modellvielfalt[226]. Allein beim Automobilhersteller DAIMLERCHRYSLER AG stieg die Anzahl neu eingeführter PKW-Modelle der Marke MERCEDES-BENZ in den letzten 15 Jahren von durchschnittlich einem auf derzeit über 2,5 Modelle pro Jahr[227] (vgl. auch *Abbildung* 2-11). Überdies steigt die Zahl der Derivate pro Modell stetig an. Die Hersteller versuchen auf diese Weise, ihre Marktanteile außerhalb der konventionellen Sparten zu sichern und ihre Profitabilität zu steigern[228].

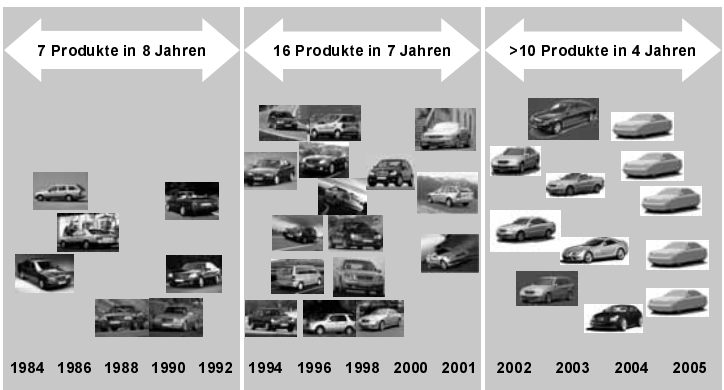


Abbildung 2-11: Steigende Modellvielfalt bei MERCEDES-BENZ

---

[224] vgl. McKinsey/WZL: Tomorrow's Automotive Production, 2005.

[225] Ein Beispiel dafür sind geländegängige Versionen von Fahrzeugen der gehobenen Mittelklasse (wie der Audi Allroad und der Volvo XJ70).

[226] vgl. u. a. Köpcke, Küppers: Skalierbare Karosserie, 2003, S. 2.

[227] vgl. Burke *et al.*: Flexible Fertigung, 2003, S. 6.

Neben der steigenden Modellvielfalt sinkt gleichzeitig die durchschnittliche Typlaufzeit der einzelnen Modelle: Die Produktlebenszyklen werden immer kürzer[229]. Wurden Fahrzeugmodelle Anfang der neunziger Jahre noch etwa neun Jahre lang nahezu unverändert produziert, werden sie heute – trotz häufigerer zwischenzeitlicher Facelifts, also einer im Wesentlichen optischen Überarbeitung und Auffrischung – bereits nach etwa sechs bis sieben Jahren von einem Nachfolgeprodukt abgelöst. Mittelfristig wird von einer Produktlebenszyklusdauer von lediglich ca. fünf Jahren ausgegangen (vgl. Abbildung 2-12)[230].

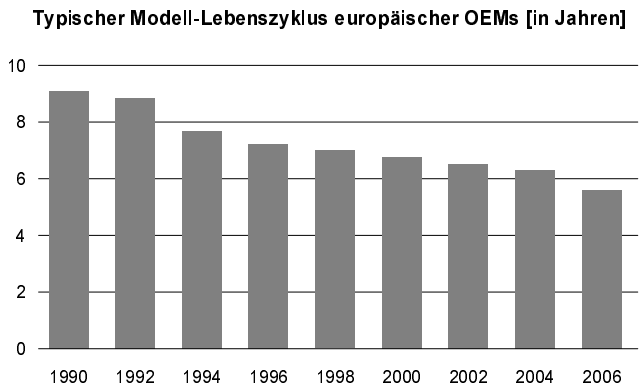


Abbildung 2-12: Entwicklung der durchschnittlichen Dauer eines Modell-Lebenszyklus'

Darüber hinaus entsteht von Kundenseite die Forderung, Automobile nicht nur in einer größeren Modellvielfalt anzubieten, sondern jedes Modell auch mit maßgeschneiderter Ausstattung anzubieten. Beim VW Golf z. B. können Käufer heute über eine Million unterschiedlicher Varianten konfigurieren. Für den Rohbau sind allerdings nur die bereits üblichen vier Varianten relevant, die sich aus der Ausstattungsoption mit oder ohne Schiebedach sowie aus dem Merkmal Rechts- oder Linkslenker ergeben[231].

Außerdem wird zunehmend auch eine kurze Lieferzeit zum Wettbewerbsfaktor[232]. Waren im Jahr 2002 noch Lieferzeiten von vier bis sechs Wochen die Zielsetzung, so streben Hersteller wie BMW oder GENERAL MOTORS heute „order-to-delivery"-Zeiten von ein bis zwei Wochen an[233].

---

228 vgl. N. N.: Benchmarking Projekt Planning Excellence, 2002, S. 3.

229 vgl. Schuh *et al.*: The Factory on Demand, 2005, S. 147, sowie Schuh, Bergholz: Collaborative Production, 2003, S. 393.

230 vgl. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 5.

231 In Einzelfällen führen spezielle Optionen, z. B. die „Langversion" bei Oberklassefahrzeugen wie dem BMW 7er oder der MERCEDES-BENZ S-Klasse, zu weiteren Varianten.

232 vgl. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 1.

233 vgl. Wallentowitz *et al.*: Technologie-Trends in der Automobilindustrie, 2002, S. 177.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass automobile Rohbauten zukünftig eine wesentlich höhere Produktvarianz bei signifikant niedrigeren Produktionsvolumina pro Modell/Derivat bewältigen müssen; Kosten- und Zeitdruck bleiben dabei bestehen.

2.2.2 Dynamik und Risiko

> *„In an era of rapid change, uncertainty is a rule, not an exception. Companies that understand that have the greatest chance to produce spectacular […] successes."*
> ANONYM

Neben den aus den geschilderten Trends resultierenden neuen Anforderungen sind Dynamik und Risiken wesentliche Herausforderungen für den Rohbau[234].

2.2.2.1 Dynamik der Nachfrage: Der Lebenszyklus eines Rohbaus

Die meisten heutigen Rohbaulinien sind Solitärlinien. Auf Solitärlinien kann nur ein Fahrzeugmodell produziert werden, d. h. es ist weder möglich, gleichzeitig ein zweites Modell darauf zu produzieren, noch ist es möglich, nach Auslauf eines Modells ein Nachfolgemodell zu produzieren.

Einerseits ist deshalb die Lebensdauer einer Rohbaulinie unmittelbar an die Lebensdauer des darin produzierten Modells geknüpft. Andererseits wird die Produktionskapazität einer Rohbaulinie nur einmal festgelegt und ist dann über die gesamte Nutzungsdauer konstant (siehe auch Abschnitt 2.1.1.5). Eine Möglichkeit, die Produktionskapazitäten während der Nutzungsdauer zu erweitern oder zu verringern, wie es beispielsweise in der Endmontage mit begrenztem Aufwand möglich ist, besteht im Rohbau aufgrund der engen Verkettung, der hohen Komplexität und des hohen Automatisierungsgrades nicht. Deshalb ist auch die Auslastung der Linie proportional zur Produktnachfrage über der Zeit.

Die Produktnachfrage ist über die Lebensdauer eines Automodells nicht konstant. Eine Rohbaulinie für ein typisches Volumenmodell wird in den ersten vier bis sechs Monaten für die so genannte Nullserie genutzt und mit einer jährlichen Ausbringung von wenigen hundert Einheiten gefahren, um die Prozesse zu optimieren und eine ausreichende Qualität sicherzustellen. Danach erreicht die Nachfrage relativ schnell innerhalb eines Jahres die Kammlinie, d. h. die maximal nachgefragte Stückzahl, und klingt dann kontinuierlich auf etwa die halbe Stückzahl ab. Das letzte Jahr der Produktion ist in der Regel bereits von der Ankündigung und teilweise der Einführung eines Nachfolgeproduktes bestimmt; die Produktionszahlen des Auslaufmodells gehen daher auf ein Minimum zurück.

---

[234] vgl. Schuh *et al.*: Diskontinuitäten auf dem Weg zur Produktion der Zukunft, 2000, S. 23.

Ein typischer Verlauf der Nachfrage für ein Volumenmodell über seinen Produktlebenszyklus ist beispielhaft in Abbildung 2-13 gezeigt. Die durchschnittliche Dauer eines Lebenszyklus' für aktuelle PKW-Modelle ist seit 1990 von neun Jahren auf unter sieben Jahre gesunken[235].

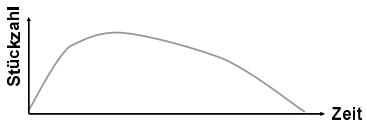


Abbildung 2-13: Typischer Verlauf der Nachfrage über den Produktlebenszyklus

Wie oben beschrieben, korreliert die Auslastung direkt mit der Produktnachfrage. Das führt dazu, dass die Produktionsanlagen zwar während der zwei bis drei Jahre Kammlinienproduktion gut ausgelastet sind, die durchschnittliche Auslastung über die gesamte Nutzungsdauer jedoch selten 50 % übersteigt[236]. Die Dynamik der Nachfrage stellt damit eine wesentliche Herausforderung für den Rohbau dar.

Der einzige wesentliche Freiheitsgrad für Anpassungen während der Lebensdauer eines Rohbaus ist die Anpassung des Schichtmodells. Wegen der hohen Investitionskosten werden Rohbauten in der Regel für einen Dreischichtbetrieb während der Kammproduktion ausgelegt[237]. Durch Verringerung der Schichtanzahl oder durch Zusatzschichten, also durch Wochenendarbeit, kann die Produktionskapazität von Rohbauten in begrenztem Umfang einer veränderten Nachfrage angepasst werden. Gegen Ende ihres Lebenszyklus' werden Rohbauten in der Regel im Zweischichtbetrieb, kurzfristig sogar im Einschichtbetrieb gefahren[238]. Dadurch können die Betriebskosten wesentlich reduziert werden; die hohen Investitionskosten bleiben jedoch davon unberührt.

2.2.2.2 Nachfragerisiken

Die Dynamik beschreibt die Änderung der Nachfrage über der Zeit; sie ist prinzipiell vorhersagbar. Im Gegensatz dazu machen verschiedene Risiken Prognosen über Produktionsanforderungen im Rohbau schwierig, teilweise unmöglich.

Nach ZIEGENBEIN ET AL. [239] lassen sich Risiken für produzierende Unternehmen gemäß der SCOR-Methode in Planungs- und Steuerungsrisiko, Beschaffungsrisiko, Prozessrisiko, Nachfragerisiko und Umweltrisiko klassifizieren, siehe Abbildung 2-14.

---

[235] vgl. VDA: Auto Jahresbericht 2004, 2004; vgl. auch Bleines, Nestle: Idealrohbau, 2004, S. 6.

[236] vgl. Fleiner: Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Rohbaualternativen, 2003, S. 14.

[237] Geplant wird für diese Zeit mit 17 Schichten pro Woche (je drei Schichten Montag bis Freitag sowie zwei Schichten am Samstag).

[238] Bleines, Nestle: Idealrohbau, 2004, S. 15.

[239] vgl. Ziegenbein *et al.*: Robust Planning, 2003, S. 3.

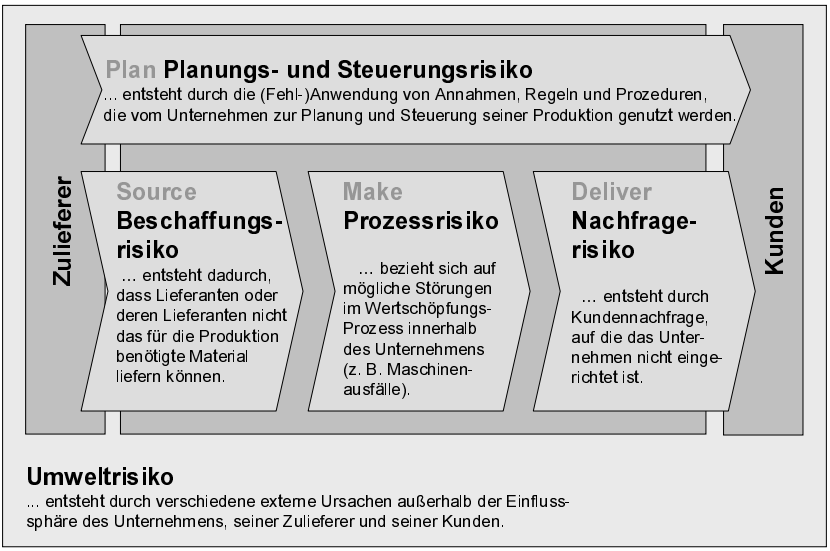


Abbildung 2-14: Risiken für produzierende Unternehmen nach ZIEGENBEIN[240]

Obwohl alle genannten Risikoarten für den Rohbau relevant sind, liegt gemäß der gewählten Zielstellung nur das Nachfragerisiko[241] im Fokus dieser Arbeit.

Während schon vorhersehbare Nachfrageschwankungen, also Dynamik, eine Herausforderung für den Rohbau darstellen, verstärkt das Nachfragerisiko das Problem einer optimalen Dimensionierung von Produktionsanlagen noch. Bei Vorhersage zu hoher Absatzzahlen wird der Rohbau überdimensioniert sein; unnötig hohe Investitionen sind die Folge. Bei Vorhersage zu niedriger Absatzzahlen kann nicht die gesamte Produktnachfrage erfüllt werden; entgangene Opportunitäten sind die Folge. Außerdem kann oft die Nachfrageverteilung auf unterschiedliche Varianten einer Baureihe schlecht vorhergesagt werden.

Nachfragerisiken lassen sich prinzipiell nicht vermeiden. Eine sichere Vorhersage der Nachfrage ist unmöglich; Ziel kann nur eine möglichst genaue Vorhersage von Absatzzahlen sein. Allerdings ist die Vorhersagegüte in der Praxis sehr gering; deshalb sehen sich die Automobilhersteller mit erheblichen Planungsunsicherheiten konfrontiert. Grundlage für alle Planungs- und Dimensionierungsaufgaben der Automobilproduktion ist die prog-

[240] vgl. Ziegenbein, Nienhaus: Coping with Supply Chain Risks, 2004, S. 167.

[241] sowie, in eingeschränkter Form, Prozessrisiken – und zwar insofern, als das als Teil dieser Arbeit vorgestellte Bewertungskonzept auch in der Lage ist, die Reaktion verschiedener Produktionssysteme auf Prozessrisiken wie z. B. den Ausfall eines Zusammenbaus zu bewerten. Allerdings ist diese Bewertungsmöglichkeit eher ein Beiprodukt der Forschungen denn ein Kernergebnis.

nostizierte Nachfrage für die einzelnen Modelle über deren Produktlebenszyklus[242]. Allerdings stimmen die realisierten Absatzzahlen in den seltensten Fällen mit den von der strategischen Programmplanung und vom Vertrieb erstellten Prognosen überein. Ein Vergleich historischer Daten zeigt, dass die zum Zeitpunkt der Grobplanung einer Automobilfertigung verfügbaren Absatzprognosen von den letztlich eingetretenen Verkaufszahlen um bis zu 40 % sowohl nach oben als auch nach unten abweichen können[243].

2.2.3 Resultierende Forderungen an den Automobilrohbau

Grundsätzlich gelten für alle Produktionssysteme die vier konkurrierenden Forderungen von WIENDAHL[244] nach kurzen Durchlaufzeiten, hoher Termintreue, niedrigen Beständen und hoher Kapazitätsauslastung[245]. Diese Ziele (...) lassen sich nicht unabhängig voneinander, sondern nur im Sinne eines Gesamtoptimums verfolgen[246] (vgl. auch Abbildung 2-15). Das Gesamtoptimum zu erreichen meint dabei nicht, das Optimum in jedem der Zielbereiche zu erreichen; eine gleichzeitige Optimierung ist nicht möglich. Vielmehr muss sich die Gewichtung der Teilziele an der Unternehmensstrategie orientieren.

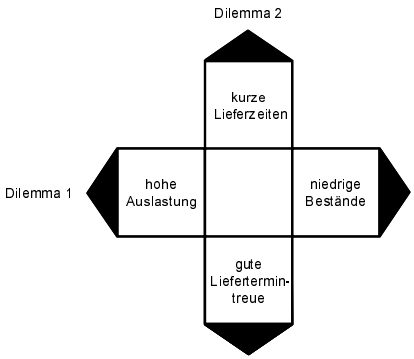


Abbildung 2-15: Konkurrierende Ziele der Produktionssteuerung nach WIENDAHL

Aus Dynamik und Risiko sowie den in Abschnitt 2.2.1 geschilderten Entwicklungen in der Automobilindustrie ergeben sich darüber hinaus neue Forderungen an den Automobilbau; Produktevolution, neue Technologien und unsichere und dynamische Marktanforderungen

---

242 vgl. DaimlerChrysler: Intranetsite des "Kompetenzfeld Rohbauplanung", 2004.

243 vgl. Muriel *et al.*: Impact of Partial Manufacturing Flexibility, 2003, S. 12.

244 vgl. Wiendahl: Fertigungsregelung, 1997.

245 vgl. auch Milberg, Reinhart: Betriebshütte, 1996, S. 10-90: Hier werden die vier Größen nach WIENDAHL ergänzt um die Zielgrößen hohe Reagibilität sowie geringer Rüstaufwand, geringer Transportaufwand usw.

246 ebd., S. 10-90; vgl. auch Beier, Schwall: Fertigungsleittechnik, 1991, S. 45, sowie Spur: Fabrikbetrieb, 1994, S. 95.

stellen hohe Anforderungen an die Produktionssysteme der Zukunft. Nicht nur die Produktentwicklungszeiten müssen sich der erhöhten Geschwindigkeit der Marktveränderungen anpassen[247], auch die Produktion muss sich neu ausrichten, um den neuen Rahmenbedingungen gerecht zu werden und kostengünstig Automobile in der geforderten Qualität bereitzustellen.

Markttrends sind dabei, einerseits mit ihren direkten Auswirkungen auf Nachfrage und Absatzzahlen, andererseits als Treiber für Produkt- und Technologieänderungen, von größter Bedeutung; sie machen grundlegende Veränderungen in der Produktion und insbesondere im Rohbau erforderlich. Die wesentliche Auswirkung der geschilderten Markttrends ist, dass die Anzahl der von einem Modell produzierten Exemplare sinken wird (und damit Investitionen eines Rohbaus nur noch auf kleinere Stückzahlen abgeschrieben werden können). Dies wird deutlich, wenn man die Trends der stetig wachsenden Modellvielfalt und der ständigen Verkürzung der Produktlebenszyklen vor dem Hintergrund der Absatzentwicklung betrachtet: Der Absatz von Neuprodukten stagnierte in den letzten vier Jahren (vgl. Abbildung 2-16).

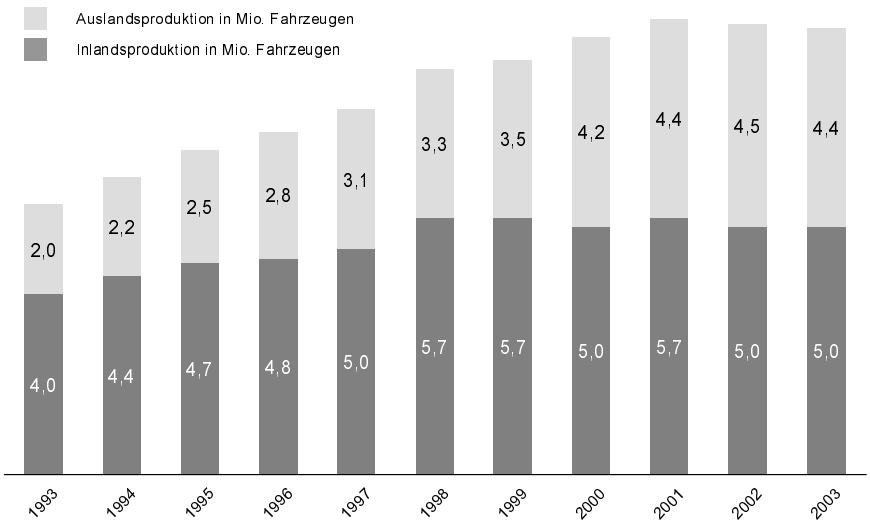


Abbildung 2-16: Automobilproduktion deutscher Hersteller im In- und Ausland[248]

Durch die geringere Anzahl an Fahrzeugen, die von einem Modell produziert werden, wird es also schwieriger, Skaleneffekte zu realisieren[249]. Weil die Kunden nicht bereit sind, die

[247] vgl. Wallentowitz *et al.*: Technologie-Trends in der Automobilindustrie, 2002, S. 176.

[248] VDA: Auto Jahresbericht 2004, 2004, S. 46.

verlangte immer größere Vielfalt[250] monetär zu würdigen[251], wird jedoch gerade dieses Erzielen von Skaleneffekten und damit Kostenvorteilen immer wichtiger. Wegen immer neuer für Automobile verwendeter Technologien für höheren Kundennutzen[252] bedeutet zudem jeder Modellwechsel höhere Investitionen und damit höhere Kosten, da, vielfach auch im Rohbau, mehr Fertigungsinhalte bewerkstelligt werden müssen[253].

Kombiniert man nun die klassischen Ziele der Produktionssteuerung nach Wiendahl, z. B. eine hohe Kapazitätsauslastung, mit den geschilderten neuen Herausforderungen sowie den nach wie vor bestehenden, sich aus Dynamik und Unsicherheit ergebenden Anforderungen, so zeigt sich, dass neue Fertigungskonzepte für den Rohbau umgesetzt werden müssen, um Skaleneffekte nutzbar zu machen.

Deshalb wird es in Zukunft nicht mehr möglich sein, für jedes neue Modell eine eigene Rohbaulinie zu planen und aufzubauen[254]. Vielmehr muss der Automobilrohbau flexibler werden, um weiterhin kostengünstig wettbewerbsfähige Fahrzeuge produzieren zu können[255]. Um die Auslastung der Anlagen zu maximieren, sind die Hersteller gezwungen, mehrere Modelle auf denselben Linien zu fertigen[256]. Dafür müssen flexible Rohbaukonzepte entwickelt werden.

Vor einer Umsetzung flexibler Rohbaukonzepte muss jedoch deren Wirtschaftlichkeit nachgewiesen werden[257].

Die aus den Trends in der Automobilindustrie resultierenden Forderungen an den Rohbau sind in Abbildung 2-17 zusammenfassend dargestellt.

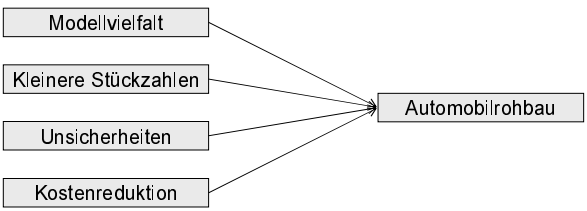


Abbildung 2-17: Resultierende Forderungen an den Rohbau

---

249 vgl. Köpcke, Küppers: Skalierbare Karosserie, 2003, S. 2.

250 Die Kunden verlangen nicht nur Zusatzoptionen wie z. B. eine hochwertige Innenausstattung, sondern, wie in Abschnitt 2.2.1.3 beschrieben, auch eine Vielfalt unterschiedlicher Karosserietypen. Die Vielfalt dieser Karosserietypen wirkt sich direkt auf den Automobilrohbau aus.

251 vgl. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 7.

252 wie z. B. passive und aktive Sicherheitssysteme

253 vgl. Lorek *et al.*: Business Value of Manufacturing Flexibility, 2002, S. 7.

254 vgl. N. N.: BMW Plant Visit, 2002, S. 7.

255 vgl. Köpcke, Küppers: Skalierbare Karosserie, 2003, S. 2.

256 vgl. N. N.: Outsourcing, 2002, S. 20.

2.3 Flexibilität als Lösung

„The OEMs that succeed will be the ones that manage the flexibility of their bodyshops the best."[258]
A. KOCHAN (2002)

Um den im vorhergehenden Abschnitt identifizierten Anforderungen gerecht zu werden, müssen die Automobilhersteller Flexibilitätsstrategien entwickeln[259]. Dabei zeigt sich, dass sich der Flexibilitätsbedarf im Gewerk Rohbau auf wenige Arten von Flexibilität konzentriert. Anhand der aus den Forderungen an den Automobilrohbau (Abschnitt 2.2) abgeleiteten Zielsetzungen der Flexibilisierungsvorhaben lassen sich, aufbauend auf dem in Abschnitt 2.1.2 erarbeiteten Flexibilitätsverständnis, die wesentlichen Arten von Flexibilität im Automobilrohbau ableiten.

2.3.1 Ziele und Nutzen von Flexibilität im Rohbau

Wie SLACK argumentativ herleitet, stellt Flexibilität grundsätzlich keine Zielsetzung erster Ordnung dar[260]; vielmehr dient Flexibilität immer der Erfüllung übergeordneter Zielsetzungen[261]. So ist kein Käufer bereit, einen höheren Preis für ein Produkt zu bezahlen, nur weil dieses auf flexiblen Fertigungseinrichtungen hergestellt wurde[262]. Stattdessen wünschen Kunden ein breites Angebot aktueller Produkte zu geringen Kosten und bei kurzen Lieferzeiten, was zu variierenden Produktstückzahlen und -zusammenstellungen in der Fertigung führt[263].

Mit der Umsetzung flexibler Fertigungskonzepte werden also übergeordnete Zielsetzungen verfolgt. Für den Rohbau ist die Zielsetzung in erster Linie die Erfüllung der Forderungen, wie sie in Abschnitt 2.2.3 hergeleitet wurden. Diese gleichen sich bei allen Herstellern[264] und lassen sich gewerkunabhängig wie folgt formulieren:

> *Die Aufgabe einer Automobilproduktion besteht darin, eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle in immer kleineren, variierenden und zudem unsicheren Mengen in der geforderten Qualität zum gewünschten Zeitpunkt und zu möglichst geringen Kosten auszuliefern.*

---

[257] vgl. Shi, Daniels: Survey of Manufacturing Flexibility, 2003, S. 418.
[258] Kochan: Bodyshop Trends, 2002, S. 3.
[259] vgl. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 1.
[260] vgl. Slack: Focus on Flexibility, 1989, S. 52.
[261] vgl. Corsten: Produktionswirtschaft, 1999, S. 21f.
[262] vgl. Chang: A Framework for Understanding Manufacturing Flexibility, 2000, S. 435.
[263] vgl. Slack: Focus on Flexibility, 1989, S. 52f.
[264] vgl. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 2.

Letztendlich muss Flexibilität also zu Kosteneinsparungen führen. Weil flexible Produktionsanlagen in der Regel teurer sind als nicht flexible, wird dieser Effekt im Wesentlichen dadurch erzielt, dass die insgesamt benötige Kapazität sinkt, wenn mit flexiblen Produktionssystemen produziert wird; dies führt zu wesentlichen Kosteneinsparungen. Außerdem sorgt eine höhere Auslastung flexibler Produktionssysteme (verglichen mit nicht flexiblen) für niedrigere Kosten (siehe Abbildung 2-18).

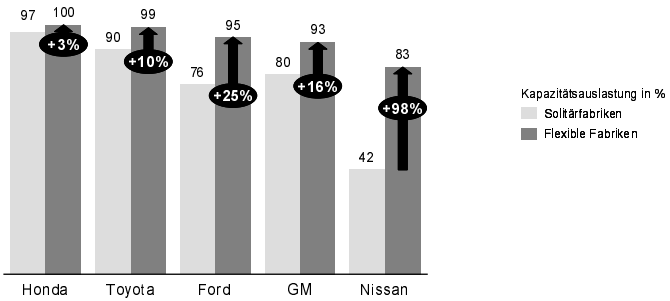


Abbildung 2-18: Auslastung flexibler und nicht flexibler Automobilfabriken in den U.S.A.[265]

Zudem ermöglicht Flexibilität die Nutzung von Produktionsanlagen und -prozessen für unterschiedliche Produkte. Dies führt zu weiteren Kosteneinsparungen durch Skaleneffekte sowie Lerneffekte[266]. Allerdings stehen diesen zusätzlichen Lerneffekten durch höhere Gesamtstückzahlen auch verringerte Lerneffekte durch die geringere Anzahl der von einem Produkt produzierten Einheiten gegenüber. Außerdem nimmt die Amortisationssicherheit von Investitionen in Flexibilität mit zunehmendem Planungshorizont ab[267].

Ziel ist generell nicht die maximale Flexibilität, sondern die wirtschaftlich optimale[268] (vgl. Abbildung 2-19). Je nach Umgebungsbedingungen und internen Zielen kann auch ein nicht flexibles Produktionssystem wirtschaftlicher als ein flexibles sein (vgl. Abbildung 2-20). Die Flexibilitätsstrategie muss sich dabei in die Unternehmensstrategie einfügen[269].

Beispielsweise müssen neben höheren Investitionskosten und generell höheren Betriebskosten für flexiblere Produktionssysteme auch weitere negative Folgen erhöhter Flexibilität berücksichtigt werden: So ist in der Regel die Verfügbarkeit flexiblerer Produktionsanlagen geringer und ihre Anlaufkurve flacher.

---

[265] vgl. Bruynesteyn: Flex Appeal, 2003, S. 5.

[266] Flexible Produktionsanlagen ermöglichen einerseits mehr Lernen (durch mehr Anwendungsfälle, aus denen gelernt werden kann) sowie andererseits eine breitere Anwendung des Gelernten.

[267] vgl. Hernández Morales: Wandlungsfähigkeit, 2003, S. 59.

[268] vgl. Schuh *et al.*: Design for Changeability (DFC), 2004, S. 100, sowie Fine, Freund: Optimal Investment in Product-Flexible Manufacturing Capacity, 1990.

[269] vgl. auch Thielen: Management der Flexibilität, 1993, S. 247f.

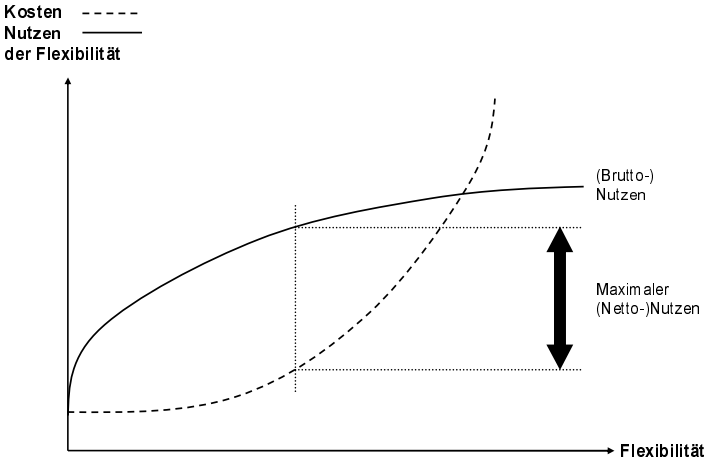


Abbildung 2-19: Abnehmender Grenznutzen von Flexibilität[270]

Außerdem wird nicht nur der Grad an Flexibilität, sondern auch die Art von Flexibilität optimiert: Je nach vorherrschender Nachfrage und identifizierten Risiken[271] muss die angemessene Flexibilitätsstrategie gewählt werden.

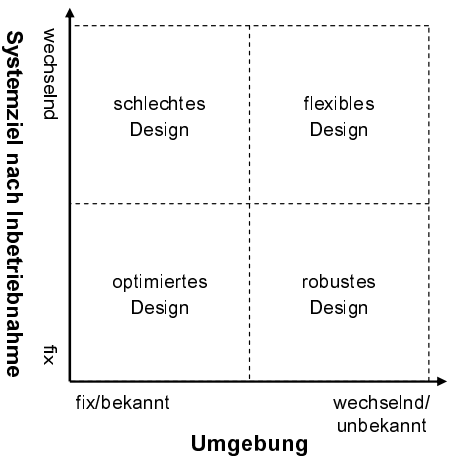


Abbildung 2-20: Flexibilität in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen und Systemzielen[272]

[270] vgl. Schuh *et al.*: Design for Changeability (DFC), 2004, S. 101.

[271] vgl. auch Wiendahl: Dynamics Monitoring, 2004, S. 7f.

Implizit wird von den Automobilherstellern neben der Kostenreduktion und damit Wirtschaftlichkeit[273] außerdem die Zielsetzung verfolgt, Investitionsrisiken zu minimieren, die sich durch die Planungsunsicherheiten ergeben[274]. Flexibilität wird also als „Versicherung gegen Diskontinuitäten“ genutzt; dafür muss eine dem vorherrschenden Risiko angemessene Versicherungsprämie bestimmt werden[275].

2.3.2 Flexibilitätsarten im Rohbau

Aus der im vorhergehenden Abschnitt hergeleiteten Aufgabenbeschreibung lassen sich implizite Zielsetzungen ableiten, die wiederum durch bestimmte Flexibilitätsarten verfolgt werden können. Zunächst müssen daher diese wesentlichen Flexibilitätsarten identifiziert werden: Welche der elf von SETHI UND SETHI[276] identifizierten Flexibilitätsarten sind für den Rohbau relevant? Wie können sie dazu beitragen, die abgeleiteten primären Zielsetzungen von Flexibilität im Rohbau zu erreichen?

Die Forderung nach einer kosteneffizienten Produktion bei geringen Modellstückzahlen führt im Rohbau aufgrund der hohen Anfangsinvestitionen zu der Forderung, mehr als ein Modell auf einer Rohbaulinie zu fertigen, um so die immensen Anlagenkosten (vgl. Abschnitt 2.1.1.4.2) auf eine möglichst große Stückzahl zu fertigender Produkte umzulegen. Die hierfür erforderliche Fähigkeit ist Produktflexibilität, wie sie BROWNE ET AL. definieren. Dabei lässt sich Produktflexibilität unterscheiden in Nachfolgerflexibilität und Produktmixflexibilität. Ein weiterer wichtiger Grund für die Flexibilisierung der Produktion sind Nachfrageunsicherheiten[277], gegen die es sich abzusichern gilt. Eine Absicherung gegen die Unsicherheiten der Stückzahlnachfrage wird durch Volumenflexibilität ermöglicht. Auf Fabrik- und Gewerkeebene sind es also drei Arten von Flexibilität, die in Zukunft wettbewerbsentscheidend sein werden: Nachfolgerflexibilität, Produktmixflexibilität und Volumenflexibilität[278] (vgl. Abbildung 2-21).

Diese Darstellung deckt sich mit den Recherchen und theoretischen Überlegungen, die CHANG hinsichtlich verschiedener Flexibilitätsbedarfe anstellt. Hierbei identifiziert er zwei Arten von Flexibilitätsbedarfen: „interne“ und „externe“ Flexibilitätsbedarfe. Während interner Flexibilitätsbedarf[279] verursacht wird durch Anlagenstillstände, unterschiedliche Bear-

---

[272] vgl. Saleh *et al.*: Extracting the Essence of Flexibility, 2001, S. 9.

[273] vgl. Köpcke, Küppers: Skalierbare Karosserie, 2003, S. 2.

[274] vgl. N. N.: Outsourcing, 2002, S. 19.

[275] vgl. Schuh *et al.*: Scenario-Based Lifecycle Analysis of Manufacturing Systems, 2005.

[276] vgl. Abschnitt 2.1.2.2.5 sowie Sethi, Sethi: Flexibility in Manufacturing, 1990, S. 96f.

[277] vgl. Ziegenbein *et al.*: Robust Planning, 2003. CHANG nennt diese Unsicherheiten Unsicherheiten der Umwelt; vgl. Chang: A Framework for Understanding Manufacturing Flexibility, 2000, S. 429.

[278] vgl. Tidd: Key Characteristics of Assembly Automation Systems, 1997, S. 53f.

[279] ZIEGENBEIN verweist hierauf unter dem Namen Prozess- sowie Planungs- und Steuerungsrisiken (vgl. auch Abschnitt 2.2.2.2 sowie Ziegenbein *et al.*: Robust Planning, 2003).

beitungszeiten, Wartezeiten und Nacharbeit, resultiert externer Flexibilitätsbedarf[280] aus Veränderungen oder Fluktuationen in der Nachfrage, Produktpreisänderungen und Aktionen von Wettbewerbern[281].

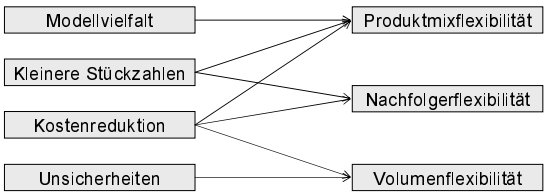


Abbildung 2-21: Forderungen an den und relevante Flexibilitätsarten im Rohbau

CHANG stellt hierzu ein Rahmenkonzept auf, das dem jeweiligen Flexibilitätsbedarf diejenigen Flexibilitätsarten gegenüberstellt, mit denen dieser beantwortet werden kann. Die in Abschnitt 2.2.3 abgeleiteten Forderungen an einen Automobilrohbau sind dem externen Flexibilitätsbedarf zuzuordnen. Als Absicherung gegen externe Flexibilitätsbedarfe konnte CHANG, wie in Abbildung 2-22 zu erkennen, die Flexibilitätsarten Produktmix-, Nachfolger-, Volumen- und Erweiterungsflexibilität identifizieren[282]. Allerdings besteht im Gewerk Rohbau nicht die Möglichkeit, die technischen Kapazitäten zu erweitern (vergleiche hierzu Abschnitt 2.2.2.1); daher entfällt in dieser Arbeit, die den Rohbau zum Betrachtungsobjekt hat, eine explizite Betrachtung von Erweiterungsflexibilität.

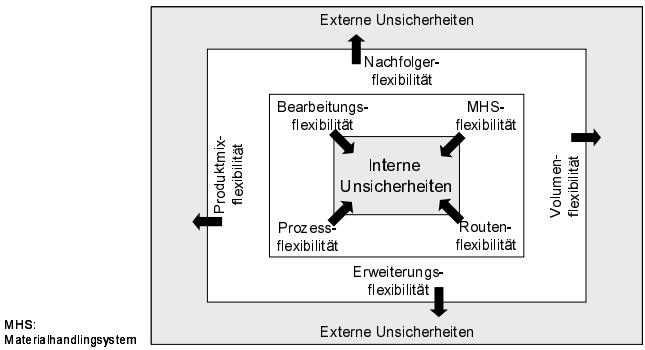


Abbildung 2-22: Rahmenkonzept für Flexibilität nach CHANG

[280] CHANG versteht hierunter lediglich den aus dem von ZIEGENBEIN als Nachfragerisiko beschriebenen Risiko resultierenden Flexibilitätsbedarf. Auf aus den von ZIEGENBEIN als Beschaffungs- sowie Umweltrisiken bezeichneten Risikoarten resultierenden Flexibilitätsbedarf geht CHANG nicht näher ein (vgl. Chang: A Framework for Understanding Manufacturing Flexibility, 2000, S. 433f, sowie Ziegenbein *et al.*: Robust Planning, 2003).

[281] vgl. Chang: A Framework for Understanding Manufacturing Flexibility, 2000, S. 433.

[282] vgl. ebd., S. 433f.

2.3.2.1 Nachfolgerflexibilität

Unter Nachfolgerflexibilität wird die Fähigkeit eines Produktionssystems verstanden, das Nachfolgemodell eines Produktes unter geringem Änderungsaufwand der Anlagen herzustellen. Es ist offensichtlich, dass Kosten für die Herstellung der einzelnen Modelle signifikant verringert werden können, sobald die erheblichen Investitionen für die Produktionseinrichtungen einer Rohbaulinie nicht mehr auf die Stückzahlen eines Produktlebenszyklus' abgeschrieben werden, sondern zusätzlich auf das Produktionsvolumen eines oder mehrerer Nachfolgemodelle[283]. Die Nachfolgerflexibilität ist also maßgeblich vom Wiederverwendungsgrad der Anlagen des Produktionssystems abhängig. Der Wiederverwendungsgrad wiederum hängt stark von der Produktgestaltung ab; hier wird deutlich, dass insbesondere diejenigen Hersteller einen Vorsprung bei der Umsetzung von Nachfolgerflexibilität erzielen können, die ihre Produktentwicklung zielgerichtet auf die Nutzung der bestehenden Produktionseinrichtungen ausrichten[284]. Die Nutzung von Nachfolgerflexibilität schränkt also die Designfreiheit für Nachfolgeprodukte ein[285].

Allerdings gestaltet sich die Implementierung von Nachfolgerflexibilität als schwierig, unter anderem deshalb, weil nach einem Produktlebenszyklus (mindestens 5-7 Jahre) Produktionseinrichtungen aufgrund technologischer Weiterentwicklungen oder unvorhersehbarer Markttrends bereits veraltet sein können; Markttrends und technologische Fortentwicklungen beeinflussen also die Bedeutung von Nachfolgerflexibilität[286].

Um zukünftige Entwicklungen am Automobil, insbesondere den Einsatz neuer Materialien und Bauweisen, nicht einzuschränken, verzichten daher manche Hersteller bewusst auf Nachfolgerflexibilität[287]. Ein weiterer Grund, von Nachfolgerflexibilität abzusehen, ist der technologische Fortschritt im Bereich der Produktionseinrichtungen, der deren Wirtschaftlichkeit laufend verbessert. Diese Produktivitätsverbesserungen können nicht genutzt werden, wenn ein schon für die Vorgängergeneration des herzustellenden Produktes gebauter Rohbau weiter betrieben wird. Außerdem können neue gesetzliche Auflagen, wie z. B. die Einführung einer neuen Richtlinie der EU zum Fußgänger- oder zum Seitenaufprallschutz, erhebliche Änderungen an der Karosseriestruktur erforderlich machen und damit die Nutzung von Nachfolgerflexibilität verhindern.

Im Falle der Nachfolgerflexibilität müsste man eigentlich nach den in Abschnitt 2.1.2.1 aufgestellten Definitionen von Wandlungsfähigkeit sprechen; denn eine volle Nachfolgerflexi-

---

[283] vgl. Naitoh *et al.*: Intelligent Body Assembly System, 1997, S. 122.

[284] vgl. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 1.

[285] Es stellt sich also die Frage, inwieweit ein Automobilhersteller auf technische bzw. Designinnovationen im Produkt verzichten und damit evtl. Käufer verlieren will, um durch Nutzung von Nachfolgerflexibilität Kostenvorteile zu realisieren.

[286] vgl. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 4.

[287] vgl. Naitoh *et al.*: Intelligent Body Assembly System, 1997, S. 123, sowie Fleiner: Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Rohbaualternativen, 2003, S. 13.

bilität ist auf absehbare Zeit nicht zu bewerkstelligen. Man kann bestenfalls von einem Wiederverwendungsgrad der Anlagenkomponenten nach einem Umbau des Rohbaus sprechen. Typischerweise kann, bei vorhandener Nachfolgerflexibilität, die Hauptlinie für zwei Typlaufzeiten eingesetzt werden, während die Untergruppen neu aufgebaut werden müssen und daher nur auf einen Produktlebenszyklus abgeschrieben werden können. Zudem fallen zusätzliche Kosten für den Umbau der Hauptlinie an[288].

2.3.2.2 Produktmixflexibilität

Während Nachfolgerflexibilität die Produktflexibilität für zeitlich aufeinander folgende Produkte darstellt, beschreibt Produktmixflexibilität die Fähigkeit eines Produktionssystems, gleichzeitig mehrere verschiedene Produkte in unterschiedlichen Zusammenstellungen („in unterschiedlichem Produktmix“) herzustellen. Der Nutzen von Produktmixflexibilität besteht darin, die Nutzung von Ausgleichseffekten bei Nachfrageschwankungen der einzelnen Produkte zu ermöglichen und so einerseits die Auslastung der Produktionseinrichtungen zu optimieren sowie andererseits Risiken zu minimieren. Aufgrund dieser Ausgleichseffekte kommen produktmixflexible Rohbaukonzepte im Allgemeinen mit einer deutlich geringeren Gesamtkapazität aus als Solitärrohbauten mit vergleichbarem Leistungsvermögen. Bedenkt man, dass sich im Rohbau die Anfangsinvestitionen annähernd proportional zur installierten Gesamtkapazität verhalten und ca. 50 % der Produktionskosten im Rohbau ausmachen, so kann man die wirtschaftliche Bedeutung von Produktmixflexibilität erahnen.

Produktmixflexibilität wird bestimmt durch die Produktallokation (Welches Produkt soll auf welcher Linie gefertigt werden?) und die Festlegung der Kapazitäten der einzelnen Produktionseinheiten. Produktallokationen können sich auch auf einzelne Zusammenbauten, also einzelne Produktionsabschnitte einer Rohbaulinie, beziehen, wodurch ein linienübergreifender Materialfluss bei der Herstellung der Rohkarossen entstehen kann. Anhand eines Beispiels ist dies in Abbildung 2-23 gezeigt.

Das größte Hemmnis bei der Implementierung sowohl von Nachfolger- als auch Produktmixflexibilität stellt die fehlende Abstimmung von Produktentwicklung und Betriebsmittelplanung dar. Denn mit der Gestaltung der Rohkarosse während der Produktentwicklung wird bereits entschieden, welche Produktionsmittel, z. B. Spannmittel oder Schweißzangen, zum Einsatz kommen müssen[289]. Auf der anderen Seite sind die bereits existierenden Werkzeuge und Betriebsmittel, speziell im Bereich der Framingstationen, modellspezifisch und damit in der Regel für eine Nutzung für weitere Modelle nicht geeignet[290]. Ebenso wie

[288] vgl. Bleines, Nestle: Idealrohbau, 2004, S. 6.

[289] vgl.Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 1.

[290] vgl. N. N.: BMW Plant Visit, 2002, S. 7.

die Nutzung von Nachfolgerflexibilität schränkt also die Nutzung von Produktmixflexibilität die Designfreiheit für die gefertigten Produkte ein[291].

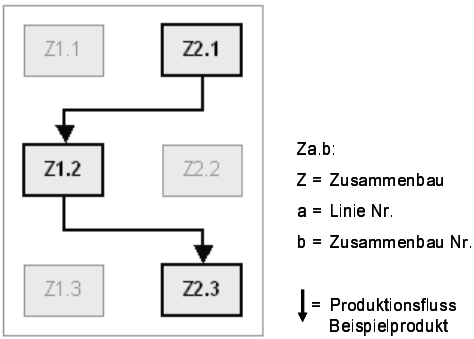


Abbildung 2-23: Beispiel für eine linienübergreifende Produktallokation

Trotz dieser Hindernisse, die der Nutzung von Produktmixflexibilität entgegenstehen, geht der Trend zu verstärkter Produktmixflexibilität. Diese wird insbesondere durch die Nutzung von Produktplattformen erreicht.

2.3.2.3 Volumenflexibilität

Neben der Verteilung der Investitionen der Rohbauanlagen auf eine möglichst große Gesamtstückzahl durch Nachfolger- und Produktmixflexibilität ist eine weitere wichtige Zielsetzung die Absicherung gegen Nachfrageunsicherheiten, wie sie durch Volumenflexibilität realisiert werden kann.

Nach der Definition von SETHI UND SETHI ist Volumenflexibilität die Fähigkeit eines Produktionssystems, bei unterschiedlichen Ausstoßmengen wirtschaftlich zu arbeiten. Aufgrund der Restriktion durch die nicht wandlungsfähigen technischen Kapazitäten (siehe Abschnitt 2.2.2.1) ist die Wirtschaftlichkeit im Rohbau direkt abhängig von der Auslastung der Linien. Dadurch wird die Volumenflexibilität auf der einen Seite durch eine (zu definierende) Untergrenze wirtschaftlicher Auslastung beschrieben und auf der anderen Seite von der technischen Kapazität der einzelnen Zusammenbauten begrenzt. Volumenflexibilität wird also durch die Dimensionierung der Kapazitäten bereits während der Rohbauplanung festgelegt.

Eine zusätzliche Volumenflexibilität ergibt sich aus ggf. vorhandener Produktmixflexibilität, da durch Ausgleichseffekte und Steuerung des Materialflusses im Rohbau die Auslastun-

[291] In Bezug auf Produktmixflexibilität stellt sich also die Frage, inwieweit ein Automobilhersteller auf technische bzw. Designdifferenzierung im Produkt verzichten und damit evtl. Käufer verlieren will, um durch Nutzung von Produktmixflexibilität Kostenvorteile zu realisieren.

gen einzelner Fertigungsbereiche optimiert werden können und so der Bereich wirtschaftlicher Ausstoßmengen vergrößert werden kann.

2.3.3 Flexible Rohbaukonzepte

Wie können nun Nachfolger-, Produktmix- und Volumenflexibilität im Rohbau implementiert werden? Welche Voraussetzungen müssen dafür vorliegen, welche Konzepte gibt es, und welche Strategien verfolgen Automobilhersteller in der Praxis?

2.3.3.1 Enabler für Flexibilität im Rohbau

Standardisierung ist ein wichtiger Enabler (engl.: „Ermöglicher") für Flexibilität. Insbesondere japanische Hersteller verfolgen schon lange eine Strategie der Standardisierung sowohl auf Produkt- als auch auf Prozess- und Ausrüstungsebene im Rohbau[292]. Eine Standardisierung auf Produktebene erfordert Einschränkungen der Designfreiheit und erschwert damit Innovationen (Einschränkung über der Zeit) sowie Differenzierung zwischen unterschiedlichen Modellen (Einschränkung über verschiedene Modelle).

Die von McKinsey und dem WZL durchgeführte Studie „Tomorrow's automotive production" identifiziert außerdem folgende allgemeine Enabler für Flexibilität[293]: Auf Produktebene werden

- Plattformen (standardisierte Teile und Prozesse für unterschiedliche Modelle)[294],
- Modularität (modularer Zellenaufbau, Anpassungen durch Modulaustausch und Softwareänderungen) und
- Skalierbarkeit[295],

auf Prozessebene werden

- Werkzeuge und Aufspannvorrichtungen (flexible Werkzeuge und Aufspannvorrichtungen, kooperierende und bewegliche Roboter, Ein-Punkt-Aufspannungen, Werkstückträgerkonzepte wie pallets und AGVs),
- Steuerungstechnik (standardisierte Steuerungsarchitekturen auf Industrie-PC-Basis),
- Fertigungstechnologien (Laserschweißen, Lasernetzwerke),

---

[292] Japanische Hersteller berücksichtigen bereits beim Produktdesign sehr weitgehend die Anforderungen der Produktion; insbesondere bei westeuropäischen Automobilherstellern hat sich dagegen die Produktion in der Regel dem Produktdesign unterzuordnen.

[293] vgl. McKinsey/WZL: Tomorrow's Automotive Production, 2005.

[294] vgl. Schuh *et al.*: Modulare Dienstleistungen als Beitrag zur Flexibilisierung global verteilter Produktion, 2003, S. 210ff, sowie Schuh *et al.*: A Model-Based Approach to Design Modular Plant Architectures, 2003, S. 369ff.

[295] vgl. auch Schuh, Gottschalk: Skalierbare Produktionslinien, 2004, S. 377f.

- Messtechnik (in den Prozess integrierte Messverfahren) und
- Layout (jelly fish)

die Implementierung von Flexibilität unterstützen. Eine Übersicht über Enabler von Nachfolger-, Produktmix- und Volumenflexibilität auf Produkt-, Ausrüstungs- und Personalebene zeigt Abbildung 2-24.

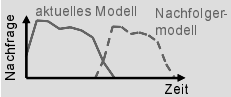
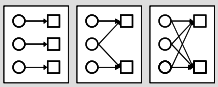
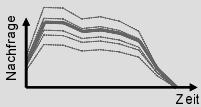
	Nachfolgerflexibilität	**Produktmixflexibilität**	**Volumenflexibilität**
			
Enabler	**Wiederverwendung**	**Produktallokation (solitär bis vollflexibel)**	**Elastizität der Kapazität**
Produkt	• Ähnliche Abmessungen • Montagereihenfolge • Verbindungstechnologie • Anzahl Schweißpunkte	• Gleicher Prozess • Gleiche Aufspannpunkte • Ähnliche Arbeitsinhalte	
Ausrüstung	• Standardisierung von Konfigurationen und Zellen • Ausreichend Platz/leere Stationen • Modulares Layout	• Dopplung von Stationen • Austauschbare Spannpaletten • Bewegliche Spannpaletten • Manuelle Stationen	• Ausreichend Platz/leere Stationen • Modulares Layout
Personal			• Mehrmaschinenbedienung • Flexible Bedienung von Einlegestationen

Abbildung 2-24: Enabler für Flexibilität im Rohbau[296]

Ähnlich identifiziert HERNÁNDEZ MORALES[297] in seiner Arbeit folgende grundsätzliche Enabler für Flexibilität:

- Universalität (in Bezug auf Produkt und Produktionstechnologie),
- Mobilität (einzelner Fabrikteile oder Produktionsanlagen),
- Skalierbarkeit (z. B. technische, räumliche und Personalerweiter- und -reduzierbarkeit),
- Modularität (z. B. durch standardisierte Produktionsanlagen und -elemente) und
- Kompatibilität (z. B. bzgl. Material, Information, Medien und Energie).

[296] vgl. McKinsey/WZL: Tomorrow's Automotive Production, 2005.

[297] vgl. Hernández Morales: Wandlungsfähigkeit, 2003.

2.3.3.2 Beispiel Modularisierung

Eine Möglichkeit, der zunehmenden Variantenanzahl zu begegnen, ist eine Modularisierung des Rohbaus (siehe vorhergehender Abschnitt): Variantenintensive, sich schnell ändernde Bereiche werden von stabileren Teilen des Rohbaus entkoppelt. Dies führt zu einzelnen, von der Hauptlinie abgetrennten Zellen und einer flexiblen Hauptlinie (siehe Abbildung 2-25). Transport- und Kontrollfunktionen sowie Aufspannvorrichtungen und Werkzeuge lassen sich in separaten „Ausrüstungsmodulen" zusammenfassen.

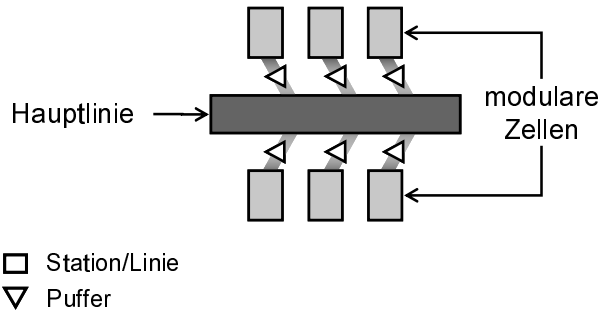


Abbildung 2-25: Modulares Layout eines Rohbaus

Dadurch können stabilere Bereiche länger unverändert bestehen; dies führt zu wesentlich geringeren Investitionskosten. Standardisierte (nach Geometrie sowie nach elektrischen, mechanischen und Steuerungsschnittstellen) Zellaufbauten ermöglichen einen einfachen Austausch einzelner entkoppelter Zellen durch andere Zellen, ohne andere Bereiche des Rohbaus zu beeinflussen; dies erleichtert die Einführung neuer Varianten sowie die Erprobung und Einführung neuer Produktionstechnologien.

Außerdem ermöglicht dieser Aufbau die gleichzeitige Produktion mehrerer unterschiedlicher Modelle auf einer Rohbau(haupt)linie.

Die Modularisierung in Hauptlinien mit hoher Produktionskapazität sowie davon abgekoppelte Zellen mit niedrigerer Kapazität und die Trennung von Prozess und Logistik ermöglichen weiterhin eine leichtere Anpassung des Produktionsvolumens.

Ein ähnlicher Ansatz ist das Outsourcing variantenintensiver Teile des Rohbaus. Beim Outsourcing werden entsprechende Arbeitsinhalte nicht in modulare, von der Hauptlinie entkoppelte Zellen verlagert, sondern von Lieferanten übernommen.

2.3.3.3 Trends bei der Flexibilisierung des Automobilrohbaus

Die aktuelle Flexibilisierungssituation im Rohbau – wie im Automobilbau insgesamt – ist sehr heterogen[298]: Einige Hersteller produzieren in einer Fabrik nur ein Modell mit einem sehr hohen Produktionsvolumen auf einer Linie. Andere Hersteller produzieren mehrere Modelle – allerdings oft solche, die auf einer gemeinsamen Plattform aufbauen – in einer Fabrik[299]. Wenige Hersteller[300] haben sich für extrem flexible Fabriken, in denen Modelle unterschiedlicher Plattformen mit langer Taktzeit gebaut werden, entschieden. In den meisten Fabriken werden nur Modelle einer Marke hergestellt. Abbildung 2-26 zeigt in einer Übersicht, wie viele Modelle in unterschiedlichen (europäischen) Fabriken gefertigt werden.

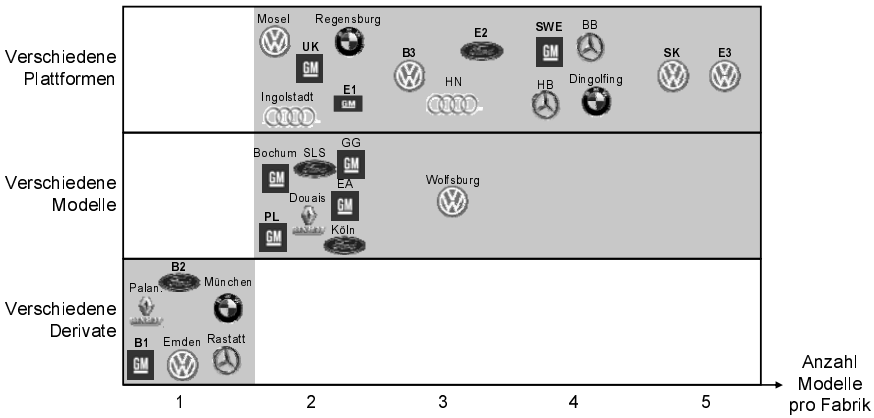


Abbildung 2-26: Anzahl der produzierten Modelle in europäischen Automobilfabriken

Der Trend geht zu Fabriken, in denen mehrere Modelle einer Plattform gebaut werden.

Neben der Frage, wie viele Modelle in einer Fabrik gefertigt werden, stellt sich die Frage, wie viele Modelle auf einer Linie produziert werden sollen. Beschränkt wird die Anzahl der Modelle, die auf einer Linie produziert werden, durch den Rohbau; mehr als drei bis vier Modelle mit vier bis sechs Derivaten pro Linie (heute: zwei bis drei Derivate; siehe auch Abbildung 2-27) werden auch für die Zukunft als nicht wirtschaftlich angesehen.

---

[298] vgl. McKinsey/WZL: Tomorrow's Automotive Production, 2005.

[299] So hat sich PSA für eine Übertragung der Plattformstrategie auf die Produktionsverteilung entschieden: In jedem Werk werden Modelle einer Plattform produziert. Je Plattform produziert PSA mit gemeinsamen, flexiblen Verschweißstationen für Plattformbauteile, Unterboden und in der Hauptverschweißlinie; weitere Baugruppen und das Framing werden in modellspezifischen Stationen bewerkstelligt.

