

Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
der Technischen Universität München

**Bestimmung der Wirtschaftlichkeit
wandlungsfähiger Produktionssysteme**

Niklas Möller

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer,
Universität Karlsruhe (TH)

Die Dissertation wurde am 18.10.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 02.02.2008 angenommen.

Niklas Möller

**Bestimmung der Wirtschaftlichkeit
wandlungsfähiger Produktionssysteme**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 212

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2008

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2008

ISBN 978-3-8316-0778-5

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utz.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, dem Leiter des wbk Institut für Produktionstechnik der Universität Karlsruhe (TH), möchte ich mich für die Übernahme des Koreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studierenden. Sie prägen das Institut und schaffen gemeinsam eine Atmosphäre, in der trotz hoher zeitlicher Belastung die Freude an der Arbeit nicht zu kurz kommt. Die Mitglieder des Forschungsfelds Wandlungsfähige Produktion haben durch zahlreiche kritische und sehr offene Diskussionen einen wichtigen Beitrag zum Gelingen der Arbeit geleistet. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Sudhoff, durch dessen fachliche und moralische Hilfe ich manches Tal bei der Optionsbewertung leichter durchschreiten konnte, sowie Herrn Christoph Rimpau, der mich nicht nur bei der Programmierung in zahlreichen Nachtschichten unterstützt hat. Gleichzeitig möchte ich ihnen, Herrn Pascal Krebs sowie meiner Schwester Kristin für die kritische Durchsicht der Arbeit danken. Herrn Florian Aull und Herrn Patrick Neise danke ich für Rat und Unterstützung während meiner Institutszeit.

Dank für die fachliche Unterstützung schulde ich auch Herrn Dr.-Ing. Bernd Müssig von der Siemens AG. Seine Begeisterung für die Thematik sowie seine Erfahrungen und zahlreichen Anregungen haben wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Diese Arbeit konnte nur durch die Unterstützung meiner Eltern entstehen. Sie haben mir meine Ausbildung ermöglicht und dadurch sowie durch ihr Vertrauen den Weg zur Promotion geebnet. Für diesen Rückhalt danke ich ihnen sehr. Nicht zuletzt und in besonderem Maße danke ich Franziska für ihre Geduld und ihr Verständnis für meine dissertationsbedingten Stimmungsschwankungen insbesondere im letzten Jahr vor Abgabe der Arbeit.

München, im April 2008

Niklas Möller

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	XIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XV
Formelzeichen.....	XIX
Große und kleine griechische Buchstaben.....	XIX
Große lateinische Buchstaben.....	XX
Kleine lateinische Buchstaben.....	XXIII
Mathematische Zeichen und Konstanten.....	XXV
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	5
1.3 Spezifizierung des Untersuchungsbereichs.....	7
1.3.1 Begriffsdefinitionen.....	7
1.3.2 Eingrenzung des Betrachtungsbereichs	8
1.4 Aufbau der Arbeit	11
2 Grundlagen.....	13
2.1 Wandlungsfähigkeit als Zielgröße in der Fabrikplanung.....	13
2.1.1 Allgemeines	13
2.1.2 Flexibilität.....	13
2.1.3 Wandlungsfähigkeit.....	15
2.1.4 Rezeptormodell der wandlungsfähigen Produktion	21
2.1.5 Charakterisierung der Problemstellung	25

2.2	Investitionsbewertung unter Unsicherheit	28
2.2.1	Investitionsrechenverfahren zur Bewertung unter Unsicherheit.....	28
2.2.2	Theorie der Realloptionen	35
2.2.3	Wandlungsfähigkeit als ein Bündel von Realloptionen	39
2.2.4	Systematik der Realloptionen.....	43
2.3	Lebenszyklusbewertung von Produktionssystemen	47
2.4	Zwischenfazit.....	49
3	Stand der Erkenntnisse	51
3.1	Untersuchungsrahmen.....	51
3.2	Bewertungsansätze aus der Fabrikplanung.....	52
3.3	Optionsorientierte Ansätze.....	57
3.4	Lebenszyklusorientierte Ansätze	60
3.5	Zwischenfazit	65
4	Anforderungen an eine Methode zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme	67
4.1	Allgemeines	67
4.2	Allgemeine Anforderungen	67
4.3	Spezielle Anforderungen an das Bewertungsverfahren.....	68
4.4	Spezielle Anforderungen an die Modellierung des Unternehmensumfeldes.....	69
4.5	Spezielle Anforderungen für die praktische Anwendung.....	70
4.6	Zusammenfassung.....	71
5	Bewertung von Realloptionen.....	73
5.1	Allgemeines	73
5.2	Fundamentalprinzipien der Optionsbewertung.....	73
5.2.1	Arbitragefreiheit bei stochastischen Zahlungsströmen	73
5.2.2	Bewertung mit Hilfe von Duplikationsportfolios.....	74
5.3	Verfahren zur Realloptionsbewertung	78

5.3.1	Allgemeines	78
5.3.2	Optionspreismodelle	78
5.3.3	Ansätze zur Bestimmung des Underlying einer Realoption.....	80
5.4	Auswahl eines Bewertungsverfahrens	82
5.5	Zwischenfazit und kritische Würdigung der Realoptionstheorie.....	84
6	Methode zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme.....	87
6.1	Bewertungsvorgehen und Aufbau der Methode	87
6.2	Annahmen und Eingrenzungen	89
6.3	Bewertungsorientierte Modellierung der Produktion	90
6.3.1	Modellbestandteile und Vorgehensschritte.....	90
6.3.2	Umfeldprofil	92
6.3.2.1	Begriffsklärung.....	92
6.3.2.2	Übernahme der Planungsdaten	92
6.3.2.3	Aufnahme des Planungsumfeldes	93
6.3.3	Kostenprofile	97
6.3.3.1	Begriffsklärung.....	97
6.3.3.2	Anforderungen an ein Kostenmodell zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme	97
6.3.3.3	Entwicklung eines Kostenmodells zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme	98
6.3.3.4	Auswahl von Kostenelementen	102
6.3.4	Optionsprofile	103
6.3.4.1	Begriffsklärung.....	103
6.3.4.2	Handlungsmöglichkeiten zur Veränderung der Produktion	103
6.3.4.3	Filterung von Scheinoptionen	107
6.3.5	Zusammenfassung	111
6.4	Bewertung	112
6.4.1	Vorgehensschritte	112
6.4.2	Basisbewertung bei erwarteter Zukunft und starrer Planung ..	113
6.4.3	Dynamisches Grundmodell.....	118
6.4.3.1	Quantitative Beschreibung von Unsicherheiten.....	118

6.4.3.2	Leistungsgrenzen der Alternativen ohne Realoptionen.....	124
6.4.4	Quantitative Optionsauswahl und -priorisierung	126
6.4.4.1	Allgemeines.....	126
6.4.4.2	Äußeres Potenzial einer Optionsausübung	126
6.4.4.3	Inneres Potenzial einer Optionsausübung.....	129
6.4.4.4	Priorität der einzelnen Realoptionen.....	130
6.4.5	Auswahl und Modellierung primärer und sekundärer Unsicherheiten.....	133
6.4.5.1	Allgemeines.....	133
6.4.5.2	Anforderungen an eine primäre Unsicherheit.....	133
6.4.5.3	Bestimmung der grundlegenden Form des Baumes und Auswahl der primären Unsicherheit	135
6.4.5.4	Baumparameter	136
6.4.5.5	Modellierung sekundärer Unsicherheiten	138
6.4.5.6	Zwischenfazit	140
6.4.6	Berechnung des Optionswertes	140
6.4.6.1	Allgemeines.....	140
6.4.6.2	Bestimmung der Zahlungsströme	142
6.4.6.3	Abgrenzung eines Basisobjektes.....	144
6.4.6.4	Berücksichtigung von Realoptionen und Bestimmung des erweiterten Kapitalwertes	146
6.5	Analyse.....	153
6.5.1	Allgemeines	153
6.5.2	Entscheidung über eine Fortführung der Bewertung	154
6.5.3	Ergebnisdarstellung	155
6.5.4	Entscheidungsfindung	157
6.6	Zwischenfazit	159
7	Umsetzung der Methode	161
7.1	Allgemeines	161
7.2	Softwarewerkzeug PlantCalc®	161
7.2.1	Allgemeines	161