Ford produziert in einigen Werken mehrere Modelle, die auf der B-car-Plattform aufbauen, in einer Linie.

[300] Z. B. PSA, Honda und Nissan verwenden solche Rohbaulinien in einigen ihrer Werke.

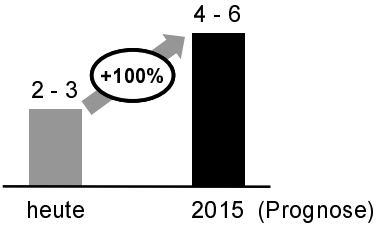


Abbildung 2-27: Durchschnittliche Anzahl der Derivate pro Linie[301]

DAIMLERCHRYSLER zum Beispiel hat sich wegen der hohen Komplexität eines flexiblen Rohbaus entschieden, für die aktuellen Modellgenerationen von C-, E- und S-Klasse von einem gemeinsamen Mix-Rohbau zur Solitärfertigung zu wechseln. Allerdings wird die Rückkehr zu einer flexiblen Mehrmodelllinie für die nächste Produktgeneration erwogen.

2.3.3.4 Beispiele für flexible Rohbauten

Der heute übliche Fischgräten-Rohbau (siehe auch Abschnitt 2.1.1.2) erfordert aufgrund seines hohen Automatisierungsgrades von nahezu 100 % hohe Anfangsinvestitionen. Da die Spannvorrichtungen typbezogen ausgeführt sind, kann in konventionellen Fischgräten-Rohbauten üblicherweise nur ein Modell mit vier Varianten gefertigt werden (Rechts-/ Linkslenker und mit/ohne Schiebedach)[302].

Ein im Gegensatz zum Fischgräten-Rohbau sehr flexibles Rohbaukonzept stellt der von NISSAN entwickelte IBAS-Rohbau dar. Zielsetzung bei der Entwicklung des IBAS war, die Fertigung aller NISSAN-Modelle auf einer Linie bei einem jährlichen Produktionsvolumen von 480.000 Einheiten und einer Zykluszeit von 45 Sekunden zu gewährleisten. Durch Verwendung typflexibler mobiler Spannpaletten ist es möglich, allein durch das Anpassen der Roboterprogrammierung unterschiedliche Fahrzeuge in beliebiger Sequenz zu fertigen. Der Schlüssel hierfür lag in der Entwicklung eines NC-gesteuerten Spannkonzeptes, das Roboter nicht nur zum Schweißen, sondern auch zum Spannen der einzelnen Komponenten innerhalb der Geometriestation nutzt, so dass es keine modellspezifische Spanntechnik mehr gibt, sowie in der Integration eines Qualitätsmesssystems[303]. Hierdurch können bis zu acht verschiedene Modelle auf einer Linie gefertigt werden, Modellwechsel bei Einführung von Nachfolgeprodukten verursachen nur noch 20 % der Kosten, die bei einem Generationswechsel auf einer konventionellen Linie entstehen. Die Vorbereitungszeit für die Spanntechnik wurde dabei von einem Jahr auf drei Monate verkürzt[304].

---

[301] bei europäischen Automobilherstellern; vgl. McKinsey/WZL: Tomorrow's Automotive Production, 2005.

[302] vgl. Fleiner: Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Rohbaualternativen, 2003, S. 4.

[303] vgl. Naitoh *et al.*: Intelligent Body Assembly System, 1997, S. 128.

[304] vgl. ebd., S. 128ff.

Der IBAS-Rohbau ist damit einer der weltweit flexibelsten Rohbauten. Prinzipähnlich dem IBAS sind die TOYOTA New Global Body Line[305] und MAZDAS Circulation Body Assembly Line (C-BAL)[306].

Ein weiteres Rohbaukonzept, das im Vergleich zum Fischgräten-Rohbau eine höhere Flexibilität aufweist, ist der so genannte Jelly-Fish[307]-Rohbau (vgl. auch Abbildung 4-1). Auch hier ist der Name bezeichnend für die Anordnung der Baugruppenfertigungen an die Hauptlinie. Die Untergruppenfertigung ist nicht mehr fest an die Hauptlinie angebunden, sondern physisch entkoppelt. Die Hauptlinie selbst ist flexibel ausgelegt. Der Einsatz mehrerer typspezifischer Spannpaletten ermöglicht die Fertigung mehrerer Modellvarianten auf einer Hauptlinie[308]. An der Hauptlinie werden hochflexible Roboter nicht nur für Fügeoperationen, sondern auch für Handlingaufgaben eingesetzt. Durch flexible Fördertechnikanbindung kann der Rohbau kostengünstig und schnell an neue Modelle angepasst werden. Es sind verschiedene Arten von Untergruppenfertigungen realisierbar. Hierdurch wird eine hohe Wiederverwendbarkeit der Anlagen von bis zu 50 % erreicht.

Abbildung 2-28 zeigt beispielhaft einen Vergleich des Stands der Technik bei der Umsetzung der einzelnen Flexibilitätsarten in den Rohbaukonzepten verschiedener Hersteller.

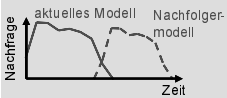
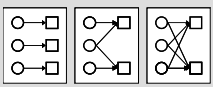
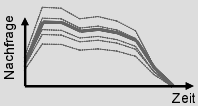
	Nachfolgerflexibilität	**Produktmixflexibilität**	**Volumenflexibilität**
			
Hersteller	**Wiederverwendung**	**Produktallokation (solitär bis vollflexibel)**	**Elastizität der Kapazität**
Mercedes-Benz	• keine • Nutzungsdauer daher 7-8 Jahre	Solitärrohbauten für eine Baureihe mit max. drei Varianten	Stückzahlerhöhung nur durch Wochenendschichten möglich
VOLVO	• Zwei Typlaufzeiten • Nutzungsdauer ca. 14 Jahre	Baureihenflexibler Rohbau für drei Baureihen (inkl. Varianten)	Stückzahlverschiebung innerhalb der Modelle auf einer Linie im Rahmen der Linienkapazität
mazda	• Mind. drei Typlaufzeiten • Nutzungsdauer mindestens 15 Jahre	Baureihenflexibler Rohbau für drei Plattformen mit sechs Aufbauten	Stückzahlverschiebung innerhalb der Modelle auf einer Linie im Rahmen der Linienkapazität

Abbildung 2-28: Wettbewerbsvergleich relevanter Flexibilitätsarten im Rohbau

[305] Eine Weiterentwicklung von TOYOTAs Flexible Body Line (FBL).

[306] vgl. MacDuffie, Pil: Automation and Work Organization Trends, 1997, S. 246.

[307] Jelly fish (engl.): Qualle

2.4 Fazit: Handlungsbedarf aus der Praxis

In einem ersten Schritt wurde in diesem Kapitel der im Eingangskapitel vorgestellte heuristische Bezugsrahmen konkretisiert. Dabei wurden zunächst die wesentlichen Begriffe Automobilrohbau und Flexibilität erläutert. Anschließend wurden die Anforderungen an den Automobilrohbau abgeleitet und untersucht, inwieweit diesen Anforderungen durch Flexibilität im Rohbau begegnet werden kann.

Die in der Automobilindustrie vorherrschenden Trends wie verkürzte Produktlebenszyklen und wachsende Modellvielfalt zwingen die Automobilhersteller aufgrund der spezifischen Randbedingungen im Rohbau, flexiblere Fertigungskonzepte zu entwickeln. Die mit der Umsetzung flexibler Rohbaukonzepte angestrebten primären Zielsetzungen sind Kostenreduktion, Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, Minimierung entgangener Produktion aufgrund von Unterkapazitäten sowie die Reduktion von Risiken. Diese Zielsetzungen werden erreicht durch die Optimierung der Gesamtkapazität und der Auslastungen, die Verteilung der Fixkosten (Anlageninvestitionen) auf eine möglichst große Gesamtstückzahl sowie durch eine Absicherung gegen Planungsunsicherheiten.

Dazu werden im Rohbau aus einer Vielzahl produktionswirtschaftlicher Flexibilitätsarten in erster Linie drei Arten angestrebt: Nachfolger-, Produktmix- und Volumenflexibilität.

Diese drei als maßgeblich identifizierten Flexibilitätsarten werden bei der Rohbauplanung festgelegt durch den Wiederverwendungsgrad der eingesetzten Anlagen, durch die Produktallokation und somit die Definition des Materialflusses durch den Rohbau sowie durch die Verteilung der Kapazitäten auf die einzelnen Produktionseinheiten (Abbildung 2-29). Diese Parameter werden, wie in Abschnitt 2.1.1.5 beschrieben, bereits in einer sehr frühen Phase der Rohbauplanung mit der Gestaltung des Blocklayouts fixiert.

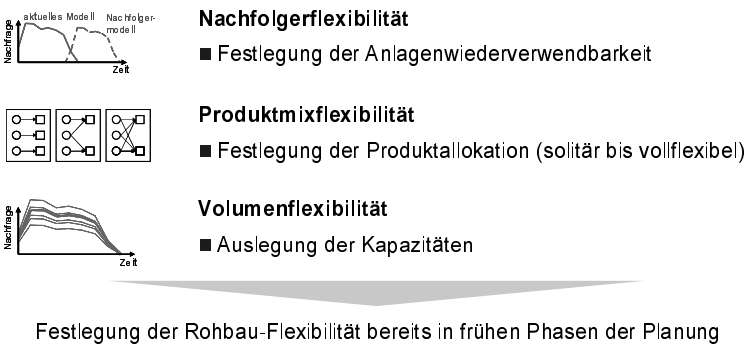


Abbildung 2-29: Flexibilitätsarten im Rohbau sowie deren Bestimmungsgrößen

[308] vgl. Fleiner: Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Rohbaualternativen, 2003, S. 9f.

Die Flexibilität eines Rohbaus ist also durch wenige wesentliche Parameter bestimmt. Ziel der Automobilhersteller muss es daher sein, diese Kernparameter zu optimieren.

3 Optimierung der Flexibilität im Automobilrohbau

Gemäß der gewählten Forschungsmethodik sind im Folgenden, aufbauend auf den bisherigen Ausführungen über die Grundlagen dieser Dissertation sowie der Schilderung des Handlungsbedarfs aus Sicht der Praxis, die problemrelevanten Theorien zu erfassen und zu interpretieren[309].

Dabei werden in Abschnitt 3.1 zunächst die Anforderungen an eine Methodik zur Flexibilitätsoptimierung diskutiert. Neben allgemeinen inhaltlichen Anforderungen werden dabei vor allem die Anforderungen an die Zielfunktion ermittelt. Außerdem werden methodische Anforderungen, insbesondere die der Praxistauglichkeit, dargelegt.

Im folgenden Abschnitt 3.2 werden bestehende Optimierungsverfahren für den Automobilrohbau diskutiert. Einen Schwerpunkt stellt dabei die Diskussion des Standes der wissenschaftlichen Forschung im Bereich der Flexibilitätsbewertung dar; dabei wird geprüft, inwieweit die existierenden Bewertungsansätze die Anforderungen an eine Zielfunktion erfüllen und damit eine geeignete Grundlage zur Flexibilitätsoptimierung im Rohbau darstellen.

Aufbauend auf dieser Diskussion werden in Abschnitt 3.3 die Defizite bestehender Optimierungsansätze identifiziert und der Handlungsbedarf für die Entwicklung von Rahmenwerk und Instrumentarium zur Flexibilitätsoptimierung im Rohbau konkretisiert.

3.1 Anforderungen an eine Methodik zur Flexibilitätsoptimierung

„When one starts to analyze flexibility, it seems to raise more questions […] due to the complexity of the concept of flexibility.“[310]
NILSSON UND NORDAHL (1995)

Im vorangehenden Kapitel konnte gezeigt werden, dass die Nutzung von Flexibilität im Rohbau einen vielversprechenden Ansatz darstellt, den aktuellen Herausforderungen zu begegnen. Die in der Rohbauplanung verfolgten Zielsetzungen sowie die hierfür relevanten Flexibilitätsarten (Nachfolgerflexibilität, Produktmixflexibilität und Volumenflexibilität) wurden identifiziert. Rohbauplaner und Entscheider der Automobilhersteller stehen nun vor der Herausforderung, in frühen Planungsphasen und auf Basis unvollständiger und ungenauer Informationen (siehe Abschnitt 2.1.1.5) zu entscheiden, wie viel und welche Art von Flexibilität in einem Rohbau implementiert werden soll – und wie genau ein geeignetes flexibles Rohbaukonzept aussieht. Die in dieser Arbeit zu entwickelnde Methodik soll sie

[309] vgl. Ulrich: Betriebswirtschaftslehre, 1984, S. 193.
[310] Nilsson, Nordahl: Making Manufacturing Flexibility Operational, 1995, S. 9.

bei dieser Entscheidung und bei der zielgerichteten Optimierung der Flexibilität der Konzeptalternativen unterstützen.

Der BROCKHAUS definiert den Begriff Optimierung wie folgt:

> *„Aufsuchen des kleinsten (Minimierung) oder größten (Maximierung) Wertes einer mathematischen Funktion mehrerer Veränderlicher, der Zielfunktion, ggf. unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen in Form von Gleichungen und/oder Ungleichungen. Angewandt in technischen, betriebs- und volkswirtschaftlichen Zusammenhängen, dient die bereits im Planungsstadium eingesetzte Optimierung dazu, knappe Ressourcen (Produktionsfaktoren, Umweltgüter wie Luft, Wasser und Naturflächen) so effektiv wie möglich zu verwenden bzw. ein gewünschtes Ergebnis mit möglichst geringem Ressourcenverbrauch zu erreichen (ökonomisches Prinzip).“*[311]

Im engen Begriffsverständnis der Mathematik bezeichnet der Begriff Optimierung das *Aufsuchen* eines Optimums. Wegen der Vielzahl an Freiheitsgraden bei der Planung von Produktionssystemen ist allerdings eine geschlossene Optimierung nicht möglich. Eine Methodik, die sozusagen „auf Knopfdruck“ den optimalen Rohbau für eine gegebene Produktionsaufgabe erzeugt, ist aufgrund der Komplexität der Fragestellung unrealistisch. Für diese Arbeit wird daher eine weiter gefasste Definition des Optimierungsbegriffes zugrunde gelegt und Optimierung als das *Sichannähern* an ein Optimum verstanden. Das Optimum wird dabei im Prozess der Optimierung nicht zwangsläufig erreicht. Bei dem zu entwickelnden Optimierungsverfahren geht es also nicht um eine geschlossene Optimierung, sondern um die Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen zur Optimierung eines Rohbaus.

Die zu entwickelnde Methodik zur Optimierung der Flexibilität im Rohbau soll den Rohbauplaner dabei unterstützen, die von ihm konzipierten Rohbauentwürfe in Bezug auf ihre Wirtschaftlichkeit zu optimieren, also deren Wirtschaftlichkeit zu maximieren. Primäre Zielsetzungen sind also Kostenreduktion, Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, Minimierung entgangener Produktion aufgrund von Unterkapazitäten sowie die Reduktion von Risiken. Die in dieser Arbeit betrachtete Stellgröße ist dabei die Flexibilität der Rohbaukonzepte. Konkreter werden die Zielsetzungen erreicht durch die durch Flexibilitätsoptimierung erzielte Optimierung der Gesamtkapazität und der Auslastungen, durch die Verteilung der Fixkosten aufgrund der Anlageninvestitionen auf eine möglichst große Gesamtstückzahl sowie durch eine Absicherung gegen Planungsunsicherheiten. Die Methodik betrachtet damit nur

[311] N. N.: Brockhaus Enzyklopädie. Band 16, 1989-1994, S. 223.

einen Teilaspekt der Fabrikplanung und stellt also eine Ergänzung etablierter Fabrikplanungsmethoden dar[312].

3.1.1 Inhaltliche Anforderungen: Zweckeignung und Handlungsnutzen

Ein Optimierungsverfahren muss grundsätzlich für den geplanten Anwendungsfall geeignet sein. Es muss die Identifizierung relevanter Parameter unterstützen sowie Empfehlungen für deren optimale Einstellung geben. Weiterhin muss ein praktisch einsetzbares Verfahren eine nachvollziehbare Bewertung der unterschiedlichen Konzepte gestatten und Antworten hoher Aussagekraft auf die belangvollen Fragestellungen ermöglichen[313].

Daher müssen zunächst die relevanten Entscheidungsdimensionen aufgezeigt werden: Was sind die Parameter, die der Planer beeinflussen kann, und die sich auf die Flexibilität und damit die Wirtschaftlichkeit des Rohbaus auswirken? Wünschenswert ist dafür der Aufbau eines morphologischen Kastens[314] mit allen relevanten Lösungselementen.

Fragestellungen, die sich bei der Bewertung, Optimierung und Auswahl alternativer Rohbaukonzepte ergeben, lauten zum Beispiel:

- Welche Art und welches Ausmaß von Flexibilität sollen implementiert werden, um die Produktionsaufgabe bestmöglich zu erfüllen? Wie gut wird der Flexibilitätsbedarf vom betrachteten Rohbaukonzept erfüllt?
- Wo ist der Nutzen von Flexibilität am größten? Wie groß ist er?
- Wie können die mit dem Flexibilisierungsvorhaben verbundenen Zielsetzungen konkret erreicht werden? Wie sieht ein dementsprechendes Produktionskonzept aus?
- Welches Risiko resultiert aus den Planungsunsicherheiten? Wie kann es vermindert werden? Mit welchem Erfolg?
- Was kostet der Nutzen erhöhter Flexibilität (wie beispielsweise eine erhöhte Lieferbereitschaft)? Oder allgemeiner: Wo ist der optimale Punkt auf der Kosten-Nutzen-Kurve (siehe auch Abbildung 2-19)?
- Wie gut werden die vorgegebenen Zielsetzungen erreicht? Rentiert sich eine empfohlene Mehrinvestition in Flexibilität bei den konkret vorherrschenden Forderungen an das Produktionssystem (Produktionsaufgabe, unternehmensstrategische Vorgaben, Unsicherheiten)?

---

[312] Für eine Übersicht der unterschiedlichen Ansätze für die Fabrikplanung im turbulenten Umfeld siehe Baumeister: Fabrikplanung im turbulenten Umfeld, 2002, S. 38.

[313] vgl. Haller: Flexibilitätsbewertung, 1999, S. 57.

[314] vgl. Zwicky: The Morphological Approach, 1967.

Das zu entwickelnde Verfahren muss Antworten auf diese Fragen ermöglichen.

Schließlich ist der Handlungsnutzen des zu entwickelnden Verfahrens wichtig: Es muss den Planer bei der optimalen Einstellung der identifizierten relevanten Parameter unterstützen. Dazu sollen relevante Lösungselemente aus dem morphologischen Kasten identifiziert und Empfehlungen für deren Einstellung gegeben werden[315]. Wichtig ist die Unterstützung des Planers bei seiner operativen Arbeit; d. h. die Empfehlungen müssen konkret und auf den vorliegenden Anwendungsfall bezogen sein. Das Ergebnis der Anwendung der Methodik müssen konkrete Handlungsempfehlungen sein.

3.1.2 Anforderungen an die Zielfunktion

Wie die Definition des BROCKHAUS zeigt, ist die Zielfunktion der Kern einer jeden Optimierung[316]. Sind die zu optimierende Zielfunktion oder das Optimierungskriterium falsch gewählt, wird auch das Ergebnis der Optimierung fehlerhaft sein. Der Auswahl der richtigen Zielfunktion kommt daher besondere Bedeutung zu.

Gemäß der Zielsetzung, die Flexibilität eines Automobilrohbaus zu optimieren, muss die Zielfunktion die Flexibilität des Rohbaus abbilden. Allerdings kann Flexibilität an sich kein Ziel der Optimierung sein (vgl. auch Abschnitt 2.3.1); primäre Zielsetzungen sind vielmehr, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, Kostenreduktion, Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, Minimierung entgangener Produktion aufgrund von Unterkapazitäten sowie die Reduktion von Risiken. Deshalb kann die Zielfunktion nicht eine von Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten losgelöste direkt flexibilitätsbeschreibende Kennzahl (d. h. eine Beschreibung von Flexibilität durch systemimmanente Kenngrößen) sein[317], sondern muss die genannten primären Zielsetzungen berücksichtigen[318].

Insbesondere muss die Zielfunktion folgende Anforderungen erfüllen:

3.1.2.1 Einbezug des Flexibilitätsbedarfs

NILSSON UND NORDAHL weisen darauf hin, dass die eigentliche Herausforderung bei Flexibilisierungsvorhaben das Erzielen einer Übereinstimmung zwischen der Flexibilität im Unternehmen und den Randbedingungen des Unternehmens darstellt[319]. Es muss demnach eine Kongruenz der Flexibilität des Produktionssystems und des vorherrschenden Flexibilitätsbedarfs angestrebt werden[320]. Die Bedeutung vorhandener Flexibilität hängt also vom

---

[315] Es wird also der Suchraum für den Produktionssystemplaner wesentlich eingeschränkt.

[316] N. N.: Brockhaus Enzyklopädie. Band 16, 1989-1994, S. 223.

[317] vgl. Schuh *et al.*: Bewertung der Flexibilität von Produktionssystemen, 2004.

[318] vgl. Schuh *et al.*: FlexibilityWindows, 2005, S. 1619.

[319] vgl. Nilsson, Nordahl: Making Manufacturing Flexibility Operational, 1995, S. 9.

[320] vgl. ebd., S. 10.

Flexibilitätsbedarf ab[321]. Daraus ergibt sich die Anforderung, dass eine geeignete Zielfunktion den Flexibilitätsbedarf in die Betrachtung einbeziehen und mit der Flexibilität des Produktionssystems abgleichen muss. Sie darf also nicht die Flexibilität eines Rohbaukonzeptes isoliert betrachten, sondern muss diese dem Flexibilitätsbedarf im konkreten Anwendungsfall gegenüberstellen. Es muss nachgewiesen werden, inwiefern ein Konzept den vorherrschenden Flexibilitätsbedarf erfüllt.

3.1.2.2 Bewertung anhand der Zielsetzungen von Flexibilität

In Abschnitt 2.4 wurde bereits hergeleitet, dass der Erfolg von Flexibilisierungsmaßnahmen immer an den damit verfolgten Zielsetzungen gemessen werden muss. Die Zielfunktion muss also die Erreichung der jeweiligen Zielsetzungen adäquat abbilden und so eine Vergleichbarkeit unterschiedlichster Konzepte ermöglichen.

3.1.2.3 Multiple Bewertungskriterien

Die Mehrdimensionalität von Flexibilität[322] und die Tatsache, dass bei einer Investitionsentscheidung zumeist unterschiedliche Zielsetzungen[323] verfolgt werden, erschweren die Quantifizierung von Flexibilität[324]. Der multidimensionale Charakter muss sich deshalb in multiplen Bewertungskriterien widerspiegeln[325].

Dies stellt für die Optimierung eine besondere Herausforderung dar, macht es doch eine multikriterielle Zielfunktion nötig. An die für die Berechnung der Zielfunktion zu Hilfe gezogenen Kriterien wird dabei der Anspruch gestellt, dass sie zum einen präzise definiert und zum anderen klar voneinander abgegrenzt sind. Für multikriterielle Zielfunktionen gilt zudem, dass sie auf der einen Seite den Sachverhalt durch Abbildung aller relevanten Aspekte hinreichend beschreiben müssen, es auf der anderen Seite aber keine Redundanzen in der Aussage der einzelnen Kriterien geben darf[326]. Um den Sachverhalt produktionstechnischer Flexibilität umfassend zu beschreiben, kann es also nicht ausreichen, eine einzige Kennzahl für die Flexibilität eines Rohbaukonzeptes zu ermitteln. Vielmehr muss sich die Zielfunktion gewichtet aus der Bewertung unterschiedlicher Kriterien zusammensetzen.

---

[321] vgl. Haller: Flexibilitätsbewertung, 1999, S. 15.

[322] vgl. Tidd: Key Characteristics of Assembly Automation Systems, 1997, S. 52, und Janssen: Flexibilitätsmanagement, 1997, S. 26ff.

[323] wie z. B. die vier konkurrierenden Forderungen von Wiendahl nach kurzen Durchlaufzeiten, hoher Termintreue, niedrigen Beständen und hoher Kapazitätsauslastung, vgl. Wiendahl: Fertigungsregelung, 1997. In der Regel lassen sich diese Ziele nicht unabhängig voneinander verfolgen.

[324] vgl. Shi, Daniels: Survey of Manufacturing Flexibility, 2003, S. 417.

[325] vgl. Slack: The Flexibility of Manufacturing Systems, 1987, S. 37, sowie Haller: Flexibilitätsbewertung, 1999, S. 57.

[326] vgl. Haller: Flexibilitätsbewertung, 1999, S. 57.

Dabei müssen u. a. die konkurrierenden Forderungen an Produktionssysteme und ihre Priorisierung durch das Unternehmen (vgl. Abschnitt 2.2.3) berücksichtigt werden.

3.1.2.4 Ermittlung des Nutzens von Flexibilität

JORDAN UND GRAVES konnten zeigen, dass Produktionssysteme, die über eine limitierte Produktflexibilität verfügen, bei geeigneter Konfiguration nahezu dieselben Vorteile erzielen wie voll produktflexible Systeme[327]. Daher erscheint eine Zielfunktion, die ausschließlich den Grad an Flexibilität in Form einer oder mehrerer gewichteter Kennzahlen berücksichtigt, nicht zielführend. Vielmehr sollte der Nutzen eines flexiblen Rohbaukonzeptes ermittelt und quantifiziert werden. Allerdings gestaltet sich gerade die Quantifizierung der Vorteile von Flexibilität als schwierig, da diese teilweise schwer zu greifen sind und zudem auf unterschiedlichen Ebenen wirken[328].

3.1.2.5 Monetäre Bewertungskriterien

Eine erhöhte Flexibilität eines Produktionssystems erfordert höhere Investitionen[329]. Flexibilität ist jedoch kein Selbstzweck (vgl. Abschnitt 2.3.1); deshalb müssen Investitionen in flexible Fertigungskonzepte hinsichtlich ihres Kosten-/Nutzenverhältnisses untersucht werden. Diese Investitionsbewertung ist einer der wichtigsten Teilaspekte der Zielfunktion, denn nur wenn eine flexible Lösung wirtschaftlich ist, wird sie auch umgesetzt werden[330]. Daher müssen die pekuniären Aspekte mit entsprechender Gewichtung in die Zielfunktion einfließen.

3.1.2.6 Gegenüberstellung von Nutzen und Aufwand

Nach der Ermittlung des Nutzens produktionswirtschaftlicher Flexibilität und der Erhebung monetärer Kenngrößen müssen diese einander gegenübergestellt und in der Zielfunktion abgebildet werden. Hierfür muss ein Vorgehen entwickelt werden, das die Resultate der im System implementierten Flexibilität vollständig erfasst, quantifiziert und den Aufwänden gegenüberstellt. Die Bewertung soll in der Lage sein, Aussagen über die Wirtschaftlichkeit von Rohbaukonzepten auf Basis monetärer Kennzahlen zu treffen.

Um eine Akzeptanz von Flexibilität in der Unternehmenspraxis zu fördern, reicht eine wissenschaftliche Argumentation des Nutzens von Flexibilität nicht aus – aus betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten werden nicht-monetäre Argumente im Zweifelsfall abgelehnt. Eine relevante Argumentation muss vielmehr Flexibilität als eine „Versicherung ge-

---

[327] vgl. Jordan, Graves: Manufacturing Process Flexibility, 1995, S. 10ff.

[328] vgl. Shi, Daniels: Survey of Manufacturing Flexibility, 2003, S. 417, sowie Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 1.

[329] vgl. Shi, Daniels: Survey of Manufacturing Flexibility, 2003, S. 418.

[330] vgl. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 2.

gen Diskontinuitäten“ darstellen[331]. Ein Bewertungsverfahren muss also helfen, zu beurteilen, ob eine bestimmte „Versicherungsprämie“ (also eine bestimmte Investition in Flexibilität) dem abgeschätzten Risiko angemessen ist.

3.1.2.7 Lebenszyklusbetrachtung

Die Auswirkungen von Flexibilität sind nicht unmittelbar abzusehen; insbesondere der Nutzen flexibler Fertigungskonzepte kommt häufig erst mittel- und langfristig zum Tragen[332]. Es ist daher für die Wirtschaftlichkeitsanalyse unabdingbar, einen längeren Zeitraum nach Implementierung der Flexibilität zu betrachten. Zielführend erscheint hier die Betrachtung der kompletten Nutzungsphase des Produktionssystems im Rahmen einer Lebenszyklusbewertung.

3.1.2.8 Risikobetrachtung

Zu den in Abschnitt 2.3.1 identifizierten Zielsetzungen von Flexibilität im Rohbau gehört auch die Minimierung der Risiken, zu denen die vorherrschenden Planungsunsicherheiten führen (siehe auch Abschnitt 3.1.2.7). Um die Fähigkeit eines flexiblen Rohbaus, den Automobilhersteller gegen Planungsunsicherheiten abzusichern, zu erfassen, müssen Bewertungsgrößen Aufschluss über die Auswirkungen der betrachteten Unsicherheiten geben. Dies kann beispielsweise durch eine Risikoanalyse der Ergebnisgrößen geschehen. Die Ergebnisse dieser Analyse müssen in die Optimierung eingehen.

3.1.3 Methodische Anforderungen

Neben den inhaltlichen Anforderungen der Zweckeignung und des Handlungsnutzens muss eine Methodik zur Flexibilitätsoptimierung folgende methodische Anforderungen erfüllen[333]:

3.1.3.1 Reproduzierbarkeit und Transparenz

Zu den allgemeinen Forderungen an Bewertungs- und Optimierungsverfahren gehört, dass die wiederholte Anwendung der Methodik auf dieselbe Fragestellung stets die gleichen, also reproduzierbare Ergebnisse liefert. Hierzu ist ein systematischer Verfahrensaufbau notwendig, der in einem schrittweisen Vorgehen durch klar abgegrenzte Teilaufgaben führt. Die einzelnen Arbeitsschritte sollen dabei logisch aufeinander aufbauen, so dass die Erarbeitung der Ergebnisse transparent und nachvollziehbar erfolgt[334]. Die Ermittlung von Kennzahlen und die Ableitung von Handlungsempfehlungen auf Basis klar

---

[331] vgl. Schuh *et al.*: The Factory on Demand, 2005.

[332] vgl. auch Nyhuis, Heger: Adequate Factory Transformability, 2004.

[333] vgl. auch Schuh, Wemhöner: Bewertung der Lebenszykluskosten von Produktionssystemen, 2004.

[334] vgl. Haller: Flexibilitätsbewertung, 1999, S. 56f.

definierter Rechenvorschriften sichert die Reproduzierbarkeit und trägt zur Transparenz der Ergebnisse bei.

3.1.3.2 Praxistauglichkeit

„80 % aller Probleme und Fragen eines Unternehmens sind ‚Menschenfragen'. Der Rest entfällt auf Technik und Finanzen."
EBERHARD VON KUENHEIM (1996)

Schließlich ist ein Anspruch an die Optimierungsmethodik deren Praxistauglichkeit. Praxistauglichkeit ist keine „Nebenanforderung" an ein Verfahren, das in der Praxis eingesetzt werden soll, sondern eine Grundvoraussetzung dafür, dass das erarbeitete Verfahren auch tatsächlich in der Rohbauplanung Anwendung findet.

Um die Praxistauglichkeit zu gewährleisten, muss ein Optimierungsverfahren zunächst einmal eine gewisse Anwenderfreundlichkeit aufweisen. Es muss einfach durchzuführen sein; ein angemessener Aufwand für den Einsatz der Methodik ist nicht zu überschreiten. Eine wichtige Randbedingung dafür ist die Erhebbarkeit der erforderlichen Eingangsdaten[335]. Hieraus abgeleitet muss sich der Detaillierungsgrad der Ergebnisse am Detaillierungsgrad der verfüg- und erhebbaren Daten orientieren.

Darüber hinaus sollte im Vergleich zum bisherigen Vorgehen der zusätzliche Nutzen für den Anwender klar erkennbar sein; das heißt, dass ein Optimierungsverfahren bei gleicher Ergebnisqualität entweder deutlich einfacher oder schneller anzuwenden ist als die bisher praktizierte Vorgehensweise oder aber neben den in der Rohbauplanung etablierten Optimierungsverfahren und Kennzahlen zur Bewertung und Auswahl alternativer Konzepte zusätzliche Informationen und Aussagen zur Unterstützung des Entscheidungsprozesses und zur Optimierung von Rohbaukonzepten generiert werden.

Eine wesentliche Anforderung an ein Optimierungskonzept ist andererseits, dass seine Akzeptanz durch die Produktionssystemplaner sichergestellt werden kann. Systeme, die vollständig auf automatischer Optimierung beruhen und dem Planer keinerlei Eingriffsmöglichkeiten bieten, erfüllen diese Anforderung nicht und haben sich deshalb in der Praxis der Rohbauplanung nicht durchgesetzt[336].

Schließlich müssen Ergebnisse einer Bewertung bzw. Empfehlungen für die Optimierung in einer geeigneten Weise aufbereitet werden. Dies beinhaltet einerseits die Eignung für den Rohbauplaner, der mittels aussagekräftiger Kennzahlen und konkreter Vorschläge für Konzeptänderungen bei der Optimierung von Rohbaukonzepten unterstützt werden soll.

---

[335] vgl. Sesterhenn: Bewertungssystematik, 2002, S. 35f.

[336] Das gleiche Problem tritt auch bei Simulationssystemen auf; vgl. hierzu Ulgen *et al.*: Simulation Methodology in Practice. Part 2, 1994, S. 136, sowie Berkin *et al.*: Management of Simulation Technology, 1995, S. 366.

Andererseits erfordert es die Aufbereitung der aus einer Optimierung resultierenden Empfehlung für ein Rohbaukonzept und die Gegenüberstellung mit anderen Konzepten in einer Form, die dem Informationsbedarf des Entscheiders gerecht wird: aussagekräftig, aber aggregiert.

Wie in der begleitenden Projektarbeit an Produktionsstandorten der DAIMLERCHRYSLER AG im Gespräch mit Rohbauplanern deutlich geworden ist, erhöht der Einsatz einfacher Software-Werkzeuge die Akzeptanz neuer Bewertungs- und Optimierungsverfahren, da so unmittelbar im Rahmen einer Diskussionsrunde Ergebnisse ermittelt und visualisiert werden können. Sofern angebracht, ist die Praxistauglichkeit daher in Form eines prototypischen IT-Tools zu fördern.

3.1.4 Zusammenfassung der Anforderungen

Zusammenfassend sind alle identifizierten Anforderungen an die Methodik zur Optimierung der Flexibilität von Rohbaukonzepten nochmals in Abbildung 3-1 aufgelistet.

Inhaltliche Anforderungen	Auswahl Zielfunktion	Methodische Anforderungen
Morphologischer Kasten der relevanten Lösungselemente	Flexibilitätsbedarf	Reproduzierbarkeit, Transparenz
	Maßstab Zielsetzungen	Praxistauglichkeit
Antworten auf relevante Fragestellungen	Multiple Bewertungskriterien	Angemessener Aufwand
	Bewertung des Nutzens	Erhebbarkeit der Daten
Unterstützung bei der optimalen Einstellung der Parameter	Monetäre Bewertung	Nutzen klar erkennbar
	Aufwand/Nutzen-Vergleich	Akzeptanz durch Planer
	Lebenszyklusbetrachtung	Aufbereitung für Entscheider
	Berücksichtigung Unsicherheiten	Softwareunterstützung

Abbildung 3-1: Anforderungen an die Optimierungsmethodik

Anhand dieser Forderungen werden im weiteren Verlauf der Arbeit die Ansätze für einzelne Teilprobleme abgeleitet.

3.2 Kritische Würdigung bestehender Optimierungsansätze

Im Rahmen des Planungsprozesses für ein Produktionssystem kommen an verschiedenen Stellen und mit unterschiedlichen Zielsetzungen Optimierungsverfahren zum Einsatz. Diese Verfahren sollen im Folgenden dargestellt und untersucht werden. Ziel dieses Abschnittes ist also nicht die Darstellung des Ablaufs der Fabrikplanung in ihrer Gesamtheit; eben-

sowenig sollen die unterschiedlichen existierenden Ansätze der Fabrikplanung dargestellt werden[337].

Es werden zunächst Ansätze zur globalen Optimierung von Rohbaukonzepten sowie Paradigmen und Strategien auf ihre Eignung zur Flexibilitätsoptimierung gemäß der identifizierten Anforderungen untersucht. Daran schließt sich eine Untersuchung aktuell eingesetzter Verfahren, die explizit die Optimierung der Flexibilität von Rohbauten zum Ziel haben, an. Nach einem Zwischenfazit werden bestehende Ansätze zur *Bewertung* von Flexibilität auf ihre Eignung zum Einsatz bei der Optimierung von Flexibilität untersucht.

3.2.1 Globale Optimierungsansätze für den Automobilrohbau

Unter globalen Optimierungsansätzen seien hier solche Ansätze verstanden, die nicht explizit die Optimierung von Flexibilitätsaspekten (im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit) zum Ziel haben, sondern ganzheitlich die Wirtschaftlichkeit optimieren.

In der Automobilindustrie werden im Wesentlichen zwei globale Optimierungsansätze zur Unterstützung der Produktionssystemplanung angewendet: Simulationsuntersuchungen und analytische Methoden.

3.2.1.1 Simulationsuntersuchungen

Alle großen Automobilhersteller verlangen inzwischen vor Investitionsentscheidungen eine Verifikation von Produktionssystemen durch (diskrete Ablauf-) Simulation[338]. Im Rahmen der geforderten Simulationsstudien von Produktionssystemen mit Hilfe kommerziell verfügbarer oder selbst entwickelter Softwarelösungen wird neben der Verifikation in der Regel auch eine Optimierung vorgenommen[339]. Ein Nachteil von Simulationsuntersuchungen ist, dass sie in der Regel sehr zeitaufwendig sind[340]. Außerdem erfordern sie meist den Einsatz von Spezialisten für die Datenerhebung und Modellierung.

Simulation wird in vielen Phasen der Produktionssystemplanung zur Unterstützung der Entscheidungsfindung eingesetzt[341]. In der Planungsphase eines Produktionssystems kommt Simulation im Wesentlichen zu zwei Zwecken zum Einsatz[342]:

- zunächst in der Konzeptphase, in der grundlegende technische Vorgänge mit Hilfe von Simulation auf ihre Machbarkeit getestet werden; sowie

---

[337] vgl. hierzu u. a. Aggteleky: Fabrikplanung, 1987, Schmigalla: Fabrikplanung, 1995, und Felix: Unternehmens- und Fabrikplanung, 1998.

[338] vgl. Ulgen, Gunal: Simulation in the Automobile Industry, 1998, S. 547.

[339] vgl. Williams: Making Simulation a Corporate Norm, 1996, S. 627.

[340] vgl. Patchong *et al.*: Improving Car Body Production, 2003, S. 38f.

[341] vgl. Dallery, Gershwin: Manufacturing Flow Line Systems, 1992, S. 4.

[342] vgl. Ulgen, Gunal: Simulation in the Automobile Industry, 1998, S. 547f.

- in späteren Planungsphasen u. a. zur Unterstützung bei der detaillierten Ausrüstungsdimensionierung, bei der Bestimmung von Zykluszeiten und zur Sequenzierung.

Grundsätzlich steht bei solchen Simulationsstudien nicht die Flexibilität im Mittelpunkt der Betrachtung. Das Ziel eines Simulationseinsatzes in der Konzeptphase ist vielmehr der generelle Nachweis der Machbarkeit eines Produktionssystems, also der Nachweis, dass das geplante Produktionssystem die gestellte Aufgabe erfüllen kann. Der Einsatz von Simulation in späteren Planungsphasen dient der Optimierung des Systems im Hinblick auf ausgewählte Parameter, wie bspw. Durchsatz oder Taktzeit[343]. Konkrete Ziele eines Simulationseinsatzes können zum Beispiel

- die Bestimmung der Kapazität eines Produktionssystems,
- die Ermittlung von Engpässen,
- die Arbeitskraftzuteilung und -optimierung,
- der Vergleich unterschiedlicher Betriebsstrategien,
- der Entwurf und die Analyse von Logistiksystemen,
- die Analyse von Materialbevorratungsstrategien,
- die Optimierung von Schichtmodellen sowie
- der Entwurf von Materialhandlingsystemen

sein[344].

Auch im Rahmen der einzelnen aufgeführten Betrachtungen werden in der Regel keine Flexibilitätsuntersuchungen vorgenommen. Neben der fehlenden Absicht, solche Untersuchungen durchzuführen, sind dafür im Wesentlichen zwei Gründe verantwortlich:

Erstens ermöglichen die verwendeten Simulationsumgebungen ohne Änderungen keine Flexibilitäts- und Risikountersuchungen. Zum Beispiel unterstützen sie nicht die Modellierung von Unsicherheiten; ebenso wenig beherrschen sie den Aufbau von Szenarien und die Auswertung und Aufbereitung der durch Unsicherheiten und Szenarien erzeugten Daten[345].

Zweitens lässt der verwendete Detaillierungsgrad keine Flexibilitätsuntersuchungen bzw. -optimierungen zu. Der Detaillierungsgrad der für die Ablaufsimulation benötigten Daten ist außerordentlich hoch. Sowohl die Fähigkeiten der Produktionssysteme als auch das zu bewältigende Produktionsprogramm und die verwendeten Steuerungsregeln müssen bis

[343] vgl. Ulgen *et al.*: The Role of Simulation, 1994, S. 125.
[344] Jayaraman, Agarwal: Simulating an Engine Plant, 1996, S. 61.
[345] vgl. Fox: Effective Application of Simulation, 1991, S. 416.

ins Detail bekannt sein, um eine Ablaufsimulation sinnvoll einzusetzen. Dies verhindert aus folgenden Gründen den Einsatz von Simulation für Flexibilitätsuntersuchungen:

- In der Detailplanungsphase, in der die wesentlichen die Flexibilität des Produktionssystems betreffenden Entscheidungen getroffen werden, liegen die erforderlichen Daten nicht mit dem für Simulationsuntersuchungen nötigen Detaillierungsgrad vor[346]. Dies betrifft sowohl Absatzdaten (in solch frühen Planungsphasen beträgt die Abweichung der Prognosen von der später eintretenden Realität bis zu 40 %, vgl. auch Abschnitt 2.2.2.2) als auch die Daten über das zu untersuchende Produktionssystem (dessen Leistungsdaten erst in späteren Planungsphasen nach der Einholung detaillierter Angebote von Produktionsausrüstern genauer bekannt sind). Daraus folgend sind auch Steuerungsregeln noch nicht endgültig festlegbar. Weil also die benötigten Daten nicht im erforderlichen Detaillierungsgrad vorliegen (und zum Großteil auch nicht beschaffbar sind), ist in den relevanten Planungsphasen eine Flexibilitätsoptimierung mit den verwendeten Simulationsumgebungen nicht realisierbar.
- Teile der erforderlichen Daten liegen im Unternehmen in der Regel durchaus im erforderlichen Detaillierungsgrad vor. Jedoch ist der Aufwand für die Beschaffung dieser Daten und deren Eingabe ins Simulationssystem durch die Tatsache, dass die Simulationsumgebungen immer das komplette System modellieren (daher der Begriff „globale Optimierungsansätze“), so hoch[347], dass in solch frühen Planungsphasen Zeit und Wille für die Aufbereitung dieser Daten zum Zwecke von Flexibilitätsuntersuchungen fehlen.
- Selbst wenn alle Daten auf dem erforderlichen Detaillierungsniveau vorlägen und beschafft und aufbereitet würden, wäre eine Simulation mit den herkömmlichen Simulationsumgebungen aus Laufzeitgründen nicht möglich. Die große Anzahl nötiger Simulationsläufe, die sich aus der Kombination der Anzahl der zu untersuchenden Absatzszenarien mit der Anzahl der möglichen Flexibilitätskonzepte ergibt, führt bei dem in den üblichen Simulationsumgebungen verwendeten Detaillierungsgrad zu unrealistisch langen Laufzeiten[348].
- Schließlich verhindert die Komplexität der in Simulationsmodellen verwendeten Regeln eine Modellierung der Teile der Flexibilität definierenden möglichen dynamischen Anpassungen über den Lebenszyklus – und somit ihre Analyse und Optimierung.

---

[346] vgl. Ulgen *et al.*: Pitfalls of Simulation Modelling, 1996, S. 23.

[347] vgl. Ulgen *et al.*: Simulation Methodology in Practice. Part 1, 1994, S. 119.

[348] Je nach Schätzung liegen diese zwischen mehreren Tagen bis zu mehreren Jahren.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die für Simulationsuntersuchungen verwendeten Modelle eine viel zu hohe Granularität für Flexibilitätsuntersuchungen und -optimierungen aufweisen.

Selbst wenn die beschriebenen Probleme nicht existierten und eine vollständige automatische Optimierung der Flexibilität durch Simulationssysteme (mit entsprechenden Ergänzungen) technisch möglich wäre, würde ihre Verwendung an der mangelnden Akzeptanz durch Produktionssystemplaner scheitern. Es hat sich gezeigt, dass mangelnde Eingriffsmöglichkeiten durch die Planer zum Scheitern automatischer Optimierungsansätze in der Praxis führen (vgl. auch Abschnitt 3.1.3)[349].

3.2.1.2 Analytische Methoden

Neben Simulationsverfahren werden im Fabrikplanungsprozess analytische Methoden angewendet, um Produktionssysteme zu bewerten und zu optimieren. Sie bieten den Vorteil schneller Ergebnisse und einfacher Anwendung, sind jedoch in der Entwicklung sehr komplex. Außerdem werden sie in der Regel nur für die Lösung stark vereinfachter Teilprobleme und unter einer Vielzahl einschränkender Annahmen eingesetzt. Sie können sehr komplexe Sachverhalte sowie dynamisches Verhalten von Systemen bisher nicht abbilden.

Für die Ermittlung und Optimierung der Flexibilität von Produktionssystemen ist jedoch die Berücksichtigung dynamischen Verhaltens notwendig. Deshalb sind auch analytische Verfahren allein nicht zur Flexibilitätsoptimierung geeignet. Allerdings kann die Ermittlung des Wertes einer Zielfunktion für die Optimierung durchaus analytisch erfolgen.

Abbildung 3-2 zeigt die Vor- und Nachteile von Simulationsverfahren und analytischen Methoden im Überblick.

Verfahren	Vorteil	Nachteil
Simulation	Präzise Modellierung	Zeitaufwendig
	Berücksichtigt dynamische Aspekte	Erfordert Spezialisten
Analytische Methoden	Einfache Anwendung	Berücksichtigt keine dynamischen Aspekte
	Ergebnisse sofort verfügbar	Nur begrenzte Komplexität modellierbar

Abbildung 3-2: Vor- und Nachteile von Simulationsverfahren und analytischen Methoden[350]

[349] vgl. Ulgen *et al.*: Simulation Methodology in Practice. Part 2, 1994, S. 136, sowie Berkin *et al.*: Management of Simulation Technology, 1995, S. 366.

[350] Patchong *et al.*: Improving Car Body Production, 2003, S. 40.

3.2.1.3 Zwischenfazit

Es lässt sich festhalten, dass sowohl die aktuell verwendeten Simulationsumgebungen als auch bisherige rein analytische Ansätze weder die oben identifizierten inhaltlichen noch die methodischen Anforderungen an ein Verfahren zur Flexibilitätsoptimierung erfüllen.

3.2.2 Paradigmen und Strategien

Es existieren unzählige Paradigmen und Strategien für die Entwicklung von Produktionssystemen in der Automobilindustrie. Die Theorien reichen dabei von solchen mit beschreibendem bis zu solchen mit empfehlendem Charakter. Von Konzepten für die gesamte Automobilbranche über spezifischere Empfehlungen für Automobilhersteller bis hin zu Strategien für den Rohbau lässt sich eine Vielzahl interessanter Ansätze finden.

Das St. Galler Management-Konzept, das auf dem Systemansatz nach ULRICH aufbaut, unterscheidet drei Dimensionen des Managements: eine normative, eine strategische und eine operative Dimension[351] (vgl. Abbildung 3-3); darüber steht ein integratives Paradigma, die Managementphilosophie. Die Aufgabe des operativen Managements ist es, über konkrete Handlungen am Markt oder im Unternehmen zu entscheiden.

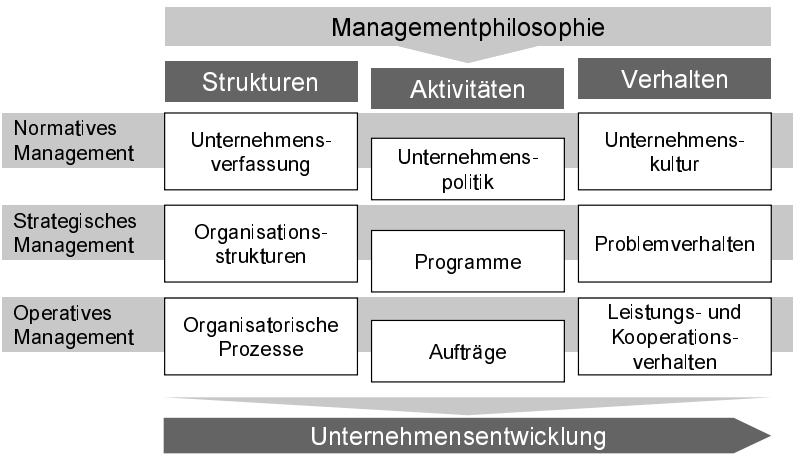


Abbildung 3-3: Das St. Galler Management-Konzept[352]

Gemäß der Zielsetzung dieser Arbeit, ein Verfahren zu entwickeln, das den Planer bei der Flexibilitätsoptimierung im Rohbau unterstützt sowie dem Management Entscheidungen

[351] Bleicher: Integriertes Managment, 2001.

[352] ebd.

für ein Rohbaukonzept ermöglicht, muss das Ergebnis des Forschungsprozesses Unterstützung auf der Ebene des operativen Managements bieten.

Die zahlreichen Paradigmen und Strategien leisten jedoch Hilfestellung auf den Ebenen des normativen und des strategischen Managements; für die Ebene des operativen Managements sind sie weder gedacht noch verwendbar. Die in solchen Ansätzen (z. B. in der BCG-Studie *Steering carmaking into the 21st century – From today's best practices to the transformed plants of 2020*[353], in der Mercer-Studie *Automobiltechnologie 2010 – Technologische Veränderungen im Automobil und ihre Konsequenzen für Hersteller, Zulieferer und Ausrüster*[354] oder in der gemeinsam von McKinsey und dem WZL durchgeführten Studie *Tomorrow's automotive production*[355]) ausgesprochenen Empfehlungen sind demgemäß nicht direkt operationalisierbar. Sie leisten keine detaillierte Gestaltungs- (für Planer) und keine Entscheidungsunterstützung (für Entscheider) im konkreten Anwendungsfall und erfüllen deshalb die oben identifizierten Anforderungen an eine Methodik zur Flexibilitätsoptimierung im Rohbau nicht.

3.2.3 Flexibilitätsoptimierung des Automobilrohbaus in der Praxis

Obwohl, wie in den beiden vorhergehenden Abschnitten dargelegt, Flexibilität im Rahmen der Anwendung globaler Optimierungsverfahren im Fabrikplanungsprozess keine Bedeutung beigemessen wird, werden in der Praxis der Fabrikplanung Untersuchungen zum Thema Flexibilität angestellt – wenn auch in sehr begrenztem Umfang.

Im Operations research werden drei Arten von Optimierung unterschieden: exakte, heuristische und manuelle Optimierung.

Exakte Optimierung wird in der Regel mit Hilfe analytischer Verfahren durchgeführt; wie in Abschnitt 3.2.1 dargestellt, werden solche Verfahren bei der Produktionssystemplanung nicht zur Flexibilitätsoptimierung eingesetzt.

Auch heuristische Verfahren zur gezielten Flexibilitätsoptimierung existieren bisher nicht.

Anwendung zur Optimierung der Flexibilität von Automobilrohbauten findet bisher nur die manuelle Optimierung. „Manuelle Optimierung" ist dabei der wissenschaftliche Ausdruck für die Methode des *trial and error* (engl.: Versuch und Irrtum). Diese Methode findet Anwendung bspw. in Form von Extremwertuntersuchungen: In der Regel wird bei der Planung und Auslegung von Produktionssystemen zwar nur mit Planabsatzzahlen gearbeitet; nach erfolgter Planung werden allerdings häufig die dann bereits in Simulationssystemen oder anderweitig modellierten Produktionssystemkonzepte zusätzlich mit einem so ge-

[353] Maurer, Stark: Steering Carmaking into the 21st Century, 2001.
[354] Kalmbach, Dannenberg: Automobiltechnologie 2010, 2001.
[355] McKinsey/WZL: Tomorrow's Automotive Production, 2005.

nannten „best case“- und einem „worst case“-Szenario untersucht. Die Wirtschaftlichkeit der Konzepte für diese beiden Fälle wird bestimmt. Auf Basis dieser Bewertung werden teilweise Änderungen an den vorliegenden Konzepten vorgenommen; sie stellen weiterhin ein Kriterium für die folgende Auswahl eines der betrachteten Produktionssystemkonzepte dar.

Auch wenn eine solch begrenzte Berücksichtigung von Flexibilität besser als eine vollständige Vernachlässigung ist, liegen ihre Nachteile auf der Hand:

- Unterschiedliche mögliche Entwicklungen (sowohl Marktentwicklungen als auch das Produktionsprogramm betreffende Entscheidungen des Unternehmens) werden nur unzureichend abgebildet.
- Deshalb können ihre Konsequenzen für die Wirtschaftlichkeit eines Produktionssystems nicht vollständig bewertet werden.
- Zudem macht ein solches Vorgehen das Erkennen von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen im Bereich von Unsicherheit, Risiko und Flexibilität unmöglich. Die Entwicklung von Strategien zur Minimierung von Risiken ist deshalb nicht möglich.
- Die nicht vorhandene explizite und gezielte Berücksichtigung von Unsicherheit und Risiko verhindert auch eine Darstellung der Vor- und Nachteile bzw. der Kosten und Nutzen von Flexibilität und somit eine Kommunikation dieser Daten an Entscheidungsträger. Flexibilität betreffende Entscheidungen werden damit (implizit) auf Planerebene getroffen – statt explizit auf Entscheiderebene. Chancen, die Flexibilität bietet, können also nicht identifiziert und quantifiziert und deshalb nicht in Investitionsentscheidungen mit einbezogen werden.

Gerade bei zunehmend dynamischen Märkten hat dies Wettbewerbsnachteile zur Folge.

Die forschungsbegleitende Arbeit an Fallstudien in der Automobilindustrie hat allerdings auch gezeigt, dass bei einigen Planern durchaus ein Bewusstsein für die Chancen (und Risiken) von Flexibilität vorhanden ist. Sie versuchen deshalb, mit den vorhandenen Hilfsmitteln und (zeitlichen und personellen) Ressourcen Flexibilität und Risiko zu untersuchen und zu bewerten. Die verwendeten Ansätze sind allerdings methodisch fragwürdig; das Vorgehen lässt sich am ehesten mit „Trial and Error auf Papier“ beschreiben. Planer kennzeichneten ihre Situation in Bezug auf Flexibilität wiederholt mit dem Begriff „Blindflug“. Das in der Praxis angewendete Verfahren zur Rohbauplanung ignoriert Flexibilitätsaspekte weitgehend.

3.2.4 Zwischenfazit: Ansätze zur Flexibilitätsoptimierung

Es lässt sich festhalten, dass sowohl die aktuell verwendeten Simulationsumgebungen als auch bisherige rein analytische Ansätze weder die oben identifizierten inhaltlichen noch die methodischen Anforderungen an ein Verfahren zur Flexibilitätsoptimierung im Rohbau erfüllen. Auch Strategien und Paradigmen leisten keine ausreichend detaillierte Gestaltungs- und Entscheidungsunterstützung im konkreten Anwendungsfall und erfüllen deshalb die Anforderungen an eine Methodik zur Flexibilitätsoptimierung nicht. Die in der Praxis eingesetzten Trial-and-Error-Verfahren weisen gravierende Nachteile auf.

Es existieren sowohl in der wissenschaftlichen Literatur als auch in der betrieblichen Praxis bisher keine geeigneten Verfahren oder etablierten Methoden zur Flexibilitätsoptimierung im Rohbau, die statt einer lediglich allgemeinen Optimierung in besonderer Weise auf Flexibilität eingehen und zukünftige Chancen und Risiken explizit betrachten[356] und alle identifizierten Anforderungen erfüllen.

3.2.5 Ansätze zur Berechnung einer Zielfunktion

Eine wesentliche Ursache für das Fehlen gezielter Verfahren zur Optimierung der Flexibilität von Produktionssystemen liegt darin, dass neben einer präzisen Definition von Flexibilität insbesondere ein Konsens über die Bedeutung und den Nutzen von Flexibilität fehlt[357]. Die Wissenschaft ist daher über Versuche zur Entwicklung von Ansätzen zur Flexibilitäts*bewertung* bisher nicht hinausgekommen. Solche Ansätze stellen jedoch eine Voraussetzung zur Optimierung von Flexibilität dar, ermöglichen sie doch die Definition und Berechnung einer Zielfunktion für die Optimierung. Die Zielfunktion wiederum ist Kern einer jeden Optimierung (vgl. Abschnitt 3.1.2); liegt keine eindeutig definierte oder gar eine fehlerhafte Zielfunktion vor, ist eine Optimierung nicht möglich.

Voraussetzung für die Optimierung der Flexibilität ist also zunächst eine Zielfunktion, die die relevanten Aspekte von Flexibilität im Rohbau bewertet. Deshalb folgen in diesem Abschnitt ein Überblick über Methoden zur Bewertung von Flexibilität sowie eine kritische Bewertung dieser Methoden. Viele der Schriften zum Thema produktionswirtschaftlicher Flexibilität (siehe hierzu auch Abschnitt 2.1.2.2) befassen sich mit dem Thema der Flexibilitätsbewertung; die folgende Recherche soll insbesondere aufzeigen, inwiefern diese die beschriebenen Anforderungen an eine Zielfunktion zur Flexibilitätsoptimierung erfüllen und somit für die angestrebte Anwendung im Rahmen der Optimierungsmethodik geeignet sind. Anhand von Beispielen sollen Unzulänglichkeiten der dominierenden Kategorien von

[356] vgl. Sihn: Wandlungsfähigkeit planen, 2000, 42ff.

[357] vgl. Warnecke: Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb, 1996, S. 435.

Bewertungsverfahren im Hinblick auf den angestrebten Anwendungsfall verdeutlicht werden.

Die meisten Arbeiten beschränken sich auf die Klassifizierung und Definition der einzelnen Flexibilitätsarten[358], eine quantitative Beschreibung der Flexibilitäten erfolgt in der Regel nicht. Dies liegt unter anderem daran, dass die Quantifizierung von Flexibilität sich aufgrund ihres strategischen Charakters und der multidimensionalen Wirkungsweise schwierig gestaltet[359].

Eine Gliederung bestehender wissenschaftlicher Ansätze zur Bewertung von Flexibilität stammt von GUPTA UND GOYAL. Dabei unterscheiden sie die Ansätze sowohl hinsichtlich der Flexibilitätsdefinitionen, die die Forscher jeweils zugrunde gelegt haben, als auch hinsichtlich der Herangehensweise, mit der die Flexibilität gemessen wird. Hierdurch identifizieren sie sechs Kategorien von Bewertungsansätzen[360], namentlich

1. den Petri-Netz-Ansatz,
2. Maße, die auf Leistungskennzahlen beruhen,
3. Maße, die auf den wirtschaftlichen Konsequenzen von Flexibilität beruhen,
4. den informationstheoretischen Ansatz,
5. den entscheidungstheoretischen Ansatz sowie
6. mehrdimensionale Bewertungsansätze.

Dabei dominieren die ersten drei Kategorien, die als Maßzahlen die Anzahl der Anpassungsmöglichkeiten, die Nutzung technischer Indikatoren in Form von Leistungskennzahlen oder ökonomische Indikatoren, die auf den wirtschaftlichen Konsequenzen beruhen, zur Quantifizierung von Flexibilität heranziehen[361]. GUPTA UND GOYAL weisen zudem darauf hin, dass in existierenden Bewertungsansätzen Flexibilität zumeist als Eigenschaft eines Systems beschrieben wird, die eher potenzielle Fähigkeiten des Systems widerspiegelt, als Aussagen über die tatsächliche Nutzenerbringung zu erlauben[362].

Da an dieser Stelle nicht auf alle in der wissenschaftlichen Literatur beschriebenen Bewertungsansätze eingegangen werden kann, sollen in den Augen des Autors vielversprechende Bewertungsmodelle herausgegriffen werden, um an ihnen exemplarisch die Nicht-

---

[358] vgl. Nilsson, Nordahl: Making Manufacturing Flexibility Operational, 1995, S. 4.

[359] vgl. Gerwin: Manufacturing Flexibility, 1993, S. 83, sowie Shi, Daniels: Survey of Manufacturing Flexibility, 2003, S. 417.

[360] vgl. Gupta, Goyal: Flexibility of Manufacturing Systems: Concepts and Measurements, 1989, S. 120f, sowie Parker, Wirth: Manufacturing Flexibility, 1999, S. 430.

[361] vgl. Schneeweiss: Flexibilität, Elastizität und Reagibilität, 1996, S. 490f.

[362] vgl. Gupta, Goyal: Flexibility of Manufacturing Systems: Concepts and Measurements, 1989, S. 124.

erfüllung relevanter Anforderungen, wie sie in Abschnitt 3.1 formuliert wurden, aufzuzeigen.

3.2.5.1 Bewertungsmodell nach CHATTERJEE ET AL.

Das Bewertungsmodell nach CHATTERJEE ET AL. steht stellvertretend für Bewertungsansätze, die den Petri-Netz-Ansatz beziehungsweise die Anzahl der Anpassungsmöglichkeiten in Form von Kennzahlen zur Bewertung von Flexibilität heranziehen. Dabei entwickeln die Autoren beispielsweise zur Bewertung von Routenflexibilität vier unterschiedliche Messgrößen[363]:

- die Kardinalität der Routenschar, d. h. die Gesamtzahl möglicher Routen,
- die Anzahl der Produktionseinheiten, die in der Lage sind, eine Operation an einem bestimmten Bauteil auszuführen, im Verhältnis zur Anzahl aller Produktionseinheiten,
- die Anzahl alternativer Pfade innerhalb einer Produktionseinheit sowie
- die Anzahl der Routen durch eine Produktionseinheit.

Der Nachteil dieses Bewertungsverfahrens ist offensichtlich: Es werden ausschließlich die Zusammenhänge verketteter Produktionseinheiten und deren Fähigkeit, bestimmte Produkte herstellen zu können, als Messgrößen erhoben. Zwar spiegeln diese sicherlich wichtige Aspekte von Routenflexibilität wider, doch fehlt beispielsweise die Berücksichtigung der technisch begrenzten Kapazitäten, so dass eine Nutzung dieser Kenngrößen in der Praxis keine Antwort auf die Frage liefern kann, inwieweit die Forderungen des Produktionsprogramms erfüllt werden können. Zudem fehlt gänzlich eine Betrachtung der Aufwandsseite, beispielsweise durch Gegenüberstellung der monetären Aufwände.

3.2.5.2 Bewertungsmodell nach JORDAN UND GRAVES

JORDAN UND GRAVES konzentrieren sich mit ihrem Bewertungsmodell auf die Bewertung von Flexibilität in Netzwerken, eine explizite Betrachtung innerhalb einer Fabrik oder gar eines Gewerks wie dem Rohbau fehlt[364]. Dennoch bieten sie einen der vielversprechendsten Ansätze, da sie sowohl wichtige Aspekte des Flexibilitätsbedarfs abbilden als auch, im Gegensatz zu CHATTERJEE ET AL., das Produktionssystem mit Kapazitäten modellieren.

Die Erfassung des Flexibilitätsbedarfes beinhaltet dabei sowohl die Anzahl der unterschiedlichen herzustellenden Produkte sowie für jedes einzelne Produkt die prognostizierte Stückzahl als auch die damit verbundenen Unsicherheiten in Form der Beschreibung

[363] vgl. Chatterjee *et al.*: Manufacturing Flexibility, 1984, S. 51ff.

[364] vgl. Jordan, Graves: Manufacturing Process Flexibility, 1995, S. 587.

der Varianz[365]. Auf der Seite des Produktionssystems berücksichtigen die Autoren zudem unterschiedliche Kapazitäten der einzelnen Fabriken.

Als Messgröße dient ihnen neben einer abstrakten Flexibilitätskennzahl die Anzahl tatsächlich produzierbarer Produkte. Die Autoren analysieren die Flexibilitätsarten Produktmix- und Volumenflexibilität. Der Fokus ihrer Untersuchungen liegt auf der Entwicklung von Allokationsstrategien (Welches Produkt wird in welcher Anzahl in welcher Fabrik hergestellt?). Ihr Ziel ist die Ableitung von Richtlinien für eine Produktzuordnung, die bei einer gegebenen Gesamtkapazität des Fabriknetzwerkes mit einer möglichst geringen Anzahl Produkt-Fabrik-Verknüpfungen einen maximalen Nutzen (Anzahl der produzierbaren Produkte bei gewählter Produktallokation bei gegebener Nachfrage) generiert. Dabei vergleichen sie den erzielbaren Nutzen sowohl mit den Ergebnissen bei Zugrundelegung eines gänzlich solitären Fabriknetzwerks (jedes Produkt kann nur in genau einer Fabrik produziert werden) als auch mit dem maximal erzielbaren Nutzen bei voller Produktflexibilität (jedes Produkt kann in jeder Fabrik produziert werden). Die Ergebnisgrößen ermitteln JORDAN UND GRAVES dabei auf analytischem Wege[366]. Eine Darstellung dieser beiden Extrema samt einer teilflexiblen Produktallokation ist in Abbildung 3-4 zu sehen.

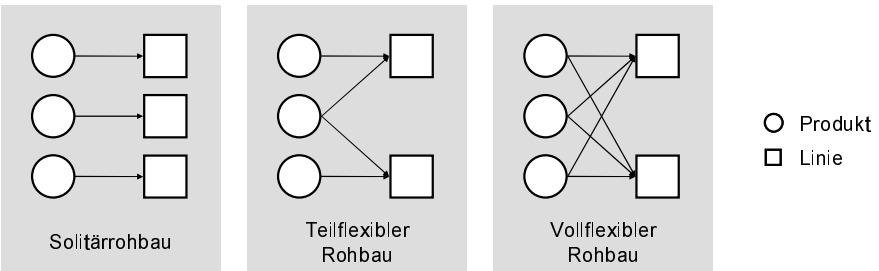


Abbildung 3-4: Produktallokationen nach JORDAN UND GRAVES

Mit der Ermittlung des tatsächlich realisierbaren Produktionsvolumens erfüllen die Autoren die Forderung nach Messung von Flexibilität anhand der damit verbundenen Zielsetzungen. Dennoch wirft ihr Verfahren Kritikpunkte auf:

Bei der Modellierung der Produktionsaufgabe betrachten die Autoren nur eine Soll-Stückzahl und deren statistische Abweichungen. Eine Betrachtung der Nachfrage der einzelnen Produkte über der Zeit erfolgt nicht; konkrete mögliche Nachfrageverläufe lassen sich also nicht modellieren. An- und Auslaufeffekte, wie sie für Produktlebenszyklen in der Automobilindustrie charakteristisch sind (siehe Abbildung 2-13), bleiben daher unberück-

[365] gemäß der Definition der Varianz in der Wahrscheinlichkeitsrechnung

[366] vgl. Jordan, Graves: Manufacturing Process Flexibility, 1995, S. 577ff.

sichtigt. Auch die Zunahme der Planungsunsicherheiten mit wachsendem Planungshorizont wird nicht abgebildet; es fehlt die Lebenszyklusbetrachtung.

Ein weiterer Schwachpunkt, der sich aus der Fokussierung auf Produktionsnetzwerke ergibt, ist die vereinfachte Darstellung der Produktallokation. So kann mit den Hilfsmitteln von JORDAN UND GRAVES nur eine einfache n:m-Beziehung (n Produkte, m Fabriken) betrachtet werden. Ein Einbezug der Verkettung von Produktionseinheiten durch sequenzielle Fertigungsschritte, wie sie bei Rohbaukonzepten durch die Zusammenbauten gegeben ist (vgl. Abschnitte 2.1.1.2 und 2.1.1.3), ist somit nicht möglich[367].

Schließlich ergibt sich bei den Flexibilitätsbewertungen die Kritik, dass in erster Linie der Nutzen dargestellt wird. Zur Betrachtung des erforderlichen Aufwandes wird lediglich die Gesamtkapazität des Produktionsverbundes als Indikator genutzt, eine Betrachtung monetärer Kenngrößen bleibt aus[368].

3.2.5.3 Bewertungsmodell nach SCHAUERHUBER

SCHAUERHUBERS Bewertungsmodell gehört zu den neueren Ansätzen, produktionswirtschaftliche Flexibilität zu bewerten. Er entwickelt dazu ein Verfahren mit der expliziten Zielsetzung, pekuniäre Aussagen über Flexibilisierungsvorhaben zu ermöglichen, und bedient sich hierzu des Ansatzes der Realoptionstheorie aus der Finanzmathematik. Auch berücksichtigt seine Ergebnisdarstellung die Unsicherheiten der Planungsgrundlagen, so dass sich diese als Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ergebnisgrößen wiederfinden.

Allerdings liegt seinem Kostenmodell die Annahme zugrunde, dass keine „absoluten Fixkosten“, also zusätzliche Investitionen für ein flexibles Produktionssystem im Vergleich mit einer nicht-flexiblen Alternative, entstehen[369]. Dies widerspricht der bereits getroffenen Feststellung, dass eine erhöhte Flexibilität im Allgemeinen mit einem höheren Investitionsbedarf einhergeht[370].

Zudem erfordert das Kostenmodell eine Stückkostenfunktion, die ein globales Minimum aufweist. Im Rahmen der begleitenden Projektarbeit bei der DAIMLERCHRYSLER AG wurde jedoch festgestellt, dass die zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung verfügbaren Kostendaten einen ausschließlich degressiven Verlauf über der produzierten Stückzahl aufweisen. Wie SCHAUERHUBER selbst feststellt, versagt sein Kostenmodell in diesen Anwendungsfällen[371].

---

[367] GRAVES UND TOMLIN erweitern in ihrer Arbeit diesen Ansatz auf verkettete Produktionssysteme. Ihr Ansatz gestattet auch die Modellierung aufeinander aufbauender Bearbeitungsstufen wie bspw. der drei Zusammenbauten im Automobilrohbau. Vgl. hierzu Graves, Tomlin: Process Flexibility in Supply Chains, 2003.

[368] vgl. Jordan, Graves: Manufacturing Process Flexibility, 1995, S. 579.

[369] vgl. Schauerhuber: Produktionswirtschaftliche Flexibilität, 1998, S. 181f.

[370] vgl. u. a. Shi, Daniels: Survey of Manufacturing Flexibility, 2003, S. 418.

[371] vgl. Schauerhuber: Produktionswirtschaftliche Flexibilität, 1998, S. 183.

3.2.5.4 Bewertungsmodell nach SESTERHENN

Ein sehr detailliertes Produktionssystemmodell, in dem durch Diskretisierung der Freiheitsgrade Anpassungsalternativen formuliert werden, erstellt SESTERHENN. Mit Hilfsmitteln der IT-gestützten Ablaufsimulation prüft er am Modell die Möglichkeiten des Produktionssystems, auf Marktanforderungen, die er in Form von Stückzahlszenarien abbildet, zu reagieren. Dabei erhebt er eine Reihe unter anderem auch monetärer Kenngrößen[372].

Der gewichtigste Kritikpunkt gilt der Art und Weise, wie er Planungsunsicherheiten berücksichtigt: Mit der Szenariotechnik nach GAUSEMEIER[373] arbeitet er in einem Anwendungsbeispiel drei mögliche Zukunftsverläufe heraus, die er mit Wahrscheinlichkeiten hinterlegt. Durch Durchführung der Simulation für jedes dieser Szenarien erhält er einen Erwartungswert seiner Ergebnisgrößen[374]. Die Kritik richtet sich hier sowohl gegen die Abbildung der Unsicherheiten durch die sehr geringe Anzahl von Szenarien als auch insbesondere gegen die ausbleibende Darstellung des Risikos in den Ergebnissen.

SESTERHENN hinterlegt außerdem bei der Modellierung des Produktionssystems ein sehr detailliertes Kostenmodell. Der daraus erwachsende Datenbedarf ist zum Zeitpunkt einer Konzeptauswahl in den frühen Phasen der Rohbauplanung mangels Verfügbarkeit der Informationen weder zu decken, noch steht der damit verbundene Erhebungsaufwand in Relation zum Detaillierungsgrad der zu bewertenden Konzeptalternativen. Die Praxistauglichkeit ist somit stark eingeschränkt.

3.2.5.5 Weitere Bewertungsansätze

SCHAUERHUBER weist zusammenfassend darauf hin, dass die meisten der in der Vergangenheit entwickelten Messgrößen für Flexibilität den Mangel aufweisen, entweder keine Aussagen über den monetären Nutzen oder Aufwand zu erlauben oder externe Umwelteinflüsse unberücksichtigt zu lassen[375].

CHANDRA kommt in seiner Recherche der existierenden Bewertungsansätze und Maßzahlen für Flexibilität zu dem Schluss, dass eine Reihe von Wissenschaftlern (so zum Beispiel SOON[376], BRILL[377] und GUSTAVSSON[378]) bereits vor längerer Zeit vielversprechende Kenngrößen zur Messung unterschiedlicher Arten von Flexibilität entwickelt haben, jedoch ei-

---

[372] vgl. Sesterhenn: Bewertungssystematik, 2002, S. 108.
[373] siehe hierzu Gausemeier *et al.*: Szenario-Management, 1996.
[374] vgl. Sesterhenn: Bewertungssystematik, 2002, S. 134.
[375] vgl. Schauerhuber: Produktionswirtschaftliche Flexibilität, 1998, S. 129.
[376] vgl. Soon, Park: Economic Measure of Productivity, 1987.
[377] vgl. Brill, Mandelbaum: On Measures of Flexibility, 1989.
[378] vgl. Gustavsson: Flexibility and Productivity, 1984.

nen praktischen Nachweis durch die Implementierung und Anwendung dieser Messgrößen schuldig blieben[379].

3.2.5.6 Zwischenfazit: Handlungsbedarf bei der Flexibilitätsbewertung

Die vorgestellten Bewertungsmodelle bieten zum Teil vielversprechende Ansätze zur Bewertung von Flexibilität und können damit als Ausgangspunkt für die Entwicklung einer Zielfunktion für das zu entwerfende Optimierungsverfahren dienen.

Allerdings wird keines der recherchierten Modelle allen wichtigen Anforderungen an eine Zielfunktion zur Flexibilitätsoptimierung von Rohbaukonzepten gerecht. Vielmehr zeigt sich, dass die einzelnen Bewertungsmodelle jeweils einen Teil der Anforderungen in ausgeprägter Weise erfüllen. Abbildung 3-5 verdeutlicht dies in einer Übersicht, in der die zentralen Forderungen an eine Zielfunktion exemplarisch den beschriebenen Bewertungsansätzen gegenübergestellt sind.

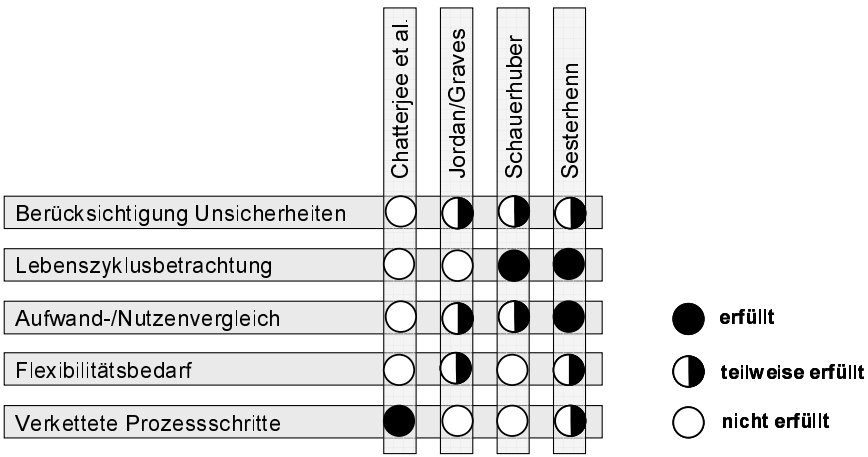


Abbildung 3-5: Anforderungen an die Zielfunktion und Erfüllungsgrad existierender Bewertungsmodelle

Das sich bei der Betrachtung der hier exemplarisch vorgestellten Bewertungsmodelle ergebende Bild ist repräsentativ für die in der wissenschaftlichen Literatur beschriebenen Ansätze. Demnach lassen sich neben der Strukturierung von GUPTA UND GOYAL auf Basis des gewählten Bewertungsansatzes folgende Gruppen anhand des offengelassenen Handlungsbedarfes bilden:

[379] vgl. Chandra, Tombak: Routing and Machine Flexibility, 1991, S. 2.

- Bewertungsansätze, die Flexibilität unabhängig vom Flexibilitätsbedarf bewerten, also weder die Produktionsaufgabe noch die Planungsunsicherheiten einbeziehen;
- Bewertungsansätze, die den Einfluss der begrenzten technischen Kapazitäten der Fertigungseinrichtungen außer Acht lassen. Zudem betrachten diese Bewertungsansätze im Allgemeinen nicht den Lebenszyklus des Produktionssystems;
- Bewertungsansätze, die entweder eine Betrachtung der Aufwandsseite gänzlich unterlassen oder keine monetäre Aussagen über den Aufwand generieren;
- Bewertungsansätze, deren Modell des Produktionssystems nicht den notwendigen Detaillierungsgrad bei der Abbildung des Rohbaus verwendet; sowie
- Bewertungsansätze, die entweder Planungsunsicherheiten ignorieren oder deren Einfluss auf die Ergebnisgrößen nicht zum Ausdruck bringen.

Eine den in Abschnitt 3.1 aufgestellten Forderungen an eine Zielfunktion für eine Methode zur Optimierung der Flexibilität im Rohbau entsprechende Methodik zur Bewertung der Flexibilität von Rohbaukonzepten muss also insbesondere die aufgerührten Defizite existierender Ansätze beheben.

3.3 Defizite bestehender Optimierungsansätze und Konkretisierung des Handlungsbedarfs

Nach der Zusammenfassung der grundlegenden Anforderungen an die Methodik zur Optimierung der Flexibilität von Automobilrohbauten in Abschnitt 3.1.4 (vgl. Abbildung 3-1) wird in diesem Abschnitt – aufbauend auf den vorstehend ausgeführten Überlegungen – der Handlungsbedarf in Abgrenzung von existierenden Ansätzen identifiziert. Gemäß der angewandten Forschungsmethodik wird damit der in Kapitel 1 vorgestellte und in Kapitel 2 detaillierte heuristische Bezugsrahmen dieser Arbeit weiter konkretisiert.

Zunächst lässt sich festhalten, dass der Automobilrohbau flexibler werden muss, um trotz sich immer schneller ändernder Produkt- und Produktionstechnologien und zunehmender Dynamik und Unsicherheit weiterhin kostengünstig wettbewerbsfähige Fahrzeuge produzieren zu können[380] und die Anforderungen aus der Praxis nach Erhöhung der Wirtschaftlichkeit zu erfüllen (siehe Abbildung 3-6). Dabei müssen strategische Vorgaben der Unternehmensführung berücksichtigt werden.

[380] vgl. Köpcke, Küppers: Skalierbare Karosserie, 2003, S. 2.

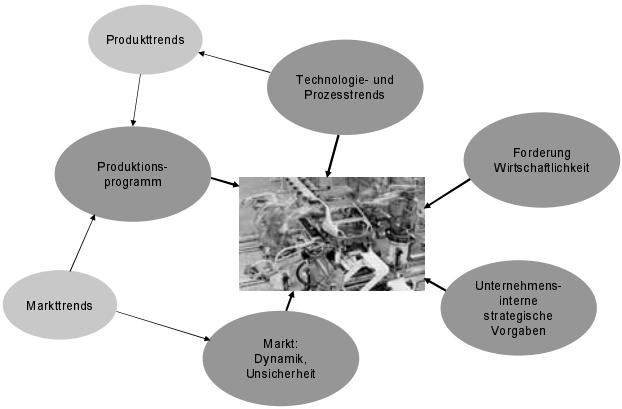


Abbildung 3-6: Einflussgrößen bei der Gestaltung eines Automobilrohbaus

Vor einer Umsetzung flexibler Rohbaukonzepte muss jedoch deren Wirtschaftlichkeit nachgewiesen[381] und optimiert werden. Die in der Praxis der Planung eines Rohbaus eingesetzten Verfahren ermöglichen diesen Nachweis nicht; auch eine gezielte Optimierung von Flexibilität im Rohbau wird durch die eingesetzten Verfahren nicht unterstützt. In der betrieblichen Praxis klafft eine Lücke zwischen Simulations- und vollständigen Optimierungsverfahren, die u. a. wegen ihrer Komplexität sowie des erforderlichen Detaillierungsgrades der verwendeten Planungsdaten in frühen Planungsphasen nicht eingesetzt werden können und generell wegen fehlender manueller Eingriffsmöglichkeiten von Planern nicht akzeptiert werden, und dem zur Flexibilitätsoptimierung genutzten Verfahren des „Trial and Error auf Papier". Auch Paradigmen und Strategien leisten keine detaillierte Gestaltungs- und Entscheidungsunterstützung und erfüllen daher die Anforderungen der Praxis nicht.

Um den Einsatz eines Verfahrens zur Flexibilitätsoptimierung in der Praxis zu ermöglichen, müssen daher insbesondere die Praxisanforderungen nach Erhebbarkeit sowie richtigem Detaillierungsgrad der benötigten Eingangsdaten, angemessenem Durchführungsaufwand und geeigneter Datenausgabe erfüllt werden (siehe Abbildung 3-7).

[381] vgl. Shi, Daniels: Survey of Manufacturing Flexibility, 2003, S. 418.

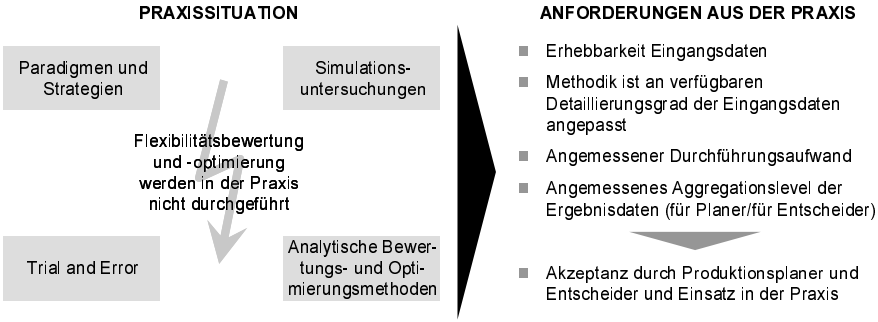


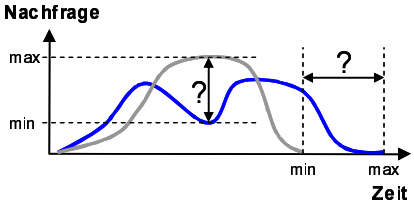
Abbildung 3-7: Praxisanforderungen an eine Methodik zur Flexibilitätsoptimierung

Von besonderer Wichtigkeit für die Optimierung ist die verwendete Zielfunktion. Sie muss die relevanten Aspekte von Flexibilität im Rohbau bewerten und dafür alle relevanten Größen abbilden. Abbildung 3-8 zeigt diese Anforderungen im Überblick. Insbesondere muss die Zielfunktion

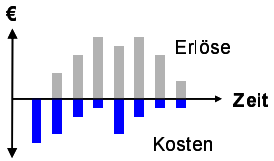
- Dynamik und Unsicherheit berücksichtigen und damit Risiken modellieren;
- die über den gesamten Lebenszyklus des Produktionssystems – und nicht etwa nur die während der ersten Investitionsphase – entstehenden Kosten (und Erlöse) in angemessener Form berücksichtigen und dabei
- alle entstehenden Kosten berücksichtigen: sowohl Investitionen für den Bau als auch Investitionen für nötig werdende Anpassungen des Produktionssystems; seine Betriebskosten über den gesamten Lebenszyklus; und schließlich Kosten für entgangene Opportunitäten.

Nur die Berücksichtigung aller dieser Größen stellt sicher, dass neben dem für Investitionen nötigen Aufwand auch der Nutzen von Flexibilität erfasst wird und in angemessener Weise in die Berechnungen einfließt.

Berücksichtigung von Dynamik und Unsicherheit



Bewertung der über den gesamten Lebenszyklus entstehenden Kosten und Erlöse



Berücksichtigung der Kostenarten

- **Initialinvest**
- **Betriebkosten**
- **Anpassungskosten**
- **Entgangene Opportunitäten**

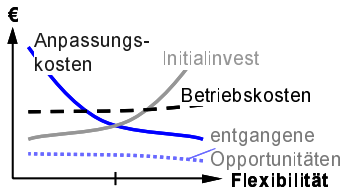
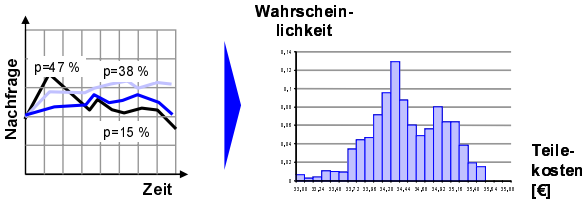


Abbildung 3-8: Anforderungen an die Zielfunktion zur Flexibilitätsoptimierung

Ein geeignetes Optimierungsverfahren muss weiterhin die Auswirkungen von Unsicherheit und Risiko aufzeigen (siehe Abbildung 3-9) und so den Nutzen richtig dimensionierter und richtig parametrierter Flexibilität nachweisen können.

Es muss dadurch Automobilherstellern dabei helfen, zu entscheiden, in welche Art von Flexibilität wie viel investiert werden soll. Dadurch unterstützt sie Automobilhersteller außer bei der Entscheidung für oder gegen Flexibilität auch bei der Entscheidung zwischen unterschiedlichen ihnen angebotenen Fertigungskonzepten.

Auswirkungen von Unsicherheit und Risiko zeigen
→Nutzen von Flexibilität darstellen



Konstruktive Empfehlungen zur Systemoptimierung geben

Lösungselemente:

Kompetenz Kapazität Verkettung

Abbildung 3-9: Anforderungen an die Bewertung und Optimierung

Schließlich müssen die Bewertungsergebnisse zur Systemoptimierung genutzt werden, indem konstruktive Empfehlungen zur Verbesserung bewerteter Produktionssystemalternativen abgeleitet werden. Im Automobilrohbau geht es dabei insbesondere um die richtige Kombination der drei Lösungselemente Kompetenz und Kapazität einzelner Rohbauten sowie ihre Verkettung.

4 Entwurf einer Methodik zur Flexibilitätsoptimierung im Automobilrohbau

Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorhergehenden Kapitel wird in diesem Kapitel, nach einer kurzen Charakterisierung seines Anwendungsraumes sowie zugrunde liegender Annahmen, das Rahmenwerk zur heuristischen Optimierung von Flexibilität im Automobilrohbau grob entworfen und für den weiteren Forschungsprozess in seinen Grundzügen festgeschrieben.

4.1 Anwendungsraum

Gemäß dem eingangs hergeleiteten Handlungsbedarf wurde im Verlauf des dargelegten Forschungsprozesses eine Methodik zur heuristischen Flexibilitätsoptimierung im Automobilrohbau entwickelt.

Die Methodik wurde zur Anwendung im Rahmen des Fabrikplanungsprozesses für Automobilrohbauten und damit für den Einsatz in der Planung von Großserienproduktionen konzipiert. Im Betrachtungsfokus stehen die Werks- und Linienebene. Die Methodik eignet sich ebenfalls zur Betrachtung von Netzwerken aus Automobilrohbauten; die Arbeitsplatz- und Zellenebene werden jedoch nicht betrachtet.

Unterstützt wird die Planung der Produktionsanlagen im Automobilrohbau; die nötige Logistik ist nicht Schwerpunkt der Betrachtung. Zwar werden die mit den zur Auswahl stehenden Rohbaukonzepten geplanten Logistikkonzepte und -kosten als Teil des Produktionssystems berücksichtigt – jedoch werden die Logistik und deren Flexibilität nicht explizit geplant.

4.1.1 Anwendung der Methodik im Fabrikplanungsprozess

Zu dem Zeitpunkt, an dem die entwickelte Methodik zum Einsatz kommen soll, wurde im Rahmen der Anlagenplanung die Fügefolge bereits festgelegt; eine grobe Zuordnung von Montagevorgängen zu Zusammenbauten existiert. Es liegt ein grobes Anlagenkonzept vor. Im Layoutplanungsprozess existieren erste Vorstellungen des Blocklayouts.

Darauf basierend entwerfen Rohbauplaner erste detaillierte Anlagenkonzepte; diese enthalten Block- und Grob-, teilweise auch bereits Feinlayout der Produktionsanlagen sowie eine erste Abschätzung der benötigten Einsatzfaktoren. Diese Anlagenkonzepte legen den Fertigungsablauf sowie grobe Kapazitäten – und damit im Wesentlichen auch die Flexibilität – fest und sind Eingangsgrößen für die vorgestellte Methodik. Ihre Entwicklung basiert zu wesentlichen Teilen auf Fachwissen der Rohbauplaner; sie wird von der vorgestellten Methodik nicht unterstützt. Ziel des vorgestellten Verfahrens ist vielmehr die Unterstützung

der Planer und Entscheider bei der Optimierung der Flexibilität der betrachteten Konzepte im Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit.

Zum Einsatzzeitpunkt der Methodik liegen also nur sehr grobe Daten des geplanten Produktionssystems vor. Genauere Aussagen über den Bedarf an Einsatzfaktoren können in dieser Planungsphase nicht gemacht werden. Ebenso sind genauere Aussagen über erwartete Marktentwicklungen nicht möglich (vgl. Abschnitt 2.1.1.5).

Am Ende des von der Methodik unterstützen Prozesses steht eine Investitionsentscheidung für eines der betrachteten Konzepte. Dabei kann es sich um eines der ursprünglich von den Planern erstellten Konzepte handeln oder um eine im Verlauf der Anwendung der Methodik optimierte Version eines solchen Konzeptes. Grundlegend neue Konzepte entstehen im Verlauf der Anwendung der Methodik nicht.

Durch die getätigte Investitionsentscheidung liegt am Ende des Planungsprozesses die im Rohbau implementierte Flexibilität fest. Wie in Abschnitt 2.1.1.5 dargelegt, ist diese fix und lässt sich während der Lebensdauer des Rohbaus i. A. nicht anpassen; größere Umbauten am Produktionssystem werden während seiner Lebensdauer i. d. R. nicht vorgenommen. Ergänzungen und Erweiterungen sind deshalb lediglich durch die Errichtung komplett neuer Produktionsanlagen möglich.

Durch die Methodik nicht unterstützt werden Entscheidungen über die operative Anwendung von Flexibilität im Produktionsbetrieb.

4.1.2 Optimierungsdimensionen

Vor welchen Entscheidungen stehen Rohbauplaner und Entscheider nun, wenn sie einen neuen Rohbau entwerfen und implementieren? Welches sind diejenigen der vom Planer zu beeinflussenden Parameter, die sich über die Flexibilität auf die Wirtschaftlichkeit des Rohbaus auswirken – und die also bei der Optimierung seiner Flexibilität berücksichtigt werden müssen?

In diesem Abschnitt sollen die Entscheidungs- und Optimierungsdimensionen, also die relevanten Optionen, erläutert und damit der in Abschnitt 3.1.1 geforderte morphologische Kasten mit „Lösungselementen“ in seiner Grundstruktur aufgebaut werden.

Grundsätzlich stellt sich zunächst die Frage nach dem verwendeten Rohbaukonzept. Soll der Rohbau nach dem Fischgrätprinzip („fish bone“) oder nach dem Quallenprinzip („jelly fish“) aufgebaut sein (vgl. Abbildung 4-1)? Sollen eher herkömmliche und damit unflexible Produktionsstationen verwendet werden oder innovative flexible Konzepte wie das NISSAN IBAS[382]?

[382] vgl. Naitoh *et al.*: Intelligent Body Assembly System, 1997, S. 128ff.

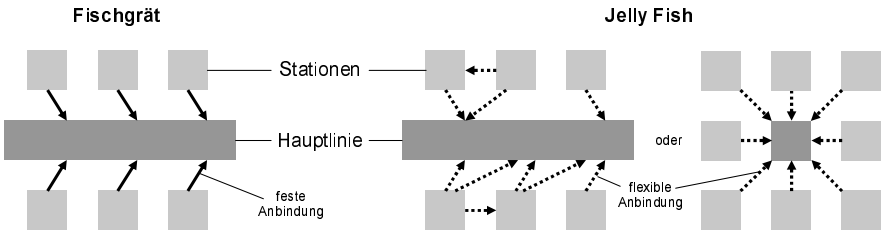


Abbildung 4-1: Unterschiedliche Rohbaukonzepte (schematisches Beispiel)

Umfangreiche Praxisanalysen im Rahmen des in dieser Arbeit geschilderten Forschungsprozesses haben drei relevante Entscheidungsdimensionen ergeben: Konkret müssen die Fragen nach

- Kompetenz,
  Das heißt: Welche Automobilmodelle und -varianten können in einem Zusammenbau – aus technischer Sicht – gefertigt werden (vgl. auch Abbildung 3-4)[383]?
- Verkettung und
  Das heißt: Auf welchen Pfaden können Karossen den Rohbau durchlaufen (vgl. Abbildung 4-2)[384]? Wie werden zu produzierende Karossen im laufenden Betrieb auf die möglichen Pfade verteilt (Prioriätsregeln)?
- Kapazität
  Das heißt: Wie viele Einheiten welches Modells und welcher Variante können – bei einem gegebenen Modellmixgrad – in einem Zusammenbau gefertigt werden?

der einzelnen Zusammenbauten beantwortet werden. Die möglichen Antworten auf diese drei Fragen stellen den Kern des gesuchten morphologischen Kastens dar.

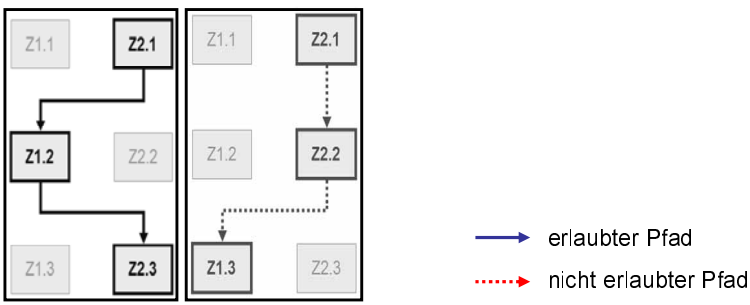


Abbildung 4-2: Erlaubte und nicht erlaubte Pfade durch den Rohbau (Beispiel)

[383] vgl. auch Jordan, Graves: Manufacturing Process Flexibility, 1995.

Für die einzelnen Zusammenbauten ergibt sich aus den Antworten auf diese Fragen auch, ob sie bspw. zu 40 % Fahrzeuge vom Typ A und zu 60 % Fahrzeuge vom Typ B oder zu 80 % Fahrzeuge vom Typ A und zu 20 % Fahrzeuge vom Typ B produzieren müssen.

Einige mögliche Rohbaukonzepte zeigt Abbildung 4-3 (Kapazitäten der Zusammenbauten sowie Prioritätsregeln für die Zuordnung von Produkten zu möglichen Pfaden sind nicht dargestellt). In der Praxis werden typischerweise ca. fünf Konzeptalternativen bewertet und optimiert; im ausschnittsweise gezeigten Planungsfall wurden zusätzlich zu den dargestellten Alternativen zwei andere teilflexible Konzepte untersucht.

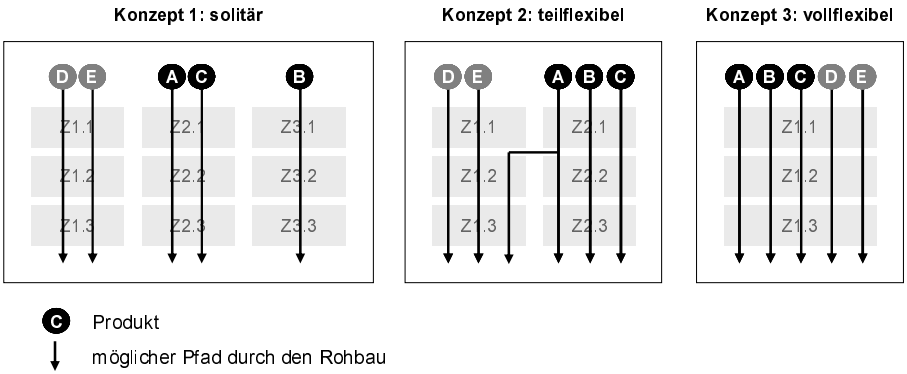


Abbildung 4-3: Mögliche Rohbaukonzepte (Beispiele)

Die beschriebenen Entscheidungsdimensionen wie Kapazität und Kompetenz der einzelnen Zusammenbauten stellen aus Sicht von Entscheidern im Rohbauplanungsprozess Stellgrößen zur Optimierung von Flexibilität und Wirtschaftlichkeit dar. Für Rohbauplaner sind sie jedoch auch Ergebnisgrößen: Sie lassen sich nicht nur direkt (z. B. durch die Dimensionierung der geplanten Anlagen) beeinflussen, sondern ergeben sich aus einer Vielzahl weiterer konkreter Entscheidungen wie z. B. dem Automatisierungsgrad einzelner Arbeitsstationen oder der (Arbeitszeit- und Kompetenz-)Flexibilität des eingesetzten Personals. Diese Stellgrößen aus Planersicht werden im Rahmen einer weiteren Ausarbeitung des morphologischen Kastens in den Abschnitten 5.3 und 5.4.3 beschrieben.

4.1.3 Anwender

Nutzer der Methodik sind zwei Gruppen von Anwendern: Rohbauplaner und Entscheider. Diese Gruppen stellen unterschiedliche Anforderungen an die Methodik.

[384] vgl. auch Graves, Tomlin: Process Flexibility in Supply Chains, 2003.

4.1.3.1 Rohbauplaner

Unter Rohbauplanern werden in der vorliegenden Arbeit Mitarbeiter der Fabrikplanung von Automobil-OEMs verstanden, die mit dem Entwurf von Automobilrohbauten beauftragt sind. Sie entwerfen und gestalten also mögliche Anlagenkonzepte.

Erste detailliertere Entwürfe von Rohbauplanern sind, wie oben beschrieben, Eingangsgrößen für die vorgestellte Methodik. Diese Entwürfe müssen im weiteren Verlauf des Planungsprozesses von den Planern konkretisiert und detailliert, angepasst und ggf. geändert werden.

Die entwickelte Methodik unterstützt Planer bei der *Optimierung der Flexibilität* der betrachteten Konzepte im Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit. Sie bietet daher die Möglichkeit,

- einzelne zu gestaltende Aspekte eines Produktionssystems auf ihre Auswirkung auf Flexibilität und Wirtschaftlichkeit zu untersuchen sowie, soweit möglich,
- gezielt Hinweise für konkrete Gestaltungsänderungen zu geben, die zu „angemessenerer“ Flexibilität und damit zu höherer Wirtschaftlichkeit führen.

4.1.3.2 Entscheider

Unter Entscheidern werden in der vorliegenden Arbeit Manager von Automobil-OEMs verstanden, die den Rohbau betreffende Investitionsentscheidungen treffen. Sie sind i. d. R. nicht mit der operativen Planung der Rohbaukonzepte befasst; ihnen werden vielmehr von Rohbauplanern konkrete Rohbaukonzepte vorgeschlagen und letztendlich zur Entscheidung vorgelegt. Sie treffen also die Auswahl unter möglichen alternativen Rohbaukonzepten. Eingangsgrößen für ihre Entscheidungen sind, neben strategischen Vorgaben aus dem Unternehmen, von Rohbauplanern bereits ausgestaltete alternative Rohbaukonzepte.

Die entwickelte Methodik unterstützt Entscheider bei der *Auswahl* von Rohbaukonzepten. Sie bietet dazu die Möglichkeit,

- Auswirkungen unterschiedlicher Anforderungsszenarien und insbesondere Auswirkungen von Dynamik und Risiko auf die alternativen Rohbaukonzepte zu untersuchen sowie
- diese Auswirkungen quantifiziert und auf angemessenem Aggregationsniveau darzustellen und damit eine fundierte Entscheidungsgrundlage zu liefern.

Damit wird insbesondere die Problematik adressiert, dass bisher viele entscheidungsrelevante Informationen über Flexibilität und ihre wirtschaftlichen Auswirkungen im konkreten Fall gar nicht bei den relevanten Entscheidern ankommen: Wegen der Komplexität der Fragestellung und der bisher nicht gelösten Problematik einer für Entscheider angemessenen Aufbereitung werden Informationen auf niedrigeren Ebenen im Unternehmen, z. B.

direkt von Rohbauplanern, gefiltert. Diese Filterung erfolgt wegen der Notwendigkeit der Aggregation für übergeordnete Entscheider fast zwangsläufig und bester Absicht und besten Gewissens. Allerdings filtert jeder Rohbauplaner nach seinen eigenen, subjektiv als wichtig identifizierten Kriterien; Zahlen unterschiedlicher Planer sind damit nicht vergleichbar. Wie die Praxisuntersuchung im Rahmen des geschilderten Forschungsprozesses gezeigt hat, sind die Filterkriterien außerdem vielfach fragwürdig.

Die vorgestellte Methodik beinhaltet daher auch ein Verfahren zur Aufbereitung der relevanten Informationen für Entscheider. Im Rahmen des Forschungsprozesses wurden dazu fundierte Untersuchungen zur Ermittlung entscheidungsrelevanter Informationen durchgeführt und auf dieser Basis ein Vorschlag für eine Datenaggregation für Entscheider entwickelt; die im Rahmen der Auswertung erzeugten Informationen werden dabei angemessen aggregiert. Auch hier werden also – zwangsläufig – Informationsverluste in Kauf genommen; allerdings gezielt und definiert.

4.2 Annahmen

Um einerseits die Komplexität der Problematik handhabbar zu machen und um andererseits die praktische Einsetzbarkeit von Rahmenwerk und Instrumentarium sicherzustellen, mussten gewisse einschränkende Annahmen getroffen werden; sie sollen hier knapp dargelegt werden.

Es wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt[385]:

- Die grundsätzliche Struktur des Rohbaus, d. h. Anzahl und Anordnung der Zusammenbauten sowie ihre Kompetenzen, bleibt über seinen Lebenszyklus gleich. Komplette Umbauten des Rohbaus werden also nicht betrachtet. Lediglich organisatorische Anpassungen sowie Anpassungen innerhalb einzelner Zusammenbauten werden berücksichtigt. Geändert werden können z. B. Schichtdauer und Schichtanzahl für den Rohbau; weiterhin ist die Bandbelegung variabel[386]. Mit diesen Anpassungen gehen ggf. Anpassungen der Anzahl der Werker im Rohbau einher. Zusätzlich werden Ausbaustufen einzelner Zusammenbauten betrachtet; z. B. können zusätzliche Roboter an einigen Stationen die Flexibilität oder die Kapazität eines Zusammenbaus erhöhen.

[385] Die hier dargelegten sowie ggf. ergänzende Einschränkungen werden in den jeweiligen Abschnitten des Kapitels 5 genauer erläutert.

[386] Z. B. kann jede zehnte Palette freigelassen werden.

- Die Taktzeit der Linien ist fix. Auch die Taktzeit einzelner Zusammenbauten ist nicht änderbar[387]; sie kann sich allerdings von Zusammenbau zu Zusammenbau unterscheiden. Diese Einschränkung spiegelt die Realität wider.
- Für jeden Rohbau wird nur seine Kapazität (Anzahl Rohkarossen pro Zeiteinheit) angegeben. Diese Kapazität ist modellunabhängig: Es wird also nicht eine verfügbare Produktionszeit eines Zusammenbaus sowie die Zeit, die die Bearbeitung einer Rohkarosse eines bestimmten Modells erfordert, angegeben. Dadurch ist festgelegt, dass innerhalb eines Zusammenbaus für die Montage aller dort bearbeiteten Produkte die gleiche Zeit benötigt wird. Das entspricht der Realität: Der Takt innerhalb eines Zusammenbaus ist fix und unabhängig von den dort montierten Karossen – und wird, wie oben beschrieben, während der Lebensdauer des Rohbaus nicht geändert. Mit anderen Worten: Alle Produkte, die einen Zusammenbau durchlaufen, benötigen dafür die gleiche Zeit.

  Kapazitätsverluste durch unterschiedliche Variantenmixe werden allerdings betrachtet.
- Anpassungsmaßnahmen der Produktionsanlagen in modellflexiblen Zusammenbauten sind an einem Wochenende machbar. Diese Annahme ist realistisch.
- Die geringere Verfügbarkeit von Produktionsanlagen während des An- und Auslaufs sowie nach Anpassungsmaßnahmen wird nicht detailliert modelliert. Vielmehr wird im Modell grundsätzlich angenommen, dass die Zielverfügbarkeit der Produktionsanlagen nach vier Monaten erreicht ist. Unterschiede in der Anlaufkurve zwischen flexiblen und weniger flexiblen Produktionssystemen werden also nicht berücksichtigt.
- Lerneffekte und insbesondere die Tatsache, dass bei flexiblen Rohbauten Lerneffekte geringer sind, werden nicht modelliert.
- Nicht modelliert ist in der beschriebenen Methodik auch die Interaktion des Rohbaus mit den anderen Gewerken einer Automobilfabrik.

  Eine sinnvolle Abstimmung der Gewerke ist für eine kosteneffiziente Produktion jedoch von herausragender Wichtigkeit. Insbesondere müssen Sprungfunktionen (bei Kosten, Kapazitäten, ...) zum Rest der Automobilfabrik passen und Puffer abgestimmt sein. Daraus ergeben sich Restriktionen für eine sinnvolle Gestaltung des Rohbaus und seiner Flexibilität wie auch für die Gestaltung der anderen Gewerke.

  Die Berücksichtigung der Gewerkeabstimmung im Modell erfordert jedoch zunächst eine Modellierung auch der anderen Gewerke einer Automobilfabrik sowie im An-

[387] Wie oben beschrieben, ist allerdings die Bandbelegung variabel. Damit kann der Durchsatz von Karossen pro Zeiteinheit angepasst werden.

schluss daran die Modellierung der Interaktionen zwischen den Gewerken. Dies würde den Rahmen einer Dissertation bei weitem sprengen, stellt jedoch ein interessantes Feld für weiterführende Forschungsarbeiten dar.

- Weiterhin werden Flexibilitätskosten nur innerhalb der Produktion berücksichtigt. Weitere durch höhere oder geringere Flexibilität verursachte Kosten, die nicht in der Produktion, sondern in anderen Unternehmensbereichen entstehen, werden nicht abgebildet.

4.3 Rahmenwerk zur Flexibilitätsoptimierung

4.3.1 Lösungsansatz

Der dieser Arbeit zugrunde liegende, als zielführend erachtete Ansatz zur Bewertung von Flexibilität leitet sich, wie im Folgenden gezeigt wird, direkt aus der Definition des Flexibilitätsbegriffes ab, demzufolge Flexibilität die Fähigkeit eines Systems ist, sich aufgrund von Freiheitsgraden an unterschiedliche oder sich verändernde, auch unsichere Anforderungen und Randbedingungen effektiv anzupassen (vgl. Abschnitt 2.1.2.1.4).

Aus wissenschaftlicher Sicht stellen Maßzahlen und der Vergleich der Flexibilität andersartiger Produktionssysteme anhand systemimmanenter Kenngrößen eine Herausforderung dar. Ihre Vorteilhaftigkeit stellt Flexibilität jedoch nur unter Beweis, wenn sie erforderlich ist[388], ein System also auf Veränderungen der herrschenden Anforderungen oder Randbedingungen reagieren muss. Praktisch nutzbare und aussagekräftige Flexibilitätsbewertungen, die eine Gegenüberstellung des Mehraufwandes und des tatsächlichen Nutzens flexibler Produktionssysteme erlauben, sind daher nur möglich, wenn Flexibilität im Zusammenhang mit dem konkret vorherrschenden Flexibilitätsbedarf gesehen wird. Allein systembeschreibende Flexibilitätskennzahlen (wie beispielsweise der Ansatz von CHATTERJEE ET AL., vgl. Abschnitt 3.2.5.1) sind hierfür ungeeignet, da sie zwar Indikatoren eines *potenziellen* Nutzens liefern, nicht jedoch den *realisierbaren* Nutzen von Flexibilität widerspiegeln. Damit sind solche Kennzahlen auch als Zielfunktion für eine Flexibilitätsoptimierung nicht geeignet.

Der Flexibilitätsbedarf wird einerseits verursacht durch prognostizierbare Veränderungen der Anforderungen und Randbedingungen über der Zeit. Auf der anderen Seite erfordern unvorhergesehene Veränderungen und Entwicklungen, also die Unsicherheiten, mit denen die der Planung zugrunde liegenden Prognosen prinzipbedingt behaftet sind, Flexibilität.

[388] vgl. Shaw *et al.*: Response Capabilitites, 2001, S. 2.

Damit müssen neben dem eigentlichen Produktionssystem und seiner Gestaltung auch die spezifischen Anforderungen und Randbedingungen sowie die mit ihnen verbundenen Unsicherheiten und Veränderungen über der Zeit (also der Flexibilitätsbedarf) elementarer Bestandteil weiterer Flexibilitätsbetrachtungen sein. In der vorliegenden Arbeit werden diese unter dem Begriff der „Systemanforderungen" zusammengefasst.

Um nun zu bestimmen, inwieweit ein Produktionssystem einen gegebenen Flexibilitätsbedarf erfüllt, bedarf es eines Verfahrens, das die Reaktion des Produktionssystems auf die konkreten Systemanforderungen über der Zeit ermittelt und bewertet. Messgrößen für die Bewertung von Flexibilität müssen eine Aussage darüber liefern, wie gut ein System durch Anpassungen tatsächlich auf Veränderungen reagiert und welcher Nutzen durch erhöhte Flexibilität vor dem betrachteten Anforderungshintergrund entsteht. Gleichzeitig sind die hierfür notwendigen Aufwände, also insbesondere die Kosten, die durch erhöhte Flexibilität verursacht werden, zu erheben und dem Nutzen gegenüberzustellen.

4.3.2 Lösungsgrobentwurf

Gemäß dem geschilderten Ansatz lässt sich ein grobes Rahmenkonzept für die Optimierung von Flexibilität skizzieren. Es basiert auf einem vereinfachten Systems-Engineering-Ansatz[389] und besteht im Kern aus den drei Modulen *Aufnahme von Systemanforderungen*, *Systemgestaltung und -optimierung* sowie *Systembewertung*[390]. Auf Basis der aufbereiteten Auswertungen wird eine heuristische Optimierung des Rohbaus unterstützt.

In Abschnitt 4.3.1 konnten bereits die Systemanforderungen als ein elementarer Bestandteil der Bewertungsmethodik identifiziert werden; sie geben Aufschluss über den Flexibilitätsbedarf eines Systems. Vor der Gestaltung des Systems werden daher zunächst die relevanten Anforderungen gesammelt.

Daran schließen sich das Produktionssystem und seine Gestaltung als zentrale Elemente des Rahmenkonzeptes an.

Das dritte Grundelement bildet die Systembewertung. Hier werden die Ergebnisse der Systemgestaltung als Reaktion auf die Systemanforderungen ermittelt und ausgewertet, um anhand dieser Aussagen über die Flexibilität des Produktionssystems zu treffen. Die Bewertung erfolgt mit dem Ziel, entweder alternative neu konzipierte Systeme miteinander zu vergleichen oder alternative Konzepte für die Neugestaltung eines bestehenden Systems hin zu erhöhter (oder verminderter) Flexibilität zu bewerten.

Aufbauend auf den Bewertungsergebnissen schließt sich die Flexibilitätsoptimierung als Iteration zwischen Bewertung und Gestaltung an.

---

[389] vgl. Daenzer, Huber: Systems Engineering, 1994.

[390] vgl. Schuh *et al.*: Lebenszyklusbewertung flexibler Produktionssysteme, 2004, S. 117.

Abbildung 4-4 zeigt das dreistufige Rahmenkonzept der Bewertungsmethodik.

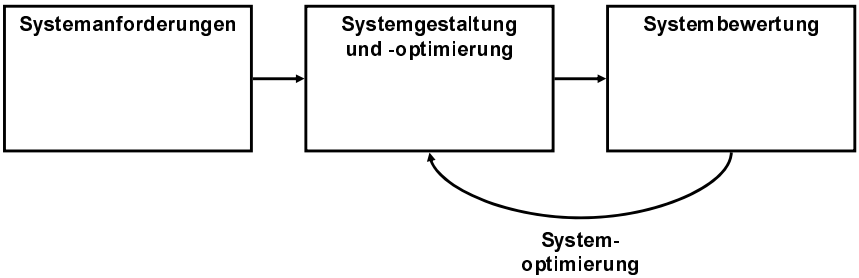


Abbildung 4-4: Rahmenkonzept der Methodik zur Flexibilitätsoptimierung

4.3.3 Vorgehen zur Ausarbeitung

Die Vorgehensweise bei der Ausarbeitung der Optimierungsmethodik in der vorliegenden Arbeit folgt dem Aufbau des zuvor formulierten Rahmenkonzeptes.

Zunächst muss also ein Weg gefunden werden, alle relevanten Systemanforderungen, die den Flexibilitätsbedarf eines Produktionssystems bestimmen, systematisch zu erfassen und zu modellieren (Abschnitte 5.1 und 5.2).

Anschließend gilt es, die Gestaltung des Produktionssystems in allen relevanten Aspekten zunächst qualitativ darzustellen (Abschnitt 5.3). Zu diesem Zweck müssen Attribute, die Auswirkungen auf die Flexibilität des Produktionssystems haben, identifiziert, strukturiert und dokumentiert werden. Damit wird der morphologische Kasten der Lösungselemente weiter ausgearbeitet.

Im nächsten Schritt muss ein Verfahren entwickelt werden, das durch die Systemgestaltung festgelegte Eigenschaften des Produktionssystems vor dem Hintergrund der Systemanforderungen simuliert. Hierfür ist es zunächst erforderlich, aus der qualitativen Beschreibung des Produktionssystems ein geeignetes quantitatives Beschreibungsmodell aufzubauen (Abschnitt 5.4). Im Rahmen der detaillierten Beschreibung der Attribute dieses Modells wird auch die Detaillierung des morphologischen Kastens der Lösungselemente abgeschlossen. Zudem muss ein Verfahren entwickelt werden, das das Verhalten des Produktionssystemmodells ermittelt, wenn man es den sich verändernden und unsicheren Systemanforderungen aussetzt (Abschnitt 5.5).

Es müssen Auswertungen entwickelt werden, die dieses Verhalten zunächst mit Kenngrößen beschreiben, in einem Bewertungsmodell zu zielführenden Kennzahlen verdichten und schließlich im Sinne der Aufgabenstellung einer heuristischen Flexibilitätsoptimierung konkrete Aussagen zu Systemverbesserungen erlauben (Abschnitt 5.6).

Die im Auswertungsmodul gewonnenen Aussagen über bewertete Systeme sollen im Rahmen eines Entscheidungsmodells schließlich auch helfen, die Flexibilitätsauswertungen optimierter Systemalternativen zu vergleichen und damit eine Investitionsentscheidung unterstützen (Abschnitt 5.7).

Das dargelegte schrittweise Vorgehen bei der Darstellung der Optimierungsmethodik in der vorliegenden Arbeit sichert Transparenz und Nachvollziehbarkeit für den Leser.

4.3.4 Detailstruktur der Optimierungsmethodik

Die Struktur der Methodik zur Flexibilitätsbewertung ist maßgeblich durch das in Abschnitt 4.3.2 vorgestellte Rahmenkonzept bestimmt. Dabei lässt sich jedes der dort beschriebenen Grundelemente in Module gliedern. Aus den im vorangehenden Abschnitt geschilderten Überlegungen ergibt sich damit folgende Detailstruktur:

Das Grundelement Systemanforderungen enthält die Module *Externe Forderungen* und *Generierung von Szenarien*, das zweite Grundelement Systemgestaltung und -optimierung umfasst die Module *Gestalt des Produktionssystems* und *Produktionssystemoptimierung*, und das dritte Grundelement Systembewertung besteht aus den Modulen *Modellbildung*, *Simulation* und *Ergebnisaufbereitung*[391]. Die einzelnen Module stehen untereinander in Beziehung (siehe Abbildung 4-5) und spiegeln damit zugleich das schrittweise Vorgehen bei der Anwendung der Bewertungsmethodik wider.