7.2.2	Modulbibliothek.....	162
7.2.3	Modul- und Projektverwaltung.....	166
7.3	Anwendungsbeispiel	167
7.3.1	Beschreibung des Anwendungsbeispiels.....	167
7.3.2	Bewertungsorientiertes Modell der Produktion.....	168
7.3.3	Bewertung.....	174
7.3.3.1	Basisbewertung	174
7.3.3.2	Dynamisches Grundmodell	174
7.3.3.3	Quantitative Optionsauswahl und Auswahl primärer und sekundärer Unsicherheiten	175
7.3.3.4	Realloptionsbewertung.....	177
7.4	Bewertung des Vorgehens.....	180
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	185
9	Literaturverzeichnis.....	189
10	Anhang	217
10.1	Handlungsmöglichkeiten zur Anpassung der Produktion.....	217
10.1.1	Personal und Organisation	217
10.1.2	Betriebsmittel.....	219
10.1.3	Material	221
10.1.4	Gebäude und Fläche.....	222
10.2	Stochastische Prozesse	224
10.2.1	Relevante Verteilungsfunktionen	224
10.2.2	Bestimmung von Konfidenzintervallen.....	228
10.3	Übersetzungen englischer Zitate	230
10.4	Genannte Firmen.....	231
10.5	Genutzte Softwareprodukte.....	232



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Effizienz durch Wandlungsfähigkeit	2
Abbildung 2:	Fabrikebenen nach Ressourcen- und Raumsicht (in Anlehnung an NYHUIS ET AL. 2005, WESTKÄMPER 2006, WIEN-DAHL ET AL. 2007)	10
Abbildung 3:	Aufbau der Arbeit	12
Abbildung 4:	Zusammenhang zwischen Wandlungsfähigkeit, Reaktionsfähigkeit und Flexibilität (REINHART 2000, S. 39)....	17
Abbildung 5:	Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (in Anlehnung an ZAEH ET AL. 2005b, S. 4)	21
Abbildung 6:	Darstellung des offenen Systems Produktion (in Anlehnung an SCHMIGALLA 1995, S. 82, SPUR 1994, S. 21 f.)	22
Abbildung 7:	Rezeptormodell einer wandlungsfähigen Produktion (in Anlehnung an CISEK ET AL. 2002, S. 442)	25
Abbildung 8:	Prinzipdarstellung der Entwicklung der Unsicherheit eines Projektes über die Zeit am Beispiel von zwei Einflussgrößen ..	27
Abbildung 9:	Beispielhafte Auswertung einer Monte-Carlo-Simulation in Form eines Histogramms (vgl. REINHART ET AL. 2006, S. 190)	30
Abbildung 10:	Beispielhafte Nachfrageentwicklung über zwei Perioden	31
Abbildung 11:	Beispielhafte Anwendung des Entscheidungsbaumverfahrens .	33
Abbildung 12:	Auszahlungsprofile für Käufer von Aktien und Optionen	37
Abbildung 13:	Auszahlungsprofil einer Kombination aus Aktie und Put-Option	38
Abbildung 14:	Gegenüberstellung der Charakteristika von Wandlungsfähigkeit und Realoptionen	39
Abbildung 15:	Wertentwicklung eines Investitionsprojektes über die Zeit mit als Dividenden interpretierten Zahlungsströmen.....	42

Abbildung 16: Kategorisierung und Typisierung von Realoptionen (in Anlehnung an COPELAND & KEENAN 1998, S. 48, HUNGENBERG ET AL. 2005, S. 19)	46
Abbildung 17: Divergierende Lebenszyklen von Produkten, Technologien und Gebäude (in Anlehnung an SCHENK & WIRTH 2004, S. 106).....	48
Abbildung 18: Übersicht der Anforderungen an eine Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme	72
Abbildung 19: Preise und zustandsbedingte Zahlungen von drei Wertpapieren	74
Abbildung 20: Beispielhafte Wertepprofile von Aktie, risikoloser Anleihe und Kaufoption für die Zeitpunkte $t=0$ und $t=1$, dargestellt in einem vereinfachten binomischen Modell	75
Abbildung 21: Überblick der Optionspreismodelle (in Anlehnung an BAECKER ET AL. 2003, S. 26, HUNGENBERG ET AL. 2005, S. 8).....	79
Abbildung 22: Bestandteile der Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme und wesentliche Schritte eines iterativen Bewertungsprozesses	88
Abbildung 23: Zusammenhang zwischen den einzelnen Vorgehensschritten zur Vorbereitung der Realoptionsbewertung.....	91
Abbildung 24: Schema zum Aufstellen eines qualitativen Umfeldprofils mit beispielhafter ausgewählten Rezeptoren, Führungsgrößen	95
Abbildung 25: Kostengliederungsstruktur zur Bewertung von Produktionssystemen auf der obersten Ebene mit beispielhafter Detaillierung eines Kostenelementes (in Anlehnung an DIN EN 60300-3-3, S. 14).....	101
Abbildung 26: Suchraum zur Identifikation von Handlungsmöglichkeiten in der Produktion bei Veränderung des Umfeldes	105
Abbildung 27: Auszug aus dem Katalog der Handlungsmöglichkeiten für das Gestaltungsfeld Betriebsmittel auf der Ebene Arbeitsstation.....	106

Abbildung 28: Vorgehen zur Bestimmung von Maßnahmen aus dem Katalog der Handlungsmöglichkeiten, die das Kriterium einer Signifikanz der Unsicherheit erfüllen	109
Abbildung 29: Vorgehensschritte zur Bewertung der zu vergleichenden Alternativen unter Einbeziehung des Wertes identifizierter Realoptionen	113
Abbildung 30: Entscheidungsprozess zur Auswahl der in eine Realoptionsbewertung einzubeziehenden Konzepte mit illustrierendem Beispiel	117
Abbildung 31: Einteilung von Unsicherheiten.....	119
Abbildung 32: Darstellung von als Random Walk, Brownsche Bewegung mit Drift und Geometrisch Brownsche Bewegung mit Drift modellierten stochastischen Prozessen $X(t)$	122
Abbildung 33: Modellierung stochastischer Ereignisse mit diskretem und stetigem Wertebereich für eine Zufallsvariable X sowie Abbildung abhängiger Ereignisse in Ereignisbäumen.....	123
Abbildung 34: Tornado-Diagramm zur Visualisierung des Einflusses von Unsicherheiten	127
Abbildung 35: Darstellung der Berechnung des äußeren Potenzials einer Optionsausübung mit den Bestandteilen „Risiko“und „Chance“	128
Abbildung 36: Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials von Realoptionen aus ihrem inneren sowie dem jeweils korrespondierenden äußeren Potenzial der Alternativen.....	132
Abbildung 37: Modellierung von Informationszuwachs und explizite Darstellung einer Entscheidungssituation in einem Baum am Beispiel der Stückzahlentwicklung als primäre Unsicherheit .	134
Abbildung 38: Vergleichende Darstellung von quadranomialen rekombinierenden und nicht-rekombinierenden Bäumen sowie Illustration von Pfadabhängigkeit	135

Abbildung 39: Anwendung der Monte-Carlo-Simulation in Kombination mit einem binomialen Baum zur Ableitung eines Risiko-profils.....	139
Abbildung 40: Iterativer Prozess der Realloptionsbewertung	142
Abbildung 41: Berechnung der Zahlungsströme in Abhängigkeit von den diskreten Zuständen der primären Unsicherheit für die zu vergleichenden technischen Alternativen und deren alternative Betriebsmodi.....	143
Abbildung 42: Berechnung des erweiterten Kapitalwertes der Alternative j durch Berücksichtigung des Wertes vorhandener Realloptionen und Duplikation der Zahlungsströme	147
Abbildung 43: Bestimmung der Differenzzahlungsreihe einer Realoption	149
Abbildung 44: Verkürzte Baumdarstellung mit einer semi-deterministischen Fortführung des unsicheren Umfeldes.....	150
Abbildung 45: Verdeutlichung der Optimierungsbedingung für die Ausübung von Optionen bei einem Time lag von $T_A = \tau = 2$	151
Abbildung 46: Prozess zur Entscheidung über die Fortführung der Bewertung.....	155
Abbildung 47: Mögliche Visualisierung des Ergebnisses der Berechnungen in Form einer Projektwertverteilung, Deckungsbeitrags- und EBIT-Entwicklung.....	156
Abbildung 48: Modulklassen in der PLANTCALC [®] -Bibliothek (ZAEH ET AL. 2006, S. 703)	163
Abbildung 49: Auszug aus einer beispielhaften Kostengliederungsstruktur in der Modulbibliothek von PLANTCALC [®]	164
Abbildung 50: Prinzipdarstellung des Datenaustausches zwischen den Modulen von PLANTCALC [®]	165
Abbildung 51: Vorgehen bei der Konfiguration eines Projektes (in Anlehnung an REINHART ET AL. 2007)	167
Abbildung 52: Qualitatives Umfeldprofil des dargestellten Fallbeispiels.....	170

Abbildung 53: Für das Anwendungsbeispiel alternativenspezifisch ermitteltes äußeres Potenzial einer Optionsausübung für U_1 bis U_5	176
Abbildung 54: Gewichtung des inneren Potenzial der Realoptionen mit dem äußeren Potenzial der Optionsausübung und Ableitung einer Rangfolge der Realoptionen für das Anwendungsbeispiel.....	177
Abbildung 55: Ermittlung des Wertes der Realoption $O_{2,5}$ des Anwendungsbeispiels in einem binomialen Baum für eine Ziehung der Monte-Carlo-Simulation mit Verdeutlichung der Optionsausübung	179
Abbildung 56: Beurteilung der Leistungsfähigkeit der entwickelten Bewertungsmethode.....	182
Abbildung 57: Dichtefunktion der Gleichverteilung	224
Abbildung 58: Dichtefunktion der Normalverteilung.....	225
Abbildung 59: Dichtefunktion der Dreiecksverteilung.....	226
Abbildung 60: Dichtefunktion der Binomialverteilung.....	226
Abbildung 61: Dichtefunktion der Poissonverteilung	227
Abbildung 62: Dichtefunktion der Lognormalverteilung	228



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Aufgaben und typische Fragestellungen bei der Planung, Gestaltung und Nutzung von Wandlungsfähigkeit auf strategischer, taktischer und operativer Ebene	5
Tabelle 2:	Ergebnisse einer Kapitalwertermittlung bei starrer Planung und quasi-sicherer Zukunft	32
Tabelle 3:	Interpretation der Parameter einer Finanzoption bei einer Realoption	43
Tabelle 4:	Realoptionstypen (in Anlehnung an TRIGEORGIS 1996, S. 9-14) und exemplarische Auswahl von Referenzen mit Anwendungen des Konzeptes auf produktionstechnische Fragestellungen	45
Tabelle 5:	Vergleichende Darstellung der untersuchten Verfahren aus der Fabrikplanung zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen	56
Tabelle 6:	Vergleichende Darstellung der untersuchten Verfahren aus dem Bereich lebenszyklusorientierter Bewertung	64
Tabelle 7:	Detaillierung der Rezeptoren der Produktion	94
Tabelle 8:	Wichtige Positionen des Kostenmodells im Fallbeispiel.....	171
Tabelle 9:	Identifizierte Handlungsmöglichkeiten und Filterung von Scheinoptionen für die Alternativen A_1 und A_2 des Anwendungsbeispiels	173
Tabelle 10:	Beschreibung des Basisszenario z_0 für das Anwendungsbeispiel	174
Tabelle 11:	Wertentwicklung der Alternativen A_1 und A_2 des Anwendungsbeispiels im Verlauf des iterativen Bewertungsprozesses	179
Tabelle 12:	Handlungsmöglichkeiten bezüglich Personal und Organisation.....	218
Tabelle 13:	Handlungsmöglichkeiten bezüglich der Betriebsmittel.....	220

Tabelle 14:	Handlungsmöglichkeiten bezüglich Material.....	221
Tabelle 15:	Handlungsmöglichkeiten bezüglich Gebäude und Fläche	223
Tabelle 16:	Deutsche Übersetzung der in der Arbeit verwendeten englischen Zitate.....	230

Abkürzungsverzeichnis

Hinweis: Einige der aufgeführten englischen Abkürzungen bezeichnen umfassende Methoden oder Konzepte. Sie werden im Deutschen gewöhnlich im Original übernommen und sind deshalb nachfolgend nicht übersetzt. Zur inhaltlichen Erläuterung der jeweiligen Abkürzung sei auf die Ausführungen im Text und die zitierten Quellen verwiesen.

BM	Brownian Motion (deutsch: Brownsche Bewegung)
BPR	Business Process Reengineering
bspw.	beispielsweise
CNC	Computerized Numerical Control (deutsch: numerische Steuerung mit Rechner)
c. p.	ceteris paribus (deutsch: unter sonst gleichen Umständen)
DCF	Discounted Cash Flow (deutsch: diskontierter Zahlungsstrom)
DESYMA	Design of Systems for Manufacture (deutsch: Gestaltung von Produktionssystemen)
DLZ	Durchlaufzeit
DOI	Digital Object Identifier (deutsch: Bezeichner für digital gespeicherte Objekte)
EBIT	Earnings Before Interests and Taxes (deutsch: Gewinn vor Steuern und Zinsen)
engl.	englisch
EURIBOR	Euro Interbank Offered Rate (Zinssatz, zu dem sich Banken untereinander Geld leihen)
F&E	Forschung und Entwicklung
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
GBM	Geometric Brownian Motion (deutsch: Geometrisch Brownsche Bewegung)

i. d. R.	in der Regel
IFA	Institut für Fabrikanlagen und Logistik (der Leibniz Universität Hannover)
IT	Informationstechnologie
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (der Technischen Universität München)
JiT	Just in Time
JiS	Just in Sequence
KRZ	Kundenreaktionszeit
lat.	lateinisch
LCC	Life Cycle Costing (deutsch: Lebenszykluskostenrechnung)
MIT	Massachusetts Institute of Technology
PDG	Partielle Differentialgleichung
PLB	Produktions- und Logistikbereich
ppm	Parts per Million (deutsch: Teile pro einer Million)
RO	Realoption
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (Aachen)
Stk.	Stück
TCO	Total Cost of Ownership
TPM	Total Productive Maintenance
TQM	Total Quality Management
VaC	Value-at-Chance
VaR	Value-at-Risk
Verf.	Verfasser
WBZ	Wiederbeschaffungszeit

WP	Wertpapier
WZL	Werkzeugmaschinenlabor (der RWTH Aachen)
ZWF	Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb
zzgl.	zuzüglich



Formelzeichen

Hinweis: Einige der nachfolgend aufgeführten Formelzeichen werden mit mehreren verschiedenen Bedeutungen verwendet. Die jeweils zutreffende Bedeutung ergibt sich entweder aus dem Kontext oder ist explizit im Text angegeben.

Große und kleine griechische Buchstaben

α	Schwellwert, Quantils- oder Signifikanzniveau
β	Quantils- oder Signifikanzniveau
γ	prozentuale Zuwachsrate (einer Geometrisch Brownschen Bewegung); γ folgt einer Brownschen Bewegung.
$\Delta_i^+(A_j)$	gesamte, zusätzlich mögliche positive Abweichung des Kapitalwertes von Alternative j bei günstiger Entwicklung der Unsicherheit i
$\Delta_i^-(A_j)$	gesamte, gewichtete negative Abweichung des Kapitalwertes von Alternative j von dessen Erwartungswert bei ungünstiger Entwicklung der Unsicherheit i
$\Delta_{i,\alpha}(A_j)$	Abweichung des Kapitalwertes vom Mittelwert bei Veränderung der Unsicherheit i auf ihr Quantil α
ε_t	Zufallsgröße, die einen Fehler zum Zeitpunkt t beschreibt
η	lokale Elastizität
$\Theta(A_j)$	Menge aller Realoptionen, die A_j verändern
λ	Parameter der Poissonverteilung (Ereignisrate)
$\mu, \mu_t, \mu(t)$	Drift der Unsicherheit, Drift der Unsicherheit zum Zeitpunkt t , Drift der Unsicherheit als Funktion der Zeit
ν_t	Drift der Veränderungsrate der Unsicherheit zum Zeitpunkt t
$\Pi(A_j)$	Gesamtpotenzial aller Realoptionen, die auf die Alternative j wirken
$\Pi(U_i)$	Gesamtpotenzial aller Realoptionen, deren Ausübung von einer Veränderung der Unsicherheit i abhängt
$\pi_{j,k}$	Gesamtpotenzial (inneres und äußeres) einer Realoption k , die sich auf Alternative j bezieht

$\Pi_{Ver}(A_j)$	Gesamtpotenzial aller verbliebenen, noch nicht bewerteten Realoptionen, die auf die Alternative j wirken
$\sigma, \sigma(t)$	Volatilität, Volatilität als Funktion der Zeit
τ	Dauer eines Wandlungsprozesses
$v_{i,\alpha}$	Quantil der Unsicherheit i zum Niveau α
$\Phi(x)$	Verteilungsfunktion der Normalverteilung; x ist reelle Zahl.
$\phi(V^+, V^-)$	Funktion, die V^+ und V^- mit Hilfe der Duplikation diskontiert
$\varphi(x)$	Dichtefunktion der Normalverteilung; x ist reelle Zahl.
$\Omega_{j,k}$	Betriebsmodus der Alternative j nach Ausübung der Option k ; falls $k=0$: Betriebsmodus der Alternative j vor der Ausübung einer ggf. vorhandenen Option