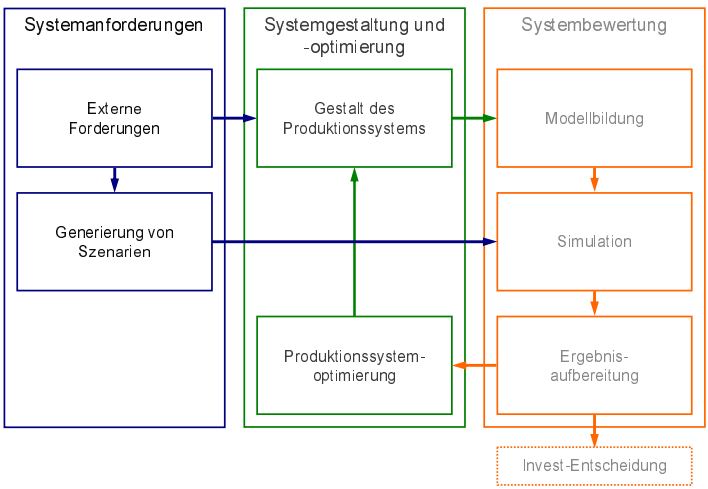


Abbildung 4-5: Struktur der Methodik zur Flexibilitätsoptimierung

[391] vgl. hierzu auch Schuh *et al.*: Lifecycle Evaluation of Automotive Body Shops, 2005.

Zwar ist die Entwicklung der Methodik speziell mit Fokus auf die Bewertung flexibler Rohbaukonzepte erfolgt; die Methodik wurde jedoch in Übereinstimmung mit der Zielsetzung, eine spätere Übertragung auf andere produzierende Bereiche zu ermöglichen, möglichst generisch gestaltet: Durch die Strukturierung in einzelne Aufgabenblöcke und den verwendeten modularen Aufbau liegen definierte Schnittstellen vor, so dass die Methodik durch Erweiterungen oder Substitution einzelner Elemente jederzeit weiterentwickelt und auch auf andere Aufgabenstellungen übertragen werden kann.

Im folgenden Kapitel 5 werden die Module der Methodik ausführlich erläutert, indem sie hinsichtlich ihrer Aufgabe, ihrer Eingangs- und Ergebnisgrößen sowie des jeweils verfolgten Lösungsansatzes beschrieben werden.

5 Detaillierung der Methodik

Im Folgenden wird das im vorhergehenden Kapitel 4 grob entworfene Rahmenwerk zur Flexibilitätsoptimierung gemeinsam mit dem darauf aufbauenden Instrumentarium für die praktische Anwendung speziell für den Rohbau einer Automobilfabrik ausgearbeitet. Der Aufbau dieses Kapitels folgt der in Abschnitt 4.3.4 (vgl. Abbildung 4-5) entworfenen Detailstruktur der Methodik.

5.1 Externe Forderungen an den Rohbau

Ausgangspunkt für den gewählten Ansatz zur Flexibilitätsbewertung bilden die Systemanforderungen. Die externen Forderungen beschreiben dabei in qualitativer Weise die von außen vorgegebenen Anforderungen an das Produktionssystem Rohbau.

5.1.1 Nachfragebezogene Forderungen

Eine elementare Forderung an ein Produktionssystem ist die Erfüllung des Flexibilitätsbedarfes, der in Abschnitt 3.1.1 erläutert wurde. Die Basisanforderungen, die ein Produktionssystem erfüllen muss, sind durch seine Produktionsaufgabe, definiert durch das Produktionsprogramm, vorgegeben. Die Entwicklung dieses Produktionsprogramms hat signifikanten Einfluss auf die erforderliche Flexibilität[392]. ZÄPFEL definiert das Produktionsprogramm wie folgt:

> *„Das Produktionsprogramm legt die Arten und Mengen herzustellender Erzeugnisse innerhalb eines Planungszeitraumes fest.“*[393]

Die Beschreibung des Produktionsprogramms umfasst dabei qualitative Komponenten (Art der zu erstellenden Leistungen), quantitative Komponenten (Menge an einzelnen Leistungsarten) und zeitliche Komponenten (vorgesehene Zeitpunkte der Erstellung der Leistungen)[394]. Im Falle einer Automobilfabrik bzw. eines Automobilrohbaus legt das Produktionsprogramm also fest, welche Modelle und Varianten in welcher Menge zu welchem Zeitpunkt herzustellen sind.

Allerdings sind diesbezügliche Planungen, wie bereits in Abschnitt 2.1.1.5 aufgezeigt, mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, da sie auf Prognosen beruhen; die tatsächlich nachgefragten Mengen können stark, oft um bis zu 40 %, vom prognostizierten Produkti-

[392] vgl. Aggteleky: Fabrikplanung, 1987, S. 243f.
[393] Zäpfel: Produktionswirtschaft, 1982, S. 46.
[394] vgl. ebd., S. 46.

onsprogrammplan abweichen[395]. Deshalb ist für eine realistische Beschreibung der tatsächlichen Produktionsaufgabe ein Einbezug der mit den Daten verbundenen Unsicherheiten, in diesem Fall also der Marktunsicherheiten bezüglich der Nachfrage über der Zeit, zwingend erforderlich. Der Fokus ist dabei insbesondere auf solche Unsicherheiten zu richten, die den Flexibilitätsbedarf für die in Abschnitt 2.3.2 identifizierten relevanten Flexibilitätsarten herbeiführen. Weitere solche Unsicherheiten, die den Flexibilitätsbedarf eines Rohbaus bestimmen, sind:

- Unsicherheit des Erscheinens eines neuen Modells oder Derivates (d. h.: Wird das Modell auf den Markt gebracht oder nicht?),
- Unsicherheit über die Markteinführungszeitpunkte der betrachteten Modelle und
- Unsicherheit über die Typlaufzeit der betrachteten Modelle.

Bei der Planung eines Rohbaus für eine neu erscheinende Baureihe steht unter Umständen noch nicht fest, ob ein von der Baureihe abgeleitetes Derivat zu einem späteren Zeitpunkt am Markt eingeführt werden wird: Über dessen Markteinführung wird also erst nach der Inbetriebnahme eines Rohbaus entschieden. Die Wahrscheinlichkeit der späteren Produktion eines solchen Derivates ist daher ein entscheidender Faktor dafür, ob ein Rohbau bereits in der Planungsphase auf dessen Herstellung ausgelegt und also mit mehr Flexibilität ausgerüstet werden soll.

Insbesondere für Derivate, aber auch für andere zukünftige Modelle, lässt sich darüber hinaus der Zeitpunkt einer Markteinführung häufig nicht genau taxieren. So zeigte die Untersuchung historischer Daten von Produkten der Marke MERCEDES-BENZ, dass der geplante Einführungszeitpunkt für ein Nischenmodell eine Varianz von bis zu einem Jahr aufweisen kann.

Zu den Ungenauigkeiten des prognostizierten Produktionsprogramms zählt schließlich auch die Unsicherheit über die letztlich realisierbare Typlaufzeit, also die Produktlebenszyklusdauer. Vom offensichtlichen und oben beschriebenen Trend zu immer kürzeren Typlaufzeiten abgesehen sind die Produktlebenszyklen von einer Vielzahl anderer Einflussfaktoren, unter anderem dem Agieren der Wettbewerber beispielsweise durch deren Preispolitik oder die Einführung neuer Modelle, abhängig.

Das geplante Produktionsprogramm ist entscheidend für die Notwendigkeit und den Nutzen einer Anwendung der beschriebenen Methodik:

- Aus wie vielen Produkten besteht es?
  Der Einsatz der Methodik ist grundsätzlich erst ab zwei, in der Praxis erfahrungsgemäß häufig erst ab drei betrachteten Modellen sinnvoll und nutzbringend; bei we-

[395] vgl. Hopp, Spearman: Factory Physics, 2001, S. 414f.

niger in Betracht gezogenen Produkten ist der Nutzen von Flexibilität so gering, dass nicht flexible Produktionssysteme implementiert werden sollten.

- Wie ähnlich sind die betrachteten Produkte?
  Bei zu unähnlichen Produkten ist der realisierbare Nutzen von Flexibilität gering.
- Sind die betrachteten Produkte Massen- oder Nischenprodukte?
  Planungsunsicherheiten sind in der Regel bei Nischenprodukten wesentlich höher; die Ähnlichkeit von Nischenprodukten zu anderen produzierten Produkten ist ebenfalls im Regelfall höher.

5.1.2 Unternehmensstrategiebezogene Forderungen

Gemäß dem St. Galler Management-Konzept (vgl. Abbildung 3-3) müssen für die von der vorgestellten Methodik unterstützte Planung und Optimierung eines Produktionssystems auf der operativen Managementebene Vorgaben des strategischen und des normativen Managements berücksichtigt werden. Zu den externen Forderungen an das Produktionssystem gehören daher darüber hinaus auch diejenigen Forderungen, die aus strategischen Entscheidungen und Handlungsmaximen resultieren:

- So kann beispielsweise die Risikopräferenz eines Unternehmens von entscheidendem Einfluss bei Investitionsentscheidungen sein: Ist ein Rohbau mit im Durchschnitt solider Wirtschaftlichkeit ohne die Chance auf besonders gute Erträge, dafür aber auch ohne das Risiko sehr geringer Wirtschaftlichkeit in anderen Fällen, als besser zu bewerten als ein Rohbau, der die Chance auf hervorragende Wirtschaftlichkeit in einigen Fällen bietet, dafür aber auch das Risiko sehr schlechter Wirtschaftlichkeit in anderen Fällen aufweist?
- Eine mögliche Handlungsmaxime ist, dass der Rohbau befähigt sein muss, nahezu jede denkbare Nachfrageentwicklung befriedigen zu können, unabhängig von den entstehenden Kosten; sehr viel wahrscheinlicher ist in diesem Zusammenhang jedoch die Vorgabe von Zielkosten. Diese werden sowohl Einfluss auf die Gestaltung des Produktionssystems haben als auch bei der Bewertung, Optimierung und Auswahl alternativer Systeme von Belang sein.
- Entscheidend ist weiterhin, für wie wichtig Flexibilität im Unternehmen generell gehalten wird. In manchen Unternehmen existieren Regeln, die den Umgang mit Flexibilität direkt beeinflussen:
  Einige Unternehmen haben die Grundsatzentscheidung getroffen, flexible Produktionssysteme zu nutzen – und halten sich strikt daran, ohne den Nutzen von Flexibilität und damit einhergehender Komplexität im konkreten Anwendungsfall zu hinterfragen. Hier besteht das Risiko, Geld für unrentable Investitionen in Flexibilität zu verschwenden. Oft wird in diesen Unternehmen auch einfach Überkapazität bereit-

gehalten, ohne zu erkennen, dass es sich dabei nicht um Flexibilität im eigentlichen Sinne handelt.
In anderen Unternehmen existieren strikte Kostenvorgaben durch das Management in frühen Planungsphasen. Bei Vorgabe sehr geringer Amortisationszeiten für Investitionen in Produktionsanlagen besteht jedoch kein Spielraum zur Finanzierung von Flexibilität. Daher werden als Folge solcher Kostenvorgaben häufig zu unflexible Produktionssysteme implementiert, die bei höherer als der erwarteten Nachfrage entweder in Kosten für entgangene Opportunitäten oder in Anpassungskosten resultieren – und bei niedrigerer Nachfrage in Kosten für unnötige Überkapazitäten.
Wieder anderen Unternehmen sind Notwendigkeit und Wichtigkeit von Flexibilität bewusst. Sie fördern Flexibilität, wo nötig, treffen jedoch individuelle Entscheidungen in konkreten Situationen.

- Eine andere strategische Grundsatzentscheidung betrifft die Nutzung von Skaleneffekten: Werden Automobile unter weitestgehender Nutzung von Skaleneffekten in für hohe Stückzahlen ausgelegten Fabriken mit eher niedriger Varianz hergestellt[396] oder in kleineren Stückzahlen mit höherer Varianz und bei dieser Varianz größtmöglicher Effizienz[397]? Letztere Strategie erfordert wesentlich mehr Flexibilität.

5.1.3 Weitere Forderungen

Nicht von der Methodik berücksichtigt wird bisher die Möglichkeit neuer gesetzlicher Auflagen wie beispielsweise einer neuen Richtlinie der EU zum Fußgängerschutz oder zum Seitenaufprallschutz, die teilweise erhebliche Änderungen an der Karosseriestruktur erforderlich machen und damit die Nutzung von Nachfolgerflexibilität verhindern können.

5.1.4 Zusammenfassung

Das Modul *Externe Forderungen* hat zunächst nur eine beschreibende Funktion. Es soll durch Strukturierung der Einflussfaktoren die Erhebung der relevanten Anforderungen, die von außen an das Produktionssystem gestellt werden, unterstützen. Die Anforderungen werden dabei gegliedert in

- Produktionsprogrammplan,
- Unsicherheiten und
- strategische Entscheidungen und Handlungsmaxime.

---

[396] wie beispielsweise der TOYOTA Yaris in Valenciennes (F) oder die MERCEDES-BENZ M-Klasse in Tuscaloosa, Al., U.S.A.

[397] wie z. B. PORSCHE im Stammwerk in Zuffenhausen oder der Auftragsfertiger KARMANN in Osnabrück

Damit stellen die externen Anforderungen zum einen die Planungsprämissen für das Modul *Produktionssystemgestaltung* dar; zum anderen bilden sie die Grundlage für die Modellierung des Flexibilitätsbedarfes, dem das zu optimierende Produktionssystem gegenüberzustellen ist.

Die Modellierung dieses aus den externen Anforderungen resultierenden Flexibilitätsbedarfs erfolgt im nächsten Schritt, der Szenariogenerierung.

5.2 Generierung von Szenarien für die Optimierung

Die Produkte und Mengenverhältnisse des prognostizierten Produktionsprogramms stellen bereits eine konkrete Formulierung der erwarteten Produktionsaufgabe mit allen wesentlichen Attributen dar[398]; allerdings fehlt eine geeignete Abbildung der damit einhergehenden Unsicherheiten, wie sie bei der Erfassung der externen Forderungen ermittelt wurden.

Die Aufgabe des Moduls *Szenariengenerierung* besteht darin, aus den im vorhergehenden Schritt erfassten externen Forderungen quantitativ einen Flexibilitätsbedarf zu modellieren.

Einen möglichen Ansatz zur Beschreibung der Unsicherheiten stellen Kenngrößen der Stochastik, beispielsweise Standardabweichung oder Varianz, dar, wie sie JORDAN UND GRAVES für ihre Flexibilitätsuntersuchungen nutzen (vgl. Abschnitt 3.2.5.2). Der entscheidende Vorteil des Einsatzes solcher Kenngrößen ist, dass es sich hierbei um etablierte Größen der Wahrscheinlichkeitsrechnung handelt und kein neues Beschreibungsmodell entwickelt werden muss. Dem stehen jedoch die Nachteile einer mangelnden Transparenz und Intuitivität im Umgang mit ihnen sowie der begrenzten Gestaltungsfreiheit und der begrenzten Abbildungsmöglichkeiten bei der Beschreibung des Raums möglicher Zukunftsentwicklungen gegenüber.

SESTERHENN verwendet in seiner Arbeit zur Bewertung der Struktur- und Betriebsvariabilität von Produktionssystemen die Methode des Szenariomanagements nach GAUSEMEIER[399]. Unter einem Szenario wird dabei die zukünftige zeitliche Entwicklung eines zu betrachtenden Merkmales verstanden. Für sein Anwendungsbeispiel entwickelt SESTERHENN mit Hilfe dieser Methode drei Szenarien, die er nacheinander untersucht[400]. Der Nachteil des Verfahrens nach GAUSEMEIER liegt in dem erheblichen Aufwand zur Generierung der Szenarien. Bereits die Ermittlung der Ausprägung eines einzigen Merkmales (typischerweise die Nachfrage für ein Produkt) zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft setzt die Erhebung und Berücksichtigung umfangreicher Datenmengen voraus. Entsprechend ist die Generierung eines Zeitverlaufes des betrachteten Merkmals ungleich aufwendiger

[398] vgl. Haller: Flexibilitätsbewertung, 1999, S. 20.

[399] Siehe hierzu Gausemeier *et al.*: Szenario-Management, 1996.

[400] vgl. Sesterhenn: Bewertungssystematik, 2002, S. 65ff.

und dem Anwendungszweck häufig nicht angemessen. Daraus resultiert, dass nur eine sehr geringe Anzahl solcher Zeitverläufe (Szenarien) betrachtet werden kann und daher Unsicherheiten und Risiken nur begrenzt abgebildet werden können.

In der vorliegenden Arbeit soll daher ein anderer Ansatz verfolgt werden. Anstelle eines einzigen zu erwartenden Verlaufes oder sehr weniger zu erwartender Verläufe des Produktionsprogramms und der Beschreibung der möglichen Abweichungen über der Zeit soll eine Vielzahl von Szenarien für die Anforderungen an das Produktionssystem entwickelt werden. Die grundlegende Idee dabei ist, mögliche Entwicklungen für die Flexibilitätsplanung relevanter Einflussfaktoren über der Zeit zu modellieren[401].

Da der Begriff des Szenarios in der Literatur mehrdeutig belegt ist, sei zunächst das in dieser Arbeit zugrunde gelegte Verständnis von Szenarien definiert. Der DUDEN definiert ein Szenario allgemein als „hypothetische Aufeinanderfolge von Ereignissen, die zur Beachtung kausaler Zusammenhänge konstruiert wird"[402]. Für die vorliegende Arbeit soll in Anlehnung daran die folgende spezifischere Definition verwendet werden:

> *Ein Szenario stellt einen möglichen zukünftigen Verlauf aller wesentlichen Einflussmerkmale über der Zeit deterministisch dar, wie er mit einer Wahrscheinlichkeit p eintreffen kann.*

Um nun Unsicherheiten abzubilden, wird die Annahme zugrunde gelegt, dass durch eine große, jedoch endliche Anzahl von Szenarien die Zukunft hinreichend ungenau beschrieben werden kann. Jedes dieser Szenarien stellt deterministisch einen möglichen Verlauf der betrachteten Faktoren über der Zeit dar und besitzt eine gewisse Eintrittswahrscheinlichkeit p. Die Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten aller Szenarien beträgt eins. In der Regel werden Szenarien, die dem prognostizierten Absatzverlauf weitestgehend entsprechen, eine vergleichsweise hohe Eintrittswahrscheinlichkeit aufweisen, während Szenarien, die den worst case oder den best case widerspiegeln, nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit belegt sein werden. Durch die Betrachtung der Gesamtheit aller Szenarien wird der Raum der möglichen zukünftigen Entwicklungen aufgespannt. Zur Veranschaulichung des Szenarienbegriffes sind in *Abbildung* 5-1 für ein Produktionsprogramm mit zwei unterschiedlichen Produkten exemplarisch Szenarien für das Einflussmerkmal Absatzzahl dargestellt. Die gezeigte Schar von Szenarien spannt den (exemplarischen) Raum möglicher zukünftiger Entwicklungen auf.

Die Vorteile dieses Ansatzes sind offensichtlich: Zum einen ist es möglich, beliebige Szenarien zu entwerfen. Dabei ist nicht entscheidend, ob die Zukunft genau so aussehen wird; es wird lediglich ein *mögliches* Abbild der Zukunft geschaffen. Der Entwurf des zeitlichen

---

[401] vgl. Schuh *et al.*: Scenario-Based Lifecycle Analysis of Manufacturing Systems, 2005.

[402] N. N.: Duden Fremdwörterbuch, 2005, S. 766.

Verlaufes eines betrachteten Merkmales sagt dabei noch nichts über dessen Eintrittswahrscheinlichkeit aus. Weiterhin sind Szenarien zur Beschreibung von Unsicherheiten sehr viel anschaulicher als Maßzahlen der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Zudem wird die vorgeschlagene Methode der Abbildung von Unsicherheiten in Form von worst-/best-case-Betrachtungen bereits heute in der Rohbauplanung angewendet; dabei werden ausgehend vom ursprünglichen Produktionsprogramm Prognosen darüber getroffen, wieweit die tatsächlich eintretenden Absatzmengen von den prognostizierten Stückzahlverläufen maximal in positive respektive negative Richtung abweichen können.

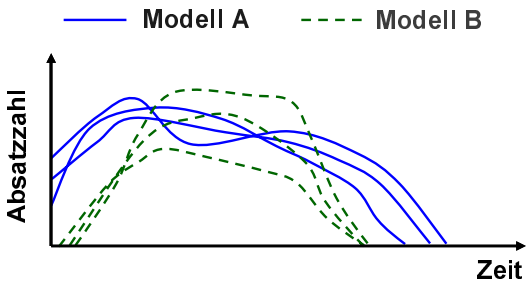


Abbildung 5-1: Der Szenarienbegriff (am Beispiel Absatzzahlen)

Allerdings werden hierbei zumeist keine Wahrscheinlichkeiten für die beiden Extremszenarien hinterlegt, sondern diese ausschließlich im Sinne einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Deshalb können lediglich Aussagen über die Reichweite möglicher Ergebniswerte getroffen werden, nicht jedoch über deren Eintrittswahrscheinlichkeiten. Eine Aussage über das resultierende Risiko ist daher nicht möglich.

Mit Hilfe einer Vielzahl von Szenarien lässt sich der durch worst- und best-case-Abschätzungen abgegrenzte Zukunftsraum sehr viel detaillierter beschreiben; Interdependenzen, beispielsweise eine Nachfrageverschiebung zwischen Produkten betreffend, können abgebildet werden. Die Modellierung der Stückzahlverläufe ist außerdem nicht mehr zwingend an den Verlauf der Absatzprognose gekoppelt. Ein Szenario allein beschreibt also nicht zwingend den erwarteten zukünftigen Verlauf von Parametern über der Zeit, aber ein Szenario stellt einen möglichen zukünftigen Verlauf dar.

Wie in der verwendeten Definition ausgeführt, stellen Szenarien einen möglichen zukünftigen Verlauf „aller wesentlichen Einflussmerkmale“ dar. Unter wesentlichen Einflussmerkmalen werden dabei die für die Untersuchung der jeweils fokussierten Fragestellung wesentlichen verstanden. Gemäß der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit werden Szenarien von der beschriebenen Methodik zur Modellierung unsicherer Marktanforderungen verwendet (vgl. Abschnitt 2.2.2.2), das modellierte wesentliche Einflussmerkmal sind also Absatzzahlen.

Das verwendete Verfahren der Abbildung eines unsicheren Ereignisraumes durch eine Schar von Szenarien lässt sich jedoch auch zur Modellierung anderer unsicherer Größen wie bspw. Wechselkurse, Lohnkosten usw. nutzen. Die Modellierung anderer Größen stand bei der Entwicklung der Methodik nicht im Vordergrund, die Methodik lässt sich jedoch leicht für diesen Zweck anpassen. So wurden mit der entwickelten Methodik im Verlauf der Validierung in der Praxis auch die Auswirkungen von Ausfällen einzelner Stationen oder Zusammenbauten innerhalb des Rohbaus untersucht. Dazu wurden Szenarien entworfen, die solche (zufällig auftretenden) Ausfälle beschreiben, so dass sich deren wirtschaftliche Auswirkungen bei unterschiedlichen Produktionssystemalternativen und damit die Robustheit verschiedener Alternativen gegenüber Teilausfällen des Produktionssystems untersuchen ließen.

5.2.1 Prognosebasierte Szenarien

Das Produktionsprogramm, wie es vom Vertrieb oder der strategischen Programmplanung ermittelt wird, stellt also in diesem Sinne ein Szenario dar. Wird ausschließlich das prognostizierte Produktionsprogramm betrachtet, so ist dieses Szenario mit der Eintrittswahrscheinlichkeit eins zu belegen. Um nun aus dem Produktionsprogramm sowie den damit verbundenen Unsicherheiten, wie sie als externe Anforderungen erhoben wurden, eine Schar von Szenarien zu bilden, bedarf es geeigneter Generierungsalgorithmen. Hierfür wurden zwei unterschiedliche Vorgehensweisen untersucht, die ausgehend vom prognostizierten Absatzverlauf den Zukunftsraum aufspannen.

Um dem Anspruch einer praxisgerechten Umsetzung der entwickelten Methode gerecht zu werden, wurde dazu jeweils ein IT-Tool („ScenarioGenerator“ und „ScenarioWizard“) entwickelt, mit dem auf Basis der Prognosen eine beliebige Anzahl von Szenarien mit Absatzverläufen generiert werden kann.

5.2.1.1 Generierung auf Basis prognostizierter Ereignisse

Bei der Generierung von Absatzszenarien auf Basis prognostizierter Ereignisse wird zunächst von einer einzigen prognostizierten (konstanten) Absatzzahl ausgegangen. Dann werden Ereignisse sowie ihre Auswirkungen auf den Absatz modelliert.

Als wesentliche Eingangsgrößen werden dabei zunächst Informationen über diejenigen Ereignisse, die sich auf den Absatzverlauf auswirken können, benötigt. Ihre Eintrittswahrscheinlichkeit sowie ihr Eintrittszeitpunkt samt den Unsicherheiten, mit denen er behaftet ist, werden hinterlegt. Es wird modelliert, welche Ereignisse sich gegenseitig ausschließen, sich gegenseitig wahrscheinlicher machen oder sogar zwangsläufig gemeinsam eintreten. Beispiele für solche Ereignisse können einerseits unternehmensextern verursachte Ereignisse, z. B. ein Anstieg des Ölpreises, andererseits unternehmensinterne Entscheidungen, z. B. der Eintritt in einen neuen Markt, sein.

Zweitens wird die allen Szenarien zugrunde gelegte erwartete (konstante) Absatzzahl erfasst, z. B. 100.000 Einheiten pro Jahr.

Im letzten Eingabeschritt werden anschließend die Auswirkungen eines möglichen Ereignisses auf die Absatzzahlen modelliert. Ein Anstieg des Ölpreises könnte beispielsweise einen Rückgang der Absatzzahlen in den U.S.A. um 10 % zur Folge haben.

Auch „sichere Ereignisse“ sowie ihre Auswirkungen auf die Absatzzahlen müssen, da die Basis eine konstante Stückzahl ist, auf diese Weise modelliert werden. Z. B. könnten saisonale Absatzschwankungen bei Cabriolets durch ein Ereignis „Sommer + Winter“ und eine Steigerung der Absatzzahlen im Sommer von 20 % und eine Verringerung der Absatzzahlen im Winter um 5 % abgebildet werden.

Vorteil des beschriebenen Verfahrens ist die Transparenz durch die grundlegende Modellierung von Unsicherheiten: Es werden keine impliziten Annahmen über Marktentwicklungen und Auswirkungen von Ereignissen und Entscheidungen getroffen; vielmehr werden alle der Generierung von Szenarien zugrunde liegenden Annahmen explizit modelliert.

Das beschriebene Verfahren zur Generierung von Szenarien ist im IT-Tool „ScenarioWizard“ umgesetzt.

5.2.1.2 Generierung auf Basis prognostizierter Verkaufszahlen

Auch dem zweiten Verfahren zur Generierung von Szenarien liegt ein erwarteter Absatz zugrunde. Allerdings handelt es sich in diesem Fall nicht um einen konstanten Absatz von x Einheiten pro Jahr, sondern vielmehr um einen Absatz*verlauf* über der Zeit, z. B. 10.000 Einheiten in Jahr 1, 40.000 Einheiten in Jahr 2, 45.000 Einheiten in Jahr 3 usw.

Bei der Generierung von Szenarien auf Basis prognostizierter Verkaufszahlen führt die Abschätzung von Abweichungen vom vorhergesagten Absatzverlauf zu einer Schar von Szenarien. Dazu wird zunächst, neben der zugrunde gelegten Absatzprognose, ein zeitvariabler (in der Regel im Zeitverlauf größer werdender) Unsicherheitskorridor modelliert, der alle möglichen Absatzszenarien umhüllt. Eine auszuwählende Wahrscheinlichkeitsverteilung sowie eine Reihe weiterer Parameter (unter anderem die Dauer des Produktlebenszyklus’) definieren Anzahl, Lage und Wahrscheinlichkeit der innerhalb dieses Unsicherheitskorridors zu generierenden Szenarien. Die Grundform jedes einzelnen Szenarios entspricht der zugrunde gelegten Absatzprognose.

Dieses Verfahren zur Generierung von Absatzszenarien wurde im IT-Tool „ScenarioGenerator“ implementiert.

Auch mit diesem Tool lassen sich nicht nur Szenarien für ein Produkt erstellen, sondern auch für Kombinationen aus mehreren Produkten. Dabei sind für jedes Produkt die Wahrscheinlichkeit der Markteinführung sowie der Markteinführungszeitpunkt und die Unsicherheit, mit der dieser Zeitpunkt behaftet ist, zu hinterlegen. Beides wird bei der Szenarienge-

nerierung berücksichtigt. Mit steigendem Betrachtungshorizont vergrößert sich i. d. R. der Wahrscheinlichkeitskorridor; dies drückt sich in einer vergrößerten Streuungsbreite (vgl. die Streuungsbreiten S_1 und S_2 in *A*bbildung 5-2) aus.

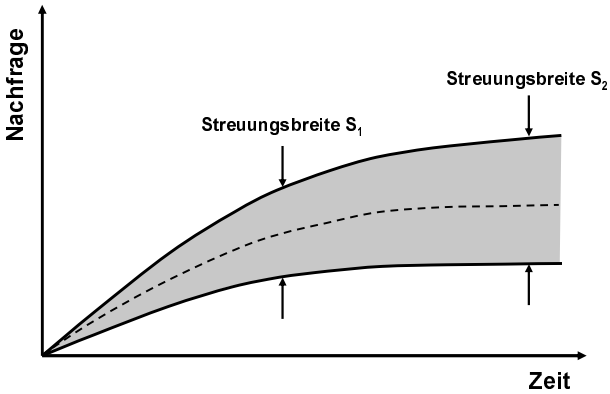


Abbildung 5-2: Wahrscheinlichkeitskorridor der Produktnachfrage

In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Vorteile dieses Verfahrens gegenüber dem im vorhergehenden Abschnitt dargestellten ereignisbasierten Verfahren überwiegen. Diese Vorteile liegen vor allem in der intuitiven Handhabung begründet sowie in der Tatsache, dass bereits eine akkumulierte Betrachtung möglicher Einflussgrößen auf Basis von Erfahrungswerten erfolgt. Während bei der ereignisgesteuerten Szenariogenerierung alle relevanten Einflussfaktoren identifiziert, erfasst und deren Auswirkungen quantitativ beschrieben werden müssen, basiert der gewählte Ansatz vielfach neben den Absatzprognosen auf Erfahrungswerten. Dabei stehen weniger die Ursachen für die Entwicklung des zeitlichen Verlaufes eines betrachteten Merkmals im Vordergrund als einzig deren Auswirkungen auf das Szenario. Der Vorteil der Nutzung von Erfahrungswissen überwiegt im Praxiseinsatz offensichtlich den Vorteil größerer Transparenz bei der Szenariengenerierung.

5.2.2 Empirische Standardszenarien

In einigen Situationen ist die prognosebasierte Erzeugung von Szenarien nicht möglich, z. B. weil für die (Grob-)Planung eines Produktionssystems (noch) keine Absatz- oder Ereignisprognosen aus dem Marketing verfügbar sind.

Für diesen Fall wurden im Rahmen des Forschungsprozesses empirische Standardszenarien entwickelt. Auch diese Szenarien modellieren zukünftige Absatzverläufe. Allerdings handelt es sich dabei, wie der Name sagt, um stereotype Szenarien, die auf Basis empirischer Untersuchungen von Absatzverläufen aus der Vergangenheit erstellt wurden. Sie

basieren also auf der Erfahrung mit bestimmten Produktkategorien, nicht auf konkreten Marketingerwartungen für zu fertigende Produkte. Untersucht man historisches Datenmaterial zu den realisierten Absatzzahlen unterschiedlicher PKW-Modelle, so lässt sich feststellen, dass die Modelle sich in Gruppen mit ähnlichen Produktlebenszyklen einordnen lassen[403]:

- Volumenmodelle (z. B. Limousinen),
- abgeleitete Volumenmodelle (z. B. Kombis),
- abgeleitete Nischenmodelle (z. B. von Volumenmodellen abgeleitete Cabrios) und
- solitäre Nischenmodelle (z. B. eigenständige Cabrios)[404].

Jede dieser Modellgruppen weist einen charakteristischen Absatzverlauf über seinen Produktlebenszyklus auf. Jedes empirische Standardszenario modelliert dementsprechend den grundsätzlichen Verlauf der Absatzkurve für eine Modellgruppe. Diese Absatzverläufe können parametrisiert und somit anhand sehr weniger Faktoren definiert werden (siehe Prinzipskizze in Abbildung 5-3). Der Aspekt der Unsicherheit wird durch die Anwendung von Wahrscheinlichkeitsfunktionen (analog dem bei der Szenariengenerierung auf Basis prognostizierter Verkaufszahlen angewandten Verfahren, siehe Abschnitt 5.2.1.2) berücksichtigt. Die Absatzverläufe werden dabei mit stochastisch verteilten saisonalen beziehungsweise zufälligen Einflüssen überlagert.

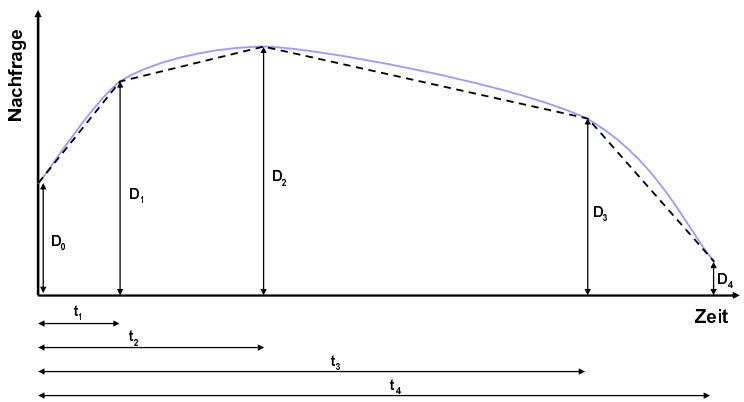


Abbildung 5-3: Parametriertes Lebenszyklusmodell

[403] vgl. Burke *et al.*: Flexible Fertigung, 2003, S. 7.

[404] Die in Klammern genannten Modelle sind lediglich Beispiele, die von Produktpalette zu Produktpalette unterschiedlicher Hersteller variieren können. Als Beispiele des Herstellers BMW lassen sich für Volumenmodelle z. B. die 3er-Reihe, für abgeleitete Nischenmodelle das (direkt von der 3er-Reihe abgeleitete) 3er-Cabrio und für solitäre Nischenmodelle der Z4 nennen. Zur Zuordnung zu prognostizierender Absatzverläufe zu einer dieser drei Gruppen: siehe unten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden parametrierte Modelle typischer Absatzzahlenverläufe der genannten vier Modellgruppen abgeleitet. Dabei konnten die wesentlichen Merkmale durch lediglich fünf Stützpunkte hinreichend beschrieben werden.

Neben der Anwendung im Falle fehlender Absatzprognosen eignen sich empirische Standardszenarien auch für Voruntersuchungen: Sie gestatten schnelle realistische Berechnungen mit einem gegenüber der prognosebasierten Szenarioerzeugung wesentlich verringerten Aufwand.

Die wesentliche Entscheidung bei der Modellierung erwarteter Absatzverläufe durch empirische Standardszenarien ist die Auswahl des Standardszenariotyps. Weil die Szenarien Absatzkurven modellieren und entsprechende Modellgruppen abgeleitet wurden, ist für diese Zuordnung die erwartete Marktwahrnehmung des betrachteten Modells entscheidend. Solitäre Nischenmodelle z. B. „verschleißen“ sich häufig schneller: Nach einem steilen Anstieg der Absatzzahlen fallen diese relativ schnell wieder. Die Absatzkurve von Volumenmodellen weist in der Regel einen flacheren Verlauf auf. Allerdings bestätigen in allen vier Kategorien Ausnahmen die Regel; es kann also u. U. durchaus sinnvoll sein, für ein solitäres Nischenmodell, für das ein langer Lebenszyklus und eine eher langsame Abflachung der Nachfrage erwartet wird, das Standardszenario „Volumenmodell“ zu verwenden.

An diese grundsätzliche Szenariotypauswahl schließt sich die Parametrierung des Grundszenarios sowie der für die Unsicherheitsmodellierung verwendeten Wahrscheinlichkeitsfunktionen an.

5.2.3 Theoretische Standardszenarien

Gedanklich sind dem Modul *Szenariengenerierung* zudem die theoretischen Standardszenarien zuzuordnen. Weil sie jedoch vorwiegend zur Optimierung betrachteter Produktionssysteme verwendet werden, sind sie im Abschnitt Produktionssystemoptimierung (Abschnitt 5.6) dargestellt.

5.3 Gestalt des Produktionssystems

Das Modul *Gestalt des Produktionssystems* umfasst innerhalb der Bewertungsmethodik die qualitative Beschreibung des Produktionssystems. Hierbei sind insbesondere solche Aspekte des Produktionssystems zu beschreiben, die maßgeblichen Einfluss auf die Flexibilität des Systems haben. Das Element stellt keine Hilfsmittel zur Produktionssystemgestalt*ung* zur Verfügung, sondern, wie der Name sagt, lediglich zur *Beschreibung seiner Gestalt*; es kommt nach der Konzeption alternativer Produktionssysteme durch Rohbauplaner für deren Abbildung zum Einsatz. Ähnlich wie das Modul *Externe Forderungen*

weist es also einen ausschließlich qualitativ beschreibenden Charakter auf und dient in erster Linie der gezielten Erhebung erforderlicher Informationen über den Betrachtungsgegenstand.

Flexibilität kann auf unterschiedlichen Ebenen angewendet[405] und bewertet werden. Im Beispiel Rohbau kann entweder die Flexibilität einer einzelnen Linie, diejenige des gesamten Gewerkes Rohbau oder sogar diejenige eines ganzen Produktionsverbundes, wie ihn die Fertigung der MERCEDES-BENZ C-KLASSE an den zwei Produktionsstandorten Bremen und Sindelfingen darstellt, betrachtet werden. Wie das Beispiel C-KLASSE zeigt, stellt die Werksebene also nicht für alle Betrachtungen die höchste Betrachtungsebene dar. Insbesondere für Flexibilitätsfragestellungen ist häufig auch die Netzwerkebene relevant: In einem Produktionsnetzwerk kann das Produktionsvolumen flexibel auf mehrere Linien nicht nur innerhalb eines Standortes, sondern auch in unterschiedlichen Fabriken, verteilt werden.

Gemäß der Zielsetzung einer breiten Einsetzbarkeit ist die Struktur der dargestellten Optimierungsmethodik generisch gehalten, so dass sie auf einer beliebigen Betrachtungsebene angewendet werden kann. Daher muss die Beschreibung des Optimierungsgegenstandes zunächst eine Aussage über die fokussierte Anwendungsebene (vgl. Abschnitt 2.1.1.2) machen.

Grundsätzlich muss anschließend neben den Kapazitäten einzelner Produktionseinheiten auch die Allokationsstrategie, wie beispielsweise Solitärfertigung oder vollflexible Fertigung, beschrieben werden. Neben dem rein solitären Konzept können zwei grundsätzliche Typen von Produktallokation unterschieden werden: volle Flexibilität und Teilflexibilität[406].

Sodann verfügt ein Produktionssystem über Freiheitsgrade, mit denen es sich sich verändernden oder neuen Anforderungen und Randbedingungen anpassen kann. Auch diese Freiheitsgrade müssen zusammen mit etwaigen Restriktionen in diesem Modul beschrieben werden.

Als Freiheitsgrad kann beispielsweise die Anzahl von Arbeitsplätzen innerhalb einer Montagelinie oder die Taktzeit der Linie gesehen werden. Im Rohbau, dem starrsten Gewerk einer Automobilfabrik, sind die einzigen wirklichen Freiheitsgrade die Anpassung des Schichtmodells entweder durch Anpassung der Schichtlänge oder durch Anpassung der Schichtanzahl pro Woche (z. B. zusätzliche Wochenendschichten oder Umstellung von 3-Schicht- auf 2-Schicht-Betrieb) und die Veränderung der Bandbelegung (durch Freilassen z. B. einiger Paletten kann ohne Veränderung der Bandgeschwindigkeit die Anzahl pro Zeiteinheit gefertigter Rohkarossen verändert werden; die Anzahl der Mitarbeiter an den

[405] vgl. Barnett *et al.*: Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction, 1995, S. 1.

[406] vgl. Bish *et al.*: Managing Flexible Capacity, 2000, S. 7.

einzelnen Stationen muss dabei ggf. angepasst werden). Eine Änderung der Taktzeit hingegen ist im Rohbau nicht möglich.

Restriktionen auf der anderen Seite schränken Freiheitsgrade ein. Eine Restriktion ist beispielsweise die Tatsache, dass die technischen Einrichtungen und Kapazitäten in einem Rohbau über der Zeit nicht verändert und angepasst werden können; eine andere Restriktion ist, dass z. B. in der Montage die Taktzeit einer Linie über den Produktlebenszyklus nicht mehr als zweimal angepasst wird. Eine weitere wesentliche Restriktion ist ein Arbeitszeitkonto, das die zeitliche Flexibilität von Mitarbeitern und damit die Möglichkeit von Kapazitätsanpassungen des Produktionssystems einschränkt.

Wegen des Anspruchs der Generizität soll diese knappe Darstellung flexibilitätsrelevanter Gestaltungsattribute von Produktionssystemen im Allgemeinen an dieser Stelle ausreichen. Die spezifischen flexibilitätsrelevanten Gestaltungsattribute für das Anwendungsfeld Automobilrohbau wurden bereits in Abschnitt 2.3.2 genannt: Anlagenwiederverwendung, Kapazitäten sowie Produktfluss und Materialfluss. Konkret sind dabei insbesondere folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Welche Produkte und Modelle (Varianten) können vom Produktionssystem gefertigt werden?
- Welche Produktionsschritte müssen hierzu von den Produkten und Modellen (Varianten) durchlaufen werden?
- Auf welchen Produktionseinheiten können die Produkte und Modelle (Varianten) gefertigt werden?
- Über welche technische Kapazität verfügen die einzelnen Produktionseinheiten?
- Welche Redundanzen der einzelnen Produktionseinheiten gibt es (Anzahl paralleler Produktionslinien)?
- Welche möglichen Materialflüsse ergeben sich hieraus?
- Wie wird der Materialfluss durch das Produktionssystem gesteuert?

Das Modul *Gestalt des Produktionssystems* beschreibt also alle flexibilitätsrelevanten Merkmale eines Produktionssystems in qualitativer Weise. Dabei sind bei der Gestaltung des Systems – die allerdings nicht von der Methodik unterstützt wird – die externen Forderungen die Eingangsgröße, da sie als Planungsprämissen wirken. Zusammenfassend werden im Modul unter anderem beschrieben:

- die betrachtete Gestaltungsebene,
- die Flexibilitätsstrategie (Solitär- oder Produktmixfertigung) sowie
- die Freiheitsgrade des Produktionssystems und seine Restriktionen.

Wegen des gemäß der Zielstellung bei der Entwicklung der Methodik gewählten geringen Detaillierungsgrades wird nicht dargestellt, wie genau diese beschriebenen Eigenschaften erreicht werden. Konkret werden z. B. Anzahl von Robotern pro Station, eingesetzte Robotertypen sowie deren Parametereinstellungen, Größen interner Puffer etc. nicht abgefragt.

Als Basis für die Bewertung und Optimierung der von Rohbauplanern entworfenen und in diesem Modul *Gestalt des Produktionssystems* in ihren flexibilitätsrelevanten Eigenschaften qualitativ beschriebenen Produktionssysteme ist im folgenden Schritt nun eine geeignete Modellbildung erforderlich.

5.4 Modellbildung

„Everything should be made as simple as possible, but not simpler...“
ALBERT EINSTEIN, Physiker (1879-1955)

Als Basis für die Modellbildung muss zunächst ein Modell der Prozesse und relevanten Kenngrößen im Rohbau entwickelt werden. Gemäß der Zielsetzung, ein einfach zu handhabendes operables Instrumentarium für die Flexibilitätsoptimierung von Automobilrohbauten zu entwickeln, ist die Entwicklung eines optimal abgestimmten, alle relevanten Eigenschaften beschreibenden, aber dennoch nicht zu komplexen Produktionssystemmodells für den fokussierten Anwendungsfall von besonderer Wichtigkeit und daher ein Kernziel des dargestellten Forschungsprozesses. Im Rahmen der Beschreibung der Modellattribute wird der in Abschnitt 3.1.1 geforderte morphologische Baukasten von Lösungselementen komplettiert.

Modelle dienen allgemein der vereinfachten Darstellung der Realität, indem sie deren wesentliche Eigenschaften oder Zusammenhänge abbilden[407].

Die Modellbildung erfolgt gewöhnlich in einem schrittweisen Vorgehen: Zunächst wird der Zweck des Modells definiert. In einem zweiten Schritt wird daraus der Betrachtungsbereich abgeleitet, den das Modell abbilden soll. Innerhalb des Betrachtungsbereichs müssen nun die relevanten Attribute identifiziert werden, während die sogenannten präterierten Attribute vernachlässigt werden. Dabei sind Modelle nach STACHOWIAK durch drei Merkmale gekennzeichnet: das Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal sowie das pragmatische Merkmal[408].

- Das Abbildungsmerkmal: Jedes Modell ist ein Abbild (eines aus Sicht des Modells realen Systems) oder ein Vorbild (für ein zu erstellendes System). Zu jedem Modell

[407] vgl. Stachowiak: Allgemeine Modelltheorie, 1973, S. 139.
[408] ebd.: Allgemeine Modelltheorie, S. 131f.

gehört daher eine Abbildung, die die Individuen und Attribute des Originals auf diejenigen des Modells abbildet. Es kann verschiedene Modelle desselben Originals geben. Dabei wird zwischen isomorphen (strukturgleichen) und homomorphen (strukturähnlichen) Modellen differenziert. Während isomorphe Modelle die Elemente und ihre Wirkzusammenhänge möglichst originalgetreu wiedergeben, bilden homomorphe Modelle vor allem die abstrakten Eigenschaften eines Systems ab[409].

- Das Verkürzungsmerkmal: Jedes Modell abstrahiert. Das Verkürzungsmerkmal beschreibt die Reduzierung des Modells auf die relevanten Attribute[410], also solche Attribute, „die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellbenutzern relevant erscheinen“[411]. Modelle erfassen also meistens nicht alle Individuen und Attribute des Originals. Insbesondere in einer Umwelt steigender Komplexität (auf Produkt-, Technologie- und Prozessebene) ist eine sinnvolle Modellierung eine immer größere Herausforderung: Weil die Komplexität ständig zunimmt, müssen Modelle immer stärker verkürzen; dennoch müssen alle relevanten Attribute abgebildet werden.
- Das pragmatische Merkmal: „Jedes Modell wird im Hinblick auf einen Verwendungszweck geschaffen“; Original und Modell sind einander nicht aus sich selbst heraus zugeordnet. Demnach kann man Modelle einteilen in Beschreibungs-, Erklärungs- sowie Entscheidungsmodelle[412].

Während im Modul *Gestalt des Produktionssystems* innerhalb der Optimierungsmethodik zunächst eine qualitative Beschreibung des Fertigungssystems erstellt wird, soll nun in einem Beschreibungsmodell eine Quantifizierung dieser Beschreibung anhand wesentlicher Parameter des Produktionssystems erfolgen. Dabei soll dem oben geschilderten schrittweisen Vorgehen zur Modellbildung nach STACHOWIAK folgend verfahren werden.

5.4.1 Zweck der Modellbildung

Die Abbildung des Produktionssystems in einem Beschreibungsmodell dient im vorliegenden Fall der Reduzierung und Parametrierung der flexibilitätsbestimmenden Gestaltungsmerkmale. Die flexibilitätsrelevanten Eigenschaften sollen in einer für das Modul *Simulation* handhabbaren Form hinterlegt werden.

---

[409] vgl. ebd.: Allgemeine Modelltheorie, S. 131, sowie Spur *et al.*: Integrierte Unternehmensmodellierung, 1993, S. 10.

[410] vgl. Spur *et al.*: Integrierte Unternehmensmodellierung, 1993, S. 10.

[411] Stachowiak: Allgemeine Modelltheorie, 1973, S. 132.

[412] vgl. ebd.: Allgemeine Modelltheorie, S. 132, sowie Spur *et al.*: Integrierte Unternehmensmodellierung, 1993, S. 10.

5.4.2 Betrachtungsbereich des Modells

Das zu bildende Modell soll dabei entsprechend den möglichen Gestaltungsebenen Linie, Gewerk und Fabriknetzwerk (vgl. Abschnitt 2.1.1.2) in seiner Struktur generisch sein und dadurch gewährleisten, den Betrachtungsbereich der Aufgabenstellung anpassen zu können. Im Anwendungsfall Rohbau sind dabei neben der Hauptlinie auch die Seitenlinien zu modellieren.

Der gewählte Betrachtungsbereich bestimmt auch das Detaillierungsniveau des Modells.

5.4.3 Attribute des Modells: Morphologie der Lösungselemente

Grundsätzlich beschreibt das Modell Fähigkeiten, Kapazität und Kosten des Produktionssystems. Die Flexibilität von Rohbaukonzepten wird dabei maßgeblich durch die in Abschnitt 2.3.2 identifizierten Gestaltungsmerkmale festgelegt: die Produktallokation, den Wiederverwendungsgrad von Anlagen sowie die Verteilung von Kapazitäten auf die einzelnen Produktionseinheiten. Daher sollen diese Attribute zunächst betrachtet werden. Daran anschließend werden weitere relevante Attribute untersucht und die restlichen Lösungselemente aus dem morphologischen Kasten vorgestellt.

5.4.3.1 Produktallokation

Wie HALLER zeigt, führt „die Festlegung von Strukturen, Maschinen und technischen Details während der Planung zu einer Einschränkung der Produktion in Hinsicht auf die Art und Menge der Produkte“[413]. Die im Rahmen des beschriebenen Forschungsprozesses entwickelte Fähigkeitsmatrix stellt bei der Modellierung des Produktionssystems die gemäß dieser Festlegung mögliche Produktallokation in Form einer Matrix dar. Während die Spalten die einzelnen Produktionseinrichtungen in der Sequenz der Fertigungsschritte abbilden, sind in den Zeilen die herzustellenden Produkte aufgetragen. Kann ein Produkt in einer Produktionseinheit – bei der Betrachtung von Rohbaukonzepten sind Produktionseinheiten typischerweise Zusammenbauten – hergestellt werden, so ist in die betreffende Zelle der Matrix eine Eins einzutragen; eine Null bedeutet, dass das Produkt an dieser Stelle nicht hergestellt werden kann.

5.4.3.2 Wiederverwendungsgrad

Die Wiederverwendbarkeit von Anlagen für folgende Produkte nach Ablauf des Produktlebenszyklus’ ist schwer zu quantifizieren. Sie wird deshalb im entwickelten Modell vereinfachend über die Produktallokation abgebildet. Nachfolgeprodukte sowie deren mögliche Allokation zu Produktionseinrichtungen werden dabei wie „normale“ Produkte modelliert. Es besteht also entweder Nachfolgerflexibilität (d. h. bestimmte Nachfolgeprodukte können

[413] vgl. Haller: Flexibilitätsbewertung, 1999, S. 26.

auf den bestehenden Anlagen gefertigt werden) – oder es besteht keine Wiederverwendbarkeit der Anlagen für ein Produkt.

5.4.3.3 Technische Kapazitäten

Für jede der Produktionseinheiten ist ihre technische Kapazität zu hinterlegen. Sie wird als Anzahl produzierbarer Einheiten pro Zeitperiode angegeben.

Im Rohbau ist die Gesamtkapazität in gewissem Maße vom Modellmix abhängig. So kann auch ein flexibler Rohbau eine höhere Ausbringung bewerkstelligen, wenn ausschließlich ein einziges Modell auf den Linien produziert wird. Insbesondere die Umstellung des Anteils der unterschiedlichen Modelle an der Gesamtproduktion wirkt sich stets negativ auf die aktuelle Produktionskapazität des gesamten Produktionssystems aus. Diese vom Variantenmix abhängige Reduzierung der Kapazität wird hier ebenfalls modelliert.

5.4.3.4 Organisatorische Kapazitäten

Die technischen Kapazitäten stellen die maximal produzierbare Anzahl von Einheiten bei voller Auslastung des Produktionssystems (max. Schichtanzahl pro Woche, max. Bandbelegungsgrad) dar. Abweichend davon haben die Produktionseinheiten im Rohbau in anderen Betriebsmodi (z. B. im 2- statt im 3-Schicht-Betrieb) geringere Kapazitäten. Auch diese Kapazitäten müssen modelliert werden. Das geschieht im Rahmen der Modellierung der Anpassungszustände des Produktionssystems (siehe Abschnitt 5.4.3.7).

5.4.3.5 Fertigungsfluss

Durch die in der Fähigkeitsmatrix definierten möglichen Produktallokationen ergeben sich aufgrund der Kombinatorik unter Umständen mehrere alternative Fertigungsflüsse (erlaubte Pfade eines zu produzierenden Produktes) durch das Produktionssystem. Jedoch ist es in der Praxis aus Komplexitäts-, Zuverlässigkeits- und Kostengründen nicht sinnvoll, all diese technisch prinzipiell möglichen Pfade auch zuzulassen. Die Methodik muss es daher gestatten, nicht erlaubte Pfade zu sperren. Die Sperrung erfolgt durch den Validitätsvektor. Durch Eintragen einer Eins beziehungsweise einer Null wird eine Fertigungsroute bestätigt bzw. als unzulässig markiert.

Außerdem können den verschiedenen möglichen Fertigungsflüssen Prioritäten zugeordnet werden. So ist es im Fall zweier paralleler Linien im Normalbetrieb in der Regel sinnvoll, eine möglichst gleichmäßige Auslastung beider Linien anzustreben. In besonderen Situationen, z. B. im Falle von Umbauten an einer der Linien oder zum Ende des Produktlebenszyklus' der auf den Linien gefertigten Produkte, wenn eine der Linien schon für die Produktion des Nachfolgeproduktes umgerüstet wird und die Produktnachfrage gut mit nur einer Linie zu bewältigen ist, kann es aber auch sinnvoll sein, eine der Linien so hoch wie möglich auszulasten und die andere gar nicht zu nutzen oder zumindest weitestmöglich zu

entlasten. Die Prioritäten unterschiedlicher möglicher Pfade einzelner Produkte durch das Produktionssystem müssen dementsprechend angepasst werden.

5.4.3.6 Kostenstruktur

Zur Flexibilitätsoptimierung ist der Aufwand für Flexibilität ihrem Nutzen gegenüberzustellen. Neben der Quantifizierung des Nutzens von Flexibilität ist daher eine Quantifizierung des monetären Aufwandes für Flexibilität und damit die Hinterlegung eines Kostenmodells[414] erforderlich.

Zum Zeitpunkt der Rohbauplanung, an dem die flexibilitätsrelevanten Eigenschaften des Fertigungskonzeptes maßgeblich festgelegt werden, sind nur sehr grobe Kostendaten verfügbar (siehe Abschnitt 2.1.1.5). Gemäß der Forderung nach einem angemessenem Aufwand bei der Flexibilitätsoptimierung (siehe Abschnitt 3.1.3) darf insbesondere die oft langwierige Modellerstellung nicht zu kompliziert sein. Daher muss das verwendete Kostenmodell eine einfache und schnelle Datenerhebung und -eingabe gestatten. Daneben muss es im Detaillierungsgrad den zum Zeitpunkt der Anwendung der Methodik verfügbaren Daten entsprechen. Bei der Ausarbeitung alternativer Rohbaukonzepte liegen Daten zum Investitionsbedarf, zur erforderlichen Baufläche sowie zum Arbeitskräfteeinsatz vor.

Es entstehen zwei Arten von Flexibilitätskosten: Kosten für die Schaffung und Vorhaltung von Flexibilität und Kosten im Falle einer Anpassung[415], d. h. Kosten für die Nutzung von Flexibilität. Das Kostenmodell weist daher erstens den Investitionsbedarf eines Rohbaukonzeptes aus. Außerdem werden die laufenden Betriebskosten des Rohbaus, also in erster Linie Flächen-, Lohn- und Energiekosten, abgebildet; diese laufenden Kosten sind bei flexiblen Systemen bei der Erstellung der gleichen Leistung ggf. höher als bei nicht oder weniger flexiblen. Zweitens werden Kosten, die für die Nutzung von Flexibilität, d. h. für den Wechsel von einem möglichen Anpassungszustand[416] in einen anderen, entstehen, hinterlegt. Diese Anpassungskosten werden in Form einer Wechselkostenmatrix abgebildet.

Grundsätzlich sind für alle Systeme die folgenden Kostenarten sowohl beim Initialinvest als auch für Anpassungen zu berücksichtigen:

- Investitionen (Anschaffung, Transport, Installation, Verwaltung, Engineering, Training),
- Betrieb (Arbeitskosten, ggf. inkl. Zuschlägen, Energie, Hilfs- und Betriebsstoffe, Ersatzteile),

---

[414] vgl. zum Thema des Kostenmodells für den Rohbau als einer (hochautomatisierten) Montage auch Hartmann: Entwicklung eines Kostenmodells für die Montage, 1993, S. 73ff.

[415] vgl. Horvath, Mayer: Produktionswirtschaftliche Flexibilität, 1986, S. 75.

[416] Dieser Begriff wird im folgenden Abschnitt 5.4.3.7 genauer erläutert.

- Fläche sowie
- Wartung und Instandhaltung (geplant und ungeplant).

Eine weitere Einflussgröße für Flexibilitätsentscheidungen und daher im Kostenmodell abzubilden ist der Produktivitätsfortschritt durch Wiederhol- und Lerneffekte in der Produktion[417]. Zwar steigt die Produktivität in jedem Produktionssystem mit der Anzahl produzierter Einheiten an[418]; dieser Anstieg fällt jedoch in der Regel wegen ausgeprägterer Wiederhol- und Lerneffekte in nicht flexiblen Produktionssystemen höher aus. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass Anlaufkurven in flexiblen Produktionssystemen in der Regel flacher verlaufen. Wegen der Forderung nach geringer Modellierungskomplexität werden diese Effekte im vorliegenden IT-Tool zur Flexibilitätsmodellierung allerdings nicht berücksichtigt.

Weiterhin zu modellieren ist der Produktivitätsfortschritt durch neue Technologien. Ein in der Zukunft, beispielsweise in sechs Jahren, also zum Start einer nächsten Modellgeneration, gekauftes Produktionssystem mit gleicher Leistung wie ein heute gekauftes System kostet durch diesen Effekt weniger – oder bietet zu gleichem Preis mehr Leistung. Dieser Effekt spricht tendenziell für die Auswahl eines weniger flexiblen Produktionssystemkonzeptes.