Große lateinische Buchstaben

A^*	Referenzalternative, die bei statischer Bewertung den höchsten Kapitalwert besitzt bzw. die als Basisobjekt ausgewählt ist
A_j	technisch-organisatorische Alternative
A_{opt}	Alternative, die nach erfolgter Bewertung realisiert werden soll
B_t	Wert einer risikolosen Anleihe zum Zeitpunkt t
$B_{t,h}$	Wert einer risikolosen Anleihe zum Zeitpunkt t in Zustand h
C_{max}	maximale Produktionskapazität
C_t^+	Wert einer Option zum Zeitpunkt t bei positiver Entwicklung des Underlying
C_t^-	Wert einer Option zum Zeitpunkt t bei negativer Entwicklung des Underlying
C_t	Wert einer Option zum Zeitpunkt t
$CF_{t,h}$	Rückflüsse aus einer Investition zum Zeitpunkt t in Knoten h Angabe von h entfällt, falls der Knoten eindeutig ist
$CF_{t,h}^{ex}$	Rückflüsse aus einer Investition zum Zeitpunkt t in Knoten h nach der Durchführung einer Anpassungsmaßnahme (<i>ex</i>)
$CF_{t,h}(\Omega_{j,k})$	Rückflüsse aus einer Investition, die im Betriebsmodus $\Omega_{j,k}$ arbeitet, zum Zeitpunkt t im Zustand h

$CF_{t,h}(O_{j,k})$	Rückflüsse einer Realloption $O_{j,k}$ zum Zeitpunkt t im Zustand h ; ergeben sich als Differenzzahlungsreihe der Betriebsmodi $\Omega_{j,k}$ und $\Omega_{j,0}$
D_t	Zahlung aus Dividenden zum Zeitpunkt t
F_i	Faktor, der bei einer Sensitivitätsanalyse untersucht wird
G	Auszahlung aus Wertpapieren bzw. einem Portfolio
H	Modalwert (häufigster Wert) einer Dreiecksverteilung
I_t	Investitionssumme zum Zeitpunkt t (ohne Index: zum Zeitpunkt $t=0$)
M	Elementmenge eines Produktionssystems
M_G	Menge verfügbarer Technologien
$NPV(A_j)$	Kapitalwert der Alternative j (Art des Kapitalwertes wird aus Kontext ersichtlich)
\overline{NPV}	erwarteter Kapitalwert (Mittelwert)
NPV_E	erweiterter Kapitalwert (<i>extended Net Present Value</i>), der den Wert der Realloptionen beinhaltet
$NPV_i(v_i, \alpha)$	Wert des NPV, wenn c. p. die Unsicherheit i das Quantil v zum Niveau α annimmt
$NPV_k(A_j)$	zusätzlicher durch die Realloption $O_{j,k}$ generierter Kapitalwert der Alternative A_j (Wertbeitrag)
NPV_{max}	maximaler Kapitalwert, der durch eine Ziehung bei einer Monte-Carlo-Simulation ermittelt wird
NPV_{min}	minimaler Kapitalwert, der durch eine Realloptionsbewertung noch auf den Kapitalwert $NPV(A^*)$ der Referenzalternative gesteigert werden kann minimaler Kapitalwert, der durch eine Ziehung bei einer Monte-Carlo-Simulation ermittelt wird
NPV_R	Kapitalwert (<i>Net Present Value</i>) bei unsicheren Zahlungen ohne Berücksichtigung von Realloptionen
NPV_S	Kapitalwert (<i>Net Present Value</i>) bei sicheren Zahlungen
$O_{j,k}$	Realloption k , die die technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften der Alternative j verändert

P	Prozess eines Produktionssystems Produktpreis
$duPV$	Barwert durch Duplikation abgezinst
$PV_{t,h}$	Barwert aller nachfolgenden Zahlungen zum Zeitpunkt t , ausgehend von Zustand h (die Angabe von h entfällt, wenn der Zustand bereits durch die Angabe von t eindeutig bestimmt ist)
$PV_{t,h}^d$	Barwert aller nachfolgenden Zahlungen zum Zeitpunkt t , einschließlich der Zahlung in t (d), ausgehend von Zustand h (die Angabe von h entfällt, wenn der Zustand bereits durch die Angabe von t eindeutig bestimmt ist)
$PV_{t,h}^{d,ex}(O_{j,k})$	Barwert der ausgeübten (ex) Realoption k der Alternative j zum Zeitpunkt t in Knoten h ; der Barwert beinhaltet die Zahlungen in t (d)
PV_t^i	Barwert aus Periode i abgezinst auf den Zeitpunkt t
Q_α	Quantil zum Niveau α
R	Spannweite (als statistisches Maß)
S	Struktur eines Produktionssystems
S_t	Wert (entspricht dem Preis) einer Aktie bzw. dem Underlying zum Zeitpunkt t
S_t^+	Wert einer Aktie zum Zeitpunkt t , der sich durch eine positive Entwicklung des Wertes S_{t-1} ergibt
S_t^-	Wert einer Aktie zum Zeitpunkt t , der sich durch eine negative Entwicklung des Wertes S_{t-1} ergibt
T	Zeitraum
T_p	Dauer des Projektes
T_X	Zeit, die zwischen der Optionsausübung und der vollständigen Umsetzung der durch die Realoption definierten Anpassungsmaßnahme vergeht
$U(O_{j,k})$	Unsicherheit, deren Auswirkungen auf die Produktion durch eine Ausübung der Realoption k verändert werden
$U(t)$	Stochastischer Prozess, der die Zukunftsentwicklung für die Dauer T als Folge von Zufallsvariablen U_t beschreibt;
U_i	Zufallsvariable der Unsicherheit i

U_t	Zufallsvektor der Ausprägung des Umfeldes zum Zeitpunkt t
$U_{t,i}$	Einflussfaktor i zum Zeitpunkt t als Zufallsvariable
V	Wert des Ausgangsknotens in einem Baum
V^-	Wert des Nachfolgers des Ausgangsknotens (mit Wert V) bei negativer Entwicklung von V
V^+	Wert des Nachfolgers des Ausgangsknotens (mit Wert V) bei positiver Entwicklung von V
X	Ausübungspreis einer Option
$X, X_p, X(t)$	Zufallsvariable, Zufallsvariable zum Zeitpunkt t , stochastischer Prozess
Y	Zufallsvariable
Z	Umfeldentwicklung als stochastischer Prozess, $Z=U(t)$

Kleine lateinische Buchstaben

a	Parameter einer Gleich- oder Dreiecksverteilung, minimal möglicher Wert
b	Parameter einer Gleich- oder Dreiecksverteilung, maximal möglicher Wert
\bar{b}_o	Vektor, der die obere Leistungsgrenze eines technischen Systems beschreibt
\bar{b}_u	Vektor, der die untere Leistungsgrenze eines technischen Systems beschreibt
c_W	Kosten einer Wandlung eines technischen Systems
<i>down</i>	negative Wertveränderung (Abwärtsbewegung) in einem Baum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Knoten
$d_{t,h}$	Nachfrage in Periode t im Zustand h
e	Eulersche Zahl
f_t	Flexibilitätsgrad zum Zeitpunkt $t, t=1, \dots, T$
$f_X(x)$	Dichtefunktion der Zufallsvariablen X
h	natürliche Zahl, Laufvariable (i. d. R. Bezeichnung der Zustände bzw. Knoten im Baum)

i	Kalkulationszins; als Index: natürliche Zahl, Laufvariable (i. d. R. Bezeichnung der Unsicherheiten)
i^*	Index der primären Unsicherheit
j	natürliche Zahl, Laufvariable (i. d. R. Bezeichnung der Alternativen)
k	natürliche Zahl, Laufvariable (i. d. R. Bezeichnung der Optionen)
l	natürliche Zahl, Laufvariable
$m, m_{t,h}$	Anteil einer Aktie bzw. eines Aktienportfolios am Duplikations- portfolio, Anteil zum Zeitpunkt t im Zustand h
n	Anzahl der Elemente einer Menge
n_A	Anzahl der Alternativen
n_O	Anzahl der Optionen
n_U	Anzahl der Unsicherheiten
p	Eintrittswahrscheinlichkeit
q	Eintrittswahrscheinlichkeit, $q=1-p$
r	Wachstumsrate oder Verzinsung bei kontinuierlicher Betrachtung
r_f	risikoloser Zins
t	Zeitpunkt
Δt	Schrittlänge in einem Baum, d. h. zeitlicher Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Knoten
t_{Takt}	Taktzeit
up	positive Wertveränderung (Aufwärtsbewegung) in einem Baum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Knoten
u_i	i -te Realisierung des stochastischen Prozesses $U(t)$ bei einer Monte-Carlo-Simulation
u_t	Ausprägung des Zufallsvektors U_t
$u_{t,i}$	Ausprägung des i -ten Merkmals des Zufallsvektors U_t
u_T^{\max}	Schätzung der maximalen Ausprägung der Zufallsvariable U_T
$w(A_j)$	Grad der Wandlungsfähigkeit von Alternative j

x	Realisierung einer Zufallsvariablen $X(t)$
$\Delta x, \Delta x^{+/-}$	Höhe der möglichen Veränderung beim Random Walk nach oben/unten in einer Zeiteinheit
Δy	Baumparameter, der den durch die stochastische Schwankung hervorgerufenen Abstand zwischen zwei Knoten bestimmt („Schrittweite“)
z_0	Basisszenario (erwartete Zukunft)
z_k	mögliches Zukunftsszenario als eine Realisierung von Z

Mathematische Zeichen und Konstanten

$B(n, p)$	Binomialverteilung bei n -maliger Durchführung eines Experimentes mit Erfolgswahrscheinlichkeit p
d	gewöhnliches Differential
δ	partiell Differential
e	Eulersche Zahl
$E(\cdot)$	Erwartungswert von (\cdot)
\ln	natürlicher Logarithmus
$N(\mu, \sigma)$	Normalverteilung mit Mittelwert μ und Standardabweichung σ
$\text{rg}(x_i)$	Rang von x_i in x_1, \dots, x_n
Σ	Summe
\sim	verteilt
$+$	Addition
$-$	Subtraktion
$/$	Division
$*, x, \cdot$	Multiplikation



1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Produktion am Standort Deutschland – das sind knapp 38.000 Unternehmen, die zusammen fast 6.000.000 Menschen beschäftigen, einen Umsatz von 1,4 Billionen Euro erwirtschaften und damit eine Wertschöpfung von 455 Mrd. Euro erzielen (STATISTISCHES BUNDESAMT 2006, S. 246 f. und 279). Zwar hat die Bedeutung des Verarbeitenden Gewerbes im Vergleich zum tertiären Sektor der Dienstleistungen in den letzten Jahren abgenommen und die Nachfrage nach bspw. Industriegütern entwickelt sich nur moderat (BCG 2004, S. 7 f.), doch handelt es sich nach wie vor um einen wachsenden Bereich (STATISTISCHES BUNDESAMT 2006, S. 246). Nicht zuletzt nimmt im tertiären Sektor der Anteil unternehmensnaher und produktionsbegleitender Dienstleistungen zu, was die Bedeutung der Produktion für die führenden Industrieländer insgesamt unterstreicht (KALMBACH ET AL. 2003).

Gleichwohl steht das Verarbeitende Gewerbe heute vor großen Herausforderungen. In den letzten 20 Jahren hat die weltweite Arbeitsteilung stark zugenommen, was an einem im Vergleich zum globalen Bruttosozialprodukt überproportional gestiegenen Welthandelsvolumen zu erkennen ist (WTO 2006, S. 2 ff.). Daraus resultiert eine zunehmende Spezialisierung sowohl im Hinblick auf die allgemeine Marktstrategie, als auch auf das Güter- und Dienstleistungsportfolio sowie auf die eingesetzten Produkt-, Fertigungs- und Montagetechnologien. Gerade deutsche Unternehmen streben häufig eine Differenzierung durch Individualisierung von Produkten und Dienstleistungen an, da aufgrund des bestehenden hohen Lohnniveaus eine globale Kostenführerschaft kaum zu erreichen ist. Als Folge davon hat die Anzahl der angebotenen Varianten in den vergangenen Jahren stark zugenommen (KINKEL 2005, S. 3, ALDERS 2006). Eine weitere Herausforderung besteht in der Verkürzung der Lebenszyklen von Produkten und Technologien. Auch wenn sich diese nicht generell empirisch belegen lässt (KINKEL 2005, S. 9 f.), ist in einigen Branchen diesbezüglich eine Dynamisierung zu beobachten: Beispielsweise erzielte die Siemens AG im Jahr 2003 bereits 75% des Umsatzes mit Produkten, die 5 Jahre und jünger waren – 1980 waren es noch 48% gewesen (NOTTBECK 2004).

Insgesamt ist das Unternehmensumfeld im Verarbeitenden Gewerbe durch hohe Komplexität und Dynamik gekennzeichnet und wird verbreitet als turbulent be-

zeichnet (CHAKRAVARTHY 1997). Es zeigt sich, dass als Folge der gewachsenen Vernetzung sowie der Vielzahl der Akteure im globalen Wettbewerb Prognosen schwieriger werden und dass sich Veränderungen kaum kontrollieren lassen (MILBERG 2000, DOVE 2001, S. 9.5, SPATH & BAUMEISTER 2001, S. 235, SPATH & SCHOLTZ 2007). Ein aktuelles Beispiel bildet die Entwicklung der Rohstoffpreise, die in kurzer Zeit stark gestiegen sind (KLEINER 2007, S. 27).

Als eine Antwort auf die beschriebenen Herausforderungen wird die wandlungsfähige Produktion gesehen (z.B. WESTKÄMPER 1999, REINHART 2000, SPATH ET AL. 2002, WIENDAHL 2002, S. 12, WIENDAHL ET AL. 2007). Eine wachsende Komplexität, hervorgerufen durch den beschriebenen Trend zur Individualisierung und zur globalen Vernetzung, erschwert die genaue Prognose zukünftiger Entwicklungen. Von essenzieller Bedeutung ist in solch einem unsicheren Umfeld die Fähigkeit, den optimalen Betriebspunkt eines Systems zu verändern, um so in unterschiedlichen Situationen wirtschaftlich produzieren zu können. Ein wandlungsfähiges Produktionssystem erleichtert dies, da Anpassungen von Fertigung, Montage und Logistik schnell und aufwandsarm durchgeführt werden können. Diese Fähigkeit ist auch erforderlich, um eine teilweise Entkopplung der Lebenszyklen der Produktionseinrichtungen von denen der Produkte zu erreichen und so eine hinreichend lange Anlagennutzungsdauer zu ermöglichen. Die Fähigkeit zum Wandel ist damit eine wichtige Voraussetzung für eine effiziente Produktion (Abbildung 1).

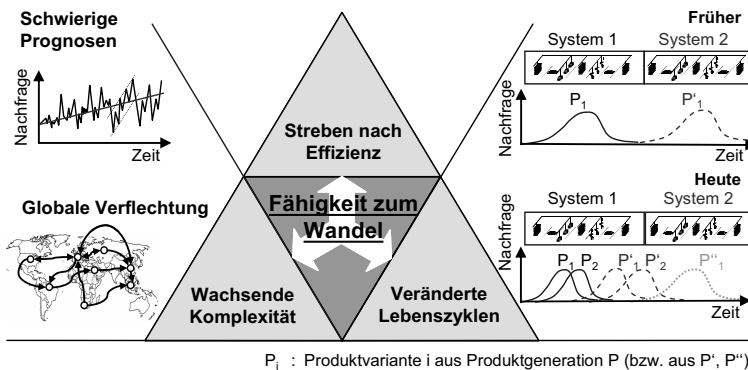


Abbildung 1: Effizienz durch Wandlungsfähigkeit

Bereits im Jahr 1998 wurde die unzureichende Veränderungsfähigkeit von produzierenden Unternehmen erkannt (NATIONAL RESEARCH COUNCIL 1998, S. 4)

und seitdem in einer Vielzahl von Forschungsprojekten adressiert. In der Folge ist die Wandlungsfähigkeit heute bereits häufig als Zielgröße der Fabrikplanung auch in der industriellen Praxis verankert (z.B. ANDRESEN & GRONAU 2004, MÜSSIG 2005, SCHMIDT 2007, TERSCHÜREN & RIECKES 2007). Trotz erheblicher Fortschritte in der Erforschung der Wandlungsfähigkeit zeigen jedoch aktuelle Untersuchungen, dass die Anpassungsfähigkeit der Produktionseinrichtungen und der Unternehmensorganisation noch nicht hinreichend umgesetzt ist und dass diesbezüglich weiterer Handlungsbedarf besteht (DREHER 2005, S. 6, MANUFUTURE 2006, KLEINER 2007, S. 72). Die Herausforderung besteht zukünftig allerdings weniger darin, die Machbarkeit technischer Konzepte zu zeigen (ELMARAGHY 2006, S. 273, HEGER 2007, S. 2 f.), sondern die konkrete Umsetzung wandlungsfähiger Systeme zu erreichen.

WESTKÄMPER (2002b, S. 26) formuliert diesbezüglich das „*Primat der Wirtschaftlichkeit*“, das auch wandlungsfähige Systeme erfüllen müssen. Häufig ist es der Fall, dass eine größere Anpassungsfähigkeit der Produktion höhere Anfangsinvestitionen in die technischen Einrichtungen erfordert bzw. Mehraufwand im Betrieb verursacht (HILL & CHAMBERS 1991, KOREN ET AL. 1999, WESTKÄMPER 2002a, SHI & DANIELS 2003, WIENDAHL & HEGER 2003, SCHUH ET AL. 2004b). Gleichzeitig führt sie zu einer Reduktion potenzieller Umstellungskosten und, verglichen mit wandlungsträgen Systemen, zu einem insgesamt erhöhten Nutzen über den Lebenszyklus (SCHULTE 2002, S. 114, WESTKÄMPER 2002a). Zur Erzielung eines wirtschaftlichen Optimums ist somit „(...) *über das richtige Maß an Wandlungsfähigkeit (zu entscheiden)*“ (GAGSCH 2002, S. 119 f.). Bei zu geringer Wandlungsfähigkeit kann sich das Unternehmen nicht schnell genug auf geänderte Anforderungen einstellen und wird ggf. aus dem Markt gedrängt (vgl. DAS & ELANGO 1995, S. 60), während zuviel strategische Flexibilität und damit Verzicht auf spezifische Investitionen den Aufbau dauerhafter Wettbewerbsvorteile verhindert – so fasst BURMANN (2002, S. VII) die bestehende Herausforderung zusammen.