Generell führt Flexibilität zu teilweise veränderten Kostenstrukturen. Flexiblere Produktionssysteme weisen also einige Kostenvor- und einige -nachteile auf. Diese Vor- und Nachteile sollen hier nicht diskutiert werden; sie sind mit den Rohbauentwürfen der Planers festgelegt und damit Eingangsgröße für die Optimierungsmethodik. Wichtig ist jedoch, dass sie im Kostenmodell abgebildet werden und damit in Bewertung und Optimierung eingehen. Im vorliegenden Kostenmodell sind Einsparungen und Mehrkosten für flexible Produktionssysteme in den oben beschriebenen Kostenkategorien enthalten. Eine adäquate Abbildung und Berücksichtigung bei der Optimierung ist somit sichergestellt.

Beispielhaft für die Veränderung von Kostenstrukturen durch Flexibilität seien genannt:

- Die Verfügbarkeit flexibler Systeme ist häufig geringer (abgebildet in niedrigerer Kapazität und teilweise höheren Personalkosten flexibler Systeme).
- Flexibilität erfordert für vergrößerte Bereitstellungsflächen oft mehr Platz am Band, weil Rohmaterial für unterschiedliche Produkte bereitgehalten werden muss (abgebildet in höheren Flächenkosten flexibler Systeme).

Weitere durch höhere oder geringere Flexibilität verursachte Kosten, die nicht in der Produktion, sondern in anderen Unternehmensbereichen entstehen, werden nicht abgebildet.

---

[417] vgl. Niemann, Westkämper: Dynamisches Life Cycle Controlling, 2004, S. 555f.

[418] Dies zeigt sich in der Praxis durch eine Erhöhung der *Kapazität* eines Produktionssystems. Die Steigerung beträgt i. A. bis ca. 10 % pro Jahr.

Beispielhaft seien hier die Mehrkosten (z. B. erhöhte Konstruktionskosten) für die Implementierung fixierter Aufnahmepunkte in Produkten im Falle flexibler Fertigung sowie entgangene Erlöse durch eine durch striktere Standardisierung eventuell kleinere Produktpalette genannt.

5.4.3.7 Anpassungszustände

Freiheitsgrade und Restriktionen eines Produktionssystems lassen sich durch Anpassungszustände[419] modellieren. Unter Anpassungszustand wird dabei eine bestimmte Kombination von Ausprägungen aller anpassbaren Parameter verstanden. Zur Modellierung wird eine Anzahl möglicher Anpassungszustände festgelegt; durch Wechsel zwischen diesen (diskreten) Anpassungszuständen kann sich das Produktionssystem sich verändernden oder neuen Randbedingungen und Anforderungen anpassen.

Basis für die Festlegung der Anpassungszustände sind die anpassbaren Parameter des zu modellierenden Produktionssystems sowie deren mögliche Ausprägungen. Allerdings sind nicht alle möglichen Kombinationen von Parameterausprägungen sinnvoll. Aus der sich kombinatorisch ergebenden Anzahl möglicher Kombinationen werden daher die erlaubten Anpassungszustände ausgewählt und im Modell hinterlegt.

Mögliche Anpassungen umfassen Struktur- und Betriebsanpassungen. Anpassbare Betriebsparameter einer Produktion sind unter anderen:

- *Schichtmodell*: Die Produktion kann im Ein-, Zwei- oder Drei-Schicht-Betrieb betrieben werden. Bei genauerer Betrachtung wird die Anzahl der Schichten pro Woche, die bei Annahme dreier Schichten pro Tag in der Regel zwischen zehn und 19, in Extremfällen auch der Höchstzahl 21, schwankt, modelliert.
- *Bandbelegung*: Auch wenn die Bandgeschwindigkeit – wie im Automobilrohbau – nicht änderbar ist, lässt sich der effektive Durchsatz herzustellender oder zu bearbeitender Produkte pro Zeiteinheit variieren: Dazu wird die Bandbelegung angepasst. Im Rohbau heißt das, dass – statt alle Paletten des Produktionsbandes zu belegen – einige freigelassen werden.
- *Prioritäten verschiedener erlaubter Fertigungsflüsse*: Wie oben dargestellt, können sich diese während des Lebenszyklus' des Produktionssystems verschieben.

Mögliche Strukturanpassungen beziehen sich auf *Art, Menge und Leistungsfähigkeit der Produktionsanlagen*: Durch Aus- oder Umbau können diese Parameter während der Lebensdauer eines Produktionssystems verändert werden. Allerdings besteht diese Möglichkeit im Rohbau nicht (vgl. Abschnitt 2.1.1.5); daher soll an dieser Stelle nicht genauer darauf eingegangen werden.

[419] Synonym hierzu wird auch der Begriff „Betriebsmodi" verwendet werden.

Jede Veränderung der genannten Parameter hat unterschiedliche Auswirkungen auf das Produktionssystem. Während z. B. eine Änderung der Produktionsanlagen – wie sie im Rohbau nicht möglich ist – Auswirkungen auf praktisch alle Modellattribute haben wird, sind die Auswirkungen anderer Anpassungen begrenzter. Insbesondere müssen jedoch für jeden der möglichen Anpassungszustände Kapazitäten und Kostenstruktur im Produktionsbetrieb, d. h. die laufenden Betriebskosten wie beispielsweise Arbeitskräfte- oder Flächenkosten, hinterlegt werden.

So verringert ein Wechsel des Schichtmodells aus dem 3-Schicht- in den 2-Schicht-Betrieb die (organisatorische) Kapazität des Produktionssystems, aber auch die Personalkosten. Die konkrete Auswirkung auf die Personalkosten ist dabei von den vorherrschenden Rahmenbedingungen abhängig. Schichtzuschläge entfallen auf jeden Fall, so dass die durchschnittlichen Lohnkosten pro Arbeitskraft sinken. Abhängig davon, wie viele Arbeitskräfte fest angestellt und wie viele Zeitarbeiter oder leicht zu kündigen sind, verringern sich die Personalkosten auch durch die Reduzierung der Zahl der Arbeitskräfte. In Deutschland sind Kündigungen in der Regel schwierig, bspw. in den neuen EU-Ländern aber wesentlich einfacher.

Eine Verringerung der Bandbelegung verringert ebenfalls die (organisatorische) Kapazität des Produktionssystems sowie die Personalkosten, da an den einzelnen Stationen weniger Mitarbeiter benötigt werden.

Neben Kapazitäten und laufenden Betriebskosten für jeden Anpassungszustand sind auch die jeweils erforderlichen Anfangsinvestitionen sowie Aussagen über die bei einem Wechsel von einem Anpassungszustand in einen anderen entstehenden Kosten zu hinterlegen. Schließlich müssen Restriktionen, die die Nutzung der Anpassungszustände einschränken, im Modell abgebildet werden. Beispielhaft sei hier die Restriktion genannt, dass z. B. in der Montage die Taktzeit einer Linie über den Produktlebenszyklus nicht mehr als zweimal angepasst wird, d. h. ein entsprechender Wechsel von Anpassungszuständen nur zweimal erlaubt ist.

Für jeden dieser Anpassungszustände wird demnach ein komplettes Modell hinterlegt. Die Modelle der einzelnen Anpassungszustände unterscheiden sich dabei mehr oder weniger.

Ein Produktionssystem ist also im Sinne der vorgestellten Methodik durch die Gesamtheit der Modelle für alle seine Anpassungszustände sowie die Regeln für den Wechsel zwischen Anpassungszuständen komplett beschrieben.

5.5 Simulation

„If you think simulation is expensive: try ignorance!“
ANONYM

Nach KOLLER ist Simulation das experimentelle Betreiben von Modellen[420]. Die VDI-Norm 3633 definiert Simulation als Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind[421]. Diesem Begriffsverständnis folgend soll der Vorgang innerhalb der Optimierungsmethodik, bei dem das Verhalten des Produktionssystemmodells bei Gegenüberstellung des Flexibilitätsbedarfs, also bei Annahme des Eintritts unterschiedlicher Szenarien, ermittelt wird, als Simulation bezeichnet werden.[422] Vom technischen Standpunkt betrachtet ist das eingesetzte Verfahren eine zeitdiskrete Simulation.

Bei der zeitdiskreten Simulation wird die Zeitachse in feste Intervalle unterteilt. Für jedes dieser Zeitintervalle wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass innerhalb eines Intervalls alle Betrachtungsgrößen konstant sind bzw. vereinfachend auf einen Mittelwert zusammengeführt werden können. Zur Erzielung eines gewünschten Detaillierungsgrades müssen die Zeitintervalle hinreichend klein gewählt werden[423]. Für die Simulation von Rohbaukonzepten in frühen Phasen der Planung bieten sich Jahre als Zeitintervalle an, da die Planungsgrundlagen (Marktprognosen) zu diesem Zeitpunkt nur jahresweise Daten bereithalten. Erst wenn der Planungshorizont sich auf unter ein Jahr verkürzt, also ab ca. einem Jahr vor Produktionsbeginn, wird üblicherweise auf Monatsebene geplant. Die verwendeten Zeitintervalle sind in der Methodik frei festlegbar.

Das Simulationsmodul nimmt innerhalb der Struktur der Optimierungsmethodik eine zentrale Rolle ein, da hier das Modell des Flexibilitätsbedarfs in Form eines Szenariensatzes mit dem Modell des Produktionssystems zusammengeführt wird. Dabei werden die Szenarien sukzessive abgearbeitet; für jedes einzelne Szenario wird nach einer systematischen Vorgehensweise verfahren.

Vorgehensweise

Kern der Simulation ist die Ermittlung sogenannter Anpassungspfade. Ein Anpassungspfad beschreibt die zeitliche Abfolge von Anpassungszuständen[424], die ein Produktionssystem während seiner Lebensdauer durchläuft.

---

[420] vgl. Koller: Simulation, 1969, S. 1486f.

[421] vgl. Warnecke: Betriebshütte, 1996, S. 9-29.

[422] In der Produktionstechnik wird der Begriff Simulation heute oft nur noch für „Materialflusssimulation“ verwendet. Dieser gewohnheitsmäßigen Einschränkung wird mit dieser Begriffswahl nicht gefolgt.

[423] vgl. Banks *et al.*: Discrete-Event System Simulation, 2004, S. 18.

[424] wie sie bei der Produktionssystemmodellierung definiert wurden

Die Generierung der Anpassungspfade erfolgt auf Basis von Anpassungsalgorithmen. Dabei wird für jedes Zeitintervall des betrachteten Marktszenarios je nach geforderten Produktionszahlen der unterschiedlichen betrachteten Produkte und Varianten aus den durch das Produktionssystemmodell festgelegten möglichen Anpassungszuständen gemäß vorgegebener Regeln derjenige ausgewählt, in dem das Produktionssystem im betrachteten Intervall operiert. Ein generierter Anpassungspfad könnte beispielsweise angeben, in welchem Zeitintervall in welchem Schichtmodell produziert wird.

Der für die Auswahl der Anpassungszustände geeignete Algorithmus muss je nach Anwendungsfall ausgewählt werden. In der Methodik wurden dazu unterschiedliche Algorithmen implementiert. Möglich sind einfache Regeln wie „niedrigste Betriebskosten“[425] oder „Amortisation von Investitionen spätestens nach einem Jahr“[426], aber auch die globale Optimierung[427] beispielsweise der Vergleichsstückkosten, der Lieferbereitschaft oder des Gewinns über den gesamten Lebenszyklus[428].

Um diese Regeln anwenden zu können, muss das Simulationsmodell konkret berechnen, auf welchen Pfaden die zu fertigenden Produkte den Rohbau durchlaufen. Das Simulationsmodul nutzt daher die im Modell des Produktionssystems hinterlegten Daten[429], um gemäß der durch den Anpassungsalgorithmus vorgegebenen Zielsetzung zu entscheiden, welcher Zusammenbau wie viele Einheiten welches Produktes fertigt.

Zur Nutzung implementierter Flexibilität

Obwohl Entscheidungen über die operative Anwendung von Flexibilität im Produktionsbetrieb nicht von der Methodik unterstützt werden, müssen sie für die Bewertung von Investitionsalternativen herangezogen werden, da die Nutzung implementierter Flexibilität maßgeblich deren Nutzen mitbestimmt. Auch für Investitionsentscheidungen muss also eine operative Planung simuliert werden; das geschieht im hier beschriebenen Modul *Simulation*. Die oben beschriebenen Anpassungsalgorithmen modellieren dazu das Entscheidungsverhalten und also die Nutzung der vorhandenen Flexibilität im laufenden Betrieb durch Planer/Entscheider.

---

[425] d. h.: Wähle immer den Anpassungszustand mit den niedrigsten Betriebskosten.

[426] d. h.: Wechsle dann in einen anderen Anpassungszustand, wenn die durch diesen Wechsel verursachten Investitionskosten sich nach spätestens einem Jahr durch niedrigere laufende Kosten amortisieren.

[427] z. B. mit Hilfe genetischer Algorithmen; vgl. dazu auch Hornyák, Monostori: Genetic Algorithms for Predictive and Reactive Scheduling of Manufacturing Systems, 1998, S. 213ff.

[428] d. h.: Wähle in jedem Betrachtungsintervall den Betriebszustand so aus, dass die Gesamtbetrachtung über den Lebenszyklus des Produktionssystems die niedrigsten Vergleichsstückkosten/die höchste Lieferbereitschaft/den höchsten Gewinn bringt.

[429] wie z. B. Kompetenzen und Kapazitäten der einzelnen Zusammenbauten, erlaubte Pfade durch den Rohbau sowie deren Priorisierung, Kosten, die bei der Produktion der unterschiedlichen Modelle in den einzelnen Zusammenbauten entstehen, usw.

Die Herausforderung dabei ist, das Verhalten der Planer realistisch abzubilden. Wenn für die vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Produktionssysteme theoretisch optimale Anpassungsalgorithmen zugrunde gelegt werden, führt das zwar zu theoretisch optimalen Ergebnissen; weil aber das für die Betrachtung zugrunde gelegte Verhalten in der Realität ganz anders wäre, sind diese Ergebnisse unrealistisch und deshalb falsch. Die im Rahmen des Forschungsprozesses gewonnenen Praxiserfahrungen haben gezeigt, dass einfache Regeln wie „Amortisation von Investitionen nach zwei Jahren" realistischer sind als Regeln wie „global unter Lebenszykluskostengesichtspunkten optimaler Entwicklungspfad".

Kenngrößen

Auf Basis dieses Anpassungspfades werden über den Lebenszyklus des Produktionssystems Kenngrößen ermittelt und protokolliert: Durch einen Anpassungspfad ist – in Kombination mit dem betrachteten Szenario – eindeutig beschrieben, was das betrachtete Produktionssystem wann, wie und ggf. wo (in welcher Produktionseinheit) produziert. Im Beispiel eines Automobilrohbaus steht also fest, in welchem Zusammenbau in welchem Zeitintervall wie viele Einheiten jedes Produktes und jeder Variante bearbeitet werden. Es steht fest, in welchem Schichtmodell das geschieht und wie viele Arbeitskräfte dafür benötigt werden. Ebenso liegen weitere Betriebskosten wie z. B. Energiekosten fest. Auch die zur Erstellung des Produktionssystems und für eventuelle Anpassungen, d. h. Wechsel von Anpassungszuständen, ggf. nötigen Investitionen sind definiert. Schließlich liegen auch die erreichten Produktionszahlen vor; daraus lässt sich durch Vergleich mit der Nachfrage desselben Zeitraums das entgangene Produktionsvolumen aufgrund etwaiger Unterkapazitäten bestimmen.

Führt man die beschriebene Vorgehensweise für den gesamten betrachteten Szenariensatz – also die betrachtete Schar von mit Eintrittswahrscheinlichkeiten behafteten Szenarien – durch, so erhält man als Ergebnis anstelle eines einzelnen Ergebniswertes eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Kenngrößen. Diese durch die Simulation gewonnenen Daten bilden die Grundlage für alle weiteren Auswertungen sowie die sich anschließende Optimierung des Produktionssystems.

5.6 Produktionssystemoptimierung

Gemäß der Zielsetzung des dargestellten Forschungsprozesses wurden zunächst für den Rohbau wichtige Flexibilitätsarten identifiziert (Produkt-, Volumen- und Nachfolgerflexibilität). Anschließend wurden die wesentlichen die Flexibilität des Rohbaus beeinflussenden Freiheitsgrade – und damit die Entscheidungsdimensionen – bestimmt (Kapazität, Kompetenz und Verkettung der einzelnen Zusammenbauten) und als morphologischer Kasten der Lösungselemente detailliert ausgearbeitet. Am Ende des Forschungsprozesses sollen

ein Rahmenwerk und ein operables Instrumentarium stehen, mit denen alternative Produktionssysteme hinsichtlich ihrer Flexibilität sowie des zu erwartenden Nutzens bewertet und optimiert werden können. An die Simulation schließt sich daher die Nutzung der Ergebnisse der Auswertung für die Gestaltung und die heuristische Optimierung des Produktionssystems an: Das Modul *Produktionssystemoptimierung* beinhaltet die Analyse und die systematische Rückführung von Simulationsergebnissen in die Produktionssystemgestaltung.

Ziel der hier vorgestellten heuristischen Optimierung ist es, auf Basis einer fundierten Analyse von Betriebsverhalten und Wirtschaftlichkeit der betrachteten Produktionssystemalternativen im unsicheren Umfeld eine Synthese zu ermöglichen; Planer und Entscheider sollen bei der gezielten Verbesserung der analysierten Alternativen unterstützt werden. Dazu müssen die wenigen relevanten Parameter in den drei identifizierten Entscheidungsdimensionen optimal festgelegt werden. Die Methodik leistet also Hilfestellung durch Identifikation der *wesentlichen* Stellschrauben sowie der Stellrichtung in einem konkreten Fall.

Dabei handelt es sich um Verbesserungen auf dem betrachteten, groben Detaillierungsniveau. Im Beispiel Rohbau werden dabei die drei identifizierten Grundparameter Kapazität, Kompetenz oder Verkettung einzelner Rohbauten geändert; konkreter werden diejenigen Parameter optimiert, die in Abschnitt 5.4 „Modellbildung“ dargestellt und also im Rahmen der Methodik modelliert werden – auf der Ebene, auf der sie dort dargestellt sind. Wenn also bspw. die Kapazität eines Zusammenbaus verändert wird, wird festgelegt, wie hoch die neue Kapazität ist; nicht betrachtet wird hingegen, wie diese Veränderung der Kapazität erreicht bzw. ermöglicht wird (bspw. durch einen Roboter vom Typ A statt eines Roboters vom Typ B, durch eine andere Einstellung bestimmter Roboterparameter, durch eine andere Konstruktion der A-Säule einiger der betrachteten Modelle, ...).

In diesem Abschnitt sind zunächst die für die Optimierung benötigten Auswertungen dargestellt (Abschnitt 5.6.1). Es folgt eine Beschreibung des Standardablaufs zur Optimierung, bei dem im Wesentlichen zunächst die Kapazitäten der einzelnen Zusammenbauten optimiert werden (Abschnitt 5.6.2). Daran schließt sich eine detailliertere Optimierung auch der anderen Kernparameter Kompetenz und Verkettung an; der Abschnitt schließt mit der Darstellung der für diese detaillierte Optimierung entwickelten Verfahren (Abschnitt 5.6.3).

5.6.1 Simulationsauswertung als Basis für die Optimierung

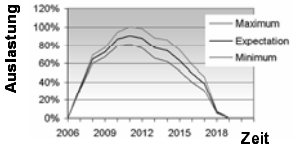
„The need to measure flexibility […] has taken an increasing importance as effective comparison of performance can only be carried out when appropriate measures have been designed and tested.“[430]
SHAW ET AL. (2001)

Die Basis für jegliche Optimierung bildet die Auswertung der Simulation. Die aus der Auswertung und Verdichtung der über den Lebenszyklus des Produktionssystems sowie über die Gesamtheit eines Szenariensatzes ermittelten Kenngrößen resultierenden Ergebnisse werden im Sinne einer Zielfunktion zur heuristischen Optimierung genutzt. In diesem Abschnitt sollen daher zunächst die möglichen Auswertungen näher beleuchtet werden.

In Abschnitt 3.1 wurde ausführlich darauf eingegangen, dass Flexibilität niemals eine primäre Zielsetzung darstellt, sondern immer der Erfüllung übergeordneter Zielsetzungen dient; die Bewertung produktionswirtschaftlicher Flexibilität als Basis für die Optimierung muss sich daher an den verfolgten Zielen orientieren. Die Auswertungen müssen zudem geeignet sein, Antworten auf die in Abschnitt 3.1.1 skizzierten Fragestellungen zu geben.

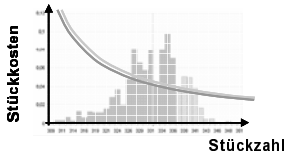
Ausgehend von der Definition der Aufgabe eines Rohbaus lassen sich zwei Zielsetzungen von Flexibilisierungsvorhaben identifizieren: Zum einen soll jede Nachfrage termingerecht befriedigt werden können, zum anderen soll dies zu möglichst geringen Kosten bewerkstelligt werden. Primäre Zielsetzungen sind also Leistungssteigerungen und Kostensenkungen. Darüber hinaus wird eine Reduzierung des durch Planungsunsicherheiten bedingten Investitionsrisikos angestrebt, so dass sich drei Gruppen möglicher Auswertungen ergeben, wie sie in Abbildung 5-4 samt einiger Beispiele aufgelistet sind und im Folgenden näher beschrieben werden.

[430] Shaw *et al.*: Response Capabilitites, 2001, S. 1.



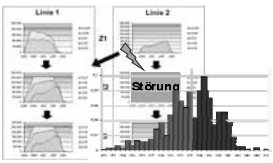
Kapazitätsbewertung

- Lieferbereitschaft
- Auslastungen
  - Überkapazitäten
  - Gleichmäßigkeit



Monetäre Bewertung

- Stückkosten
- Kapitalwert



Risikobewertung

- Auswirkungen von Unsicherheiten
- Stresstest

Abbildung 5-4: Übersicht der grundlegenden Simulationsauswertungen

5.6.1.1 Kapazitätsauswertung

Die Kapazitätsauswertung basiert auf den Ergebnisgrößen, wie sie nach Durchführung der Simulation vorliegen. Sie dient der Ermittlung von Leistungskennzahlen. Hierfür werden ausgewertet:

- die Produktionsstückzahl,
- die Auslastung,
- das aufgrund von Unterkapazitäten entgangene Produktionsvolumen sowie
- die Lieferbereitschaft.

Die Kennzahlen Produktionsstückzahl und Auslastung werden dabei zum einen für jede einzelne Produktionseinheit (im Beispiel Rohbau: für jeden Zusammenbau) individuell erhoben, weil die Produktionseinheiten zum Teil sehr unterschiedliche Auslastungen aufweisen; zum anderen werden sie für das Produktionssystem als Ganzes erhoben. Weil beide Kennzahlen nur bei Betrachtung des verketteten Systems sinnvoll zu ermitteln sind, werden das aufgrund von Unterkapazitäten entgangene Produktionsvolumen sowie die Lieferbereitschaft nur für das System als Ganzes ermittelt.

Für Produktionssysteme ist i. A. statt der häufig lediglich betrachteten quantitativen Auslastung die qualitative Auslastung entscheidend, d. h. Produktionssysteme sollen nicht nur irgendetwas produzieren, um nicht stillzustehen, sondern gemäß ihrer charakteristischen

Fähigkeiten ausgelastet werden. Im Allgemeinen muss daher bei der Kapazitätsauswertung die qualitative Auslastung betrachtet werden. Im Beispiel des Automobilrohbaus sind die beiden Größen jedoch identisch, weil die erforderlichen Produktionsanlagen für spezifische Modelle und Varianten konzipiert werden; es können keine anderen außer diesen Produkten auf ihnen gefertigt werden. Daher ist quantitative Auslastung im Fall des Rohbaus immer zugleich qualitative Auslastung.

5.6.1.2 Monetäre Auswertung

Auf der Seite der monetären Größen erfolgt die Bewertung anhand der Kennzahlen Kapitalwert der Kosten und Vergleichsstückkosten.

Kapitalwert der Kosten

Der Kapitalwert der Kosten (net present cost, NPC) hat in letzter Zeit als Kenngröße ständig an Bedeutung gewonnen[431]. Der *NPC* stellt die Zahlungsreihe für alle Zeitperioden *t* unter Berücksichtigung des Kalkulationszinsfußes *d* als Gegenwartswert aller zukünftigen Zahlungsströme dar.

$$NPC = C_{init,A_0} + \sum_{t=1}^{t_{\max}} \frac{(C_{change,A_{t-1},A_t} + c_{part,A_t} * x_t)}{(1+d)^t} \qquad \textit{(Formel 5-1)}$$

C_{init,A_0} sind dabei die initialen Investitionskosten bei Annahme einer Ausgangskonfiguration A_0. C_{change,A_{t-1},A_t} sind die Kosten für einen Wechsel aus dem Zustand A_{t-1} in den Zustand A_t; c_{part,A_t} sind die laufenden Kosten pro produziertem Produkt im Anpassungszustand A_t. x_t ist die Anzahl der in Periode *t* produzierten Einheiten des betrachteten Produktes.

Die mit dem Kapitalwert der Kosten zu treffende Aussage beantwortet die Frage, was ein Investitionsvorhaben in Summe kosten wird. Es berücksichtigt dabei die Vorteilhaftigkeit einer späteren Investition aufgrund der Diskontierung der zu tätigen Investitionen.

Vergleichsstückkosten

Der Kapitalwert der Kosten berücksichtigt dabei jedoch nicht die Leistungsfähigkeit eines Produktionssystems. Entscheidend für die Rohbauplanung sind die Vergleichstückkosten, die sich als Quotient der Summe aller Auszahlungen (Kosten) und der Anzahl tatsächlich produzierter Einheiten ergeben.

Sowohl die Leistungskennzahlen der Kapazitätsauswertung als auch die monetären Kennzahlen lassen sich hinsichtlich ihres Betrachtungsbereichs gliedern: So werden einerseits für jedes betrachtete Zeitintervall (beispielsweise Kalenderjahr) Kenngrößen ermittelt; zum anderen gibt es Kennzahlen, die über den gesamten betrachteten Zeitraum, also typi-

[431] vgl. u. a. Reichert et al.: Financial Analysis among Large U.S. Corporations, 1993, und Segelod: A Note on the Survey of Project Evaluation Techniques, 1998.

scherweise den Anlagenlebenszyklus, aggregiert sind. In der Rohbauplanung ist es zudem üblich, Kennzahlen für den Zeitraum der höchsten Produktionszahlen, also „für die Kammlinie“, zu berechnen. Typischerweise werden hierzu als Betrachtungszeitraum die drei aufeinander folgenden Perioden mit der höchsten Stückzahl zugrunde gelegt.

5.6.1.3 Risikoauswertung: Darstellung von Unsicherheiten

5.6.1.3.1 Aggregation in Histogrammen

Da die Kennzahlen zur monetären sowie zur Kapazitätsbewertung nicht nur für ein einzelnes Szenario, sondern für den gesamten die Unsicherheit abbildenden Szenariensatz – also für eine Vielzahl von (mit Wahrscheinlichkeiten behafteten) Szenarien – ermittelt werden, erhält man als Ergebnis anstelle eines einzelnen Ergebniswertes eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der zuvor aufgeführten Kennzahlen.

In einem ersten Aggregationsschritt können diese Kenngrößen sowie ihre Verteilung in einem Histogramm dargestellt werden. Das Histogramm spiegelt die Unsicherheiten der Systemanforderungen wider. Exemplarisch ist dies anhand der Stückkostenverteilung eines Produktionssystems in Abbildung 5-5 dargestellt.

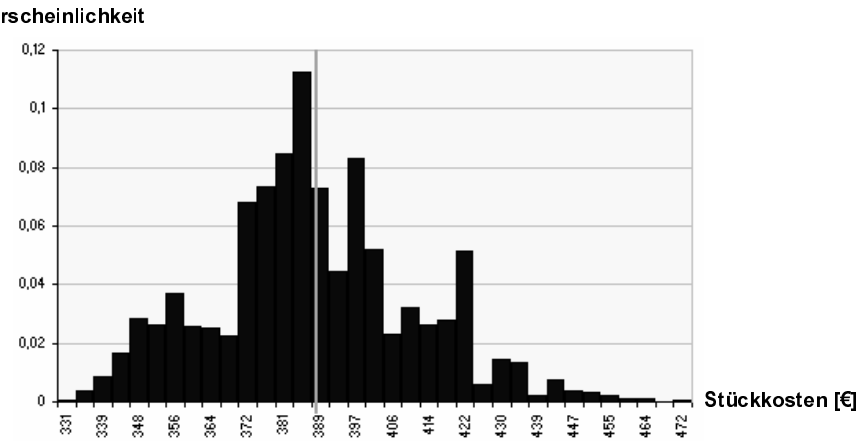


Abbildung 5-5: Wahrscheinlichkeitsverteilung am Beispiel Stückkosten

Da eine solche Darstellung sich einer intuitiven Bewertung entzieht und insbesondere in multikriteriellen Entscheidungssituationen, wie sie der Vergleich alternativer Rohbaukonzepte darstellt, ein unmittelbarer Vergleich zweier Produktionssysteme anhand einer ausgewählten Kennzahl nicht immer möglich ist, müssen geeignete Auswertungen verwendet werden, die anhand besser zu vergleichender Kennzahlen oder Darstellungen Auswirkungen von Unsicherheiten erfassen und so den Entscheidungsprozess unterstützen.

Die in der Methodik dafür zum Einsatz kommenden Größen werden im Folgenden kurz erläutert.

5.6.1.3.2 Erwartungswert

Der Erwartungswert E(x) ist die bedeutendste Kennzahl, da er den zu erwartenden Ergebniswert x_i unter Berücksichtigung aller Szenarien *i* und verbundenen Wahrscheinlichkeiten $p(x_i)$ wiedergibt. Er berechnet sich als Summenprodukt $E(x) = \mu$ aus der Datenreihe der Kenngröße und der Reihe der korrespondierenden Wahrscheinlichkeiten:

$$E(x) = \mu = \sum_{i=1}^{i_{\max}} x_i \cdot p(x_i) \qquad \textit{(Formel 5-2)}$$

5.6.1.3.3 Planwert

Der Planwert hingegen gibt den Ergebniswert wieder, der sich ergäbe, legte man der Berechnung nur ein einzelnes, den Planwerten entsprechendes Szenario zugrunde. Dieser Wert ist insofern hilfreich, als sein Vergleich mit dem Erwartungswert aufzeigt, inwiefern die Betrachtung von Planungsunsicherheiten zu einem anderen Ergebniswert der betrachteten Kennzahl führt, und zudem Rückschlüsse auf das Risiko zulässt.

5.6.1.3.4 Minimum, Maximum

Durch den minimalen bzw. maximalen Ergebniswert einer Kennzahl wird der Bereich möglicher Werte aufgespannt.

5.6.1.3.5 α-Perzentil, (1-α)-Perzentil

Da die Betrachtung von Minimum und Maximum jedoch unter Umständen auch extreme Ergebniswerte mit vernachlässigbar geringer Eintrittswahrscheinlichkeit umfasst und somit die Aussagekraft der Beschreibung des Wertebereiches schwächt, werden häufig die Randbereiche einer Wahrscheinlichkeitsverteilung aus dem Betrachtungsbereich ausgrenzt. Dabei wird für beide Ränder eine Wahrscheinlichkeit von α % ausgeblendet, so dass nur der Bereich vom α-Perzentil bis zum (1-α)-Perzentil betrachtet wird.

5.6.1.3.6 Value at Risk

Der Value at Risk (VaR) ist eine der Finanzmathematik entlehnte Kennzahl. Er gibt den maximalen zu erwartenden Schaden gegenüber dem Erwartungswert einer unsicheren Investition entsprechend einem vorgegebenen Konfidenzintervall an. Der VaR erlaubt somit Aussagen darüber, welcher Schaden im Vergleich zum erwarteten Ergebnis mit einer Wahrscheinlichkeit von x % nicht überschritten wird.

Möchte man nicht nur die Risikoseite einer unsicheren Investition betrachten oder ist laut Value at Risk das Risiko zweier Alternativen gleich hoch und besteht daher zusätzlich die Notwendigkeit der Bewertung unsicherer Potenziale, so kann analog ein Value at Chance

definiert werden, der entsprechend nicht den möglichen Schaden, sondern den möglichen Gewinn gegenüber dem Erwartungswert zum Ausdruck bringt.

5.6.1.3.7 Weitere Kenngrößen der Statistik

Darüber hinaus gibt es in der Statistik eine Vielzahl etablierter Kenngrößen zur Beschreibung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die aus unterschiedlichen Gründen nur bedingt zur Unterstützung einer Investitionsentscheidung geeignet sind. Ein entscheidender Grund ist oftmals die mangelnde Transparenz.

5.6.1.4 Das Flexibilitätsfenster

Eine explizite Zielsetzung der in diesem Abschnitt dargestellten Auswertungen ist die Unterstützung der sich der Auswertung anschließenden heuristischen Produktionssystemoptimierung. Wichtig dafür ist die Verdichtung und zweckmäßige Darstellung relevanter Informationen, um ein schnelles Erfassen und Bewerten des Sachverhaltes und damit von Vor- und Nachteilen unterschiedlicher Rohbaukonzepte zu ermöglichen.

Allein die im vorhergehenden Abschnitt 5.6.1.3 vorgestellten Kennzahlen sind dazu, wie sich im Verlauf des Forschungsprozesses gezeigt hat, nicht ausreichend. Daher wurde eine aggregierte Darstellung der wesentlichen für die Optimierung relevanten Informationen erarbeitet: das Flexibilitätsfenster[432].

5.6.1.4.1 Herleitung

Im Laufe der Simulation werden unter anderem (vgl. Abschnitt 5.5) die Leistungskenngrößen Auslastung, Kapazität, entgangenes Produktionsvolumen sowie die monetären Kenngrößen Kapitalwert der Kosten und Vergleichsstückkosten berechnet. Betrachtet man diese im Verlauf der Simulation erhobenen Kenngrößen, so lässt sich erkennen, dass die Aussagen dieser Kennzahlen untereinander in Verbindung stehen.

Bereits in Abschnitt 2.3.1 konnte außerdem festgehalten werden, dass für eine aussagekräftige Bewertung produktionswirtschaftlicher Flexibilität der erzielte Nutzen den Aufwänden gegenübergestellt werden muss. Bei Investitionsentscheidungen wird der Aufwand üblicherweise monetär zum Ausdruck gebracht. Es gilt also, Leistungsindikatoren, die den Nutzen erhöhter Flexibilität widerspiegeln, ins Verhältnis zum monetären Aufwand zu setzen. An dieser Stelle sei auch die in Abschnitt 2.3.1 formulierte Aufgabenstellung eines Automobilrohbaus wiederholt: Demnach müssen die Modelle des Produktionsprogramms „zum gewünschten Zeitpunkt und zu möglichst geringen Kosten“ ausgeliefert werden.

Während die Kapazität als Bewertungsgröße nicht geeignet ist, da sie vom Rohbauplaner festgelegt wird und also keine Ergebnis-, sondern eine Eingangsgröße ist, gibt die Auslas-

[432] vgl. Schuh *et al.*: FlexibilityWindows, 2005.

tung Auskunft darüber, wie wirtschaftlich ein Produktionssystem arbeitet. Um der Forderung an multikriterielle Bewertungsverfahren nach überschneidungsfreier Abbildung der relevanten Sachverhalte gerecht zu werden, kann die Auslastung also nicht die zielführende Größe sein, die monetären Kennzahlen gegenübergestellt werden soll. Das entgangene Produktionsvolumen hingegen ist sowohl eine reine Leistungskennzahl, beschreibt also die Fähigkeiten eines Produktionssystems, als auch, wie JORDAN UND GRAVES in ihrer Arbeit beweisen[433], ein geeigneter Indikator für mangelnde Produktmix- und Volumenflexibilität. Damit ist das entgangene Produktionsvolumen prinzipiell die geeignete Kennzahl, um den Nutzen produktionswirtschaftlicher Flexibilität zu beschreiben[434].

Anstelle der absoluten Kennzahl „entgangenes Produktionsvolumen" soll als Leistungsindikator jedoch eine relative Darstellung genutzt werden. Dazu wird aus dem entgangenen Produktionsvolumen die Lieferbereitschaft errechnet. Sie ist definiert als der Quotient der Anzahl produzierter Produkte und der nachgefragten Anzahl an Produkten innerhalb eines betrachteten Zeitintervalls.

Auf der monetären Seite werden der Kapitalwert der Kosten und die Stückkosten als Ergebnisgrößen der Simulation errechnet. Sie stehen, vernachlässigt man den Diskontierungssatz, in unmittelbarem Zusammenhang. Auch wenn die berechneten Stückkosten keine Aussage über die Höhe der erforderlichen Anfangsinvestitionen eines Rohbaus erlauben, soll der Aufwand bei der Bewertung von Flexibilität durch die Stückkosten ausgedrückt werden. Der Grund dafür ist, dass die Stückkosten einer Rohkarosse in der Rohbauplanung die entscheidende und etablierte Planungszielgröße sind.

5.6.1.4.2 Portfolio-Darstellung

Stellt man nun der Lieferbereitschaft die parallel ermittelten Stückkosten gegenüber, erhält man eine Portfoliodarstellung, die die wichtigsten Zusammenhänge der Flexibilität in Größen zum Ausdruck bringt, die dem Rohbauplaner bereits heute vertraut sind[435]. Eine solche Gegenüberstellung ist in Abbildung 5-6 dargestellt.

Unten rechts liegt der theoretisch optimale Betriebspunkt mit einer Auslastung von genau 100 %: Es werden alle Lieferwünsche erfüllt, und das System ist komplett ausgelastet. Der Bereich möglicher Werte ist nach unten durch eine Gerade minimaler Kosten begrenzt: Punkte auf dieser Gerade ergeben sich, wenn die Auslastung über 100 % steigt. Nach rechts ist der Bereich durch die Gerade maximaler Lieferbereitschaft begrenzt; Punkte auf dieser Geraden ergeben sich, wenn die Auslastung unter 100 % fällt.

---

[433] vgl. Jordan, Graves: Manufacturing Process Flexibility, 1995.

[434] vgl. Schuh *et al.*: FlexibilityWindows, 2005, S. 1617.

[435] vgl. Schuh *et al.*: Lifecycle Oriented Evaluation of Automotive Body Shop Flexibility, 2005.

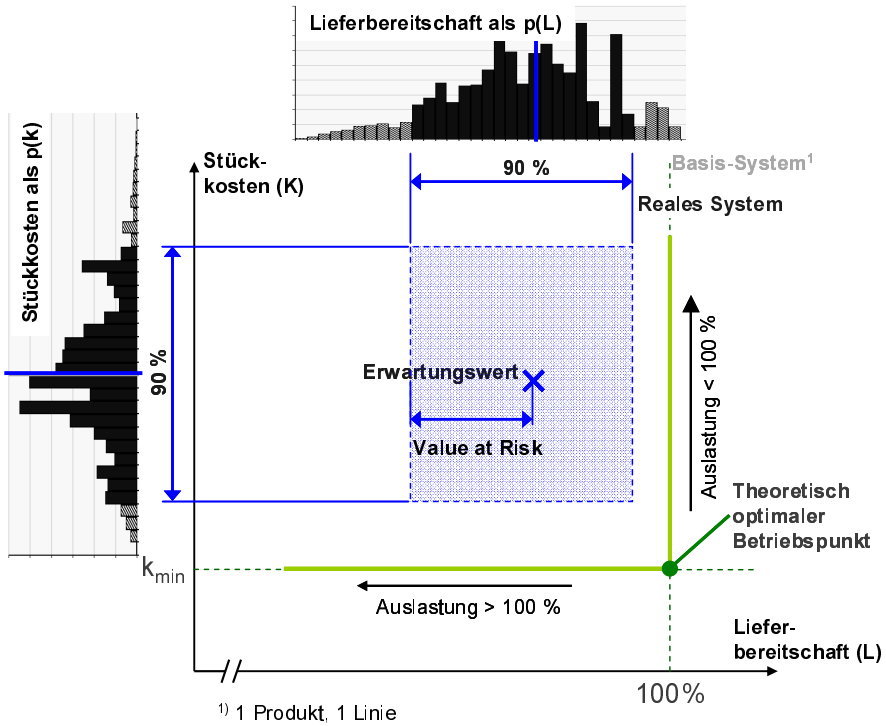


Abbildung 5-6: Das Flexibilitätsfenster[436]

Für das in der Mitte des Portfolios veranschaulichte Produktionssystem wird durch die entwickelte Darstellung neben dem Erwartungswert von Stückkosten und Lieferbereitschaft, die einen festen Punkt im Portfolio (gekennzeichnet durch das eingetragene Kreuz) darstellen, auch deutlich, innerhalb welchen Wertebereichs Stückkosten und Lieferbereitschaft bei der zugrunde liegenden Marktunsicherheit (dem Flexibilitätsbedarf) liegen können (dargestellt durch die 90-%-Bereiche in den Wahrscheinlichkeitsverteilungen am linken und oberen Rand der Darstellung). Das durch die sich ergebenden Wertebereiche aufgespannte (in der Abbildung gestrichelt dargestellte) Rechteck ist das Flexibilitätsfenster.

Das Flexibilitätsfenster ist dabei nicht durch die minimal und maximal auftretenden Werte definiert; vielmehr konzentriert man sich auf einen begrenzten Wertebereich der Wahrscheinlichkeitsverteilung (im gezeigten Beispiel 90 %), um Extremwerte mit vernachlässig-

[436] vgl. Schuh *et al.*: FlexibilityWindows, 2005, S. 1618.

barer Eintrittswahrscheinlichkeit auszublenden und somit die Aussage des Portfolios nicht zu verzerren.

Neben dem durch das Flexibilitätsfenster aufgespannten wahrscheinlichen Wertebereich der beiden Portfolio-Größen lassen sich zudem anhand der Position des Erwartungswertes innerhalb des Flexibilitätsfensters Aussagen über die mit dem Rohbaukonzept verbundenen Risiken treffen. Durch die Begrenzung des Flexibilitätsfensters auf einen Teil der Eintrittswahrscheinlichkeit entspricht die Distanz der linken bzw. der oberen Kante des Flexibilitätsfensters zum Erwartungswert der Lieferbereitschaft bzw. der Vergleichstückkosten genau dem Value at Risk, wie er in Abschnitt 5.6.1.3 eingeführt wurde. Es lässt sich somit direkt ein Value at Risk sowohl für die monetäre Größe Vergleichstückkosten als auch für die Lieferbereitschaft ablesen. Das für den Value at Risk gewählte Konfidenzintervall bestimmt dabei die Breite der betrachteten Ausschnitte.

Mit Hilfe des Flexibilitätsfensters kann also ein schneller Vergleich alternativer Konzepte in allen relevanten Dimensionen erfolgen. Es ist daher auch als Unterstützung bei der Entscheidungsfindung hilfreich[437].

5.6.2 Standardablauf zur Optimierung

Wegen der herausragenden Bedeutung der Kapazität für die Investitionskosten eines Automobilrohbaus wird bei der grundlegenden Optimierung eines Rohbaukonzeptes zunächst schwerpunktmäßig die Kapazität betrachtet. Daran schließt sich die Optimierung auch der anderen Parameter an.

5.6.2.1 Schritt 1: Grobe Optimierung der Kapazitäten

Nach der Modellierung der alternativen Rohbaukonzepte und der Marktszenarien werden in einem ersten Schritt noch vor der Simulation und der Auswertung die Kapazitäten der einzelnen Zusammenbauten grob optimiert. Dabei werden zunächst mit Hilfe einer Extremwertuntersuchung offensichtlich nicht sinnvolle Plankapazitäten angepasst.

Dazu werden den Marktszenarien die maximalen und minimalen Kapazitätsbedarfe für die einzelnen Zusammenbauten entnommen und mit den in den vorgeschlagenen Konzeptalternativen vorgesehenen Kapazitäten verglichen. Stellt man bei der Auswertung der Auslastungsverläufe eines beliebigen Produktionssystems beispielsweise fest, dass die Auslastung bei den vorherrschenden Anforderungen in einzelnen Produktionseinheiten, z. B. in einem Zusammenbau einer Rohbaulinie, mit einer Wahrscheinlichkeit von eins über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg deutlich unter der vollen Auslastung von 100 % liegt, so liegt offensichtlich in diesem Fertigungsbereich für die konkrete Produktionsauf-

[437] siehe auch Abschnitt 5.7.1.

gabe eine Überkapazität vor. Da durch die Modellierung der Nachfrage in Form einer Schar von Szenarien der Flexibilitätsbedarf bereits berücksichtigt ist (also Nachfrageszenarien mit Stückzahlen über der Plannachfrage betrachtet werden), kann in diesem Fall bereits hier die Kapazität kleiner dimensioniert werden; damit werden Kosteneinsparungen erzielt.

Allerdings stellt sich die Berechnung der vorhandenen und der Gesamtnachfrage gegenüberzustellenden Gesamtkapazität aus den (vorliegenden) Kapazitäten der einzelnen Zusammenbauten nicht so trivial dar, wie es auf den ersten Blick erscheinen mag. Während es nahe liegt, jeweils die Kapazitäten einer Aufbaustufe über alle Linien zu addieren, ist unklar, wie die Kapazitäten der einzelnen Zusammenbauten im Verhältnis zueinander gewichtet werden sollen. Die Ursache dafür ist, dass wegen der unterschiedlichen Kompetenzen der einzelnen Rohbauten nicht alle Kapazitäten für alle Produkte genutzt werden können. Fallbeispiele zeigen, dass die kumulierten Kapazitäten der Aufbaustufen eines Rohbaukonzeptes nicht für jede Aufbaustufe identisch sein müssen.

Weil außerdem das konkrete Verhalten der Rohbaualternativen bei Eintritt der verschiedenen Marktszenarien noch nicht ermittelt wurde, d. h. die Anpassungspfade noch nicht berechnet wurden, kann die Marktnachfrage zwar der Kapazität des gesamten Produktionssystems, nicht aber unbedingt der Kapazität der einzelnen Zusammenbauten gegenübergestellt werden. Um also keine unzulässigen Veränderungen der Kapazität vorzunehmen, müssen die Anpassungsregeln „auf der sicheren Seite“ sein. Daher können nicht alle Potenziale zur Optimierung ausgeschöpft werden.

Die endgültige Kapazitätsoptimierung wird daher erst nach der Berechnung der Anpassungspfade und der Analyse der Auslastungen der einzelnen Produktionseinheiten über den Lebenszyklus in Schritt 5 vorgenommen.

Ein Vorteil dieser vorgeschlagenen frühen Kapazitätsoptimierung ist, dass durch die Berücksichtigung des konkreten Flexibilitätsbedarfes in Form der abgebildeten Szenarien Sicherheitsreserven entfallen, wie sie bei der Betrachtung eines einzelnen prognostizierten Szenarios unter Umständen vorgehalten werden müssten[438].

Ein weiterer Vorteil ist die Tatsache, dass die Vorgehensweise sehr intuitiv und daher auf hohe Akzeptanz in der Praxis gestoßen ist. Im Wesentlichen bildet sie ein triviales Vorgehen ab, das allerdings bisher wegen des Fehlens expliziter Nachfrageverläufe als Planungsbasis nicht umgesetzt werden konnte. Auch die große zu handhabende Datenmenge war ein Hinderungsgrund für den Einsatz in der Praxis; das im Rahmen des Forschungsprozesses entwickelte IT-Tool beseitigt dieses Hindernis.

[438] Bei der Betrachtung nur eines einzelnen Szenarios wäre die frühe Optimierung der Kapazität nicht möglich, weil die Dimensionierung von Sicherheitsreserven bei der Betrachtung nur eines Szenarios methodisch nicht abgesichert ist.

Exkurs: Nutzung der Kapazität als Entscheidungsindikator

In einigen Situationen, in denen eine extrem schnelle, aber sehr grobe Abschätzung der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Rohbaualternativen gewünscht ist, kann ggf. die Gesamtkapazität als grober Indikator für die Anfangsinvestitionen eines Rohbaukonzeptes herangezogen werden: Sie gibt bereits vor einer Wirtschaftlichkeitsbewertung Aufschluss über die erforderlichen Investitionen. In diesem Fall ist es sinnvoll, die Kapazitätssummen der Aufbaustufen gemäß dem in Abschnitt 2.1.1 festgestellten Investitionsbedarf der einzelnen Aufbaustufen zu gewichten.

5.6.2.2 Schritt 2: Optimierung der Betriebsmodi

Wünschenswert wäre, im nächsten Schritt, der Simulation, mit einem Optimierungstool für jedes betrachtete Zeitintervall den optimalen Anpassungszustand und damit den optimalen Anpassungspfad eines eingegebenen Systems zu berechnen; auf Basis dieser Simulation und sich anschließender Auswertungen könnte das Rohbaukonzept anschließend optimiert werden. Bei Annahme einer realistischen Anzahl von zehn anzupassenden Parametern mit jeweils im Durchschnitt fünf möglichen Zuständen gibt es allerdings für jedes betrachtete Zeitintervall 5^{10} = 9.765.625 = ca. 10^7 mögliche Anpassungszustände. Legt man eine Betrachtungsdauer von 14 Zeitintervallen[439] (bei einer Intervalldauer von einem Jahr entspricht das also ca. zwei Produktlebenszyklen) zugrunde, existieren damit ca. $(10^7)^{14} = 10^{98}$ mögliche Anpassungspfade. Diese Optimierung muss pro betrachteter Produktionssystemalternative für ca. 200 Szenarien[439] vorgenommen werden; es müssen also bei der Optimierung größenordnungsmäßig 10^{100} mögliche Zustände berechnet werden. Diese kurze Betrachtung macht deutlich, dass eine vollständige Optimierung mit heutigen Rechnern nicht möglich ist.

Daher wird in Schritt 2 als Zwischenschritt vor der Simulation, also der Berechnung der Anpassungspfade, zunächst eine Vorauswahl der möglichen Anpassungszustände getroffen. Dazu wird vom Rohbauplaner manuell eine Vorauswahl ca. zehn[439] sinnvoller Parameterkombinationen getroffen; für diese zehn Kombinationen werden nur diejenigen Parameter, in denen sich die Kombinationen unterscheiden, festgelegt, beispielsweise das Schichtmodell. In Abhängigkeit dieser fix ausgewählten Parameterkombinationen ist anschließend für alle möglichen Nachfragekombinationen die optimale Einstellung der jeweils verbleibenden Parameter zu bestimmen. Dazu wird jeweils ein einzelnes Zeitintervall (im Beispiel Rohbau: ein Jahr[439]) bei Annahme einer fixen Nachfragekombination (also z. B. 10.000 Stück von Modell A, 15.000 Stück von Modell B, 45.000 Stück von Modell C) betrachtet; dafür werden die verbleibenden Parameter optimiert. Zielgröße für diese Optimierung sind die bei der Produktion entstehenden laufenden Kosten. Berücksichtigt wer-

[439] Die genannte Beispielzahl hat sich in der Praxis als sinnvoll erwiesen.

den dabei u. a. Synergieeffekte zwischen Linien sowie Produktmix und Ähnlichkeit zu produzierender Produkte.

In Schritt 2 müssen damit (bei zehn betrachteten Parameterkombinationen, neun verbleibenden zu optimierenden Parametern mit jeweils fünf Zuständen sowie einer Betrachtungsdauer von 14 Jahren und 200 Szenarien) $10 \cdot 9 \cdot 5 \cdot 14 \cdot 200 = 1.260.000$ Berechnungen, in Schritt 3 (bei zehn betrachteten Parameterkombinationen, also zehn resultierenden vollständig beschriebenen Anpassungszuständen, sowie einer Betrachtungsdauer von 14 Jahren und 200 Szenarien) $10^{14} \cdot 200 \approx 10^{16}$ Berechnungen durchgeführt werden. Diese Größenordnung ist mit Hilfe geeigneter Verfahren handhabbar.

Der Vorteil des gewählten Verfahrens liegt also in seiner praktischen Durchführbarkeit; allein aus diesem Grund kommt eine vollständige Optimierung nicht in Frage. Der Nachteil des Verfahrens besteht darin, dass keine vollständige analytische, sondern lediglich eine heuristische Optimierung der Anpassungspfade stattfindet. Damit ist nicht garantiert, dass eine optimale Lösung gefunden wird. Die Erfahrungen aus dem Praxiseinsatz zeigen allerdings, dass die bei diesem vereinfachten Verfahren gefundenen Lösungen eine sehr gute Qualität aufweisen.

Als Ergebnis liegen nach Durchführung der beschriebenen Optimierung (Schritt 2) ca. zehn vollständig beschriebene Anpassungszustände vor. Diese Zustände sind die Basis für die Berechnung der möglichen Anpassungspfade im folgenden Schritt 3.

5.6.2.3 Schritt 3: Optimierung der Anpassungspfade über den Lebenszyklus des Produktionssystems

Im nächsten Schritt werden, wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, die möglichen Anpassungspfade berechnet; dabei wird für jedes der betrachteten Zeitintervalle jeweils der optimale der (ca. zehn) möglichen Anpassungszustände ausgewählt. Der für die Auswahl der Anpassungszustände zu nutzende Algorithmus kann dabei je nach Anwendungsfall frei gewählt werden. In der Methodik wurden dazu unterschiedliche Algorithmen implementiert[440], die von einfachen Auswahlregeln bis hin zu einer echten Optimierung reichen.

In Schritt 3 wird also das Verhalten jedes betrachteten Rohbaukonzeptes unter Unsicherheit bestimmt. Als Ergebnis liegen anschließend für jede Produktionssystem-Marktszenario-Kombination komplett beschriebene Anpassungspfade über den gesamten Lebenszyklus vor.

Neben der Kapazität liegen damit auch Kompetenz und Verkettung der betrachteten Rohbaualternativen und damit ihre Flexibilität fest.

---

[440] siehe auch Abschnitt 5.5: Möglich sind einfache Regeln wie „niedrigste Betriebskosten“ oder „Amortisation von Investitionen spätestens nach einem Jahr“, aber auch die globale Optimierung beispielsweise der Vergleichsstückkosten, der Lieferbereitschaft oder des Gewinns über den gesamten Lebenszyklus.

5.6.2.4 Schritt 4: Auswertung

Im nächsten Schritt werden auf Basis dieser berechneten Anpassungspfade die grundlegenden Auswertungen (siehe auch Abschnitt 5.6.1) erstellt. Damit ist ersichtlich, welches Produktionssystemkonzept bei Eintritt eines bestimmten Szenarios bzw. für die Schar aller Szenarien im Durchschnitt wie wirtschaftlich arbeitet. Neben Wirtschaftlichkeitskenngrößen sind auch Nutzengrößen (Lieferbereitschaft) sowie Risiko dargestellt. Außerdem liegen für jedes Konzept maximale und minimale Kenngrößen über alle Szenarien sowie weitere statistische Auswertungen vor. Damit ist die Flexibilität der betrachteten Rohbaukonzepte bewertet.

5.6.2.5 Schritt 5: Detaillierte Optimierung der Kapazitäten

Nach der ersten groben Kapazitätsoptimierung in Schritt 1 sowie Simulation und Auswertung werden im folgenden Schritt 5 der Flexibilitätsoptimierung zunächst die Kapazitäten der einzelnen Zusammenbauten detailliert optimiert. Hierfür werden die berechneten Anpassungspfade zugrunde gelegt. Weil jetzt detailliert feststeht, welcher Teil der in den Marktszenarien abgebildeten Nachfrage in welchem Zusammenbau bedient werden muss, können die Kapazitäten abschließend bestimmt werden. Diesem Optimierungsschritt liegt dieselbe Logik wie Schritt 1 zugrunde.

5.6.2.6 Schritt 6: Weitere Optimierung der Konzeptalternativen

Anschließend erfolgt die weitere Optimierung der Flexibilität der alternativen Produktionssystemkonzepte im Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit. Während bisher das Hauptaugenmerk auf der Optimierung der Kapazität lag, werden in den folgenden Schritten gezielte weitere Optimierungen sowohl der Kapazität als auch der Kompetenz und Verkettung der einzelnen Rohbauten vorgenommen.

Im Rahmen des Forschungsprozesses wurden unterschiedliche Verfahren entwickelt, die Planer und Entscheider dabei unterstützen. Sie sind im folgenden Abschnitt 5.6.3 dargestellt.

5.6.3 Spezifische Optimierungsverfahren

Zweck der im Folgenden vorgestellten Verfahren ist es, aus der Analyse der Konzeptalternativen konkrete Handlungsempfehlungen zur Optimierung der Systeme abzuleiten.

Dazu werden zwei Klassen von Optimierungsverfahren vorgestellt:

- Ziel der Verfahren der ersten Klasse ist es, nach der Simulation des Verhaltens von Produktionssystemen unter Dynamik und Risiko auszuwerten, welche Teile der implementierten Flexibilität in welchem Ausmaß genutzt werden, um daraus mögliche Optimierungen abzuleiten.

Verfahren der ersten Klasse sind die Analyse von Karossenpfaden durch die Produktion (Abschnitt 5.6.3.1) und die Analyse von Anpassungspfaden (Abschnitt 5.6.3.2).

- Ziel der Verfahren der zweiten Klasse ist es, die Modelle der zu bewertenden Produktionssysteme gezielt mit Eingangsdaten zu versorgen, um aus der Reaktion des Systems Rückschlüsse für die Systemoptimierung ziehen zu können. Untersucht wird hier also die Systemantwort im Sinne der Systemtheorie.

  Verfahren der zweiten Klasse sind die theoretischen Standardszenarien (Abschnitt 5.6.3.3) und die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse (Abschnitt 5.6.3.4).

Die Verfahren bieten damit verschiedene Stufen der Unterstützung für verschiedene Anwendungsfälle.

5.6.3.1 Analyse von Karossenpfaden durch die Produktion

Bei der Analyse von Karossenpfaden durch die Produktion wird festgestellt, wie und in welcher Anzahl die verschiedenen Modelle durch den Rohbau laufen.

Dabei lässt sich u. a. feststellen, welche Zusammenbauten schwerpunktmäßig von welchem Modell genutzt werden. Außerdem lässt sich feststellen, welche der erlaubten Pfade durch den Rohbau wie oft genutzt werden.

Diese Auswertungen stellen die Basis für die Anpassung von Kompetenz, Verkettung und Verteilungsregeln dar. Möglicher Nutzen optimierter Kompetenz und optimierter Verteilungsregeln ist einerseits eine dadurch in einigen Zusammenbauten oder im Rohbau insgesamt eventuell mögliche Kapazitätsreduzierung. Die Einschränkung der Kompetenzen eines Zusammenbaus bewirkt andererseits oft eine Kostenreduzierung; geänderte Verkettungen wiederum ermöglichen häufig eine Optimierung der benötigten Kompetenzen.