Gleichwohl gestaltet sich die geforderte wirtschaftliche Bewertung wandlungsfähiger Systeme in der Praxis schwierig. Zunächst erhöht sich durch die Berücksichtigung von Anpassungsfähigkeit die Komplexität und damit der Aufwand der Betrachtung. Jedoch entscheiden eine sorgfältige Planung und Auslegung insbesondere bei einem unsicheren Unternehmensumfeld zu einem großen Teil über die Wirtschaftlichkeit eines Produktionssystems (RIGAMONTI ET AL. 2005, S. 99), so dass ein größerer Aufwand auch gerechtfertigt scheint. Allerdings ist speziell der Nutzen eines anpassungsfähigen Systems, im Gegensatz zu erhöhten

Investitionen und Betriebskosten, schwer quantifizierbar (SCHUH ET AL. 2005, S. 434).

Gefordert werden deshalb bereits seit längerer Zeit Methoden, mit denen eine Bewertung der Wandlungsfähigkeit erleichtert und sowohl zu wenig als auch „Überwindungsfähigkeit“ vermieden werden kann (z.B. KIRCHNER ET AL. 2003, S. 257, MÜSSIG 2005, ELMARAGHY 2006, WIENDAHL ET AL. 2007). ANDRESEN & GRONAU (2004) ergänzen, dass dies immer fall- und unternehmensspezifisch zu analysieren ist.

Aus theoretischer Sicht steht mit der Realoptionstheorie ein Ansatz zur Verfügung, der eine korrekte Bewertung von anpassungsfähigen Systemen bei bestehender Unsicherheit verspricht. Studien und zahlreiche Veröffentlichungen zeigen dessen Relevanz für Fragestellungen in der Produktion (z.B. SANCHEZ 1993, S. 257, BENGSSON 2001, PESKE 2002, S. 90 f., ABELE ET AL. 2007). Umfragen belegen jedoch, dass Realoptionen in der Praxis noch nicht verbreitet zum Einsatz kommen (VOLLRATH 2003). Als Ursache dafür wird unter anderem die hohe Komplexität des Verfahrens genannt: „(...) *one has to conclude that the successful adoption of real option valuation critically depends on the use of simple, albeit inaccurate, techniques to gain the acceptance of top management*“ (BAECKER & HOMMEL 2004, S. 28)¹. Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, die Komplexität auf Kosten der Genauigkeit zu verringern und so die Anwendbarkeit der Realoptionsbewertung zu erhöhen (HOMMEL & PRITSCH 1999b, S. 44, MILLER & PARK 2002, S. 129).

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass das Verarbeitende Gewerbe nach wie vor eine hohe Bedeutung für den Standort Deutschland besitzt und dass sich dies auch in Zukunft wenig ändern wird. Für die zugehörigen Unternehmen ist es im intensiven globalen Wettbewerb ein wichtiger Erfolgsfaktor, sich schnell an veränderte Anforderungen anzupassen. Der *Wandlungsfähigkeit* kommt vor diesem Hintergrund eine große Bedeutung zu. Eine Herausforderung ist heute oft weniger die technische Gestaltung anpassungsfähiger Systeme, sondern die *Bestimmung des wirtschaftlich sinnvollen Maßes an Wandlungsfähigkeit*. Zwar existieren bereits Lösungsansätze, u. a. die relativ neue Methode der Realoptionsbewertung. Speziell dieses Verfahren ist in der Praxis derzeit jedoch nicht verbreitet, was vor allem durch eine hohe Komplexität der Anwendung bedingt scheint.

¹ Eine Übersetzung englischer Zitate findet sich in Abschnitt 10.3.

Die vorliegende Arbeit adressiert die beschriebene Herausforderung einer Bewertung von Investitionsalternativen und formuliert eine Methode zur *Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme*. Die genaue Zielsetzung ist im folgenden Abschnitt aufgezeigt, ehe eine Eingrenzung des Untersuchungsbereichs anschließend in Abschnitt 1.3 erfolgt. In Abschnitt 1.4 wird dann der Aufbau der Arbeit erläutert.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

In der beschriebenen dynamischen Umwelt ist eine wandlungsfähige Produktion grundsätzlich geeignet, um zum wirtschaftlichen Erfolg produzierender Unternehmen beizutragen. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist es daher, den *Einsatz wandlungsfähiger Produktionssysteme in Unternehmen zu fördern. Hierfür ist es erforderlich, die Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen und somit den richtigen Grad der Wandlungsfähigkeit zu bestimmen.*

In Anlehnung an SHI & DANIELS (2003) lassen sich drei Ebenen identifizieren, auf denen Entscheidungen über den Einsatz und die Ausprägung der Wandlungsfähigkeit im Unternehmen getroffen werden (vgl. Tabelle 1).

	Aufgabe	typische Fragestellung
strategisch	<ul style="list-style-type: none"> ▪ strategische Positionierung ▪ Investitions- und Finanzplanung ▪ Abgleich des Nutzens der Anpassungsfähigkeit mit der Unsicherheit des Umfeldes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Welche Aufgabe hat das Werk im Produktionsnetz? ▪ Wie viel kann investiert werden? ▪ Welche Unsicherheiten bestehen und wie groß sind sie?
taktisch	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definition von Planungsprozessen ▪ Beschreibung und Prognose des Systemverhaltens ▪ Gestaltung und Planung von Produktionssystemen, Technologien, Prozessen und Ressourcen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mit welchen technischen Mitteln wird eine Veränderungsfähigkeit erreicht? ▪ An welcher Stelle im System ist Veränderungsfähigkeit notwendig? ▪ Welche Kosten werden im Betrieb und bei Anpassungen entstehen?
operativ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Systemüberwachung ▪ Entscheidungen über Systemveränderungen ▪ Durchführung von Anpassungsmaßnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wie ist die aktuelle Systemleistung? ▪ Wann sollte die vorhandene Wandlungsfähigkeit genutzt werden? ▪ Ist das bestehende Potenzial noch ausreichend?

Tabelle 1: Aufgaben und typische Fragestellungen bei der Planung, Gestaltung und Nutzung von Wandlungsfähigkeit auf strategischer, taktischer und operativer Ebene

Auf *strategischer Ebene* wird über die Zusammensetzung des Investitionsprogramms und die Höhe der Investitionen entschieden, welche zur Verbesserung

der Wandlungsfähigkeit getätigt werden. Es erfolgt damit der Abgleich zwischen der strategischen Positionierung des Unternehmens im Markt und den daraus resultierenden Wandlungsanforderungen. Auf *taktischer Ebene* werden Prozesse entwickelt, um die Wandlungsfähigkeit technisch zu ermöglichen und zu implementieren sowie die potenziellen (finanziellen) Auswirkungen zu prognostizieren. Wie sich die vorhandene Wandlungsfähigkeit optimal nutzen lässt, ist Gegenstand der Untersuchungen auf der *operativen Ebene*. Der Einsatz wandlungsfähiger Systeme kann gefördert werden, wenn sich das Entscheidungsverhalten auf einer oder mehreren dieser Ebenen durch die Verwendung neuer Technologien, Methoden oder Erkenntnisse verändert.

Das globale Ziel dieser Arbeit, die Verbreitung wandlungsfähiger Produktionssysteme zu unterstützen, kann zum einen erreicht werden, indem neue Formen der technisch-organisatorischen Gestaltung wandlungsfähiger Fertigungs- und Montagesysteme bzw. spezifischer Ressourcen erforscht werden. Dies führt dann zur Senkung von Anschaffungs- und Umstellungskosten. Zum anderen lässt sich die Verbreitung wandlungsfähiger Systeme durch einen verbesserten Nachweis ihres finanziellen Nutzens im Rahmen einer Investitionsbewertung fördern. Dieser Ansatz soll in der vorliegenden Arbeit fokussiert werden. Er basiert auf der These, dass bereits mit heutigen technischen Mitteln wirtschaftliche wandlungsfähige Fertigungs- und Montagesysteme möglich sind, wenn deren Nutzen über den Lebenszyklus richtig erfasst wird (WESTKÄMPER 2002a).

Zahlreiche Autoren merken an, dass bei einer Anwendung herkömmlicher Methoden der Investitionsrechnung der Wert von Handlungsmöglichkeiten, wie sie die Wandlungsfähigkeit darstellt, keine adäquate Berücksichtigung findet (z.B. TRIGEORGIS 1996, PRITSCH 2000, COPELAND & ANTIKAROV 2001, SUDHOFF 2007). Neuere Verfahren sind in der Praxis dagegen kaum im Einsatz (VOLLRATH 2003), da sich ihre Anwendung sehr komplex gestaltet (KROLLE & OßWALD 2003). Eine weiteres Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin nachzuweisen, dass eine praxistaugliche Umsetzung solcher innovativer Bewertungskonzepte in Gestalt der sog. Realloptionsbewertung möglich und dass deren Anwendung nicht auf Spezialfälle beschränkt ist. Dies soll gezeigt werden, indem eine Implementierung in einem unterstützenden Softwarewerkzeug erfolgt.

Aus der aufgezeigten Zielsetzung ergibt sich die Aufgabe, eine Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme zu entwickeln. Diese umfasst, bezogen auf die dargestellte Einteilung von SHI & DANIELS (vgl. Tabelle 1 auf S. 6), zunächst Elemente der *strategischen Ebene*,

d.h. das Bewertungsverfahren selbst. Durch die Ableitung von an die Spezifika wandlungsfähiger Systeme angepasster Vorgehensweisen der Investitionsbewertung soll das Entscheidungsverhalten verändert werden. Die zu entwickelnde Methode muss aber auch Elemente der *taktischen Ebene* beinhalten, um den Nutzen der spezifischen Wandlungsfähigkeit zu ermitteln, zu prognostizieren und so die Eingangsgrößen für das Verfahren zu bestimmen. Dabei besteht ein enger Zusammenhang mit der Konzipierung der technischen Systeme, die im Rahmen der Arbeit zu berücksichtigen ist, die jedoch nicht in deren Gestaltungsbereich liegt. Sie liefert vor allem Eingangsinformationen. In die technische Systementwicklung können aber auch Erkenntnisse aus der Bewertung einfließen und zu einer Veränderung der Systeme führen. Die Elemente der *operativen Ebene* werden nicht betrachtet.

Die Ziele dieser Arbeit sind zusammengefasst

- die Förderung des Einsatzes wirtschaftlicher, wandlungsfähiger Produktionssysteme durch
 - den verbesserten Nachweis des finanziellen Nutzens wandlungsfähiger Systeme über den Lebenszyklus sowie
 - die Entwicklung von an die Charakteristika der Wandlungsfähigkeit angepassten innovativen Bewertungsverfahren und
- der Nachweis der Praxistauglichkeit der entwickelten Ansätze durch die Implementierung in einem Softwarewerkzeug.

1.3 Spezifizierung des Untersuchungsbereichs

1.3.1 Begriffsdefinitionen

Für ein einheitliches Verständnis dieser Arbeit sind in diesem Abschnitt die Begriffe *Produktion*, *Produktionssystem* und *Produktionssystemplanung* erläutert.

Unter dem Begriff *Produktion* (von lat. *producere* = *hervorbringen*) wird der technische Prozess der Kombination von materiellen und immateriellen Gütern zur Herstellung anderer Güter verstanden (ZAHN & SCHMID 1996, S. 65). Dazu zählen aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive alle Tätigkeiten der technischen Auftragsabwicklung, die nicht nur unmittelbar an der Gütererstellung beteiligte Bereiche, sondern neben Fertigung und Montage auch indirekte Funktio-

nen wie Arbeitsplanung, Fertigungssteuerung und Materialwirtschaft beinhaltet (EVERSHEIM 1996, S. 1535).

Eine Leistungseinheit, in der alle zur Durchführung einer Produktionsaufgabe benötigten organisatorisch-technischen Tätigkeiten zusammengefasst sind, wird als *Produktionssystem* bezeichnet (EVERSHEIM 1996, S. 1536). Einschränkung erfolgt eine Interpretation als *Produktionssystem im engeren Sinn*, das sich auf den eigentlichen Transformationsprozess und das Zusammenwirken von Inputfaktoren zum Zwecke der Gütererstellung konzentriert (ZÄPFEL 1989, S. 1 f., ZAHN & SCHMID 1996, S. 111 f.). Weitere betriebliche Grundfunktionen wie die Beschaffung und der Absatz werden somit nicht betrachtet (vgl. auch CORSTEN 1994, S. 7, ZAHN & SCHMID 1996, S. 10).

Ein Produktionssystem ist auch Bestandteil einer Fabrik, die als Stätte des Transformationsprozesses definiert ist (FELIX 1998, S. 33). Grundlage dieser Interpretation ist die systemtechnische Sicht der Fabrik (SCHMIGALLA 1995, S. 43 f.), nach der das Produktionssystem als wichtiges Subsystem des Fabriksystems Maschinen und Anlagen für unterschiedliche technologische Prozesse in Fertigung, Montage, Transport und Lagerung sowie deren Beziehungen zueinander umfasst (SCHENK & WIRTH 2004, S. 98). HERNÁNDEZ (2003, S. 42 f.) differenziert noch genauer und beschreibt das Produktionssystem mit seinen Subsystemen Fertigungs-, Montage- und Logistiksystem, die wiederum als weitere Subsysteme die Arbeitsstationen enthalten. Die *Produktionssystemplanung* als gedankliche Vorwegnahme und Festlegung der zukünftigen Aktivitäten mit Bezug zu den relevanten Systemelementen (SPUR 1994, S. 30, GRUNDIG 2006, S. 9) ist somit ein Teil der *Fabrikplanung* (SCHENK & WIRTH 2004, S. 98).

1.3.2 Eingrenzung des Betrachtungsbereichs

Zur Eingrenzung des Untersuchungsbereiches werden in diesem Abschnitt zunächst die betrachteten Unternehmenstypen näher beschrieben. Anschließend erfolgt eine Einordnung der zu entwickelnden Methode in den Planungsprozess und die Planungsdisziplin, bevor dann durch eine subjektbezogene Abgrenzung die Zielgruppe dieser Arbeit festgelegt wird.

Die Untersuchungen sind auf Unternehmen beschränkt, die einen Bedarf an Wandlungsfähigkeit haben. Das ist dann der Fall, wenn die *Veränderungshäufigkeit* und gleichzeitig der *Anpassungsaufwand* (bei Nutzung herkömmlicher, wandlungsträger Systeme) hoch sind. Die *Veränderungshäufigkeit* ist sowohl

abhängig von der Länge der Lebenszyklen als auch von Markt- und Prognoseunsicherheiten (DOHMS 2001, S. 9 f., SESTERHENN 2003, S. 8 f.). Gerade Unternehmen bzw. Branchen mit hohem Innovationsgrad erzielen Wettbewerbsvorteile durch eine häufige Anpassung ihres Leistungsspektrums in Form neuer Produkte, Varianten und Prozesse – sie werden aber auch durch die von Wettbewerbern entwickelten technologischen Veränderungen im Unternehmensumfeld zu Anpassungen gezwungen.

Ein großer *Anpassungsaufwand* ergibt sich, wenn die Spezifität der eingesetzten Produktionseinrichtungen hoch ist. Oft sind solche Anlagen durch starke Automatisierung gekennzeichnet, durch die sich vor allem bei großen Absatzmengen geringe Stückkosten erzielen lassen. Einzelfertiger stellen zwar eine sehr große Anzahl unterschiedlicher Produktvarianten her, versuchen diese Kundenindividualität jedoch durch geringe Spezifität der Produktionseinrichtungen und eine geschickte Steuerung der Produktionsaufträge zu ermöglichen (CISEK 2005, S. 6). Dezierte, kapitalintensive Produktionsanlagen und -strukturen finden sich dagegen insbesondere in der Serienproduktion (SESTERHENN 2003, S. 9). Unter Berücksichtigung der geforderten und erläuterten hohen Veränderungshäufigkeit liegen deshalb *Unternehmen mit variantenreicher Serienproduktion* im Fokus dieser Arbeit². Die Betrachtungen werden weiterhin begrenzt auf Unternehmen, die *Fertigungstechnik* und keine Energie- oder Verfahrenstechnik einsetzen (vgl. EVERSHEIM ET AL. 1996, S. 11.1). Typische Vertreter dieser Typologie finden sich bspw. im Bereich der Automobilzulieferindustrie, der Elektronikfertigung und der Konsumgüterindustrie.

Ein weiterer Aspekt zur Eingrenzung des Betrachtungsbereichs folgt aus der Unterteilung der Produktion in einer hierarchischen Ressourcen- bzw. Raumsicht (Abbildung 2). Die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit bleiben auf einen einzelnen Produktionsbetrieb beschränkt und beziehen weder die Standortwahl noch die Gestaltung des Produktionsnetzwerkes in die Analyse ein. Auf der Prozessebene sind die einzelnen Fertigungs- und Montageoperationen bzw. die genauen technologischen Parameter beschrieben. Diese Sichtweise ist für die Bewertung im Rahmen der Fabrikplanung (s.u.) zu detailliert und wird deshalb in dieser Arbeit ebenfalls nicht berücksichtigt.