In einem Praxisbeispiel hat sich z. B. gezeigt, dass eine mögliche Verzweigung und damit ein möglicher Pfad durch den Rohbau nur sehr selten genutzt wurde. Als Folge der Analyse wurde dieser mögliche Pfad gestrichen und dafür die Kapazität des Hauptpfades geringfügig erhöht. Die Einsparungen durch die nicht mehr erforderlichen Kompetenzen für das betrachtete Modell auf dem Nebenpfad überwogen die Zusatzaufwendungen für die Erhöhung der Kapazität auf dem Hauptpfad bei weitem.

5.6.3.2 Analyse von Anpassungspfaden des Produktionssystems

Die erarbeitete Methodik ermöglicht weiterhin die Analyse der generierten Anpassungspfade, die die Reaktion des Systems auf die wechselnden Anforderungen repräsentieren. Dazu werden vom Simulationsmodul Wechselhäufigkeiten protokolliert. Darauf aufbauend kann gezielt analysiert werden, wann, wie häufig und bei welchen Nachfrageszenarien ein Produktionssystem von einem Anpassungszustand in einen anderen wechselt. Ggf. kön-

nen Wechselschemata erkannt werden. Die Anpassungspfadanalyse erfolgt manuell; als Weiterentwicklung der Methodik ist jedoch eine automatisierte Analyse denkbar.

Die Anpassungspfadanalyse hat keine Kennzahlen zum Ergebnis. Sie dient einerseits generell einem besseren Verständnis des Systemverhaltens; andererseits ermöglicht sie ggf. eine gezielte Optimierung des Systems.

In allen Szenarien nicht genutzte Anpassungszustände können beispielsweise ersatzlos gestrichen werden. Die Reduzierung der Anzahl der Anpassungszustände verringert in der Regel die Kosten des Rohbaus.

Im Falle nur selten genutzter Anpassungszustände werden in der Regel diese Anpassungszustände gestrichen und ein neuer Simulationslauf gestartet. In einigen Fällen sinken die Produktionskosten dadurch: In diesen Fällen überwiegt offenbar die Einsparung durch die Reduzierung der Anzahl der Anpassungszustände die Kosteneinsparung, die sich durch optimale Anpassung (d. h. unter Nutzung der ursprünglich vorgesehenen Anpassungszustände) ggü. nicht optimaler Anpassung (d. h. ohne die ursprünglich vorgesehenen Anpassungszustände) ergibt. In den Fällen, in denen die Produktionskosten durch die einfache Streichung eines Anpassungszustandes steigen, muss der Produktionssystemplaner die Anpassungspfade gezielt analysieren und Anpassungen vornehmen. Oft kann hierdurch eine Kostenreduzierung erreicht werden.

Von Zeit zu Zeit lassen sich Muster in den Anpassungspfaden erkennen. Beispielweise wird immer kurz nach einem Wechsel in Anpassungszustand 3 in Anpassungszustand 4 gewechselt. In diesen Fällen macht es häufig Sinn, direkt in den zweiten Anpassungszustand (hier: Zustand 4) zu springen, um mehrmalige Anpassungen zu vermeiden und dadurch Kosten zu sparen. Einerseits lassen sich so durch die Reduzierung der Anzahl der nötigen Anpassungen Kosten sparen; andererseits lässt sich ggf. zusätzlich hierzu der erste Anpassungszustand (im Beispiel: Zustand 3) streichen.

5.6.3.3 Theoretische Standardszenarien

Ein wichtiges Element der Optimierungsmethodik sind die theoretischen Standardszenarien[441]. Sie unterscheiden sich in Struktur und Inhalt nicht von fallspezifischen Szenarien; auch Standardszenarien beschreiben zukünftige zeitliche Verläufe betrachteter Merkmale. Wie Szenarien der anderen beiden Typen auch, können theoretische Standardszenarien beispielsweise, aber nicht nur, zur Modellierung von Stückzahlverläufen eingesetzt werden.

Allerdings ist bei der Modellierung von Merkmalsverläufen in theoretischen Standardszenarien nicht die realistische oder schematische Abbildung in der Praxis auftretender Ver-

[441] vgl. Schuh *et al.*: FlexibilityWindows, 2005, S. 1615.

läufe das Ziel, sondern die zielgerichtete Modellierung charakteristischer Aspekte solcher Verläufe. Durch diese Entkopplung der Modellierung vom tatsächlich vorherrschenden Flexibilitätsbedarf ergibt sich eine erhöhte Gestaltungsfreiheit. So müssen sich Standardszenarien für Stückzahlen weder an Absatzprognosen orientieren, noch müssen sie der Form betriebswirtschaftlicher Produktlebenszyklen folgen. Durch die erhöhte Gestaltungsfreiheit eröffnet sich eine Vielzahl neuer Möglichkeiten, gezielt bestimmte Aspekte des Systemverhaltens zu untersuchen.

Theoretische Standardszenarien sind daher besonders hilfreich, um aus der Systemanalyse konkrete und konstruktive Empfehlungen zur Systemverbesserung abzuleiten. Durch die Anwendung geeigneter theoretischer Standardszenarien könnten dezidierte Aussagen über Teilaspekte der in einem Produktionssystem installierten Flexibilität erarbeitet werden. Mögliche theoretische Standardszenarien sind z. B. linear oder anderweitig steigende oder fallende Absatzzahlen eines Produktes oder saisonal schwankende Absatzverläufe. Eine linear steigende Funktion für den Absatzverlauf kann z. B. genutzt werden, um dasjenige Absatzvolumen, bei dem ein Produktionssystem von einem Anpassungszustand in einen anderen wechselt, zu identifizieren. Eine Schrittfunktion ist hilfreich bei der Untersuchung des Ramp-up-Verhaltens.

Auch die Kombination der Absatzverläufe mehrerer Produkte in einem theoretischen Standardszenario ist möglich. Um diese Idee zu verdeutlichen, sei ein einfaches Beispiel zu Hilfe genommen: Das Produktionsprogramm für den zu optimierenden Rohbau umfasst drei unterschiedliche Baureihen A, B und C. Ein denkbares Standardszenario beschreibt einen schlagartigen Nachfragerückgang um 20 % für Produkt A zum Zeitpunkt t_1, während zeitgleich die Stückzahlen der Produkte B und C um jeweils 10 % ansteigen. Abhängig von der Produktallokation sowie der Verteilung der Kapazitäten innerhalb des betrachteten Rohbaukonzeptes werden die im Laufe der Auswertung ermittelten Kenngrößen wie Auslastungen, Lieferbereitschaft oder Stückkosten Aufschluss über die Fähigkeit des Konzeptes geben, Ausgleichseffekte zu nutzen.

Bereits die Betrachtung dieses sehr einfachen einzelnen Standardszenarios erlaubt erste Aussagen über die Flexibilität untersuchter Produktionssysteme. Betrachtet man beispielhaft ein teilflexibles (das die Produktion der Produkte A und B auf einer Linie vorsieht, für die Produktion von Produkt C jedoch eine eigene Linie vorhält) und ein flexibles Rohbaukonzept (bei dem alle drei Produkte auf einer flexiblen Linie produziert werden), so ist zu erkennen, dass das flexible System die skizzierte Nachfrageveränderung ohne erkennbare Einbußen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit oder Lieferbereitschaft beantworten kann. Das teilflexible System hingegen kann nur der erhöhten Nachfrage nach Produkt B nachkommen; es stehen offensichtlich keine Kapazitäten bereit, um einen Mehrausstoß des Produktes C zu bewerkstelligen.

Untersuchungen mit Hilfe theoretischer Standardszenarien werden im Regelfall nach der grundlegenden Systemanalyse mit prognosebasierten Szenarien oder empirischen Standardszenarien durchgeführt. Einerseits kann dadurch im Falle ähnlicher Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit der untersuchten Systeme z. B. festgestellt werden, welches System robuster gegenüber Flexibilität erfordernden Veränderungen der Eingangsdaten ist; beispielsweise kann untersucht werden, wie nahe die in den prognosebasierten Szenarien auftauchenden Extremwerte der Nachfrage bei Punkten liegen, die einen Wechsel des Systems in einen neuen Anpassungszustand auslösen. Andererseits können gezielt weitere Aspekte von Flexibilität vergleichend untersucht werden.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen kann die Systemflexibilität optimiert werden. Ergeben die Untersuchungen z. B., dass ein Produktionssystem bei Produktionsstückzahlen, die wenig unterhalb der Maximalnachfrage liegen, in einen anderen Anpassungszustand wechselt, so ist es oft sinnvoll, das System so umzugestalten, dass dieser Wechsel des Anpassungszustandes nicht nötig ist (und also die Wechselkosten gespart werden) oder eher erfolgt (und damit das Potenzial auch des zweiten Anpassungszustandes – nämlich ein Betrieb nahe des im jeweiligen Anpassungszustand optimalen Betriebspunktes – besser genutzt wird). Generell lässt sich nach der Analyse mit Hilfe theoretischer Standardszenarien die Frage beantworten, welche Parameter des Produktionssystems vordringlich geändert werden sollen: nämlich diejenigen, die in der Nähe kritischer Punkte liegen.

Theoretische Standardszenarien zur Analyse von Flexibilität als systemintrinsischer Eigenschaft

Neben der Nutzung zur Optimierung von Produktionssystemkonzepten durch Anwendung nach der Analyse mit prognosebasierten Szenarien oder empirischen Standardszenarien können theoretische Standardszenarien auch zur eigenständigen Analyse von Produktionssystemkonzepten genutzt werden.

Wie schon im Abschnitt 5.2.2 „Empirische Standardszenarien“ beschrieben, kann die Erhebung der für die Generierung prognosebasierter Szenarien erforderlichen Daten unter Umständen mühsam, im Aufwand dem Zweck und der Zielsetzung der Bewertung bzw. Optimierung nicht angemessen oder aufgrund eines sehr frühen Planungszeitpunktes auch einfach nicht möglich sein. In solchen Fällen sollte zunächst versucht werden, die Nachfrage durch empirische Standardszenarien zu modellieren.

In manchen Fällen fehlen jedoch auch dafür die Eingangsdaten, weil z. B. zum Planungszeitpunkt noch nicht feststeht, aus welchen Typen welcher Modellgruppen das zu produzierende Produktspektrum bestehen wird. Zudem sind Erhebung und Formalisierung durch die Modellierung mit Hilfe von Szenarien eines im Anwendungsfall konkret vorherrschenden Flexibilitätsbedarfs nur dann sinnvoll, wenn sich dadurch eine erhöhte Ergebnisqualität ergibt.

In diesen beiden Fällen können anstelle der aus den konkreten Anforderungen abgeleiteten Szenarien Standardszenarien eingesetzt werden, die Flexibilitätsforderungen unabhängig vom fallspezifischen Flexibilitätsbedarf modellieren. Mit einer endlichen Anzahl fixer, präzise definierter Szenarien, von denen jedes einzelne Szenario alleine oder in Kombination mit anderen einzelne Effekte und Auswirkungen produktionswirtschaftlicher Flexibilität untersucht, kann man so die Flexibilität eines Produktionssystems umfassend untersuchen.

Mit der hier beschriebenen Nutzung theoretischer Standardszenarien ist ein Verfahren aufgezeigt, das sich einerseits der Struktur und des Ansatzes der entwickelten Optimierungsmethodik bedient; andererseits ermöglicht es jedoch die Bestimmung von Flexibilität als einer systemintrinsischen Eigenschaft und damit unabhängig von der Verfügbarkeit von Informationen über den Absatzmarkt. Dabei entfällt zudem der Aufwand, die externen Anforderungen in Szenarien abzubilden[442].

5.6.3.4 Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse

„Cynics say that models can be made to conclude anything provided that suitable assumptions are fed into them.“ [443]
THE ECONOMIST (1998)

Die Nutzbarkeit der in den Simulationsläufen erzeugten und für die Bewertung und Optimierung verwendeten Daten hängt wesentlich von ihrer Qualität ab. Diese ist im Wesentlichen von der Güte des verwendeten Modells sowie von der Qualität der Eingangsdaten abhängig. Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, ist ein Nutzen der vorgestellten Methodik, die bei der vorliegenden Aufgabenstellung zwangsläufige Datenunsicherheit zu berücksichtigen und trotz ihrer aussagekräftige und sinnvoll nutzbare Ergebnisse zu liefern. Weil also zum Anwendungszeitpunkt der Methodik sowohl die verfügbaren Eingangsdaten als auch die zur Modellierung der Konzeptalternativen verwendeten Daten unsicher bzw. ungenau sind (vgl. Abschnitt 2.1.1.5), kommt der Abschätzung der Ergebnisqualität sowie der Aufklärung über Unsicherheiten im Ergebnis besondere Bedeutung zu[444].

Während sich zur Analyse der Auswirkungen von Änderungen von Modellparametern die Sensitivitätsanalyse eignet, ist zur Analyse der Auswirkungen von Änderungen externer Parameter neben der Abschätzung der Auswirkungen von Änderungen der Eingangspa-

---

[442] An Stelle dessen kann allerdings die Festlegung von Gewichtungsfaktoren treten, um einzelne Aspekte produktionswirtschaftlicher Flexibilität gezielt gewichtet zu bewerten (vgl. Abschnitt 5.7.2).

[443] N. N.: More Fall-out from Chernobyl, 1998.

[444] vgl. auch Chapman, Ward: Managing Project Risk and Uncertainty, 2002, S. 31f.

rameter durch die Untersuchung geeigneter theoretischer Standardszenarien (siehe Abschnitt 5.6.3.3) insbesondere die Unsicherheitsanalyse geeignet[445].

Es existieren zahlreiche Verfahren zur Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse. Meist werden dazu bei wiederholter Durchführung der Modellrechnung Eingangsparameter gezielt[446] verändert. Durch diese Veränderung von Eingangsparametern wird die Auswirkung dieser Veränderungen auf die Ausgangsparameter untersucht. Insbesondere bei nicht verfügbarer Wahrscheinlichkeitsverteilung geschieht dies häufig nach dem Prinzip von Versuch und Irrtum, bringt dann aber einen großen Aufwand mit sich. Besser geeignet ist ein methodisches Vorgehen[447]. So erlaubt das mathematisch fundierte Verfahren der statistischen Versuchsplanung, die Anzahl der Experimente, die zur Klärung einer gezielten Frage notwendig sind, deutlich zu reduzieren[448]. Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse werden in der Regel gemeinsam durchgeführt[449].

Anwendung

Bei der Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse werden einzelne Eingangsgrößen oder Parameter zielgerichtet verändert, während andere gleich bleiben. Die sich ergebenden Veränderungen an den Ausgangsgrößen und Kennzahlen können so eindeutig auf die veränderten Größen zurückgeführt werden.

Bei der Anwendung im Rahmen der vorgestellten Optimierungsmethodik wird z. B. die Sensitivität der Stückkosten in Bezug auf Nachfrageveränderungen oder Nachfrageverschiebungen zwischen Modellen analysiert. Wenn ein Produktionssystemkonzept sensibel auf eine Nachfrageveränderung bei Modellen, deren Absatzverläufe mit großer Unsicherheit behaftet sind, reagiert, ist ggf. eine Änderung des Konzeptes sinnvoll.

Häufig ist es sinnvoll, die Wirtschaftlichkeit eines Produktionssystems unter Unsicherheit der Wirtschaftlichkeit desselben Systems bei geringer Unsicherheit gegenüberzustellen. Dazu wird das Systemverhalten zunächst mit Hilfe einer großen Schar möglicher Szenarien mit dementsprechend geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten, anschließend bei sicherem Eintritt genau eines Szenarios untersucht. Die Unterschiede in der Wirtschaftlichkeit des Systems erlauben Rückschlüsse auf die Auswirkungen von Unsicherheiten.

Nutzen

Der Nutzen der Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse ist also die Identifizierung derjenigen Parameter des Produktionssystems, auf die Unsicherheiten große, ggf. die Wirtschaft-

---

[445] vgl. Bean: Probability, 2000, S. 131.

[446] falls sie bekannt ist, häufig gemäß einer gegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung

[447] Warnecke: Betriebshütte, 1996, S. 9-29.

[448] vgl. Kleijnen: Statistical Tools for Simulation Practitioners, 1987.

[449] vgl. Saltelli *et al.*: Sensitivity Analysis in Practice, 2004, S. 52.

lichkeit des Systems negativ beeinflussende Auswirkungen haben und die also verändert werden müssen, um die Wirtschaftlichkeit des Systems zu steigern. Weiterhin gibt die Auswertung der durch die Analyse gewonnenen Daten Aufschluss darüber, wie die identifizierten Parameter geändert werden sollten.

Ein weiterer Zweck der Anwendung dieser Analyseverfahren ist es, die vorhandenen Informationen dazu zu nutzen, das Vertrauen in die Eingangsdaten und das Modell zu quantifizieren[450]. Der Zweck ist *nicht*, die Unsicherheit zu *reduzieren* – die Verringerung von Unsicherheit ist prinzipiell nur durch zusätzliche Information möglich[451]. Obwohl die Anwendbarkeit eines Modells durch die Modellannahmen und die Unsicherheit in den Eingangsdaten begrenzt ist, ist es hilfreich, diese Einschränkungen zu verstehen, statt sie zu ignorieren. Insbesondere bei Anwendungen, bei denen die Datenverfügbarkeit und -qualität eingeschränkt ist und bei denen eine Vielzahl einschränkender Annahmen zugrunde gelegt wird, spielt die Unsicherheitsanalyse eine wichtige Rolle bei der Beantwortung der Frage, wie robust die gezogenen Schlüsse sind – und dabei, ggf. zusätzliche Datenbedarfe identifizieren und zu konkretisieren[452].

5.7 Ergebnisaufbereitung zur Entscheidungsunterstützung

„ In zweifelhaften Fällen entscheide man sich für das Richtige.“
KARL KRAUS, Schriftsteller (1874-1936)

An den Prozess der Optimierung unterschiedlicher Produktionssystemalternativen schließt sich die Auswahl der zu implementierenden Alternative an. Grundlage für diese Auswahl bildet eine Bewertung der möglichen Systeme. Dafür werden alle in den vorhergehenden Abschnitten vorgestellten Auswertungen verwendet; auch die bisher für die Optimierung genutzten Auswertungen können zur Entscheidungsfindung genutzt werden. Neben den Auswertungsdaten müssen auch Unternehmenspräferenzen und strategische Vorgaben des Managements zur Entscheidungsfindung herangezogen werden.

Auf die in den vorhergehenden Abschnitten dieses Kapitels dargestellten Schritte und insbesondere auf die im Abschnitt „Produktionssystemoptimierung“ (5.6) beschriebenen Auswertungen soll hier nicht noch einmal eingegangen werden. Es folgen jedoch einige vertiefende Erläuterungen zur Entscheidungsfindung mit Hilfe des Flexibilitätsfensters, insbesondere bei indifferenten Entscheidungssituationen, sowie zur Berücksichtigung von Unternehmenspräferenzen und strategischen Vorgaben im Entscheidungsprozess.

---

[450] vgl. Saltelli *et al.*: Handbook of Sensitivity Analysis, 2000, S. 55.
[451] vgl. Morgan, Henrion: Uncertainty, 1992, S. 22.
[452] vgl. Frey: Quantitative Analysis of Uncertainty and Variability, 1992.

5.7.1 Entscheidungsfindung mit dem Flexibilitätsfenster

Neben der Nutzung zur heuristischen Optimierung eines Produktionssystems ist auch die Unterstützung des Entscheidungsprozesses bei der Auswahl alternativer Rohbaukonzepte Zielsetzung bei der Entwicklung des Flexibilitätsfensters (siehe Abschnitt 5.6.1.4) gewesen.

Zur Entscheidungsfindung werden die Flexibilitätsfenster zweier oder mehrerer Investitionsalternativen in die Portfoliodarstellung eingetragen und verglichen. Neben dem Vergleich von Konzeptalternativen ist dabei auch der Abgleich eines Produktionssystems mit einem von Zielgrößen aufgespannten Flexibilitätsfenster möglich. Ein solches wird auf der einen Seite von den Ziel-Vergleichsstückkosten und einer zu erfüllenden Lieferbereitschaft als Mindestanforderungen begrenzt, während es auf der anderen Seite offen ist beziehungsweise von der 100 %-Lieferbereitschaftslinie eingerahmt wird. Liegt das betrachtete Produktionssystem innerhalb dieses Vergleichsfensters, so entspricht es den Anforderungen, andernfalls muss das Konzept überarbeitet werden.

5.7.1.1 Indifferente Entscheidungssituationen

Ist beim Vergleich zweier Produktionssysteme mit Hilfe der Darstellung ihrer Flexibilitätsfenster eine Entscheidung auf den ersten Blick nicht eindeutig, müssen Entscheidungshilfen diese indifferente Situation klären helfen.

Geht man zunächst nur von den Erwartungswerten zweier zu vergleichender Produktionssysteme aus, so ist exemplarisch die Situation denkbar, dass das eine System die niedrigeren Stückkosten bietet, während das andere System eine höhere Lieferbereitschaft aufweist. In diesem Fall gilt es, eine Präferenz zu suchen. Hierzu müssen die Leistungskennzahl Lieferbereitschaft und die monetäre Bewertungsgröße Stückkosten zu einer Zielgröße zusammengeführt werden.

Ein Ansatz, der dies ermöglicht, ist die Methode der so genannten Opportunitätskosten. Unter Opportunitätskosten versteht man in den Wirtschaftswissenschaften Kosten, die dadurch entstehen, dass Möglichkeiten (Opportunitäten) zur maximalen Nutzung von Ressourcen nicht wahrgenommen werden. Opportunitätskosten sind keine Kosten im Sinne der Kosten- und Leistungsrechnung, sondern ein ökonomisches Konstrukt zur Quantifizierung entgangener Alternativen[453].

Im Fall entgangener Produktionsstückzahlen aufgrund zu geringer Kapazitäten würde jedes nachgefragte, aber nicht herzustellende Produkt mit Opportunitätskosten belegt. Die Höhe der festgelegten Opportunitätskosten spiegelt die Lieferbereitschaft/Kosten-Präferenz wider und stellt damit die Gewichtung der beiden Ziele Lieferbereitschaft und

[453] vgl. N. N.: Gabler Wirtschaftslexikon, 1997, S. 2862.

Stückkosten gegeneinander dar. Sie soll hier nicht weiter beschrieben werden; zum Thema der Gewichtung unterschiedlicher Ziele von Flexibilität bzw. Produktionssystemen allgemein sei jedoch auf den folgenden Abschnitt 5.7.2 verwiesen. Beispielsweise können der potenzielle Ertrag, aber auch der beim Verkauf potenziell erzielte Gewinn eines der nicht verkauften Produkte als Opportunitätskosten angenommen werden.

Für die Nutzung der Opportunitätskosten als Entscheidungskriterium muss die Lieferbereitschaft zunächst über den Faktor der Gesamtnachfrage über den betrachteten Zeitraum in eine Stückzahl des entgangenen Produktionsvolumens konvertiert und dann mit den Opportunitätskosten pro entgangenem Verkauf multipliziert werden, um die Summe der Opportunitätskosten zu bestimmen.

Mit Hilfe der festgelegten Opportunitätskosten lässt sich für jeden Punkt im Portfolio der net present value (NPV) berechnen. Trägt man zur Veranschaulichung der Präferenz jeweils Punkte gleichen NPVs auf, so ergeben sich so genannte Iso-NPV-Linien (vgl. Abbildung 5-7). Gemäß der durch die Festlegung der Opportunitätskosten getroffenen Gewichtung haben dann alle Erwartungswerte links unterhalb einer Iso-NPV-Linie einen besseren, alle Werte rechts oberhalb dieser Linie einen schlechteren NPV.

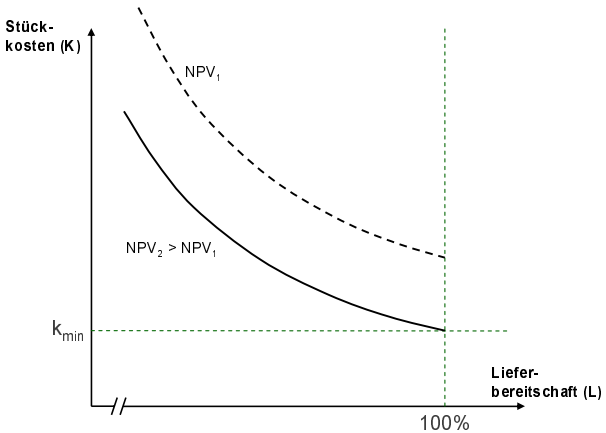


Abbildung 5-7: Beispiele für ISO-NPV-Linien im Flexibilitätsfenster

Eine generelle Verdichtung der Information aus Stückkosten und Lieferbereitschaft zur Darstellung der Bewertungsergebnisse in nur einer Kennzahl stellte nach Auffassung des Autors eine unzulässige Vereinfachung der komplexen Zusammenhänge flexibler Fertigungskonzepte dar und sollte daher nicht verwendet werden (vgl. auch Abschnitt 3.1.2).

Neben der beschriebenen Indifferenzsituation, die die Abwägung von Kostenvorteilen gegenüber einer erhöhten Lieferbereitschaft notwendig macht, sind indifferente Entschei-

dungssituationen möglich, bei denen der Vorteilhaftigkeit der Erwartungswerte einer Alternative ein höheres Risiko entgegensteht. In diesem Falle ist die Risikopräferenz des Entscheidungstragenden ausschlaggebend. Die Entscheidungstheorie bietet hier etablierte Verfahren für Entscheidungen unter Risiko (nachzulesen zum Beispiel bei MAG[454] oder DOMSCHKE UND SCHOLL[455]). Hier sei einerseits auf diese Verfahren sowie andererseits auf den folgenden Abschnitt 5.7.2 verwiesen.

5.7.2 Nutzwertanalyse

Wie in Abschnitt 3.1.2 hergeleitet, müssen Unternehmenspräferenzen und strategische Vorgaben, insbesondere die im Modul *Externe Forderungen* abgebildeten unternehmensstrategiebezogenen Forderungen (vgl. Abschnitt 5.1.2), im Entscheidungsprozess berücksichtigt werden. Dazu gehören beispielsweise

- die konkurrierenden Forderungen an Produktionssysteme nach Wiendahl (vgl. Abschnitt 2.2.3),
- die generelle Bewertung der Wichtigkeit von Flexibilität im Unternehmen sowie
- die Risikopräferenz des Unternehmens.

Einerseits können diese Präferenzen bei einer manuellen Entscheidung auf Basis der oben vorgestellten Auswertungen berücksichtigt werden. Beispielsweise das Flexibilitätsfenster schafft dazu die Voraussetzungen, indem es neben den Zielgrößen Lieferbereitschaft und Kosten auch das Risiko, das unterschiedliche Produktionssystemkonzepte bergen, darstellt.

Die im Rahmen des beschriebenen Forschungsprozesses entwickelte Methodik bietet allerdings die Möglichkeit, den Entscheidungsprozess durch eine teilweise Automatisierung noch einen Schritt weiter zu unterstützen.

Der verwendete Ansatz der Multi-Szenario-Technik erlaubt es, eine Vielzahl von Szenarien zu betrachten und deren Auswirkungen auf ein Produktionssystem zu untersuchen. Davon wurde bereits zur Abbildung und Analyse von Unsicherheit und Risiko Gebrauch gemacht. Für die Berücksichtigung unternehmensstrategiebezogener Forderungen im Entscheidungsprozess in es nun naheliegend, nicht nur einen Satz (prognosebasierter) Szenarien, wie zuvor diskutiert, zu untersuchen, sondern einen *Satz von Szenariosätzen* zu untersuchen. Alternativ oder ergänzend dazu kann auch eine zusätzliche Untersuchung mit einem Satz von Standardszenarien oder -sätzen vorgenommen werden. Um aus der möglichen Vielzahl der dabei erzielten Auswertungen gezielte Informationen für bestimmte Fragestel-

[454] vgl. Mag: Grundzüge der Entscheidungstheorie, 1990, S. 46ff.
[455] vgl. Domschke, Scholl: Betriebswirtschaftslehre, 2003, S. 50ff.

lungen zu erhalten, können die einzelnen Auswertungen unter Zuhilfenahme etablierter Methoden der multikriteriellen Bewertung entsprechend der unternehmensstrategiebezogenen Forderungen gewichtet und verdichtet werden.

Zum Beispiel in Anlehnung an die Methode der Nutzwertanalyse[456] bilden dabei die betrachteten einzelnen oder Gruppen von Szenarien jeweils das Bewertungskriterium, die dazugehörigen Ergebnisse der Auswertung den Erfüllungsgrad und die alternativen Produktionssysteme die Bewertungsobjekte. Die einzelnen Gewichtungsfaktoren drücken dabei die Unternehmenspräferenzen aus[457].

Bessere Ergebnisse als die Nutzwertanalyse liefert der von SAATY entwickelte Analytic Hierarchy Process (AHP)[458]. Der AHP ist im Vergleich zur Nutzwertanalyse präziser, aber auch mathematisch anspruchsvoller: Die Methode des AHP basiert mathematisch auf einer Kette von Matrizen-Multiplikationen; die Nutzwertanalyse ist lediglich ein additives Näherungsverfahren. Abgesehen von einer breiteren Bewertungsskala überprüft der AHP im Gegensatz zur Nutzwertanalyse auch Logik und Qualität einer Entscheidung. Aus den nicht vermeidbaren Widersprüchen aller paarweisen Vergleiche bzw. aus deren subjektiven Bewertungen werden durch eine „unnötige Überbestimmung" der sogenannte Inkonsistenzfaktor und die Stabilität des Rankings aller Alternativen ermittelt[459].

Bei Anwendung einer der beiden Verfahren werden also gezielt Sätze von Szenarien untersucht, die bestimmte Herausforderungen für Produktionssysteme abbilden. Die Wirtschaftlichkeit der zu bewertenden Produktionssysteme bei Eintritt verschiedener Sätze von Herausforderungen wird bewertet und fließt, gewichtet nach der Bedeutung der bewerteten Herausforderung, in ein Gesamtergebnis ein[460].

Neben Sätzen empirischer sowie theoretischer Standardszenarien (siehe auch Abschnitt 5.2) wurden auch Schemata von Gewichtungsfaktoren für die Nutzwertanalyse erarbeitet, die für unterschiedliche Anwender und Anwendungsfälle gezielt die maßgeblichen Simulationsergebnisse der einzelnen Szenarien(sätze) hervorheben. Neben den bereits oben erwähnten unternehmensstrategiebezogenen Forderungen können dabei weitere strategische Festlegungen, wie beispielsweise Zielgruppe und Produktstrategie des Unternehmens (z. B. Premiumautos oder Autos für den Massenmarkt) sowie Absatzmarkt (z. B. Deutschland, U.S.A. oder China), berücksichtigt werden.

---

[456] vgl. Zangemeister: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik, 1970, S. 45ff.

[457] Die im vorhergehenden Abschnitt 5.7.1 beschriebene Entscheidungsfindung mit dem Flexibilitätsfenster verwendet für indifferente Entscheidungssituationen das gleiche Prinzip: Durch einen Gewichtungsfaktor (ausgedrückt in den Opportunitätskosten) wird der Vergleich alternativer Systeme gesteuert.

[458] vgl. Saaty: Multicriteria Decision Making, 1990.

[459] vgl. Golden *et al.*: The Analytic Hierarchy Process, 1989.

[460] vgl. auch Schaefer: System zur Planung und Nutzung der Flexibilität in der Fertigung, 1980, S. 120ff.

Trotz dieser teilweisen Automatisierung von Teilen des Auswahlprozesses liegt die endgültige Entscheidung nach wie vor bei den Planern und Entscheidern.

5.7.3 Stresstests

Zusätzlich zu den geschilderten Analyse- und Optimierungsverfahren ist es möglich, das Produktionssystem Stresstests zu unterziehen, beispielsweise durch Simulation des Ausfalls einer bestimmten Produktionseinheit. In diesem Fall gibt das hierdurch entgangene Produktionsvolumen Auskunft darüber, inwieweit die vorhandene Systemflexibilität es ermöglicht, den Materialfluss auf alternativen Routen zu führen.

Stresstests lagen bei der Entwicklung der Methodik nicht im Fokus. Die Praxiserfahrung hat allerdings gezeigt, dass sie in einigen Fällen, insbesondere in indifferenten Entscheidungssituationen, hilfreich sind.

5.8 Zusammenfassende Darstellung der Methodik

Die Struktur der als Antwort auf die grundlegende Forschungsfrage entwickelten Methodik zur Optimierung der Flexibilität von Rohbaukonzepten ist in Abbildung 5-8 nochmals gezeigt. Die einzelnen Module sind jeweils stichpunktartig charakterisiert.

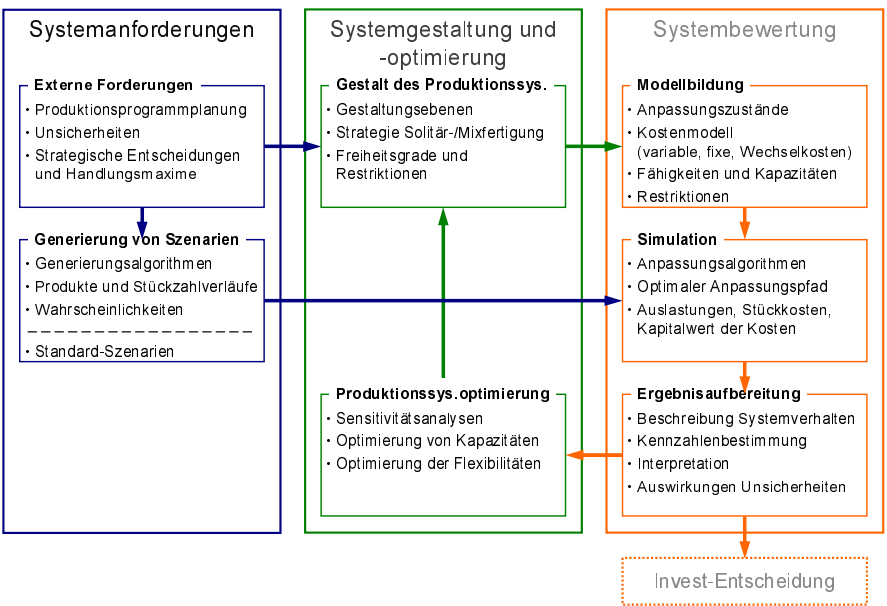


Abbildung 5-8: Methodik zur Flexibilitätsoptimierung von Rohbaukonzepten

Die Flexibilitätsoptimierung beginnt mit der Erhebung der relevanten Systemanforderungen. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Informationen über das geplante Produktionsprogramm und Unsicherheiten der Absatzplanung sowie Unternehmenspräferenzen und strategische Vorgaben des Managements. Im nächsten Schritt werden die erhobenen Anforderungen modelliert. Absatzerwartungen werden dabei in Form von Szenarien hinterlegt; je nach Anwendungszweck werden dafür prognosebasierte oder (empirische oder theoretische) Standardszenarien verwendet. Unsicherheit wird durch die Hinterlegung einer Schar von mit Eintrittswahrscheinlichkeiten behafteten Szenarien abgebildet.

An die Erhebung und Modellierung der Systemanforderungen schließt sich die Entwicklung möglicher Produktionssystemkonzepte durch Planer an. Diese Entwicklung wird von der entwickelten Methodik nicht unterstützt; mögliche Systemkonzepte sind vielmehr Eingangsdaten für die Methodik. Das Modul *Gestalt des Produktionssystems* hat einen ausschließlich qualitativ beschreibenden Charakter; es dient der gezielten Erhebung erforderlicher Informationen über den Betrachtungsgegenstand. Hierbei sind insbesondere solche Aspekte des Produktionssystems zu beschreiben, die maßgeblichen Einfluss auf die Flexibilität des Systems haben.

Im Rahmen der Produktionssystembewertung erfolgt zunächst die Modellierung aller relevanten Eigenschaften des Produktionssystems. Grundsätzlich beschreibt das hier zu erstellende Modell die Fähigkeiten, Kapazitäten und Kosten des Produktionssystems. Die Flexibilität von Rohbaukonzepten ist maßgeblich durch die Gestaltungsmerkmale Produktallokation, Wiederverwendungsgrad von Anlagen sowie Verteilung von Kapazitäten auf die einzelnen Produktionseinheiten bestimmt. In diesem Schritt werden auch die erlaubten Anpassungszustände des Systems festgelegt.

An die Modellierung schließt sich die Simulation an. Hier wird das Verhalten der zu optimierenden Produktionssystemmodelle bei Annahme des Eintritts unterschiedlicher Szenarien ermittelt. Dazu wird auf Basis wählbarer Anpassungsregeln ermittelt, welche Folge von Anpassungszuständen das Produktionssystem bei Eintritt eines bestimmten Szenarios durchläuft. Auf Basis der so ermittelten Anpassungspfade werden über den Lebenszyklus des Produktionssystems Kenngrößen ermittelt und protokolliert; u. a. werden dabei produzierte Einheiten (und entgangene Produktion) sowie entstehende Kosten (Initialinvestitions-, Wechsel- und Betriebskosten) festgehalten. Diese Simulation wird nacheinander für alle Szenarien der Schar durchgeführt. Dadurch erhält man eine Wahrscheinlichkeitsverteilung aller Kenngrößen, die die Grundlage für alle weiteren Auswertungen sowie die sich anschließende Optimierung des Produktionssystems bildet.

An die Simulation schließt sich die Optimierung der Produktionssystemkonzepte an. Ziel dieses Schrittes der Optimierungsmethodik ist es, auf Basis einer fundierten Analyse von Betriebsverhalten und Wirtschaftlichkeit der betrachteten Produktionssystemalternativen im unsicheren Umfeld eine Synthese zu ermöglichen; Planer und Entscheider sollen bei

der gezielten (heuristischen) Verbesserung der analysierten Alternativen unterstützt werden. Dazu müssen die wenigen relevanten Parameter in den drei identifizierten Kern-Entscheidungsdimensionen optimal festgelegt werden. Die Optimierungsmethodik leistet dabei Hilfestellung durch Identifikation der *wesentlichen* Stellschrauben sowie der Stellrichtung in einem konkreten Fall. Die aus der Auswertung und Verdichtung der über den Lebenszyklus des Produktionssystems sowie über die Gesamtheit eines Szenariensatzes ermittelten Kenngrößen resultierenden Ergebnisse werden dabei im Sinne einer Zielfunktion für die Optimierung genutzt.

Die Optimierung der Rohbaukonzepte erfolgt in den grundlegenden Schritten:

- grobe Optimierung der Kapazitäten der einzelnen Zusammenbauten,
- Optimierung der Betriebsmodi des Rohbaus,
- Ermittlung optimaler Anpassungspfade über den Lebenszyklus des Rohbaus,
- Auswertung aller relevanten Kenngrößen sowie
- detaillierte Optimierung der Kapazitäten der Zusammenbauten.

Insbesondere die Ergebnisaufbereitung nimmt eine wichtige Rolle innerhalb des Optimierungsvorgehens ein. Hier werden nach der groben Kapazitätsoptimierung sowie der Optimierung der Betriebsmodi und Anpassungspfade alle für die detaillierte Optimierung des Produktionssystems nötigen Auswertungen, im Wesentlichen eine Kapazitäts-, eine monetäre und eine Risikoauswertung, erstellt. Die Ausarbeitung geeigneter Auswertungen war daher ein wichtiger Baustein bei der Entwicklung der Optimierungsmethodik. Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere Lieferbereitschaft sowie Vergleichsstückkosten wesentliche Zielgrößen sind und ihre gemeinsame Darstellung die geforderte Gegenüberstellung von Nutzen und Aufwand einer erhöhten produktionswirtschaftlichen Flexibilität ermöglicht. Um zusätzlich die durch Planungsunsicherheiten verursachten Risiken abzubilden, wurde das Flexibilitätsfenster entwickelt.

An die grundlegenden fünf Optimierungsschritte schließt sich die weitere Optimierung der Konzeptalternativen durch spezifische Optimierungsverfahren an. Im Rahmen des Forschungsprozesses wurden für die detaillierte Optimierung von Automobilrohbauten folgende Verfahren entwickelt bzw. aufbereitet:

- die Analyse von Karossenpfaden durch die Produktion,
- die Analyse von Anpassungspfaden des Produktionssystems über seinen Lebenszyklus,
- theoretische Standardszenarien sowie
- Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen.

Nach der Optimierung unterschiedlicher Produktionssystemalternativen folgt die Auswahl der zu implementierenden Alternative. Grundlage für diese Auswahl bildet eine Bewertung der möglichen Systeme. Dafür werden alle bereits für die Optimierung erstellten Auswertungen genutzt; insbesondere ist hier das Flexibilitätsfenster hilfreich. Neben diesen Auswertungsdaten müssen auch Unternehmenspräferenzen und strategische Vorgaben des Managements zur Entscheidungsfindung herangezogen werden. Zur Abbildung solcher Kriterien sind Verfahren wie die Nutzwertanalyse oder der Analytic Hierarchy Process geeignet. Im Falle indifferenter Entscheidungssituationen wird eine Entscheidung mit Hilfe einer Bewertung der Opportunitätskosten herbeigeführt. Die letztendliche Entscheidung über die Umsetzung eines Produktionssystemkonzeptes muss jedoch immer der Anwender treffen.

Damit sind die theoretischen Grundlagen der Optimierungsmethodik dargestellt. Wegen der Komplexität und der zu bewältigenden Datenmengen sowie des Anspruchs einer praxisnahen Lösung wurde der Kern der entwickelten Methodik in einem IT-Tool implementiert. Die Umsetzung wird exemplarisch bei der Validierung anhand eines Fallbeispieles im folgenden Kapitel gezeigt.

6 Anwendung und kritische Reflexion

Einer der wesentlichen Ansprüche eines Forschungsprozesses ist es, mit den erzielten Ergebnissen eine bessere Beherrschung der Realität zu erreichen[461]. Nach ULRICH beginnt und endet ein Forschungsprozess daher im Anwendungszusammenhang[462]; aber auch im Verlauf dieses Prozesses werden durch Fragen an die Realität und die Aufarbeitung des dabei gewonnenen Erfahrungswissens neue Fragen generiert und damit neue Erkenntnisse gewonnen[463].

Gemäß der Forderung ULRICHs wurden im dargelegten Forschungsprozess erfolgversprechende Lösungsansätze direkt in der Praxis angewendet, gewissenhaft geprüft und auf dieser Basis weiterentwickelt; den vorläufigen Abschluss des Forschungsprozesses stellt die Validierung der entwickelten Methodik dar. Als Validierung wird häufig der Nachweis bezeichnet, dass ein abstraktes Modell hinreichend genau das reale System repräsentiert; nach ISO 9000 ist Validierung allgemeiner definiert als die

> *„Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderungen für einen spezifischen beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind“*[464].

Um diesen Nachweis für die dargestellte Methodik zur Optimierung der Flexibilität von Rohbaukonzepten zu erbringen, wird im folgenden Kapitel an Hand eines detaillierten Fallbeispiels die Prüfung der Methodik im Anwendungszusammenhang dargestellt. Das Fallbeispiel wurde so gewählt, dass die untersuchten Alternativen die gesamte Bandbreite flexibler Rohbaukonzepte aufzeigen.

Die Darstellung der Prüfung der Methodik im Anwendungszusammenhang ist in vier Abschnitte unterteilt: Zunächst wird die Aufgabenstellung geschildert (Abschnitt 6.1). Anschließend wird das Vorgehen bei der Anwendung der Methodik von der Modellierung des Flexibilitätsbedarfs bis zur Ergebnisaufbereitung und Auswahl des zu implementierenden Rohbaukonzeptes dargestellt; dabei werden auch die Ergebnisse der jeweiligen Anwendungsschritte präsentiert (Abschnitt 6.2). Danach erfolgt eine Bewertung des Einsatzes der Methodik im Anwendungszusammenhang (Abschnitt 6.3); dafür werden die in Kapitel 3 erarbeiteten Kriterien zugrunde gelegt. Den Abschluss der Bewertung bildet eine kritische Reflexion der Methodik in Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit.

---

[461] vgl. Kubicek: Heuristische Bezugsrahmen, 1977, S. 7, sowie die Ausführungen in Abschnitt 1.4.

[462] vgl. Ulrich: Betriebswirtschaftslehre, 1984, S. 192, sowie Ulrich: Management, 1984, S. 175 und S. 179. Ulrich schreibt dort: „Die empirische Forschung dient in den Grundlagenwissenschaften der Prüfung von Hypothesen, in den angewandten Wissenschaften der Erfassung typischer Probleme der Praxis und der Prüfung der von ihr entwickelten Gestaltungsmodelle im Anwendungszusammenhang.“

[463] vgl. Kubicek: Heuristische Bezugsrahmen, 1977, S. 14.

[464] Aus dem Englischen übertragen aus N. N.: ISO 9000 - Quality Management, 2003, S. 22.

6.1 Aufgabenstellung

Das vorliegende Fallbeispiel wurde in Zusammenarbeit mit einem renommierten Automobilhersteller erstellt. Für die Validierung der Optimierungsmethodik wurde ein reales Anwendungsbeispiel am größten Produktionsstandort des Herstellers ausgewählt. Aufgrund der Sensibilität der Daten und der zugesicherten Vertraulichkeit wurden für die Darstellung in der vorliegenden Arbeit alle Daten so variiert, dass keine Rückschlüsse auf reale Zahlen möglich sind.

Aufgabe war die Neuplanung eines Rohbaus für die kommende Generation zweier wichtiger Baureihen einer der Hauptmarken des Herstellers. In der Grobplanungsphase wurden mehrere Rohbaukonzepte entworfen und davon schließlich fünf einer genaueren Untersuchung und Optimierung unterzogen. Die Konzepte unterscheiden sich dabei sowohl in der Linienstruktur und den grundsätzlichen und möglichen Kapazitätsverteilungen als auch im sogenannten Verblockungsgrad der einzelnen Modelle, also ihrer Produktmixflexibilität. Zur Unterstützung einer optimalen Investitionsentscheidung sollten die fünf Konzepte mit Hilfe der entwickelten Methodik hinsichtlich ihrer produktionswirtschaftlichen Flexibilität bewertet, optimiert und abschließend verglichen werden.

Produkte

Die untersuchten Rohbauten sind für die Fertigung zweier Baureihen konzipiert. Diese Baureihen umfassen zwei bzw. drei unterschiedliche Modelle, die in dieser Arbeit mit den Buchstaben A bis E bezeichnet werden. Abbildung 6-1 zeigt eine Übersicht der betrachteten Baureihen sowie eine grobe Charakterisierung der einzelnen Modelle.

Modell	Typ	Stückzahl[1]	Laufzeit
Modell A	Volumenmodell	240.000	9 Jahre
Modell B	Abgeleitetes Volumenmodell	52.000	8 Jahre
Modell C	Abgeleitetes Nischenmodell	66.000	9 Jahre
Modell D	Volumenmodell	102.000	10 Jahre
Modell E	Abgeleitetes Nischenmodell	72.000	9 Jahre

X Baureihe 1
X Baureihe 2

[1] an Kammlinie; in Einheiten pro Jahr

Abbildung 6-1: Übersicht der im Fallbeispiel betrachteten Modelle

Betrachtungszeitraum

Gemäß der Zielsetzung einer lebenszyklusorientierten Betrachtung von Produktionssystemen wurde als Betrachtungszeitraum die erwartete Dauer des Lebenszyklus' der Roh-

bauanlagen festgelegt. Im betrachteten Rohbau sollen alle fünf aufgeführten Modelle produziert werden. Die Einführung der verschiedenen Baureihen und Modelle erfolgt sukzessive und erstreckt sich insgesamt über einen Zeitraum von vier Jahren. Aufgrund dieser sukzessiven Produkteinführung ergibt sich eine geplante Lebensdauer des Rohbaus und damit ein Betrachtungszeitraum von insgesamt 14 Jahren. Da die Bewertung zu einem sehr frühen Zeitpunkt der Rohbauplanung erfolgte, waren die prognostizierten Absatzzahlen der einzelnen Modelle nur für Jahreszeitscheiben verfügbar, so dass die Zeitinkremente der Simulation ganze Jahre umfassen.

Untersuchte Rohbaukonzepte

Das betrachtete Fallbeispiel eignet sich insbesondere deshalb zur Darstellung der Optimierungsmethodik, weil die fünf untersuchten Alternativen die gesamte Bandbreite flexibler Rohbaukonzepte aufzeigen. Neben einem konventionellen solitären Rohbau und einem vollflexiblen Ansatz wurden drei Konzepte betrachtet, die über eine begrenzte Produktmixflexibilität verfügen und daher als teilflexibel zu bezeichnen sind. In den weiteren Ausführungen in diesem Kapitel soll der Übersichtlichkeit halber neben dem solitären und dem vollflexiblen Konzept exemplarisch nur eines der drei teilflexiblen Rohbaukonzepte dargestellt werden. Abbildung 6-2 zeigt die betrachteten Konzepte.

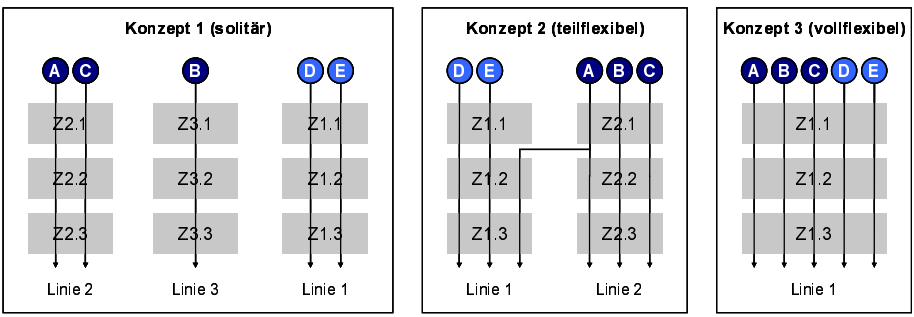


Abbildung 6-2: Übersicht der im Fallbeispiel betrachteten Rohbaukonzepte

Während das solitäre Konzept 1 für jede Baureihe (Baureihe 1: Modelle A und C; Baureihe 2: Modelle D und E) sowie zusätzlich für das Modell B (ebenfalls Baureihe 1) eine eigene Rohbaulinie vorsieht, werden im vollflexiblen Konzept 3 alle Produkte auf einer Linie gefertigt. Das teilflexible Konzept 2 wiederum ordnet vier der fünf Modelle (Modelle B, C, D und E) jeweils einer Rohbaulinie deterministisch zu; das fünfte Modell A hingegen durch-

läuft zunächst den ersten Zusammenbau immer auf Linie 2 und im Anschluss daran die Zusammenbauten Zx.2 und Zx.3 jeweils wahlweise auf einer der beiden Linien.

Aufgrund der Linienstruktur und der Produktallokation unterscheiden sich die Kapazitäten in den Zusammenbauten der einzelnen Konzepte, während die Gesamtkapazität aller Konzepte identisch ist. Zudem erfordern die Alternativen Anfangsinvestitionen unterschiedlicher Höhe und variieren hinsichtlich ihrer Flächen- und Personalbedarfe, woraus sich differierende Kostenstrukturen ergeben (Abbildung 6-3).

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
Gesamtkapazität	547.000 E/Jahr	547.000 E/Jahr	547.000 E/Jahr
Investitionsbedarf	768 Mio. Euro	702 Mio. Euro	755 Mio. Euro
Flächenbedarf	118.000 m^2	95.000 m^2	95.000 m^2
Personalbedarf	1960 MA/Tag	1930 MA/Tag	1790 MA/Tag

E: Einheiten; MA: Mitarbeiter

Abbildung 6-3: Wichtige Kenngrößen der im Fallbeispiel betrachteten Rohbaukonzepte

Anhand dieser Aufstellung scheint sich die in Abschnitt 1.2 getroffene Aussage, eine erhöhte produktionswirtschaftliche Flexibilität gehe mit höheren Anfangsinvestitionen einher, nur bedingt belegen zu lassen. Die deutlich höheren Kosten für das solitäre Konzept 1 im Vergleich zum vollflexiblen Konzept sind im Fallbeispiel jedoch auf standortspezifische Randbedingungen zurückzuführen. Im Vergleich zum teilflexiblen Konzept 2 wird jedoch der Mehraufwand für die Vollflexibilität der dritten Konzeptalternative deutlich.

6.2 Anwendung der Methodik und Ergebnisse

Bei der Bearbeitung der vorgegebenen Aufgabenstellung wurde entsprechend der in Kapitel 5 beschriebenen Vorgehensweise verfahren. Dabei wurde das im Rahmen des Forschungsprozesses entwickelte prototypische IT-Tool verwendet.

In den Diskussionen mit Rohbauplanern bestätigte sich die Notwendigkeit, die theoretischen Überlegungen in ein praxistaugliches IT-Tool umzusetzen. Mit Hilfe des entwickelten Tools ist es möglich, alternative Rohbaukonzepte in sehr kurzer Zeit zu modellieren und hinsichtlich ihrer Flexibilität zu bewerten, zu optimieren und zu vergleichen und so direkt mit den Experten vor Ort erste Ergebnisse zu erarbeiten. Dies förderte erheblich die Akzeptanz der entwickelten Methodik und führte mehrfach zu hilfreichen Anregungen für dessen Weiterentwicklung.

Ein weiterer Grund für die Entwicklung des IT-Tools war, dass der mit der entwickelten Methodik verfolgte Ansatz, produktionswirtschaftliche Flexibilität anhand des formalisierten

Flexibilitätsbedarfes mit Mitteln der zeitdiskreten Simulation zu bewerten, aufgrund der handzuhabenden Datenmengen sowie der Komplexität der durchzuführenden Operationen, die nur bedingt durch mathematische Verfahren zu bewerkstelligen sind, den Einsatz IT-technischer Hilfsmittel erfordert.

Die IT-technische Umsetzung der Vorgehensweise stellte daher in mehrfacher Hinsicht einen wichtigen Schritt beim Transfer der wissenschaftlichen Theorie in die Praxis dar.

An das IT-Tool gleichermaßen wie an die entwickelte Methodik richtete sich dabei die Forderung, durch eine generische Struktur und Vorgehensweise die Voraussetzungen für eine Anwendung auf andere produzierende Bereiche als den beispielhaft fokussierten Automobilrohbau zu gewährleisten. Um den modularen Charakter der Methodik zu erhalten, wurde daher jede der Vorgehensstufen der Methodik als eigenständiges Softwaremodul implementiert. Die einzelnen Module sind einander über klar definierte Schnittstellen angegliedert und können sequenziell ausgeführt werden.

6.2.1 Modellierung des Flexibilitätsbedarfs

Der ersten Schritte in der Anwendung der Methodik waren die Aufnahme und Modellierung des Flexibilitätsbedarfs. Der grundsätzlich erwartete Verlauf der Produktnachfrage über der Zeit war bekannt; daher wurden zur Abbildung des Flexibilitätsbedarfs prognosebasierte Szenarien (vgl. Abschnitt 5.2.1) verwendet. Konkret wurden mit Hilfe des im Rahmen des Forschungsprozesses entwickelten IT-Tools „ScenarioGenerator“ Szenarien generiert; die Szenariengenerierung erfolgte gemäß der in Abschnitt 5.2.1.2 beschriebenen Vorgehensweise auf Basis der prognostizierten Verkaufszahlen. Dabei wurde für jedes der betrachteten fünf Modelle der Bereich möglicher Stückzahlen über der Zeit durch einen Unsicherheitskorridor modelliert, wie es beispielhaft in Abbildung 6-4 gezeigt ist.

Der Unsicherheitskorridor (dargestellt als positive und negative Abweichungen von der eingegebenen Planstückzahl) wird im unteren rechten Bereich der Maske eingegeben. Oben rechts im Bild sind die Planabsatzzahlen (grau schraffiert) sowie die sich aus den eingegebenen Unsicherheiten ergebenden Minimal- und Maximalstückzahlen dargestellt.

Für die Erzeugung der die Unsicherheit modellierenden Szenarienschar musste weiterhin die Wahrscheinlichkeitsverteilung der zu generierenden Szenarien innerhalb des Unsicherheitskorridors (zu sehen unten links im Bild) definiert werden. Darüber hinaus sind oben links in der Maske

- die Wahrscheinlichkeit einer Markteinführung der betrachteten Produkte[465],
- ihr frühester sowie spätester Markteinführungszeitpunkt sowie

[465] Zum Planungszeitpunkt stand noch nicht fest, ob alle betrachteten Modelle tatsächlich in Produktion gehen würden.

- die Anzahl der zu generierenden Szenarien

anzugeben.

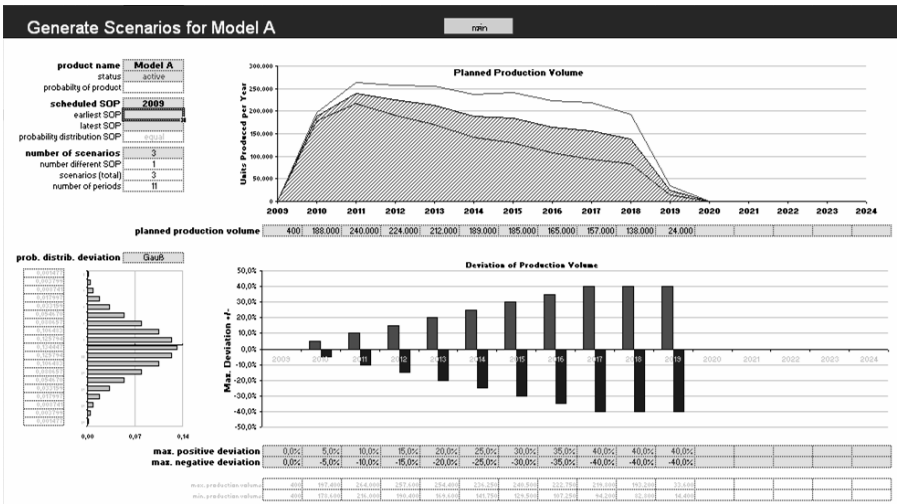


Abbildung 6-4: Abbildung des Flexibilitätsbedarfs im ScenarioGenerator

Auf Basis dieser modellspezifischen Eingabedaten wurden nun Szenarien generiert, die sowohl die zu produzierenden Stückzahlen jedes einzelnen Modells über der Zeit als auch die Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios beinhalten.

Wie in Abschnitt 5.2.1.2 beschrieben, hat sich in der Praxis die Generierung von Szenarien auf Basis prognostizierter Verkaufszahlen als den anderen Verfahren zur Szenariengenerierung (vgl. Abschnitt 5.2) überlegen erwiesen. Der Vorteil des IT-Tools „Scenario-Generator“ liegt in der intuitiven, strukturierten Handhabung und der Transparenz der mit seiner Hilfe generierten Szenarien. In Zusammenarbeit mit Rohbauplanern konnten auf diese Weise in recht kurzer Zeit umfangreiche Szenariensätze aufgebaut werden. Der Vorgehensweise kommt dabei zugute, dass der Planer gewohnt ist, ausgehend von prognostizierten Planstückzahlen Abschätzungen über maximale Abweichungen zu treffen, und somit sein Erfahrungswissen direkt für die Darstellung des Flexibilitätsbedarfs mit Hilfe des ScenarioGenerators nutzen kann.

Deutlich zu erkennen ist in Abbildung 6-4 die typische Aufweitung des Unsicherheitskorridors über der Zeit, die ihre Begründung in der sinkenden Prognosesicherheit mit steigendem Planungshorizont findet[466].

[466] vgl. Hopp, Spearman: Factory Physics, 2001, S. 145.

Nachdem für jedes der fünf herzustellenden Modelle die genannten Informationen im IT-Tool hinterlegt und alle Szenarien für die einzelnen Produkte generiert waren, wurde durch Kombinatorik der Stückzahlverläufe der einzelnen Modelle ein ganzheitlicher Szenariensatz gebildet. Der im Fallbeispiel generierte Szenariensatz umfasste mehrere hundert Szenarien. Die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Szenarien ergeben sich durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten der fünf Modell-Szenarien und betragen in der Summe eins.

6.2.2 Modellierung und erste Optimierung der Rohbaukonzepte

Die Modellierung und erste Optimierung der Rohbaukonzepte (vgl. Abschnitt 6.1) soll beispielhaft anhand des teilflexiblen Konzeptes 2 (vgl. Abbildung 6-2) erläutert werden, da dieses aufgrund seines nicht deterministischen Materialflusses am umfassendsten die Möglichkeiten der gewählten Modellierungsart demonstriert.

Modellierung: Linienstruktur

Für die Definition der Linienstruktur des Produktionssystems ist die Eingabe der Anzahl der Linien sowie der Anzahl der Produktionsstufen pro Linie erforderlich (Abbildung 6-5). Der als Konzept 2 modellierte Rohbau besteht aus zwei Linien, die jeweils aus drei Zusammenbauten aufgebaut sind, wie es Stand der Technik im Rohbau ist (vgl. Abschnitt 2.1.1.2). Im IT-Tool ist mit Blick auf die Abbildung komplexerer Produktionssysteme oder eine detailliertere Betrachtungsebene (vgl. Abschnitte 2.1.1.2 und 5.4) die Möglichkeit implementiert, beliebig viele Produktionsstufen und Linien abzubilden.

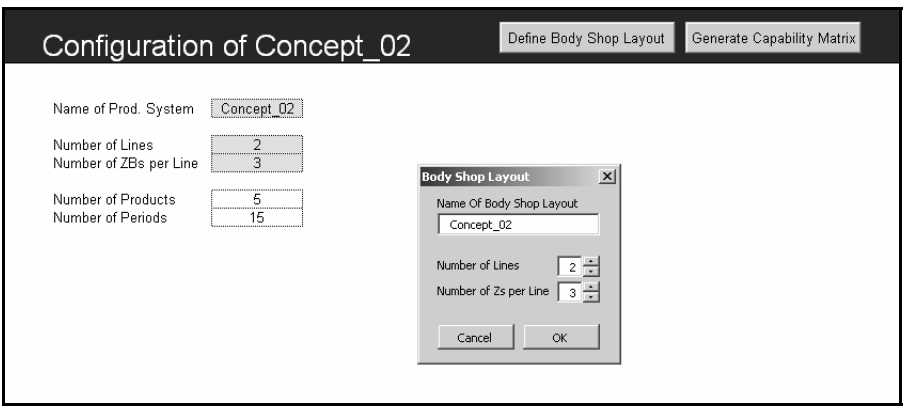


Abbildung 6-5: Definition der Linienstruktur

Auf Basis der Informationen zur Linienstruktur des Produktionssystems erzeugt das IT-Tool anschließend die in Abschnitt 5.4 erläuterte Fähigkeitsmatrix.

Modellierung: Fähigkeitsmatrix

Mit Hilfe der in Abbildung 6-6 gezeigten Fähigkeitsmatrix werden die Produktallokation des Rohbaukonzeptes sowie die in den einzelnen Produktionseinheiten (hier: Zusammenbauten) installierte technische Kapazität definiert.

Capabilities of Concept_02

Generate Material Routes

	Model A	Model B	Model C	Model D	Model E	Capacity
Line 1						
Z1.1				1	1	191.000
Z1.2	1			1	1	262.000
Z1.3	1			1	1	262.000
Line 2						
Z2.1	1	1	1			356.000
Z2.2	1	1	1			285.000
Z2.3	1	1	1			285.000

1 = Modell in diesem Zusammenbau herstellbar
0 = Modell in diesem Zusammenbau nicht herstellbar

Abbildung 6-6: Definition der Produktallokation mit Hilfe der Fähigkeitsmatrix

Dabei sind horizontal die zu fertigenden Produkte aufgetragen (Modelle A bis E), während die Zeilen von den einzelnen Zusammenbauten der Rohbaulinien aufgespannt werden (Linie 1: Z1.1 bis Z1.3; Linie 2: Z2.1 bis Z2.3). Durch Eintrag in der Matrix wird nun festgelegt, ob ein bestimmtes Produkt in der jeweiligen Produktionsstufe einer Linie herstellbar ist (1 = herstellbar, 0 = nicht herstellbar). Mit Hilfe der Fähigkeitsmatrix kann also die Produktallokation in sehr kompakter Weise dargestellt werden; zugleich lassen sich die Kapazitäten der einzelnen Produktionseinheiten hinterlegen.

Durch die dynamische Generierung der Matrix auf Basis der Informationen zur Linienstruktur lassen sich so in kurzer Zeit die erlaubten Produktallokationen auch für sehr komplexe Produktionssysteme und beliebig viele Produkte abbilden. Die Umsetzung mit Hilfe einer Matrixdarstellung – im Gegensatz zu Auswahl- oder Eingabefeldern – erlaubt auch die Definition nicht-eindeutiger Produktallokationen, wie sie in Konzept 2 für das Modell A in der zweiten und dritten Aufbaustufe vorgesehen sind.

Modellierung: Materialflussrouten

Das IT-Tool ermittelt anhand der Informationen aus der Fähigkeitsmatrix für jedes Produkt die denkbaren Materialflussrouten und stellt diese in einer dynamisch generierten Übersicht dar, in der auch der Materialfluss der jeweils ausgewählten Route visualisiert wird (Abbildung 6-7). Gleichzeitig wird die maximale Kapazität jeder Route ermittelt. Sofern Re-

dundanzen bei der Allokation einzelner Produkte existieren, ergibt sich für diese ein nicht-eindeutig definierter Materialfluss.

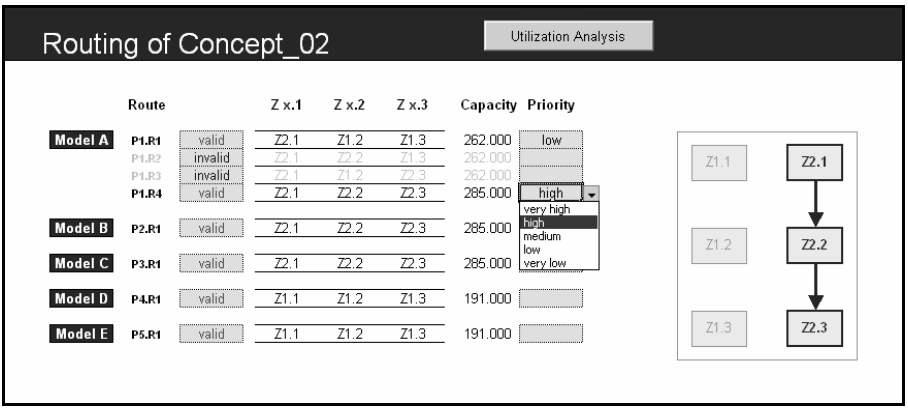


Abbildung 6-7: Definition der Materialflussrouten und Routenprioritäten

Im diskutierten Rohbaukonzept 2 ergeben sich für das Modell A aus den in der Fähigkeitsmatrix eingegebenen Daten auf diese Weise insgesamt vier mögliche Routen. Da ein Linienwechsel der Routen jedoch nur zwischen den Aufbaustufen Z1 und Z2 vorgesehen ist, wurden die Routen, bei denen auch zwischen den Aufbaustufen Z2 und Z3 die Linie gewechselt wird (im Beispiel die mit „P1.R2“ und „P1.R3“ bezeichneten Routen) manuell über ein Auswahlmenü deaktiviert (als „invalid“ gekennzeichnet), so dass für Modell A schließlich zwei zulässige Routen verblieben.

Falls für ein Modell mehrere alternative Routen verbleiben, werden Prioritäten hinterlegt, mit denen der Materialfluss gesteuert wird.

Modellierung: Materialflusssteuerung

Da das diskutierte Rohbaukonzept 2 über mehrere mögliche Materialflussrouten für Modell A verfügt, war es erforderlich, für die Simulation zusätzlich Regeln oder Strategien zu hinterlegen, die den Materialfluss steuern. Von Seiten der Rohbauplaner wurden in der begleitenden Projektarbeit vor allem zwei Steuerungsstrategien nachgefragt:

- Im Normalbetrieb eines Rohbaus wird üblicherweise eine gleich hohe Auslastung aller Linien angestrebt, um die Betriebszeiten und somit die Arbeitszeitmodelle der dort beschäftigten Mitarbeiter einander anzugleichen.
- Lediglich in Übergangssituationen wird versucht, einzelne Linien maximal auszulasten oder aber die Auslastung gänzlich zurückzufahren, beispielsweise um Linien für ein Nachfolgeprodukt umzurüsten oder zurückzubauen.

Im IT-Tool sind daher zunächst diese zwei Steuerungsregeln in Form von Heuristiken hinterlegt: zum einen „Balance Line Utilizations“, also die möglichst gleichmäßige Auslastung aller Linien, zum anderen die Steuerung des Materialflusses entsprechend den der Materialflussrouten manuell zugeordneten Prioritäten („Use Route Priorities“). Über eine geeignete Vergabe von Routenprioritäten lassen sich so verschiedene Auslastungsverteilungen erzielen, unter anderem die geforderte Auslastungsmaximierung bzw. -minimierung einzelner Linien.

Modellierung: Anpassungszustände

Die Modellierung der Freiheitsgrade eines Produktionssystems erfolgt in der Optimierungsmethodik durch die Definition diskreter Anpassungszustände. Im Fallbeispiel sind die Freiheitsgrade der Produktionssysteme sehr begrenzt: Bei den beiden flexiblen Rohbaukonzepten des Fallbeispiels ist es ausschließlich das Schichtmodell, mit dem Anpassungen der Kapazitäten über den Lebenszyklus erreicht werden können. Der Einschichtbetrieb wurde im Fallbeispiel als Restriktion ausgeschlossen, da die freiwerdenden Mitarbeiterkapazitäten nicht beliebig anderweitig eingesetzt werden können. Zudem arbeiten die Mitarbeiter aller Linien im gleichen Schichtmodell, so dass eine unabhängige Anpassung des Schichtmodells in den Linien nicht vorgesehen ist. Weitere Freiheitsgrade, wie zum Beispiel der nachträgliche Ausbau der installierten Kapazitäten, sind aufgrund technischer Randbedingungen im Rohbau nicht gegeben (vgl. Abschnitt 2.2.2.1). Für das solitäre Rohbaukonzept besteht allerdings zusätzlich der Freiheitsgrad, die einzelnen Linien zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufzubauen. Insbesondere der Aufbau der dritten Linie für das Modell B kann zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, da die Markteinführung des Derivates zeitversetzt erfolgt. Dadurch verdoppelt sich die Anzahl der Anpassungszustände. Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 6-8 die Darstellung der Anpassungszustände des teilflexiblen Konzeptes 2 im IT-Tool gezeigt.

Configuration of Concept_02 main

Name of system: Concept_02

Adaption alternatives: 3
Number of products: 5

	Adaption alternatives			Capacity		Product Compatibility Matrix				
	Name		Description	Technical	Organisational	A	B	C	D	E
1	A001	1-Shift	semi-flexible system in 1 shift	182.000	182.000	1	1	1	1	1
2	A002	2-Shifts	semi-flexible system in 2 shifts	364.000	364.000	1	1	1	1	1
3	A003	3-Shifts	semi-flexible system in 3 shifts	546.000	546.000	1	1	1	1	1

Abbildung 6-8: Anpassungszustände des Rohbaukonzeptes 2

Grundsätzlich ist das IT-Tool so ausgelegt, dass alle zuvor definierten Eigenschaften eines Produktionssystems wie Anzahl der Linien, Produktallokation, Kapazität in einzelnen Pro-

duktionseinheiten oder auch Steuerungsstrategie als Freiheitsgrad behandelt und somit in Anpassungszuständen variiert werden können (siehe hierzu auch Abschnitt 5.4).

Modellierung: Kosten

Für jeden der modellierten Anpassungszustände wurde zudem ein Kostenmodell hinterlegt. Dabei unterscheiden sich die drei Konzepte nicht nur hinsichtlich des Investitionsbedarfs, sondern auch in den Personal- und Flächenkosten, wie sie sich aus den in Abbildung 6-3 aufgelisteten Kenngrößen ergeben. Exemplarisch ist in Abbildung 6-9 das Kostenmodell des diskutierten Rohbaukonzeptes 2 gezeigt. Dieses setzt sich zusammen zum einen aus den beschriebenen Kostengruppen für jeden einzelnen Anpassungszustand, zum anderen aus der Wechselkostenmatrix, in der die durch Wechsel von einem Anpassungszustand in einen anderen anfallenden Kosten eingetragen sind.

Das Kostenmodell ist ein wichtiger Bestandteil der einzugebenden Daten; es wird vom Simulationsmodul benötigt, weil der Flexibilität eines Produktionssystemkonzeptes und den konkret möglichen Anpassungen des Produktionssystems die dadurch entstehenden Kosten als Aufwand gegenüberstellt werden müssen.

Invest and Change Costs of Concept_02 — main

Adaption alternatives	Name	Initial Invest	Change Costs to System A001	A002	A003
A001	1-Shift	702.000.000	0	1.000.000	1.000.000
A002	2-Shifts	702.000.000	1.000.000	0	1.000.000
A003	3-Shifts	702.000.000	1.000.000	1.000.000	0

Operating Costs of Concept_02 — main

	Adaption alternatives	Name	area costs p.a.	labour costs p.a.	energy costs p.a.	machine consumption per part	additional costs per part when reaching too high utilization
1	A001	1-Shift	14.300.000	34.000.000			
2	A002	2-Shifts	14.300.000	68.000.000			
3	A003	3-Shifts	14.300.000	102.000.000			

Abbildung 6-9: Kostenstruktur des Rohbaukonzeptes 2

Für die Anpassung des Schichtmodells wurden im Fallbeispiel pauschal Wechselkosten in Höhe von 1 Million Euro für den organisatorischen Aufwand angenommen. Der nachträgliche Bau der dritten Linie für das Modell B im Solitärkonzept verursacht Wechselkosten in Höhe der Investitionsdifferenz von 234 Millionen Euro. Für den Rückbau der dritten Linie wurde die Annahme getroffen, dass ein Resterlös von 7 Millionen Euro erzielt werden kann; dieser Betrag ist in der Wechselkostenmatrix mit negativem Vorzeichen eingetragen.

Um bestimmte, aufgrund vorgegebener Restriktionen nicht erlaubte Wechsel von einem in einen anderen Anpassungszustand gezielt zu unterbinden, ist lediglich der Eintrag eines sehr hohen Betrages an entsprechender Stelle der Wechselkostenmatrix erforderlich.

Damit war die Modellierung des Rohbaukonzeptes abgeschlossen. Gemäß dem in Abschnitt 5.6.2 beschriebenen Standardablauf zur Optimierung folgten darauf die ersten beiden Optimierungsschritte: grobe Optimierung der Kapazitäten und Optimierung der Betriebsmodi.

Optimierung: Kapazitäten

Als Schritt 1 des Standardablaufs zur Flexibilitätsoptimierung im Rohbau folgte die vorläufige Optimierung der Kapazitäten in den einzelnen Zusammenbauten (vgl. Abschnitt 5.6.2.1). Die Auswertung der maximalen und minimalen Kapazitätsbedarfe im IT-Tool „CapaOptimizer“ bestätigte die Qualität der Vorschläge der Rohbauplaner. Lediglich die Kapazitäten der Zusammenbauten Z1.2 und Z1.3 sowie Z2.2 und Z2.3 wurden leicht angepasst (siehe Abbildung 6-10; die Anpassungen sind gestrichelt umrandet); einer Reduzierung der benötigten Kapazität in den Zusammenbauten der Linie 1 stand dabei eine leichte Kapazitätserhöhung der Zusammenbauten der Linie 2 gegenüber. Insgesamt konnte durch diese Anpassung eine leichte Reduzierung der Investitionskosten erzielt werden.

Capabilities of Concept_02 | Generate Material Routes

	Model A	Model B	Model C	Model D	Model E	Capacity
Line 1						
Z1.1				1	1	~~191.000~~
Z1.2	1			1	1	257.000
Z1.3	1			1	1	257.000
Line 2						
Z2.1	1	1	1			~~356.000~~
Z2.2	1	1	1			286.000
Z2.3	1	1	1			286.000

Abbildung 6-10: Optimierte Kapazitäten der Zusammenbauten des Rohbaukonzeptes 2

Optimierung: Betriebsmodi

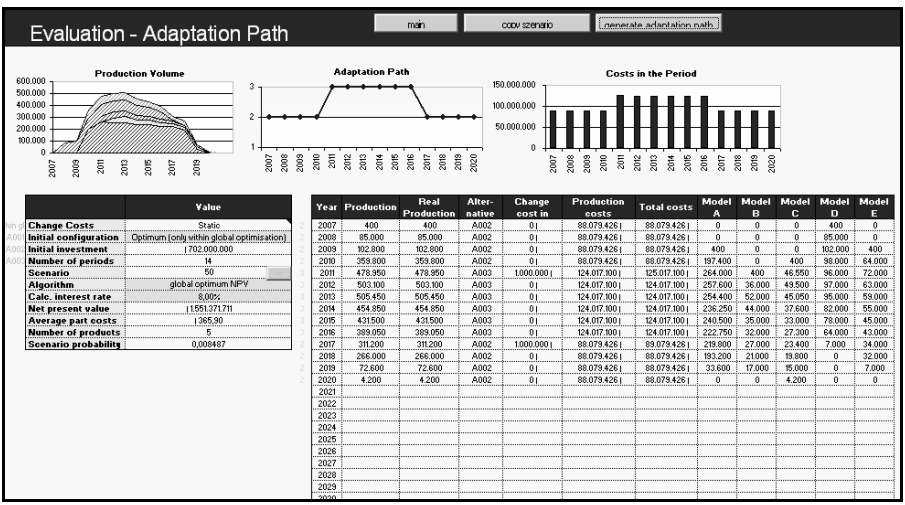
Den zweiten Schritt im Standardablauf zur Flexibilitätsoptimierung bildet die Optimierung der Betriebsmodi (vgl. Abschnitt 5.6.2.2). Weil sich im vorgestellten Fallbeispiel die Anpassungszustände nur durch das Schichtmodell, nicht aber durch weitere Parameter wie

z. B. Bandbelegung o. a. unterscheiden, war diese Optimierung allerdings im konkreten Fall nicht erforderlich[467].

6.2.3 Simulation und Auswertung

Die Simulation des Verhaltens der Rohbaukonzepte bei Eintritt unterschiedlicher Szenarien, also die Optimierung der Anpassungspfade über den Lebenszyklus, ist der nächste Schritt des Standardablaufs zur Flexibilitätsoptimierung (vgl. Abschnitt 5.6.2.3); nach der Simulation erfolgt in Schritt 4 des Standardablaufs die Auswertung der Simulationsläufe (vgl. Abschnitt 5.6.2.4).

Für die Simulation des zuvor modellierten Produktionssystems wurde die den Flexibilitätsbedarf formende Szenarienschar in das Simulationsmodul geladen. Wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, werden hier alle Szenarien der Schar sukzessive geladen, und das Verhalten des Rohbaus bei Eintritt des jeweiligen Szenarios wird simuliert. Während der Simulation konnten anhand von Visualisierungen im IT-Tool bereits erste Erkenntnisse gewonnen werden. Abbildung 6-11 zeigt für ein einzelnes Szenario die Ermittlung des Anpassungspfades sowie die Berechnung der monetären Kenngrößen auf Basis des in der Produktionssystemmodellierung hinterlegten Kostenmodells.



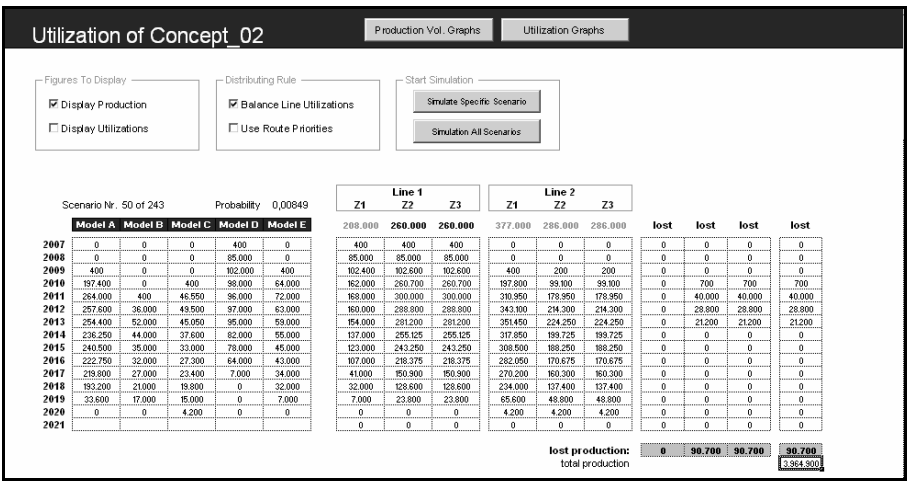
	Value
Change Costs	Static
Initial configuration	Optimum (only within global optimisation)
Initial investment	702.000,000
Number of periods	14
Scenario	50
Algorithm	global optimum NPV
Calc. interest rate	8,00%
Net present value	1.551.371,71
Average part costs	365,90
Number of products	5
Scenario probability	0,008487

Year	Production	Real Production	Alter-native	Change cost in	Production costs	Total costs	Model A	Model B	Model C	Model D	Model E
2007	400	400	A002	0	88.079,426	88.079,426	0	0	0	400	0
2008	85.000	85.000	A002	0	88.079,426	88.079,426	0	0	0	85.000	0
2009	102.800	102.800	A002	0	88.079,426	88.079,426	400	0	0	102.000	400
2010	359.800	359.800	A002	0	88.079,426	88.079,426	197.400	0	400	98.000	64.000
2011	478.950	478.950	A003	1.000.000	124.017,100	125.017,100	264.000	400	46.550	96.000	72.000
2012	503.100	503.100	A003	0	124.017,100	124.017,100	257.600	36.000	49.500	97.000	63.000
2013	505.450	505.450	A003	0	124.017,100	124.017,100	254.400	52.000	45.050	95.000	59.000
2014	454.850	454.850	A003	0	124.017,100	124.017,100	236.250	44.000	37.600	82.000	55.000
2015	431.500	431.500	A003	0	124.017,100	124.017,100	240.500	35.000	33.000	78.000	45.000
2016	389.050	389.050	A003	0	124.017,100	124.017,100	222.750	32.000	27.300	64.000	43.000
2017	311.200	311.200	A002	1.000.000	88.079,426	89.079,426	219.800	27.000	23.400	7.000	34.000
2018	266.000	266.000	A002	0	88.079,426	88.079,426	193.200	21.000	19.800	0	32.000
2019	72.600	72.600	A002	0	88.079,426	88.079,426	33.600	17.000	15.000	0	7.000
2020	4.200	4.200	A002	0	88.079,426	88.079,426	0	0	4.200	0	0
2021											
2022											
2023											
2024											
2025											
2026											
2027											
2028											
2029											
2030											

Abbildung 6-11: Generierung der Anpassungspfade

[467] Selbstverständlich wurde auch dieser Schritt der Methodik an realen Rohbauplanungsprojekten in der Praxis getestet und validiert; er ist lediglich nicht Teil des zur Beschreibung in dieser Arbeit ausgewählten Beispiels.

Nach der Generierung der Anpassungspfade und der Ermittlung monetärer Größen wurde die Verteilung der Stückzahlen innerhalb des Produktionssystems auf die einzelnen Produktionseinheiten simuliert. Auch hier wurden für jedes Szenario die wichtigsten Größen dargestellt und beispielsweise etwaige Unterkapazitäten in einzelnen Produktionseinheiten (Zusammenbauten) farblich gekennzeichnet sowie das resultierende entgangene Produktionsvolumen errechnet (Abbildung 6-12).



	Model A	Model B	Model C	Model D	Model E	Line 1 Z1	Line 1 Z2	Line 1 Z3	Line 2 Z1	Line 2 Z2	Line 2 Z3	lost	lost	lost	lost
						208.000	260.000	260.000	377.000	286.000	286.000				
2007	0	0	0	400	0	400	400	400	0	0	0	0	0	0	0
2008	0	0	0	85.000	0	85.000	85.000	85.000	0	0	0	0	0	0	0
2009	400	0	0	102.000	400	102.400	102.600	102.600	400	200	200	0	0	0	0
2010	197.400	0	400	98.000	64.000	162.000	260.700	260.700	197.800	99.100	99.100	0	700	700	700
2011	264.000	400	46.550	96.000	72.000	168.000	300.000	300.000	310.950	178.950	178.950	0	40.000	40.000	40.000
2012	257.600	36.000	49.500	97.000	63.000	160.000	288.800	288.800	343.100	214.300	214.300	0	28.800	28.800	28.800
2013	254.400	52.000	45.050	95.000	59.000	154.000	281.200	281.200	351.450	224.250	224.250	0	21.200	21.200	21.200
2014	236.250	44.000	37.600	92.000	55.000	137.000	255.125	255.125	317.850	199.725	199.725	0	0	0	0
2015	240.500	35.000	33.000	78.000	45.000	123.000	243.250	243.250	308.500	188.250	188.250	0	0	0	0
2016	222.750	32.000	27.300	64.000	43.000	107.000	218.375	218.375	282.050	170.675	170.675	0	0	0	0
2017	219.800	27.000	23.400	7.000	34.000	41.000	150.900	150.900	270.200	160.300	160.300	0	0	0	0
2018	193.200	21.000	19.800	0	32.000	32.000	128.600	128.600	234.000	137.400	137.400	0	0	0	0
2019	33.600	17.000	15.000	0	7.000	7.000	23.800	23.800	65.600	48.800	48.800	0	0	0	0
2020	0	0	4.200	0	0	0	0	0	4.200	4.200	4.200	0	0	0	0
2021						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
											lost production:	0	90.700	90.700	90.700

Abbildung 6-12: Ermittlung der Stückzahlverteilung

Nach Simulation aller Szenarien sind die wichtigsten Kenngrößen bereits abrufbar und in Diagrammen aufbereitet. Diese Daten stellen die in Abschnitt 5.6.2.4 beschriebene Auswertung der Simulationsergebnisse dar; vor der Durchführung der folgenden Optimierungsschritte wurden sie ausführlich mit den Planern diskutiert und analysiert.

Die Ergebnisse der Simulation werden in einer Datenbank gespeichert, auf die für weitere Auswertungen aus anderen Softwaremodulen, z. B. dem Optimierungs- und Auswertungstool, zugegriffen werden kann.

6.2.4 Optimierung

Anschließend wurden als Schritt 5 des Standardablaufs zur Flexibilitätsoptimierung (vgl. Abschnitt 5.6.2.5) auf Basis der Simulationsergebnisse die Kapazitäten der Zusammenbauten detailliert optimiert.

Detaillierte Optimierung der Kapazitäten

Zunächst wurden dazu die während der Simulation protokollierten Daten über die in jedem Zusammenbau hergestellten Einheiten der einzelnen Produkte bzw. die hieraus resultierenden Auslastungen graphisch in einer Übersicht dargestellt (Abbildung 6-13; diese Darstellung ist für jedes betrachtete Szenario verfügbar). Gut zu erkennen ist in der Abbildung die Ausbalancierung der Auslastungen beider Linien durch die variable Aufteilung des Materialflusses von Modell A (im Diagramm die jeweils unterste Linie) nach der ersten Aufbaustufe. Die fette waagerechte Linie stellt die Maximalkapazität der Zusammenbauten dar.

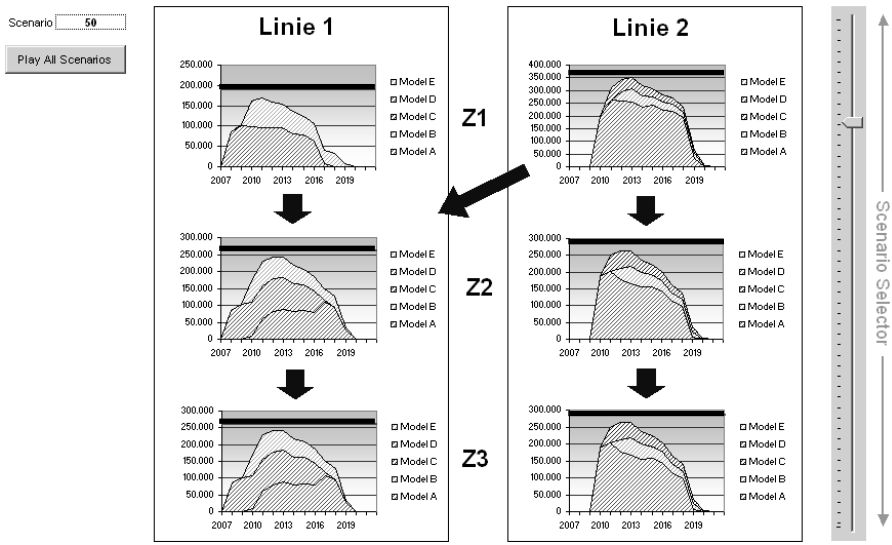


Abbildung 6-13: Produktionsvolumen in den Zusammenbauten

Während die Darstellung der Stückzahlen in den einzelnen Produktionseinheiten in Abbildung 6-13 jeweils nur die Ergebnisse eines einzigen Szenarios wiedergibt, zeigt die aggregierte Darstellung in Abbildung 6-14 die Auslastungen über die Gesamtheit aller Szenarien der Schar.

Hierbei werden neben dem Planwert (demjenigen Ergebniswert, der sich für das mit den prognostizierten Absatzzahlen korrespondierende Szenario ergibt) oder optional dem Erwartungswert der Auslastungen auch die minimal bzw. maximal errechnete Auslastung gezeigt. So können bereits anhand der Visualisierung erste Aussagen über etwaige Über- oder Unterkapazitäten getroffen werden.

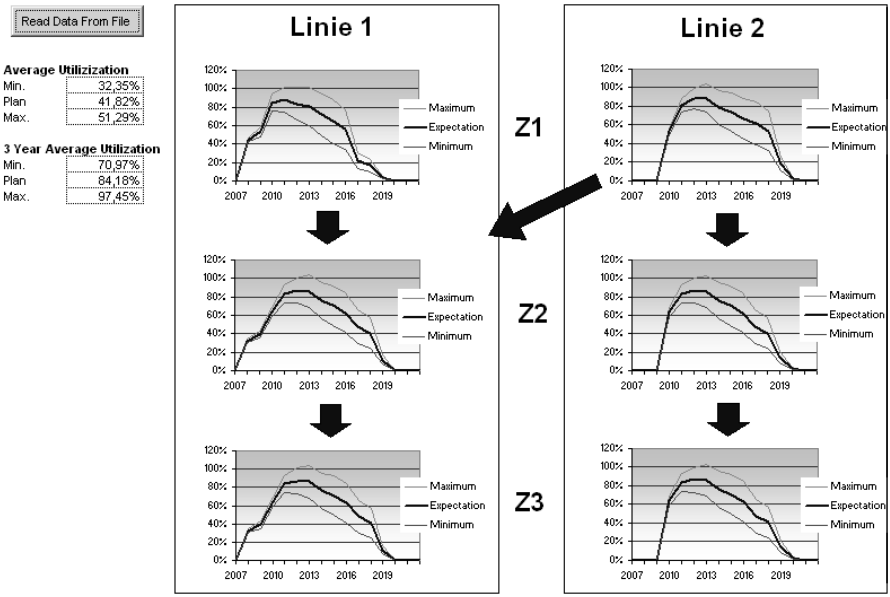


Abbildung 6-14: Auslastungen in den Zusammenbauten

Zusätzlich werden die Auslastungen in den Produktionseinheiten zu Kennzahlen aggregiert. Neben Plan- und Erwartungswert, Minimum und Maximum sowie des 5-Perzentil- und 95-Perzentilwertes der Auslastungen für jedes Zeitinkrement (hier: Jahr) werden die Daten als Durchschnittswerte sowohl über den gesamten Lebenszyklus errechnet als auch über die drei stückzahlstärksten Perioden („Kammlinie"), da dies dem gewohnten Vorgehen in der Rohbauplanung entspricht. Darüber hinaus werden Unterkapazitäten durch die Aufsummierung des hierdurch entgangenen Produktionsvolumens aufgezeigt. Für das teilflexible Konzept 2 zeigt Abbildung 6-15 eine Auflistung dieser Kenngrößen.

	Erwartungswert	Planwert	Min. / Max.	5% / 95%-Perzentil
Entgangene Produktion	1488 E	0 E	0 E / 25.950 E	0 E / 9.400 E
Lieferbereitschaft	99,96 %	100 %	99,42 % / 100 %	99,74 % / 100 %
Auslastung über Lebenszyklus		41,82 %	32,25 % / 51,29 %	
Auslastung Kammlinie		84,14 %	70,97 % / 97,45 %	

E: Einheiten

Abbildung 6-15: Kenngrößen der Kapazitätsbewertung für Konzept 2

Auf der Basis dieser Auswertungen wurden mit Hilfe weiterer Simulationsläufe die Kapazitäten der einzelnen Rohbauten in den betrachteten Konzepten optimiert. Dabei ergaben

sich wiederum leichte Veränderungen der bisher geplanten Werte (siehe Abbildung 6-16, vgl. rote Markierung).

Wie erwartet, wurde dabei die in Schritt 2 der Optimierung als in den Zusammenbauten Z1.2 und Z1.3 maximal benötigt identifizierte Kapazität von 257.000 Einheiten (vgl. Abschnitt 6.2.2) leicht unterschritten. Auch die dort für die Zusammenbauten Z2.2 und Z2.3 identifizierte Minimalkapazität von 286.000 Einheiten stellte offensichtlich eine sinnvolle Untergrenze dar; die Kapazität dieser Zusammenbauten wurde leicht erhöht (die Anpassungen sind in der Graphik gestrichelt umrandet).

Capabilities of Concept_02

Generate Material Routes

	Model A	Model B	Model C	Model D	Model E	Capacity
Line 1						
Z1.1				1	1	191.500
Z1.2	1			1	1	256.400
Z1.3	1			1	1	254.800
Line 2						
Z2.1	1	1	1			355.900
Z2.2	1	1	1			286.600
Z2.3	1	1	1			288.200

Abbildung 6-16: Optimierte Kapazitäten des Rohbaukonzeptes 2

Schritt 6 des Standardablaufs zur Flexibilitätsoptimierung stellt die weitere Optimierung der betrachteten Produktionssystemalternativen dar (siehe Abschnitt 5.6.2.6); dabei können die unterschiedlichen dort geschilderten Verfahren zum Einsatz kommen.

Analyse von Karossenpfaden durch die Produktion

Die Analyse von Karossenpfaden durch die Produktion ist nur dann sinnvoll, wenn eine relative Vielzahl möglicher Pfade für mindestens ein Produkt existiert, so dass evtl. einer oder einige dieser Pfade gestrichen werden können. Im in dieser Arbeit betrachteten Rohbaukonzept 2 existieren jedoch nur für Modell A unterschiedliche Pfade. Von den theoretisch möglichen vier Pfaden wurden jedoch zwei bereits zu Beginn des Optimierungsvorgehens gesperrt (vgl. Abschnitt 6.2.2). Die verbleibenden zwei erlaubten Pfade sind eines der wesentlichen Charakteristika des betrachteten Rohbaukonzeptes 2; daher steht ihre Existenz nicht in Frage. Deshalb waren hier keine weiteren Untersuchungen nötig.

Die Analyse von Karossenpfaden spielte im betrachteten Fallbeispiel jedoch für ein in dieser Arbeit nicht behandeltes weiteres teilflexibles Konzept, das zwischen den hier vorgestellten Konzepten 2 (teilflexibel) und 3 (vollflexibel) positioniert ist, eine wichtige Rolle. Dieses Konzept weist eine höhere Flexibilität als das vorgestellte Konzept 2 auf; insbe-

sondere sind für alle drei Produkte mehrere Pfade durch den Rohbau möglich und erlaubt. Daher war in diesem Fall die Reduzierung der Anzahl möglicher Karossenpfade ein wichtiges Optimierungsziel, das mit der vorgestellten Methodik erreicht werden konnte.

Analyse von Anpassungspfaden

Das zweite in Abschnitt 5.6.2.6 vorgestellte Optimierungsverfahren, die Analyse der verwendeten Anpassungspfade, hat zum Ziel, ggf. nicht benötigte Anpassungszustände zu streichen oder bestimmte, häufig vorkommende Abfolgen von Anpassungszuständen durch eine kostengünstigere Abfolge zu ersetzen. Weil sich im betrachteten Rohbaukonzept die einzelnen Anpassungszustände nur durch die unterschiedlichen Schichtmodelle unterscheiden und daher die zeitliche Anordnung der Anpassungszustände bei den Konzepten 2 und 3 lediglich durch die Nachfrage sowie beim Konzept 1 zusätzlich durch die Inbetriebnahme der dritten Linie zum Zeitpunkt der Markteinführung des Modells B bestimmt ist, führte die Auswertung der Anpassungspfade bei den untersuchten Konzepten weitgehend zu absehbaren Ergebnissen. Weder ermöglicht die Streichung der Möglichkeit des Betriebs in einem Schichtmodell Kostenersparnisse, noch ist eine Optimierung der Abfolge der Schichtmodelle[468] möglich. In Abbildung 6-17 sind die Anpassungspfade der Konzepte 1 und 2 exemplarisch für ein einzelnes Szenario gezeigt.

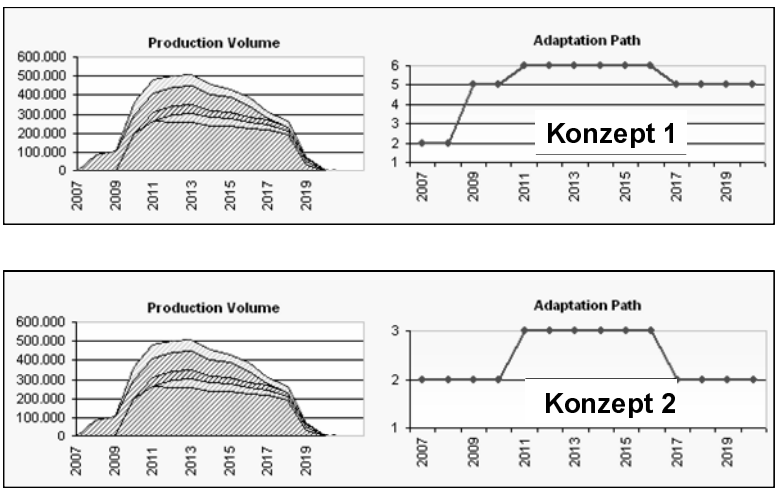


Abbildung 6-17: Anpassungspfade der Konzepte 1 und 2

Dass die Anpassungspfade sich direkt aus der Nachfrage ergeben, liegt in der Kostenstruktur der betrachteten Rohbaukonzepte begründet; die Adaption des Schichtmodells ist

[468] im Rahmen der für die Auswahl und Abfolge der Schichtmodelle geltenden Restriktionen

unter anderem deshalb direkt von der Nachfrage abhängig, weil die Einsparungen der Betriebskosten bei Reduzierung der Schichtanzahl bereits innerhalb einer Betrachtungsperiode (hier: ein Jahr) größer sind als die bei einer Anpassung anfallenden Wechselkosten. Die Wechselkosten amortisieren sich also unmittelbar. Beim Solitärkonzept (Konzept 1) ist zudem die Vorteilhaftigkeit einer späten Inbetriebnahme der nur für die Produktion des erst später eingeführten Modells B genutzten dritten Linie offenkundig, da auf diese Weise zum einen die Betriebskosten für die Erweiterung erst ab einem späteren Zeitpunkt anfallen und sich zum anderen der Kapitalwert der Kosten aufgrund der Abzinsung bei einer verzögerten Investition verringert.

Auch wenn das diskutierte Fallbeispiel den Nutzen einer Anpassungspfadanalyse nur eingeschränkt aufzeigt, konnten mit Hilfe dieser Analyse in weiteren Anwendungsbeispielen entscheidende Fragestellungen der Rohbauplanung beantwortet werden. Eine wiederkehrende Aufgabe waren beispielsweise Untersuchungen, unter welchen Unsicherheiten sich eine vorausschauende höhere Investition in Flexibilität bezahlt macht bzw. wann Minimalinvestitionsstrategien zielführend sind.

Theoretische Standardszenarien

Mit einem weiteren möglichen Optimierungsverfahren, der Untersuchung des Produktionssystemverhaltens mit Hilfe theoretischer Standardszenarien, wurden im Fallbeispiel mögliche Nachfrageverschiebungen zwischen der betrachteten Modellen A bis E untersucht. Auch mögliche Kannibalisierungseffekte mit anderen Modellen des Herstellers wurden analysiert. Folge war eine nochmalige Anpassung der Kapazitäten der einzelnen Zusammenbauten.

Sensitivitätsanalysen

Abschließend wurden im Fallbeispiel alle betrachteten Rohbaukonzepte mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen insbesondere im Hinblick auf die Nachfrage der betrachteten Modelle untersucht. Dadurch wurde die Notwendigkeit für Anpassungen der (hier nicht dargestellten) zwischen den Alternativen 1 und 2 und den Alternativen 2 und 3 angesiedelten teilflexiblen Konzepte identifiziert; sie wurden daraufhin von den Rohbauplanern gezielt überarbeitet; die identifizierten Schwächen konnten teilweise behoben bzw. abgeschwächt werden.

6.2.5 Ergebnisaufbereitung und Entscheidung

Zum Ende des Optimierungsprozesses war im Fallbeispiel eine der betrachteten und inzwischen optimierten Konzeptalternativen zur Umsetzung auszuwählen.

Dazu wurde zunächst eine monetäre Bewertung der Konzeptalternativen vorgenommen.

Monetäre Bewertung

Im Rahmen der Lebenszyklusrechnung wurden der Kapitalwert der Kosten sowie die Vergleichsstückkosten errechnet. Für beide Größen gilt, dass diese nicht als ein einzelner Wert ermittelt werden können, sondern dass die Simulationsergebnisse für alle Szenarien der betrachteten Schar in die Ergebnisse einfließen müssen.

In Abbildung 6-18 ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Vergleichsstückkosten für das teilflexible Konzept gezeigt. Für diese Darstellung wurde ein als Plug-In ausgeführtes Softwaremodul programmiert, das die Analyse einer beliebigen Wahrscheinlichkeitsverteilung sowohl visuell unterstützt als auch Kennzahlen der Datenreihe ermittelt, wie beispielsweise den Erwartungswert oder das arithmetische Mittel. In der Abbildung sind zudem die jeweils 5 % der Eintrittwahrscheinlichkeit umfassenden Außenbereiche ausgegraut.

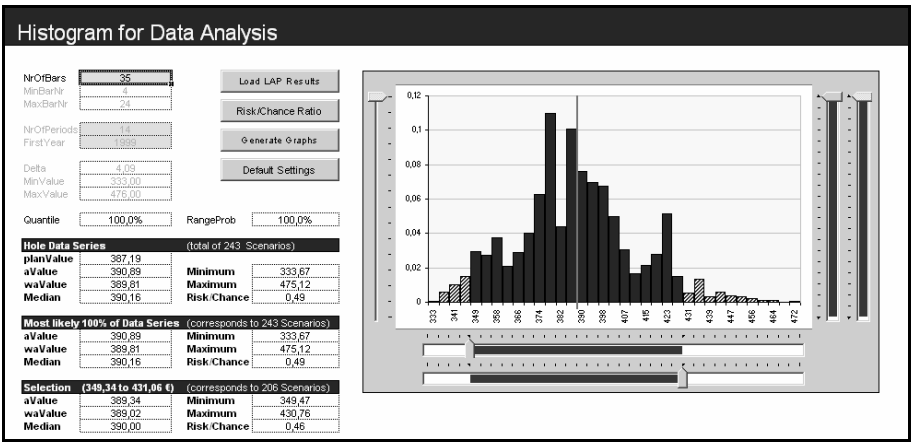


Abbildung 6-18: Histogramm der Vergleichsstückkosten für Konzept 2

Einen Überblick über die wesentlichen erhobenen Kenngrößen gibt Abbildung 6-19. Hier ist neben den Vergleichsstückkosten auch der Kapitalwert der Kosten aufgezeigt. Für die Berechnung des Kapitalwertes wurde ein konstanter Zinssatz angenommen, der im Fallbeispiel bei 7 % lag.

	Erwartungswert	Planwert	Min. / Max.	5% / 95%-Perzentil
Kapitalwert der Kosten	1,56 Mio. €	1,56 Mio. €	1,53 / 1,61 Mio. €	1,53 / 1,61 Mio. €
Vergleichsstückkosten	389,81 €	387,19 €	333,67 / 475,12 €	351,54 / 428,43 €

Abbildung 6-19: Monetäre Kenngrößen für Konzept 2

Nachdem die Anwendung der Methodik exemplarisch an einem der betrachteten Rohbaukonzepte gezeigt wurde, sollen nun die Ergebnisse aller drei Investitionsalternativen abschließend miteinander verglichen und die Ableitung der Investitionsempfehlung gezeigt werden.

Vergleich der Konzeptalternativen mit Hilfe des Flexibilitätsfensters

Bereits in Abschnitt 2.3.1 konnte festgehalten werden, dass für eine aussagekräftige Bewertung produktionswirtschaftlicher Flexibilität der erzielte Nutzen den Aufwänden gegenübergestellt werden muss. Daher sind, wie in Abschnitt 5.6.1.4 hergeleitet, Lieferbereitschaft und Kosten einander gegenüberzustellen. Abbildung 6-20 zeigt die wichtigsten Kennwerte dieser beiden Größen für die drei betrachteten Konzeptalternativen.

	Konzept 1 (solitär)	Konzept 2 (teilflexibel)	Konzept 3 (vollflexibel)
Lieferbereitschaft			
Erwartungswert	99,81 %	99,96 %	100,00 %
5-Percentil	98,95 %	99,74 %	100,00 %
95-Percentil	100,00 %	100,00 %	100,00 %
Vergleichsstückkosten			
Erwartungswert	426,36 €	389,81 €	397,09 €
5-Percentil	385,08 €	351,54 €	357,09 €
95-Percentil	468,54 €	428,43 €	468,54 €

Abbildung 6-20: Kennzahlen der betrachteten Konzeptalternativen

Die in Abschnitt 5.6.1.4 vorgestellte Methode des Flexibilitätsfensters bietet eine verdichtete Darstellung der oben aufgeführten Kennzahlen. Durch die graphische Aufbereitung der Ergebnisse erleichtert das Flexibilitätsfenster den Vergleich der diskutierten Rohbaukonzepte. In die Portfoliodarstellung Abbildung 6-21 wurden daher die Flexibilitätsfenster der drei alternativen Rohbaukonzepte eingezeichnet.

Betrachtet man zunächst die Erwartungswerte der drei Alternativen, so ist deutlich zu erkennen, dass das Solitärkonzept 1 sowohl hinsichtlich der Lieferbereitschaft als auch hinsichtlich der Vergleichsstückkosten den beiden anderen Konzepten unterlegen ist. Während der Erwartungswert der Lieferbereitschaft nur geringfügig (0,15 % bzw. 0,19 %) unter den Vergleichswerten liegt, liegen die Vergleichstückkosten um 36,57 Euro bzw. 29,29 Euro über denen der Investitionsalternativen.

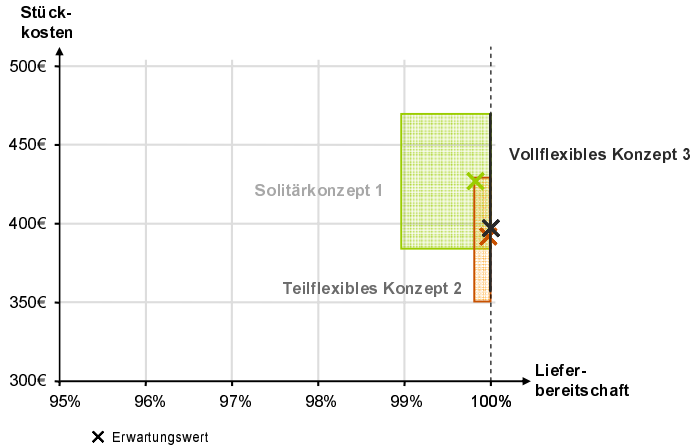


Abbildung 6-21: Flexibilitätsfenster der betrachteten Investitionsalternativen

Auch das durch die Planungsunsicherheiten bedingte Risiko wirkt sich auf das solitäre Rohbaukonzept 1 stärker aus: Während das Risiko für höhere Stückkosten bei allen drei Konzepten auf gleichem Niveau liegt (der Value at Risk beträgt in allen Fällen ca. 39 Euro), weist das Solitärkonzept das größte Risiko einer verminderten Lieferbereitschaft auf, was sich anhand der Breite des Flexibilitätsfensters leicht erkennen lässt. Dies lässt sich vornehmlich darauf zurückführen, dass durch die Aufteilung der herzustellenden Modelle auf eine größere Anzahl von Produktionslinien nur in geringerem Maße Kompensationseffekte bei Nachfrageschwankungen der einzelnen Produkte erzielt werden können; im Gegensatz zu den beiden anderen Konzepten ist es nicht möglich, den Materialfluss flexibel an Nachfrageentwicklungen anzupassen. So wird zeitweise die Kapazitätsgrenze einer Rohbaulinie erreicht, während die Auslastung in einer anderen deutlich unter 100 % liegt.

Das Solitärkonzept 1 schied damit als Investitionsalternative aus.

Der Vergleich von vollflexiblem (Konzept 3) und teilflexiblem (Konzept 2) Lösungsansatz erforderte hingegen eine genauere Betrachtung: Während mit dem teilflexiblen Konzept geringere Vergleichsstückkosten erzielt werden können, weist die vollflexible Alternative eine sichere Lieferbereitschaft von 100 % (teilflexibles Konzept: 99,96 %) auf, so dass das Flexibilitätsfenster zu eine senkrechten Linie wird. Da die Bandbreite möglicher Lieferbereitschaftsgrade beim teilflexiblen Konzept 2 sehr schmal ist und die Bandbreite der Vergleichsstückkosten etwa gleich groß, bot sich ein Vergleich der beiden Alternativen mit Hilfe des in Abschnitt 5.6.1.4 geschilderten Ansatzes der Opportunitätskosten an.

Die geringere Lieferbereitschaft des teilflexiblen Konzeptes 2 entspricht über den Betrachtungszeitraum einem entgangenen Produktionsvolumen von ca. 1.390 Einheiten. Dem

steht eine Reduktion der Vergleichsstückkosten von 7,90 Euro entgegen, was bei einer Gesamtabsatzmenge von 3,6 Millionen Einheiten Gesamteinsparungen von 28,4 Millionen Euro entspricht. Daraus ergibt sich ein Grenzwert für den Erwartungswert der Opportunitätskosten in Höhe von über 20.460 Euro. Wird also der Schaden, der durch die nicht befriedigte Nachfrage nach einer Einheit entsteht, mit Opportunitätskosten kleiner als 20.460 Euro taxiert, so ist das teilflexible Konzept zu präferieren, da die höhere Lieferbereitschaft des vollflexiblen Konzeptes nicht dessen höhere Gesamtkosten rechtfertigt.

Im Fallbeispiel wurden Opportunitätskosten von weniger als 20.460 Euro ermittelt; daher war bei Betrachtung nur des Erwartungswertes der Investitionsalternativen das teilflexible Konzept 2 zu präferieren.

Analog wurde unter Berücksichtigung der Risikopräferenz des Unternehmens eine Bewertung des Risikos einer möglicherweise verringerten Lieferbereitschaft aufgrund ungewöhnlich hoher Nachfrage vorgenommen, wie es die horizontale Aufspreizung des Flexibilitätsfensters von Konzept 2 angezeigt. Auch hier ergab sich eine Präferenz für das teilflexible Konzept 2.

Stresstests

Auch Stresstests, mit deren Hilfe das Verhalten des Produktionssystems bei Ausfall einzelner Zusammenbauten untersucht wurde, ergaben, dass eine Investition in das teilflexible Konzept 2 zu präferieren sei.

Dieses Ergebnis lässt sich leicht nachvollziehen: Beim Solitärkonzept 1 führt ein Ausfall eines Zusammenbaus dazu, dass das auf der betroffenen Linie zu produzierende Produkt nicht mehr hergestellt werden kann. Beim vollflexiblen Konzept 3 existiert nur eine Linie; ein Ausfall eines der drei Zusammenbauten führt zu einem kompletten Stillstand der Produktion. Nur beim teilflexiblen Konzept 2 können Ausfälle von Zusammenbauten, wenn auch nur teilweise und nur im Falle freier Kapazitäten auf der Ausweichlinie, durch die Verlagerung der Produktion auf eine andere Linie kompensiert werden.

Investitionsentscheidung

Es konnte nachgewiesen werden, dass im Fallbeispiel weder ein konventioneller, rein solitärer Rohbau noch ein vollflexibles Rohbaukonzept wirtschaftlich sinnvoll sind. Auf Basis der präsentierten Ergebnisse wurde die Entscheidung für eine Investition in das teilflexible Rohbaukonzept 2 getroffen.

6.3 Bewertung und kritische Reflexion

Es folgt eine Bewertung des Einsatzes der Methodik im Anwendungszusammenhang (Abschnitt 6.3.1). Sie basiert auf der in dieser Arbeit dargestellten Anwendung sowie zahlrei-

chen weiteren Praxisanwendungen. Als Kriterien für die Bewertung wurden die in Kapitel 3 erarbeiteten Anforderungen zugrunde gelegt.

Aufbauend auf dieser Prüfung im Anwendungszusammenhang erfolgt eine kritische Reflexion der Leistungsfähigkeit der Methodik verbunden mit der Identifikation weiteren Forschungsbedarfes (Abschnitt 6.3.2).

6.3.1 Bewertung im Anwendungszusammenhang

Inhaltliche Anforderungen

Die Methodik gibt zunächst durch die Modellierungsanforderungen einen morphologischen Kasten der relevanten Lösungselemente vor und unterstützt dadurch die Planer bei der schnellen Konfiguration sinnvoller Alternativen.

Die im Verlauf der Anwendung durchgeführten Auswertungen ermöglichen die Nutzung der Bewertungsergebnisse zur Systemoptimierung: Der Planer erhält konstruktive Empfehlungen für die optimale Einstellung der relevanten Parameter. Im Automobilrohbau geht es dabei insbesondere um die richtige Kombination der drei Lösungselemente Kompetenz und Kapazität einzelner Rohbauten sowie ihrer Verkettung.

Die abschließenden Auswertungen ermöglichen eine nachvollziehbare Bewertung der unterschiedlichen Konzepte und geben Antworten hoher Aussagekraft auf die belangvollen Fragestellungen wie denen nach Auslastungen, Lieferbereitschaft und Kosten. Insbesondere zeigen sie die Auswirkungen von Unsicherheit und Risiko auf und können so den Nutzen richtig dimensionierter und richtig parametrierter Flexibilität nachweisen. Die Anwendung der Methodik hilft so Automobilherstellern dabei, zu entscheiden, in welche Art von Flexibilität wie viel investiert werden soll. Dadurch unterstützt sie Automobilhersteller außer bei der Entscheidung für oder gegen Flexibilität auch bei der Entscheidung zwischen unterschiedlichen ihnen angebotenen Fertigungskonzepten.

Das Optimierungsverfahren ist daher für den geplanten Anwendungsfall geeignet.

Anforderungen an die Zielfunktion für die Optimierung

Die Zielfunktion ist der Kern einer jeden Optimierung; sind die zu optimierende Zielfunktion oder das Optimierungskriterium falsch gewählt, wird auch das Ergebnis der Optimierung fehlerhaft sein. Der Auswahl der richtigen Zielfunktion kommt daher besondere Bedeutung zu.

Die für die Optimierungsmethodik entwickelte Zielfunktion berücksichtigt den Flexibilitätsbedarf und gleicht ihn mit der Flexibilität des Produktionssystems sowie der Zielsetzung (Maximierung der Wirtschaftlichkeit) ab. Für die Bewertung werden dabei alle relevanten Kriterien, u. a. der konkrete Nutzen von Flexibilität (Erhöhung der Lieferbereitschaft) sowie

der durch sie entstehende (Zusatz-)Aufwand (zusätzliche Investitions- oder Betriebskosten), berücksichtigt und in einer Wirtschaftlichkeitsbewertung zusammengeführt.

Die Bewertungsgrößen geben Aufschluss über die Auswirkungen der betrachteten Unsicherheiten und ermöglichen es so, die Fähigkeit eines flexiblen Rohbaus, den Automobilhersteller gegen Planungsunsicherheiten abzusichern, zu bewerten.

Schließlich findet bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse im Rahmen der Berechnung der Zielfunktion der gesamte Lebenszyklus des Produktionssystems Berücksichtigung. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass der Nutzen flexibler Fertigungskonzepte sich häufig erst mittel- und langfristig manifestiert.

Die für die Optimierungsmethodik entwickelte Zielfunktion erfüllt damit die in Kapitel 3 identifizierten Kriterien.

Methodische Anforderungen

Zunächst lässt sich festhalten, dass das dargestellte Vorgehen reproduzierbar und transparent ist und damit eine grundlegende Anforderung erfüllt.

Weiterhin ist die Praxistauglichkeit des erarbeiteten Verfahrens eine Grundvoraussetzung dafür, dass es auch tatsächlich in der Rohbauplanung Anwendung findet; um die Akzeptanz bei Rohbauplanern und damit den Einsatz des Verfahrens zur Flexibilitätsoptimierung in der Praxis zu ermöglichen, mussten daher insbesondere die Praxisanforderungen nach Erhebbarkeit sowie richtigem Detaillierungsgrad der benötigten Eingangsdaten, angemessenem Durchführungsaufwand und geeigneter Datenausgabe erfüllt werden.

Die intensiven Diskussionen mit Planern und Entscheidern in der Praxis im Verlauf und zum Abschluss des Forschungsprozesses haben gezeigt, dass das Verfahren tauglich für den Einsatz in der betrieblichen Praxis ist:

- Es ist, insbesondere durch die Implementierung im IT-Tool, anwenderfreundlich und einfach durchzuführen.
- Alle benötigten Daten sind zum Einsatzzeitpunkt der Methodik, d. h. bereits in einer sehr frühen Phase des Planungsprozesses, verfüg- und mit geringem Aufwand beschaffbar.
- Der Zusatznutzen gegenüber bisher eingesetzten Verfahren ist den Planern klar erkennbar: Erstens ist das Verfahren schneller als die bisherigen manuellen Rechnungen und Trial-and-Error-Untersuchungen. Zweitens werden zusätzlich zu den in der Rohbauplanung etablierten Optimierungsverfahren und Kennzahlen zur Bewertung und Auswahl alternativer Konzepte zusätzliche Informationen und Aussagen zur Unterstützung des Entscheidungsprozesses und zur Optimierung der betrachteten Rohbaukonzepte generiert. Dabei handelt es sich insbesondere um Aussagen, die Risiken und Unsicherheiten quantifizieren.

- Das Verfahren ist „manuell genug“, um von den Planern akzeptiert zu werden, d. h. es sind ausreichend Eingriffsmöglichkeiten gegeben: Das System optimiert nicht selbständig; vielmehr gibt es dem Planer konkrete Empfehlungen, die dieser umsetzen kann – oder auch nicht. Die zur automatisierten Unterstützung der Systemauswahl vorgestellte Nutzwertanalyse ist lediglich optional.
- Schließlich waren sowohl Planer als auch Entscheider mit den zur Auswertung zur Verfügung gestellten Daten zufrieden: Planer können nach den Simulationsläufen auf umfangreiches Datenmaterial zurückgreifen und finden zahlreiche Verfahren zur genaueren Analyse des Systemverhaltens vor; für Entscheider bietet insbesondere das Flexibilitätsfenster eine aggregierte, aber dennoch aussagekräftige Form der Darstellung.

Allerdings sei abschließend angemerkt, dass die Methodik ein grundsätzliches Problem lebenszyklusorientierter Planung nicht lösen kann: die Diskrepanz zwischen den Lebenszyklen von Produktionssystemen und denjenigen von Entscheidern in den Unternehmen. Dieser Gegensatz führt dazu, dass Entscheider häufig an ihren persönlichen (kurzfristigen) Interessen orientierte Entscheidungen treffen, die im Gegensatz zur Lebenszyklusbetrachtung der Produktionssysteme stehen. Das entwickelte Vorgehen kann hier lediglich das Bewusstsein für den Nutzen einer Lebenszyklusorientierung und Transparenz im Entscheidungsprozess schaffen. Beides wird zwar zur Lösung des Problems beitragen, es aber nicht vollständig lösen.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die entwickelte Methodik alle identifizierten Anforderungen erfüllt.

Durch die Untersuchung im Praxiszusammenhang konnte damit nachgewiesen werden, dass die entwickelte Methodik dem eingangs formulierten Anspruch der Entwicklung eines Rahmenwerks sowie eines operablen Instrumentariums zur Flexibilitätsoptimierung genügt. Sie stellt einen gelungenen Ansatz zur Ergänzung der bisherigen Planungsprozesse im Rohbau dar und unterstützt effektiv die Bewertung und heuristische Optimierung der Flexibilität von Automobilrohbauten.

6.3.2 Kritische Reflexion

An einem Fallbeispiel wurden Nutzen und Anwendbarkeit der Methodik zur Flexibilitätsoptimierung im Automobilrohbau nachgewiesen. Was bisher unbeachtet blieb, ist die Bewertung der durch die Aufgabenstellung vorgenommenen Eingrenzung des Gültigkeitsbereiches. Daher folgt in diesem Abschnitt ein kritisches Hinterfragen der erarbeiteten Lösung. Außerdem lassen sich in einigen Bereichen im Sinne des explorativen Forschungsansatzes weiterer Forschungsbedarf bzw. weiteres Erkenntnispotenzial identifizieren:

Vielversprechend ist insbesondere die Ausweitung der erarbeiteten Ergebnisse auf weitere kapitalintensive Produktionsbereiche. Zunächst bietet sich dabei die Betrachtung hochautomatisierter Montagebereiche im Allgemeinen an. Neben dieser Ausweitung auf weitere Produktionsbereiche ist auch eine Ausweitung auf Netzwerke von Produktionsstätten denkbar.

Nicht modelliert ist in der vorliegenden Methodik die Interaktion des Rohbaus mit den anderen Gewerken einer Automobilfabrik. Eine sinnvolle Abstimmung der Gewerke ist für eine kosteneffiziente Produktion jedoch von herausragender Wichtigkeit. Daraus ergeben sich Restriktionen für eine sinnvolle Gestaltung des Rohbaus und seiner Flexibilität wie auch für die Gestaltung der anderen Gewerke. Die Berücksichtigung der Gewerkeabstimmung im Modell stellt daher ein interessantes Feld für weiterführende Forschungsarbeiten dar.

Wie in Abschnitt 5.4.3.6 erwähnt, sollten mit der Weiterentwicklung der Methodik Lösungen gefunden werden, die den Produktivitätsfortschritt durch Wiederhol- und Lerneffekte in der Produktion sowie den Produktivitätsfortschritt durch neue Technologien modellieren, ohne die Modellkomplexität zu stark ansteigen zu lassen.

Ergänzende Untersuchungen sollten sich der mehrdimensionalen Abbildung von Anpassungszuständen annehmen, bei der Freiheitsgrade einzeln mit Wertebereichen definiert sind und das Optimierungsmodell gezielt um verknüpfte Restriktionen sowie priorisierte Zielgrößen erweitert wird. Der Optimierungsalgorithmus kann dann mehrdimensional optimieren. Dies würde eine höhere Automatisierung des Optimierungsprozesses zulassen, ist allerdings nur mit sehr leistungsfähigen Algorithmen und Rechnern möglich.

Eine interessante Perspektive bietet die Anwendung des entwickelten IT-Tools in späteren, detaillierteren Planungsphasen oder sogar im taktischen Planungsbereich. Dazu müssten zunächst Produkte mit Merkmalen und Prozessketten modelliert werden. Prozesse müssten einzelnen Produktionseinheiten zugeordnet und mit Produktmerkmalen verknüpft werden. Dies würde auch die automatisierte Betrachtung von Nachfolgerflexibilität ermöglichen: Neue Produkte verfügen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit über bestimmte Produktmerkmale; daraus ergibt sich der Wiederverwendungsgrad der Maschinen.

Eine weitere interessante Erweiterung stellt die Rückführung der Auswertungsergebnisse zur Produktentwicklung dar. Welche Produktgestaltungsregeln lassen sich daraus ableiten?

Durch wiederholte Anwendung des Instrumentariums in der Praxis könnte schließlich als eine vielversprechende Weiterentwicklung Erfahrungswissen aufgebaut werden mit dem

Ziel der Ableitung allgemeiner Optimierungsregeln, ähnlich der von JORDAN UND GRAVES identifizierten Chaining-Regeln[469].

[469] vgl. Jordan, Graves: Manufacturing Process Flexibility, 1995.

7 Zusammenfassung

Zunehmende Modellvielfalt durch neu entstehende Produktnischen und immer **kürzere Lebenszyklen** ihrer Produkte **bei gleichem Gesamtabsatzvolumen** machen es der Automobilindustrie immer schwerer, eine wirtschaftliche Produktion ihrer Modelle zu gewährleisten. Zusätzlich sehen sich die Automobilhersteller mit erheblichen **Planungsunsicherheiten** konfrontiert; die realisierten Absatzzahlen stimmen in den seltensten Fällen mit den von der strategischen Programmplanung und vom Vertrieb erstellten Prognosen überein: Die realisierten Verkaufszahlen weichen um bis zu 40 % von den Prognosen zum Zeitpunkt der Grobplanung der Produktionssysteme ab. Eine Folge unter anderem dieser Planungsunsicherheiten ist, dass die **Auslastung** von Automobilrohbauten bei im Durchschnitt **unter 50 %** liegt.

Um trotz dieser Entwicklungen weiterhin wirtschaftlich konkurrenzfähige Fahrzeuge anbieten zu können, **muss die Automobilproduktion flexibler werden**. Insbesondere in kostenintensiven Produktionsabschnitten wie dem Karosserierohbau ist es erforderlich, die Anlageninvestitionen auf möglichst große Produktionsstückzahlen zu verteilen und so Stückkosten zu senken und Investitionsrisiken zu reduzieren. Angestoßen durch japanische Unternehmen bemühen sich Automobilhersteller in jüngerer Zeit verstärkt darum, ihre Rohbauten flexibler zu gestalten.

Geeignete **Ansätze zur Bewertung und Optimierung von Flexibilität** im Automobilrohbau **fehlen** jedoch.

Aus diesem **empirisch identifizierten Handlungsbedarf** wurde die **grundlegende Forschungsfrage** hergeleitet, welcher Gestalt ein Rahmenwerk und operables Instrumentarium seien, die die Bewertung und heuristische Optimierung der Flexibilität von Automobilrohbauten effektiv unterstützen. Die Beantwortung der gestellten Forschungsfrage führte über die Beantwortung fünfer abgeleiteter Fragen. Die Vorgehensweise zur Untersuchung der Problematik wurde am Forschungsprozess nach ULRICH angelehnt, der im Praxiszusammenhang beginnt und endet.

Zunächst wurde in den ersten beiden Kapiteln die erste abgeleitete Frage nach **flexibilitätsrelevanten Anforderungen an den Automobilrohbau** beantwortet. Nach einer Analyse der aktuellen Anforderungen an die Automobilindustrie wurden der Bedarf an und die Potenziale von Flexibilität in der Produktion hergeleitet und damit der Handlungsbedarf aus der Praxis identifiziert.

Auf dieser Grundlage und aufbauend auf den Spezifika des Automobilbaus sowie **relevanten Theorien aus den Bereichen der Flexibilitätsforschung und der Optimierung** wurden anschließend in Kapitel 3 **Anforderungen an eine Methodik zur Planung von Flexibilität** im Automobilrohbau abgeleitet und für die weitere Forschungsarbeit festge-

schrieben. Es wurde festgehalten, dass Ausmaß und Art der implementierten Flexibilität optimiert werden müssen. Außerdem muss die Vorteilhaftigkeit von Investitionen in Flexibilität und Wandlungsfähigkeit vor einer Umsetzung nachgewiesen werden. Dazu müssen Unsicherheit und Dynamik modelliert und in Bewertungen einbezogen werden.

Ein Vergleich vorhandener Flexibilitätsplanungsansätze mit diesen Anforderungen legt offen, dass die **vorliegenden Arbeiten lediglich Teilbereiche abdecken**. Für den automobilen Rohbau fehlen pragmatische Methodiken, die in nachvollziehbarer Weise und bei angemessenem Aufwand die Bewertung und Optimierung von Flexibilisierungsvorhaben erlauben. **Kernprobleme** der Bewertung sind dabei ihre Kontextunbezogenheit sowie ihr nicht-pekuniärer Charakter; Defizite existieren weiterhin in den Bereichen Produktionssystemmodellierung, Lebenszyklusbewertung, Kosten-/Nutzen-Gegenüberstellung und Berücksichtigung von Planungsunsicherheiten. Geeignete Optimierungsansätze existieren nicht.

Mit dem dritten Kapitel wurden daher als weitere Schritte auf dem Weg zur Konkretisierung des heuristischen Bezugsrahmens die weitere abgeleitete Forschungsfrage nach den Anforderungen an eine Methodik zur Flexibilitätsoptimierung im Automobilrohbau beantwortet sowie das Pflichtenheft für die zu entwickelnde Methodik erstellt: Gemäß der gestellten grundlegenden Forschungsfrage war das **Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung eines Rahmenwerks und eines darauf aufbauenden operablen Instrumentariums zur Flexibilitätsplanung, mit dem alternative Fertigungskonzepte im Automobilrohbau hinsichtlich ihrer Flexibilität sowie des zu erwartenden Nutzens bewertet und optimiert werden können** und das damit sowohl Rohbauplaner als auch Entscheider bei der Planung flexibler Produktionsanlagen unterstützt. Wegen des hohen Potenzials sowie der aktuellen Relevanz von Flexibilität im Automobilrohbau hat der Autor sich entschieden, Rahmenwerk und Instrumentarium in dieser Arbeit zunächst für das **Beispiel der Planung von Rohbaukonzepten** in der Automobilindustrie auszuarbeiten; dabei wurden jedoch eine möglichst generische Struktur und Vorgehensweise erarbeitet, um so eine spätere Übertragung auf andere (insbesondere kapitalintensive) produzierende Bereiche zu ermöglichen.

Aufbauend auf der in Kapitel 3 dargestellten Untersuchung der flexibilitätsbestimmenden Eigenschaften eines Automobilrohbaus und der Planungsprozesse im Automobilrohbau und damit auf der Beantwortung zweier weiterer abgeleiteter Forschungsfragen wurde in Kapitel 4 zunächst das Rahmenwerk zur Flexibilitätsoptimierung grob entworfen und anschließend in Kapitel 5 gemeinsam mit dem Instrumentarium für die praktische Anwendung[470] ausgearbeitet. Es basiert auf einem vereinfachten Systems-Engineering-Ansatz

[470] Die Anwendung dieses Instrumentariums wird in dieser Zusammenfassung lediglich grob geschildert. Eine übersichtliche, aber detaillierte Darstellung findet sich im Abschnitt 5.8 „Zusammenfassende Darstellung der Methodik“.

und besteht im **Kern aus drei Modulen**: **Aufnahme von Anforderungen und Rahmenbedingungen**, **Gestaltung und Optimierung des betrachteten Produktionssystems** sowie **Simulation und Auswertung**. Die (heuristische) **Optimierung** wird dabei auf Basis der aufbereiteten Auswertungen unterstützt.

Zur Abbildung der marktseitigen Anforderungen an den Automobilrohbau werden **Szenarien** verwendet. Mit Eintrittswahrscheinlichkeiten behaftete Szenarien ermöglichen es, sowohl **Dynamik als auch Unsicherheit von Nachfrageverläufen** gezielt **abzubilden**. Es wurden unterschiedliche Verfahren zur Herleitung dieser Szenarien in der Praxis entwickelt.

Kern der Entwicklung des Modellierungskonzeptes war die **Identifikation der flexibilitätsbezogenen Kernparameter**: **Produktallokation und Dimensionierung der Kapazitäten der einzelnen Zusammenbauten** als Kernparameter legen sowohl Produktmix- als auch Volumenflexibilität zum Planungszeitpunkt fest und wirken sich damit wesentlich auf die Wirtschaftlichkeit des Rohbaus aus. Die Nachfolgerflexibilität ist darüber hinaus von einer Vielzahl weiterer Faktoren abhängig, insbesondere von der Verknüpfung des Produktentwicklungs- und Rohbauplanungsprozesses. Weiterhin gestatten Anpassungen von Schichtmodell und Bandbelegung eine Kapazitätsanpassung im laufenden Betrieb. Es wurde ein **Konzept zur schnellen und praxistauglichen Modellierung dieser** relevanten **Parameter** samt aller dazugehörigen Kostenfunktionen entwickelt.

Das **Simulationsmodul** führt anschließend modellierte Produktionssysteme und Marktanforderungen zusammen; die **Wirtschaftlichkeit** der unterschiedlichen Konzeptalternativen bei Eintritt verschiedener Marktszenarien wird **berechnet**. Das Simulationsmodell ermittelt dabei für einen gegebenen Nachfrageverlauf den wirtschaftlich optimalen Evolutionspfad für ein Produktionssystem über seinen gesamten Lebenszyklus und legt diesen der Bewertung zugrunde.

Ein weiterer Kernpunkt des Forschungsprozesses war die **Auswertung und Aufbereitung der Simulationsergebnisse**. Insbesondere das sogenannte **Flexibilitätsfenster**, eine im Rahmen der Dissertation entwickelte aggregierte Darstellungsweise von Nutzen und Aufwand von Flexibilität, bietet hierzu ein wirkungsvolles Hilfsmittel, das zudem Aussagen über die Auswirkungen der Planungsunsicherheiten erlaubt. Der Entwicklung des Flexibilitätsfensters lagen theoretische Überlegungen zugrunde, anhand derer sich zeigen lässt, dass die Darstellung der Vergleichstückkosten über der Lieferbereitschaft in einem Portfolio **die wichtigsten entscheidungsbestimmenden Faktoren zielführend abbildet**. Dabei werden neben dem Erwartungswert der beiden genannten Zielgrößen auch deren mögliche Wertebereiche wiedergegeben, die das Flexibilitätsfenster aufspannen. Aus der Lage des Erwartungswertes innerhalb des Flexibilitätsfensters **lassen sich unmittelbar Aussagen über das durch die Planungsunsicherheiten bedingte Investitionsrisiko** treffen.

Das Flexibilitätsfenster erfüllt damit die eingangs aufgestellte Forderung nach Anwendbarkeit der Methodik bereits in frühen Planungsphasen: Es **ermöglicht** auf Basis der zu diesem frühen Anwendungszeitpunkt verfügbaren groben Daten **relevante Aussagen zum konkreten wirtschaftlichen Nutzen implementierter Flexibilität**.

Im Rahmen des Forschungsprozesses entwickelte, auf diesen Auswertungen basierende Verfahren **ermöglichen Planern eine** eingehende Prüfung sowie **zielgerichtete (heuristische) Optimierung flexibilitätsrelevanter Merkmale von Automobilrohbauten**. Weiterhin unterstützt die Methodik Entscheidungsträger durch eine prägnante Darstellung der entscheidungsrelevanten Informationen und **ermöglicht** damit **explizite Flexibilitätsentscheidungen auf Executive-Level**. Damit werden implizite Entscheidungen, die auf niedrigeren Entscheidungsebenen und in der Regel gegen Flexibilität getroffen werden, verhindert.

Die Unterstützung durch ein im Rahmen dieser Arbeit als **operables Instrumentarium** entwickeltes **anwendungsfreundliches IT-Tool** erleichtert die Anwendung der Planungsmethodik und befähigt Rohbauplaner, innerhalb kürzester Zeit Konzeptideen abzubilden, hinsichtlich der Erfüllung des konkret vorherrschenden Flexibilitätsbedarfes multikriteriell zu bewerten und zu optimieren sowie mit alternativen Konzepten zu vergleichen.

Durch die **Anwendung im Praxiszusammenhang** anhand aktueller Rohbauplanungsprojekte eines renommierten Automobilherstellers konnten Plausibilität und Validität der Methodik nachgewiesen werden.

Der **Beitrag zur Wissenschaft** ist der Aufbau eines Rahmenkonzeptes zur Bewertung und heuristischen Optimierung von Flexibilität im Automobilrohbau. Dabei wurde nicht nur ein theoretischer Rahmen in Form einer generischen Bewertungsstruktur geschaffen; es wurden insbesondere auch Kennzahlen und Verfahren zur kontextbezogenen, lebenszyklusorientierten monetären Bewertung von Flexibilität entwickelt.

Das entwickelte Instrumentarium trägt weiterhin zur **Beratung der Praxis** bei. Es erlaubt die Quantifizierung von Aufwand und Nutzen von Flexibilität im Automobilrohbau unter Berücksichtigung von Dynamik und Unsicherheiten. Die Aufbereitung der Bewertungsergebnisse ermöglicht dem Praktiker eine zielgerichtete heuristische Optimierung von Flexibilität im Rohbau sowie die Einbeziehung von Planungsergebnissen in Investmententscheidungen. Mit Hilfe des vorliegenden Konzeptes können Unternehmen daher wirtschaftliche Potenziale von Flexibilität optimal erschließen.

Literaturverzeichnis

Aggteleky, B.: *Fabrikplanung. Band 1*. 2. Aufl., München: Carl Hanser, 1987.

Albert, H.: *Marktsoziologie und Entscheidungslogik: Zur Kritik der reinen Ökonomik*. Tübingen: Mohr Siebeck, 1998.

Aurich, J. C.; Barbian, P.; Naab, C.: *Produktionsstrategien im Produktlebenszyklus*. In: Zeitschrift für Wirtschaftlichen Produktionsbetrieb (ZWF). 99. Jg., 2004, Nr. 5, S. 218-223.

Banks, J.; Carson, J.; Nelson, B. L.; Nicol, D.: *Discrete-Event System Simulation*. 4. Aufl., Prentice Hall, 2004.

Barad, M.; Sipper, D.: *Flexibility in Manufacturing Systems: Definitions and Petri-Net Modelling*. In: International Journal of Production Research. 26. Jg., 1988, Nr. 2, S. 237-248.

Barnett, L.; Leaney, P. G.; Matke, J.: *Striving for Manufacturing Flexibility in Body Construction*. Proceedings of the IMechE AutoTech/95 Conference, Birmingham, UK, 1995.

Baumeister, M.: *Fabrikplanung im turbulenten Umfeld: Methodik zur Zielplanung einer Fabrik unter Berücksichtigung eines turbulenten Unternehmensumfeldes und der übergeordneten Unternehmensziele*. Diss. Universität Karlsruhe, 2002.

Bean, M. A.: *Probability: The Science of Uncertainty with Applications to Investments, Insurance, and Engineering*. 1. Aufl., Pacific Grove, California: Brooks Cole, 2000.

Behrbohm, P.: *Flexibilität in der industriellen Produktion: Grundüberlegungen zur Systematisierung und Gestaltung der produktionswirtschaftlichen Flexibilität*. Frankfurt a. M.: Lang, 1985.

Beier, H. H.; Schwall, E.: *Fertigungsleittechnik*. 1. Aufl., München: Hanser, 1991.

Berkin, D.; Brazier, M.; Klungle, R.; Menawat, A.; Na, H. S.: *Management of Simulation Technology in Large Companies*. In: Oren, T.; Birta, L. (Hrsg.): Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, San Diego, Calif.: Society for Computer Simulation, 1995, S. 361-366.

Binder, V. A.; Kantowsky, J.: *Technologiepotentiale: Neuausrichtung der Gestaltungsfelder des Strategischen Technologiemanagements*. Diss. Universität St. Gallen, 1996.

Bish, E. K.; Muriel, A.; Biller, S.: *Managing Flexible Capacity in a Make-to-Order Enviroment*. 2000.

Bleicher, K.: *Das Konzept Integriertes Management*. 6. Aufl., Frankfurt, New York: Campus, 2001.

Bleines, A.; Nestle, T.: *Planung eines Idealrohbaus für Baureihe XY*. Ulm: DaimlerChrysler AG, 2004.

Bomm, H.-J.: *Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme*. Diss. Technische Universität München, 1992.

Böning, M.: *Einsatzmöglichkeiten eines lebenszyklusorientierten Controlling von Produktionssystemen*. Diss. Ruhruniversität Bochum, 1997.

Brill, P.; Mandelbaum, M.: *On Measures of Flexibility in Manufacturing Systems*. In: International Journal of Production Research. 27. Jg., 1989, Nr. 5, S. 747-756.

Browne, J.; Dubois, D.; Rathmill, K.; Sethi, S. P.; Stecke, K. E.: *Classification of Flexible Manufacturing Systems*. In: The FMS Magazine. 2. Jg., 1984, Nr. 4, S. 114-117.

Bruynesteyn, M.: *Flex Appeal*. Prudential Equity Group, LLC, 2003.

Burke, M.; Haepp, H. J.; Walz, G.: *Flexible Fertigung: Zukünftige Anforderungen an die Produktionstechnik*. DaimlerChrysler AG, 2003.

Buzacott, J. A.: *The Fundamental Principles of Flexibility in Manufacturing Systems*. Proceedings of the First International Conference on Flexible Manufacturing Systems, Brighton, U. K.: IFS (Conference) Ltd., 1982, S. 13-22.

Buzacott, J. A.; Mandelbaum, M.: *Flexibility and Productivity in Manufacturing Systems*. Proceedings of the IIE Fall Conference, Chicago, IL, 1985, S. 404–413.

Buzacott, J. A.; Yao, D. D.: *Flexible Manufacturing Systems: A Review of Analytical Models*. In: Management Science. 32. Jg., 1986, Nr. 7, S. 890–905.

Carlsson, B.: *Flexibility and the Theory of the Firm*. In: International Journal of Industrial Organization. 7. Jg., 1989, S. 179-203.

Chandra, P.; Tombak, M. M.: *Models for the Evaluation of Routing and Machine Flexibility*. In: DecisionCraft Analytics Paper, 1991, Nr. 172, S. 1-13.

Chang, A.-Y.: *A Framework for Understanding Manufacturing Flexibility*. Industrial Engineering Department, National Huwei Institute of Technology, 2000.

Chapman, C. B.; Ward, S.: *Managing Project Risk and Uncertainty: A Constructively Simple Approach to Decision Making*. Chichester: John Wiley, 2002.

Chatterjee, A.; Cohen, M.; Maxwell, W.; Miller, L.: *Manufacturing Flexibility: Models and Measurements.* Proceedings of the 1st ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems, Ann Arbor, 1984, S. 49-64.

Chryssolouris, G.: *An Assessment of Flexibility in Manufacturing Systems*. In: Manufacturing Review. 5. Jg., 1992, Nr. 2, S. 105-116.

Chryssolouris, G.: *Flexibility and its measurement*. In: Annals of CIRP. 45. Jg., 1996, Nr. 2, S. 581-587.

Corsten, H.: *Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*. 8. Aufl., München: Oldenbourg, 1999.

Cox, J. F.; Blackstone, J. H.: *APICS Dictionary*. 10. Aufl., Falls Church, VA: Amer Production & Inventory, 2001.

Daenzer, W. F.; Huber, F.: *Systems Engineering*. 8. Aufl., Zürich: Industrielle Organisation, 1994.

DaimlerChrysler: *Intranetseite des "Kompetenzfeld Rohbauplanung", Stand 05.04.2004. Internes Dokument*. Stuttgart: DaimlerChrysler AG, 2004.

Dallery, Y.; Gershwin, S. B.: *Manufacturing Flow Line Systems: A Review of Models and Analytic Results*. In: Queueing Systems: Theory Applications. 12. Jg., 1992, Nr. 1-2, S. 3-94.

De Toni, A.; Tonchia, S.: *Manufacturing Flexibility: a Literature Review*. In: International Journal of Production Research. 36. Jg., 1998, Nr. 6, S. 1587-1617.

Domschke, W.; Scholl, A.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung aus entscheidungstheoretischer Sicht*. 2. Aufl., Berlin: Springer, 2003.

Dormayer, H.-J.: *Konjunkturelle Früherkennung und Flexibilität im Produktionsbereich*. 1. Aufl., München: Ifo-Institut für Wirtschaftsforschung, 1986.

Elango, B.: *Selecting a Flexible Manufacturing System: A Strategic Approach.* In: LRP. 27. Jg., 1994, Nr. 3, S. 118-126.

Felix, H.: *Unternehmens- und Fabrikplanung: Planungsprozesse, Leistungen und Beziehungen.* 1. Aufl., München: Hanser, 1998.

Fine, C. H.; Freund, R. M.: *Optimal Investment in Product-Flexible Manufacturing Capacity.* In: Management Science. 36. Jg., 1990, Nr. 4, S. 449-466.

Fleiner, O.: *Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Rohbaualternativen am Beispiel des Nutzfahrzeug-Rohbaus Werk Wörth.* Studienarbeit DaimlerChrysler, 2003.

Fox, J. G.: *Effective Application of Simulation in the Life Cycle of a Manufacturing Cell Project.* In: Nelson, B.; Kelton, W. D.; Clark, G. M. (Hrsg.): Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference, Piscataway, New Jersey: IEEE, 1991, S. 411-418.

Frey, H. C.: *Quantitative Analysis of Uncertainty and Variability in Environmental Policy Making.* Washington, D. C.: Directorate for Science and Policy Programs, American Association for the Advancement of Science, 1992.

Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: *Szenario-Management.* 2. Aufl., München, Wien: Carl Hanser, 1996.

Gerwin, D.: *Manufacturing Flexibility: A Strategic Perspective.* In: Management Science. 39. Jg., 1993, Nr. 4, S. 395-410.

Golden, B. L.; Harker, P. T.; Wasil., E. A.: *The Analytic Hierarchy Process: Applications and Studies.* New York: Springer, 1989.

Goldman, S. L.; Nagel, R. N.; Preiss, K.: *Agile Competitors and Virtual Organizations: Strategies for Enriching the Customers.* 1. Aufl., New York, London, Melbourne, Toronto, Bonn, Singapore, Tokyo, Mexico City: Van Nostrand Reinhold, 1995.

Goldman, S. L.; Nagel, R. N.; Preiss, K.; Warnecke, H.-J.: *Agil im Wettbewerb: Die Strategien der virtuellen Organisation zum Nutzen der Kunden.* 1. Aufl., Berlin: Springer, 1996.

Gottschalk, L.: *Flexibilitätsprofile: Analyse und Konfiguration von Strategien zur Kapazitätsanpassung in der Produktion.* Diss. ETH Zürich, 2005.

Graves, S. C.; Tomlin, B. T.: *Process Flexibility in Supply Chains.* In: Management Science. 49. Jg., 2003, Nr. 7, S. 907-919.

Guba, E. G.; Lincoln, Y. S.: *Competing Paradigms in Qualitative Research.* In: Denzin, N. K.; Lincoln, Y. S. (Hrsg.): Handbook of Qualitative Research, Thousand Oaks: SAGE, 1994.

Gupta, D.: *On Measurement and Valuation of Manufacturing Flexibility.* In: International Journal of Production Research. 31. Jg., 1993, Nr. 12, S. 2947-2958.

Gupta, Y. P.; Goyal, S.: *Flexibility of Manufacturing Systems: Concepts and Measurements.* In: European Journal of Operations Research. 43. Jg., 1989, Nr. 2, S. 119-135.

Gustavsson, S.: *Flexibility and Productivity in Complex Production Processes.* In: International Journal of Production Research. 22. Jg., 1984, Nr. 5, S. 801-808.

Gutenberg, E.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Band 1: Die Produktion.* 1. Aufl., Berlin: Springer, 1951.

Haller, M.: *Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflußsysteme der variantenreichen Großserienproduktion.* Diss. TU München, 1999.

Hartmann, M.: *Entwicklung eines Kostenmodells für die Montage: Ein Hilfsmittel zur Montageanlagenplanung.* Diss. RWTH Aachen, 1993.

Heinen, E.: *Einführung in die Betriebswirtschaftslehre.* 1. Aufl., Wiesbaden: Gabler, 1968.

Helberg, P.: *PPS als CIM-Baustein: Gestaltung der Produktionsplanung und -steuerung für die computerintegrierte Produktion.* 1. Aufl., Berlin: Erich Schmidt, 1987.

Hermann, U.; Schuh, G. S.: *Wertorientiertes Ressourcenmanagement.* Diss. Gabler, 1996.

Hernández Morales, R.: *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung.* Diss. Universität Hannover, VDI, 2003.

Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: *Factory Physics.* 2. Aufl., Boston: McGraw-Hill, 2001.

Hornyák, J.; Monostori, L.: *Genetic Algorithms for Predictive and Reactive Scheduling of Manufacturing Systems.* Proceedings of ICME98 (CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering), Capri, Italy, 1998, S. 213-220.

Horvath, P.; Mayer, R.: *Produktionswirtschaftliche Flexibilität.* In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium. 15. Jg., 1986, Nr. 2, S. 69-76.

Janssen, H.: *Flexibilitätsmanagement: Theoretische Fundierung und Gestaltungsmöglichkeiten in strategischer Perspektive.* Diss. Ludwig-Maximilians-Universität München, 1997.

Jayaraman, A.; Agarwal, A.: *Simulating an Engine Plant.* In: Manufacturing Engineering. 117. Jg., 1996, Nr. 5, S. 60-68.

Jordan, W. C.; Graves, S. C.: *Principles on the Benefits of Manufacturing Process Flexibility.* In: Management Science. 41. Jg., 1995, Nr. 4, S. 577-594.

Kalmbach, R.; Dannenberg, J.: *Automobiltechnologie 2010: Technologische Veränderungen im Automobil und ihre Konsequenzen für Hersteller, Zulieferer und Ausrüster.* Mercer Management Consulting, 2001.

Kleijnen, J. P. C.: *Statistical Tools for Simulation Practitioners.* New York: Marcel Dekker, 1987.

Kochan, A.: *Bodyshop Trends: A Flexible Tale of Processes and Materials.* Automotive World Knowledge. World Automotive Manufacturing Special Report: Bodyshop Trends, 2002, S. 1-3.

Koller, H.: *Simulation.* In: Grochla, E. (Hrsg.): Handwörterbuch der Organisation, 1. Aufl., Stuttgart: Schäffer, 1969, S. 1486-1498.

Köpcke, U.; Küppers, R.: *Mit Modulen zur skalierbaren Karosserie.* Internationaler Expertenkreis Karosseriebau, Fellbach, 2003.

Kromrey, H.: *Empirische Sozialforschung. Modelle und Methoden der standardisierten Datenerhebung und Datenauswertung.* 10. Aufl., Opladen: Leske + Budrich, 2002.

Kubicek, H.: *Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung.* In: Köhler, R. (Hrsg.): Empirische und handlungstheoretische Forschungskonzeption in der Betriebswirtschaftslehre, Stuttgart, 1977.

Kuhn, T. S.: *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen.* 16. Aufl., Frankfurt: Suhrkamp, 2003.

Ladwig, J.; Petz, U.: *Herstellung von einbaufähigen Modulen für den Karosseriebau: Erfahrungsbericht eines Zulieferers.* Internationaler Rohbau-Expertenkreis September 2003, 2003.

Lakatos, I.: *Falsifikation und die Methodologie wissenschaftlicher Forschungsprogramme.* In: Lakatos, I.; Musgrave, A. (Hrsg.): Kritik und Erkenntnisfortschritt, Braunschweig: Vieweg, 1974, S. 89-134.

Lorek, D.; Lorenzen, T.; Mellott, R.: *Business Value of Manufacturing Flexibility.* Master Thesis Michigan State University, 2002.

MacDuffie, J. P.; Pil, F. K.: *From Fixed to Flexible: Automation and Work Organization Trends from the International Assembly Plant Study.* In: Shimokawa, K. (Hrsg.): Transforming Automobile Assembly: Experience in Automation and Work Organization, Berlin: Springer, 1997.

Mag, W.: *Grundzüge der Entscheidungstheorie.* 1. Aufl., München: Vahlen, 1990.

Mandelbaum, M.: *Flexibility in Decision Making: An Exploration and Unification.* Diss. University of Toronto, 1978.

Mascarenhas, B.: *Planning for Flexibility.* In: Long Range Planning. 14. Jg., 1981, Nr. 5, S. 78-82.

Maurer, A.; Stark, W. A.: *Steering Carmaking into the 21st Century: From Today's Best Practices to the Transformed Plants of 2020.* The Boston Consulting Group, 2001.

Mayring, P.: *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken.* 8. Aufl., Weinheim [u.a.]: Beltz, 2003.

McKinsey/WZL: *Tomorrow's Automotive Production.* RWTH Aachen, 2005.

Merchant, M. E.: *Current Status of and Potential for Automation in the Metal Working Manufacturing Industry.* In: CIRP Annals of Manufacturing Technology. 24. Jg., 1983, Nr. 2, S. 573-574.

Milberg, J.; Reinhart, G.: *Produktionssystemplanung.* In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte: Produktion und Management, 7. Aufl., Berlin: Springer, 1996, S. 10-11 - 10-126.

Morgan, M. G.; Henrion, M.: *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis.* Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

Muriel, A.; Somasundaram, A.; Zhang, Y.: *Impact of Partial Manufacturing Flexibility on Production Variability.* University of Massachusetts Amherst. Under second review in Manufacturing and Service Operations Management, 2003.

N. N.: *Brockhaus Enzyklopädie in 24 Bänden. Band 7.* 19. Aufl., Mannheim: F. A. Brockhaus, 1989-1994.

N. N.: *Brockhaus Enzyklopädie in 24 Bänden. Band 16.* 19. Aufl., Mannheim: F. A. Brockhaus, 1989-1994.

N. N.: *Gabler Wirtschaftslexikon.* 14. Aufl., Wiesbaden: Gabler, 1997.

N. N.: *More Fall-out from Chernobyl.* The Economist, 27.06.1998.

N. N.: *Richtlinie über Altfahrzeuge 2000/53/EG.* 2000.

N. N.: *Adhesives: Production Solutions Hampered by Unpredictable Behaviour.* In: Kochan, A. (Hrsg.): Automotive World Knowledge. World Automotive Manufacturing Special Report: Bodyshop Trends, 2002, S. 16-17.

N. N.: *Aluminium: Automakers Rethink Production Processes.* In: Kochan, A. (Hrsg.): Automotive World Knowledge. World Automotive Manufacturing Special Report: Bodyshop Trends, 2002, S. 14-15.

N. N.: *Benchmarking Projekt Planning Excellence: Strategische Planung effektiv gestalten.* Universität St. Gallen, 2002.

N. N.: *BMW Plant Visit: Innovative Weld Bonding for 7-Series Body.* In: Kochan, A. (Hrsg.): Automotive World Knowledge. World Automotive Manufacturing Special Report: Bodyshop Trends, 2002, S. 6-7.

N. N.: *Outsourcing: Bodyshops Could be Turning to More Outsourcing.* In: Kochan, A. (Hrsg.): Automotive World Knowledge. World Automotive Manufacturing Special Report: Bodyshop Trends, 2002, S. 19-20.

N. N.: *ISO Standards Compendium: ISO 9000 - Quality Management.* 10. Aufl., International Organization for Standardization, 2003.

N. N.: *Duden Fremdwörterbuch.* 8. Aufl., Mannheim: Bibliographisches Institut, 2005.

Naitoh, T.; Yamamoto, K.; Kodama, Y.; Honda, S.: *The Development of an Intelligent Body Assembly System.* In: Shimokawa, K. (Hrsg.): Transforming Automobile Assembly - Experience in Automation and Work organization, Berlin: Springer, 1997.

Narain, R.; Yadav, R. C.; Sarkis, J.; Cordeiro, J. J.: *The Strategic Implications of Flexibility in Manufacturing Systems.* In: International Journal of Agile Management Systems. 2. Jg., 2000, Nr. 3, S. 202-213.

Niemann, J.; Westkämper, E.: *Dynamisches Life Cycle Controlling von ganzheitlichen Produktionssystemen mit erfahrungskurverbasierten Planungsverfahren.* In: wt Werkstattstechnik online. 94. Jg., 2004, Nr. 10, S. 553-557.

Nilsson, C.-H.; Nordahl, H.: *Making Manufacturing Flexibility Operational: Distinctions and Examples.* In: Integrated Manufacturing Systems. 6. Jg., 1995, Nr. 2, S. 4-10.

Nyhuis, P.; Heger, C. L.: *Adequate Factory Transformability at Low Costs.* Proceedings of the COMA 2004 International Conference on Competitive Manufacturing, Stellenbosch, Südafrika, 2004.

Osburg, B.; Adam, H.: *NewSteelBody: Leichtbau mit Stahl für Automobile mit Zukunft.* ThyssenKrupp Stahl AG, 2003.

Ost, S.: *Wirtschaftliche Bewertung der Produktionsflexibilität.* In: KRP (Kostenrechnungspraxis), 1995, Nr. 3, S. 153-158.

Parker, R. P.; Wirth, A.: *Manufacturing Flexibility: Measures and Relationships.* In: European Journal of Operational Research. 118. Jg., 1999, Nr. 3, S. 429-449.

Patchong, A.; Lemoine, T.; Kern, G.: *Improving Car Body Production at PSA Peugeot Citroen.* In: Interfaces. 33. Jg., 2003, Nr. 1, S. 36-49.

Pfohl, H.-C.: *Logistiksysteme: betriebswirtschaftliche Grundlagen.* 6. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2000.

Popper, K.: *Die Logik der Sozialwissenschaften.* In: Adorno, T. W. (Hrsg.): Der Positivismusstreit in der deutschen Soziologie, Neuwied/Berlin: Luchterhand, 1969, S. 103-123.

REFA: *Methodenlehre der Betriebsorganisation: Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme*. 2. Aufl., München: Carl Hanser, 1990.

Reichert, A. K.; Moore, J. S.; Byler, E.: *Financial Analysis among Large U.S. Corporations: Recent Trends and the Impact of the Personal Computer Industry*. In: Journal of Business Finance & Accounting. 15. Jg., 1993, Nr. 4, S. 469-485.

Reinhart, G.: *Innovative Prozesse und Systeme: Der Weg zu Flexibilität und Wandlungsfähigkeit*. In: Milberg, J.; Reinhart, G. (Hrsg.): Mit Schwung und Aufschwung, Münchner Kolloquium 1997, Landsberg/Lech: MI, 1997.

Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Hirschberg, A.; Selke, C.: *Reaktionsfähigkeit für Unternehmen: Eine Antwort auf turbulente Märkte*. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF). 94. Jg., 1999, Nr. 1/2, S. 22-26.

Rößl, D.: *Die Entwicklung eines Bezugsrahmens und seine Stellung im Forschungsprozeß*. In: Journal für Betriebswirtschaft, 1990, Nr. 2, S. 99-110.

Rumelt, R. P.; Teece, D. J.; Schendel, D. E.: *Fundamental Issues in Strategy: A Research Agenda*. Boston: Harvard Business School Press, 1994.

Saaty, T. L.: *Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process*. 2. Aufl., Pittsburgh, PA: RWS, 1990.

Saleh, J. H.; Hastings, D. E.; Newman, D. J.: *Extracting the Essence of Flexibility in System Design*. Cambridge, Ma.: M.I.T., 2001.

Saltelli, A.; Chan, K.; Scott, M.: *Handbook of Sensitivity Analysis*. Chichester: John Wiley, 2000.

Saltelli, A.; Tarantola, S.; Campolongo, F.; Ratto, M.: *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. Chichester: John Wiley, 2004.

Schaefer, F.-W.: *System zur Planung und Nutzung der Flexibilität in der Fertigung*. Diss. RWTH Aachen, 1980.

Schanz, G.: *Wissenschaftstheoretische Grundfragen*. In: Kieser, A.; Reber, G.; Wunderer, R. (Hrsg.): Handwörterbuch der Führung. Band 10, Stuttgart: Schäffer Poeschel, 1987.

Schauerhuber, M.: *Produktionswirtschaftliche Flexibilität: Eine Konstruktion pekuniärer, kontextbezogener und interagierender Flexibilitätsmaße*. 1. Aufl., Wien: Service-Fachverlag, 1998.

Schmigalla, H.: *Fabrikplanung. Begriffe und Zusammenhänge*. 1. Aufl., München, Wien: Carl Hanser, 1995.

Schneeweiss, C.: *Flexibilität, Elastizität und Reagibilität*. In: Kern, W. (Hrsg.): Handbuch der Produktionswirtschaft, 2. Aufl., Stuttgart: Schaeffer-Poeschel, 1996.

Schönsleben, P.: *Integrales Logistikmanagement: Planung und Steuerung der umfassenden Supply Chain*. 4. Aufl., Berlin: Springer, 2004.

Schuh, G.; Bergholz, M.: *Collaborative Production on the Basis of Object Oriented Software Engineering Principles*. In: CIRP Annals of Manufacturing Technology. 52. Jg., 2003, Nr. 1, S. 393-396.

Schuh, G.; Bergholz, M.; Liestmann, V.; Merchiers, A.; Sander, B.; Spille, J.: *Modulare Dienstleistungen als Beitrag zur Flexibilisierung global verteilter Produktion*. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF). 98. Jg., 2003, Nr. 5, S. 210-213.

Schuh, G.; Friedli, T.; Kunz, P.: *Diskontinuitäten auf dem Weg zur Produktion der Zukunft*. In: Industrie Management. 16. Jg., 2000, Nr. 5, S. 23-28.

Schuh, G.; Friedrich, C.; Wemhöner, N.: *FlexibilityWindows: A Method for Evaluating and Visualising Production Flexibility*. Proceedings of the EurOMA International Conference on Operations and Global Competitiveness, Budapest, Hungary, 2005, S. 1612-1621.

Schuh, G.; Gottschalk, S.: *Skalierbare Produktionslinien in der Automobilindustrie*. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF). 99. Jg., 2004, Nr. 7-8, S. 376-380.

Schuh, G.; Gulden, A.; Wemhöner, N.; Kampker, A.: *Bewertung der Flexibilität von Produktionssystemen*. In: wt Werkstattstechnik online. 94. Jg., 2004, Nr. 6, S. 299-304.

Schuh, G.; Harre, J.; Gottschalk, S.; Kampker, A.: *Design for Changeability (DFC): Das richtige Maß an Wandlungsfähigkeit finden*. In: wt Werkstattstechnik online. 94. Jg., 2004, Nr. 4, S. 100-106.

Schuh, G.; Van Brussel, H.; Boer, C.; Valckenaers, P.; Sacco, M.; Bergholz, M.; Harre, J.: *A Model-Based Approach to Design Modular Plant Architectures*. Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Saarbrücken, 2003, S. 369-373.

Schuh, G.; Wemhöner, N.: *Bewertung der Lebenszykluskosten von Produktionssystemen*. In: Mertins, K.; Rabe, M. (Hrsg.): Experiences from the Future: New Methods and Applications in Simulation for Prodction and Logistics, 1. Aufl., Stuttgart: IRB, 2004.

Schuh, G.; Wemhöner, N.; Friedrich, C.: *Lifecycle Oriented Evaluation of Automotive Body Shop Flexibility*. Proceedings of the CARV 05 (International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production), München, 2005.

Schuh, G.; Wemhöner, N.; Friedrich, C.: *Scenario-Based Lifecycle Analysis of Manufacturing Systems*. Proceedings of the 38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Florianopolis, Brasilien, 2005.

Schuh, G.; Wemhöner, N.; Kampker, A.: *Lebenszyklusbewertung flexibler Produktionssysteme*. In: wt Werkstattstechnik online. 94. Jg., 2004, Nr. 4, S. 116-121.

Schuh, G.; Wemhöner, N.; Kampker, A.: *The Factory on Demand: Lifecycle Oriented Production in Networks*. In: WGP Annals of the German Academic Society for Production Engineering. 12. Jg., 2005, Nr. 1, S. 147-152.

Schuh, G.; Wemhöner, N.; Roscher, J.; Friese, M.: *Lifecycle Evaluation of Automotive Body Shops*. Proceedings of the 3rd CIRP International Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, MI, 2005.

Segelod, E.: *A Note on the Survey of Project Evaluation Techniques in Major Corporations*. In: International Journal of Production Economics. 54. Jg., 1998, Nr. 2, S. 207-213.

Sekine, Y.; Koyama, S.; Imazu, H.: *Nissan's New Production System: Intelligent Body Assembly System*. Proceedings of the 1991 SAE International Congress and Exposition, Detroit, 1991.

Sesterhenn, M.: *Bewertungssystematik zur Gestaltung struktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme*. Diss. RWTH Aachen, 2002.

Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: *Flexibility in Manufacturing: A Survey*. In: International Journal of Flexible Manufacturing Systems. 2. Jg., 1990, Nr. 4, S. 289-328.

Shaw, A.; McFarlane, D. C.; Chang, Y. S.; Noury, P. J. G.: *Measuring Response Capabilities in the Order Fulfillment Process*. Working paper University of Cambridge, 2001.

Shewchuk, J. P.; Moodie, C. L.: *Definition and Classification of Manufacturing Flexibility Types and Measures*. In: International Journal of Flexible Manufacturing Systems. 10. Jg., 1998, S. 325-349.

Shi, D.; Daniels, R. L.: *A Survey of Manufacturing Flexibility: Implications for e-Business Flexibility*. In: IBM Systems Journal. 42. Jg., 2003, Nr. 3, S. 414-427.

Shimokawa, K.; Jürgens, U.; Fujimoto, T.: *Transforming Automobile Assembly*. 1. Aufl., Berlin, New York, Tokyo: Springer, 1997.

Sihn: *Wandlungsfähigkeit planen durch objektorientierte Modellierung*. In: Industrie Management. 16. Jg., 2000, Nr. 3, S. 42-46.

Slack, N.: *Flexibility as a Manufacturing Objective*. In: Voss, C. A. (Hrsg.): Research in Production/Operations Management, London: Gower, 1984, S. 101-119.

Slack, N.: *The Flexibility of Manufacturing Systems*. In: International Journal of Operations and Production Management. 7. Jg., 1987, Nr. 4, S. 35-45.

Slack, N.: *Focus on Flexibility*. In: Wild, R. (Hrsg.): International Handbook of Production and Operations Management, London: Cassel, 1989.

Soon, Y. K.; Park, C.: *Economic Measure of Productivity, Quality and Flexibility in Advanced Manufacturing Systems*. In: Journal of Manufacturing Systems. 6. Jg., 1987, Nr. 3, S. 193-207.

Spieckermann, S.; Gutenschwager, K.; Heinzel, H.; Voß, S.: *Simulation-Based Optimization in the Automotive Industrie: A Case Study on Body Shop Design*. In: Simulation. 75. Jg., 2000, Nr. 5, S. 276-286.

Spur, G.: *Fabrikbetrieb*. 1. Aufl., München: Hanser, 1994.

Spur, G.; Mertins, K.; Jochem, R.: *Integrierte Unternehmensmodellierung*. In: H.-J. Warnecke, R. S. (Hrsg.): Entwicklungen zur Normung von CIM, 1. Aufl., Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 1993.

Stachowiak, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. 1. Aufl., Wien: Springer, 1973.

Stützle, G.: *Langfristige Kapazitätsplanung unter Berücksichtigung der betrieblichen Elastizität*. München: V. Florentz, 1987.

Tanase, K.; Matsuo, T.; Shimokawa, K.: *Production of the NSX at Honda: An Alternative Direction for Assembly Organization*. In: Shimokawa, K. (Hrsg.): Transforming Automobile Assembly - Experience in Automation and Work organization, Berlin: Springer, 1997.

Tempelmeier, H.; Kuhn, H.: *Flexible Fertigungssysteme*. Berlin: Springer, 1992.

Thielen, C. A.: *Management der Flexibilität: Integriertes Anforderungskonzept für eine flexible Gestaltung der Unternehmung*. Diss. Hochschule St. Gallen, 1993.

Tidd, J.: *Key Characteristics of Assembly Automation Systems*. In: Shimokawa, K. (Hrsg.): Transforming Automobile Assembly: Experience in Automation and Work Organization, Berlin: Springer, 1997.

Tomczak, T.: *Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft*. In: Marketing - Zeitschrift für Forschung und Praxis, 1992, Nr. 2, S. 77-87.

Ulgen, O.; Gunal, A.: *Simulation in the Automobile Industry.* In: Banks, J. (Hrsg.): Handbook of simulation, New York: John Wiley & Sons, 1998, S. 547-570.

Ulgen, O.; Gunal, A.; Grajo, E.; Shore, J.: *The Role of Simulation in Design and Operation of Body and Paint Shops in Vehicle Assembly Plants.* Proceedings of the European Simulation Symposium, San Diego, Calif.: Society for Computer Simulation International, 1994, S. 124-128.

Ulgen, O.; Gunal, A.; Shore, J.: *Pitfalls of Simulation Modelling and How to Avoid them by Using a Robust Simulation Methodology.* Proceedings of the Autosimulations Symposium, Bountiful, Utah, 1996, S. 21-31.

Ulgen, O. M.; Black, J. J.; Johnsonbaugh, B.; Klungle, R.: *Simulation Methodology in Practice. Part 1: Planning for the Studys.* In: International Journal of Industrial Engineering. 1. Jg., 1994, Nr. 2, S. 119-128.

Ulgen, O. M.; Black, J. J.; Johnsonbaugh, B.; Klungle, R.: *Simulation Methodology in Practice. Part 2: Selling the Results.* In: International Journal of Industrial Engineering. 1. Jg., 1994, Nr. 2, S. 129-137.

Ulrich, H.: *Die Unternehmung als produktives soziales System.* 1. Aufl., Bern, Stuttgart: Haupt, 1968.

Ulrich, H.: *Der systemorientierte Ansatz in der Betriebswirtschaftslehre.* In: Kortzfleisch, G. v. (Hrsg.): Wissenschaftsprogramm und Ausbildungsziele der Betriebswirtschaftslehre: Bericht von der wissenschaftlichen Tagung in St. Gallen vom 2. - 5. Juni 1971, Berlin: Duncker & Humblot, 1971, S. 43-60.

Ulrich, H.: *Betriebswirtschaftslehre. Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft.* In: Dyllick, T.; Probst, J. B. (Hrsg.): Management, Bern: Paul Haupt, 1984, S. 168-199.

Ulrich, H.: *Management.* Bern u.a.: Haupt, 1984.

Ulrich, H.; Schwaninger, M.: *Systemorientiertes Management: Das Werk von Hans Ulrich.* Studienausg Aufl., Bern [u.a.]: Haupt, 2001.

Ulrich, P.; Hill, W.: *Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I).* In: WiST Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt, 1976, Nr. 7, S. 304-309.

Ulrich, P.; Hill, W.: *Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II).* In: WiST Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt, 1976, Nr. 8, S. 345-350.

Upton, D. M.: *The Management of Manufacturing Flexibility.* In: California Management Review. 33. Jg., 1994, Nr. 4, S. 72-89.

VDA: *Auto Jahresbericht 2004.* Frankfurt: Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA), 2004.

Vokurka, R. J.; O'Leary-Kelly, S. W.: *A Review on Empirical Research on Manufacturing Flexibility.* In: Journal of Operations Management. 18. Jg., 2000, S. 483-501.

Wallentowitz, H.; Leyers, J.; Parr, T.; Dögl, R.; Schneider, W.: *Technologie-Trends in der Automobilindustrie: BAIKA-Studie "Automobilzulieferer".* Bayerische Innovations- und Kooperationsinitiative Automobilzulieferindustrie, 2002.

Warnecke, H.-J.: *Flexible Manufacturing Systems, EDP Supported Planning: Application Examples.* Proceedings of the First International Conference on Flexible Manufacturing Systems, Brighton, U. K.: IFS (Conference) Ltd., 1982, S. 345-356.

Warnecke, H.-J.: *Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb: Technik, Organisation, Betriebswirtschaft*. Berlin: Springer, 1996.

Warnecke, H.-J.: *Fabrikplanung*. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte: Produktion und Management, 7. Aufl., Berlin: Springer, 1996, S. 9-1 - 9-117.

Warnecke, H.-J.: *Agilität und Komplexität: Gedanken zur Zukunft produzierender Unternehmen*. In: Schuh, G.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Komplexität und Agilität, Berlin: Springer, 1997, S. 1-10.

Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: *Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen*. In: wt Werkstattstechnik online. 90. Jg., 2000, Nr. 1/2, S. 22-26.

Wiendahl, H.-P.: *Produkt- und Produktionsflexibilität*. In: wt Zeitschrift für industrielle Fertigung. 71. Jg., 1981, S. 293-296.

Wiendahl, H.-P.: *Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells*. 2. Aufl., München: Hanser, 1997.

Wiendahl, H.-P.: *Wandlungsfähigkeit: Neues Zielfeld in der Fabrikplanung*. In: Industrie Management. 16. Jg., 2000, Nr. 5, S. 37-41.

Wiendahl, H.-P.: *Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik*. In: wt Werkstattstechnik online. 92. Jg., 2002, Nr. 2002, S. 122-127.

Wiendahl, H.-P.: *Dynamics Monitoring for Suppliers*. Proceedings of the CIRP Meeting, STC "O" (Optimization), Krakau, 2004.

Williams, E. J.: *Making Simulation a Corporate Norm*. In: Ingalls, V. W.; Cynamon, J.; Saylor, A. V. (Hrsg.): Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, San Diego, Calif.: Society for Computer Simulation International, 1996, S. 627-632.

Witte, K.-W.; Vielhaber, W.; Ammon, C.: *Planung und Gestaltung wandlungsfähiger und wirtschaftlicher Fabriken*. In: wt Werkstattstechnik online. 95. Jg., 2005, Nr. 4, S. 227-231.

Wolf, J.: *Investitionsplanung zur Flexibilisierung der Produktion*. Diss. Technische Universität Darmstadt, 1989.

Zangemeister, C.: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. 1. Aufl., München: Wittemann, 1970.

Zäpfel, G.: *Produktionswirtschaft. Operatives Produktionsmanagement*. New York: de Gruyter, 1982.

Zelenovich, D. M.: *Flexibility: A Condition for Effective Production Systems*. In: International Journal of Production Research. 20. Jg., 1982, Nr. 3, S. 319-337.

Ziegenbein, A.; Nienhaus, J.: *Coping with Supply Chain Risks on Strategic, Tactical and Operational Level*. In: Harvey, R. J.; Geraldi, J. G.; Adlbrecht, G. (Hrsg.): Proceedings of the Global Project and Manufacturing Management Symposium, Siegen, 2004, S. 165-180.

Ziegenbein, A.; Nienhaus, J.; Verbeck, A.; Alard, R.: *Robust Planning: Coping with Uncertainty in Production Networks*. Proceedings of the 9th conference on manufacturing excellence, Melbourne, Australia, 2003.

Zohm, F.: *Management von Diskontinuitäten: Das Beispiel der Mechatronik in der Automobilzulieferindustrie*. Diss. RWTH Aachen, 2004.

Zwicky, F.: *The Morphological Approach to Discovery, Invention, Research and Construction.* In: Zwicky, F.; Wilson, A. G. (Hrsg.): New Methods of Thought and Procedure. Contributions to the Symposium on Methodologies, Berlin: Springer, 1967, S. 273-297.

Lebenslauf

Zur Person

Name	Nils Wemhöner
Geboren	am 08.12.1974 in Herford
Familienstand	verheiratet, 1 Kind
Staatsangehörigkeit	deutsch

Ausbildung

1981 – 1985	Grundschule Eickum, Herford
1985 – 1994	Ravensberger Gymnasium, Herford; Abschluss: Abitur
1994 – 1995	Kindergarten der ev. Jugendhilfe, Schweicheln: Zivildienst
1995 – 1998	Technische Universität Dresden: Studium der Elektrotechnik
1998 – 2000	University of California at Berkeley: Studium der Elektrotechnik und Informatik; Abschluss: Master of Science

Beruf

2001 – heute	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssystematik des Laboratoriums für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL) an der RWTH Aachen

Aachen, im Dezember 2005