² Diese Eingrenzung ist bei der Untersuchung von Wandlungsfähigkeit üblich, bspw. behandelte auch der Sonderforschungsbereich 467 von 1997 bis 2005 „Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion“ (WESTKÄMPER 2005).

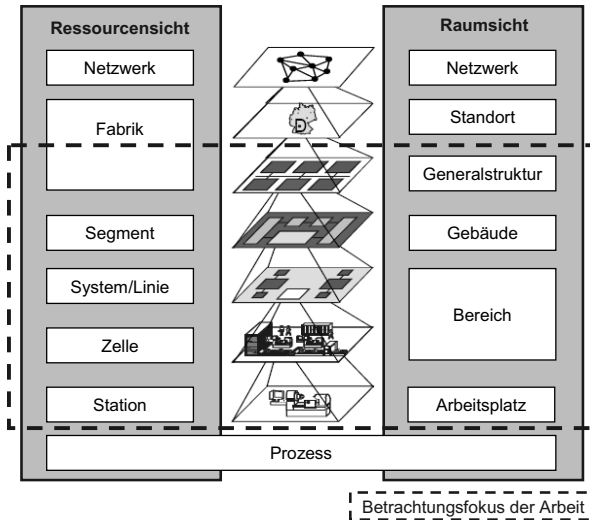


Abbildung 2: Fabrikebenen nach Ressourcen- und Raumsicht (in Anlehnung an NYHUIS ET AL. 2005, WESTKÄMPER 2006, WIENDAHL ET AL. 2007)

Die vorliegende Arbeit befasst sich im weiteren Sinn mit der Optimierung der technischen Ausstattung von Produktionsstätten und ist daher der unternehmerischen Disziplin der Fabrikplanung zuzurechnen (vgl. WIENDAHL ET AL. 1996, S. 9-1, HERNÁNDEZ 2003, S. 12 f.). Es wird nicht die Phase des operativen Fabrikbetriebs untersucht, welche die optimale Nutzung *bereits vorhandener* Produktionsanlagen zur Realisierung eines Produktionsprogramms beinhaltet (GRUNDIG 2006, S. 19). Behandelt wird hingegen die strategische Initialplanung, die von der dezentralen Planung im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses abzugrenzen ist (HERNÁNDEZ 2003, S. 12). Da der Fabrikplanungsprozess in seinem Wesen einem Investitionsprozess entspricht (GRUNDIG 2006, S. 9, SCHMIGALLA 1995, S. 70), liegt aus betriebswirtschaftlicher Sicht eine Fokussierung auf die Anwendung der mittel- bis langfristige Investitionsrechnung vor, im Gegensatz zur primär kurzfristigen Kostenorientierung während des Fabrikbetriebs (EWERT & WAGENHOFER 2000, S. 79 f.). Bei einer Einordnung entsprechend den Phasen der Fabrikplanung nach GRUNDIG (2006, S. 38 ff.) ist diese Arbeit der iterativ zu durchlaufenden *Grobplanung* zuzurechnen, in der verschiedene alternative Produktionssystemvarianten bewertet werden.

Die Arbeit richtet sich an *Fabrikplaner* mit betriebswirtschaftlichen Grundkenntnissen insbesondere im Bereich der Kostenrechnung. Die zu entwickelnde Me-

thode soll die Komplexität einer Realloptionsbewertung reduzieren und so deren Nutzung für einen Vergleich alternativer Produktionssystemkonzepte ermöglichen. Die Prognose des technischen Verhaltens dieser Systeme steht nicht im Fokus der Untersuchungen, wird jedoch als wichtige Eingangsgröße benötigt. Entsprechend richtet sich die Methode an *Planungsspezialisten*, die Prozesswissen im Bereich der Fertigung, Montage und Logistik besitzen, nicht jedoch an Bewertungsspezialisten. Da die Bewertung der verschiedenen Alternativen dazu dienen soll, das zu realisierende Konzept auszuwählen, gehören auch die *Entscheider* im Management der beschriebenen Unternehmen zur angesprochenen Zielgruppe.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich inklusive der Einleitung und Zusammenfassung in 8 Kapitel, die in Abbildung 3 ersichtlich sind. In den vorangegangenen Abschnitten wurden bereits die Ausgangssituation und die Motivation aufgezeigt, darauf aufbauend die Zielsetzung der Arbeit formuliert und der Untersuchungsbereich eingegrenzt.

In Kapitel 2 erfolgt zunächst eine Darstellung der für die Arbeit wesentlichen Grundlagen. Mit der Wandlungsfähigkeit als Zielgröße in der Fabrikplanung, der Investitionsbewertung unter Unsicherheit und der Lebenszyklusbewertung von Produktionssystemen sind drei Elemente beschrieben, die das Verständnis der Methode erleichtern und eng mit der Problemstellung dieser Arbeit zusammenhängen.

Im Gegensatz dazu werden in Kapitel 3 neuere wissenschaftliche Arbeiten diskutiert, die sich speziell mit der Bewertung von Wandlungsfähigkeit aus unterschiedlichen Blickrichtungen befassen. Ziel ist es, Defizite bestehender Vorgehensweisen aufzuzeigen und gleichzeitig Teilaspekte einzelner Ansätze zu identifizieren, die in dieser Arbeit aufgegriffen werden können. Auf der Basis von Kapitel 2 und 3 sind anschließend in Kapitel 4 die Anforderungen an eine Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme erläutert.

Die Grundprinzipien der Optionsbewertung sowie die Auswahl eines für diese Arbeit geeigneten Realloptionsverfahrens sind Thema des 5. Kapitels. Ebenso erfolgt eine kritische Reflexion der Realloptionsbewertung im Hinblick auf die Problemstellung dieser Arbeit.

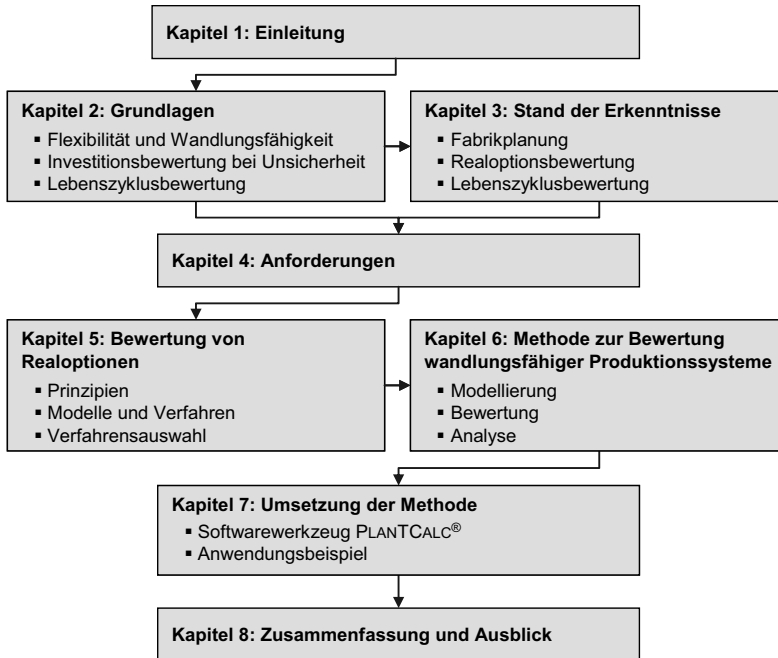


Abbildung 3: Aufbau der Arbeit

In Kapitel 6 wird die Methode zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme entwickelt. Die Schwerpunkte des Kapitels behandeln die Modellierung, die eigentliche (mathematische) Bewertung sowie die Analyse der daraus erzielten Ergebnisse.

Auf die praktische Umsetzung der Methode wird in den beiden nachfolgenden Kapiteln eingegangen. Das am *iwb* in Kooperation mit der Siemens AG entwickelte Softwarewerkzeug PLANTCALC® unterstützt die Bewertung von Fabrikplanungsaufgaben unter Unsicherheit und berücksichtigt die Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit (Kapitel 7). In Abschnitt 7.3 schließlich ist ein Anwendungsbeispiel erläutert, anhand dessen die entwickelte Vorgehensweise verdeutlicht sowie deren praktische Anwendbarkeit kritisch hinterfragt wird.

Eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick, der offene Forschungsfragen identifiziert und mögliche Weiterentwicklungen der in dieser Arbeit beschriebenen Methode aufzeigt, finden sich abschließend in Kapitel 8.

2 Grundlagen

2.1 Wandlungsfähigkeit als Zielgröße in der Fabrikplanung

2.1.1 Allgemeines

In Abschnitt 1.1 wurde erläutert, dass die zunehmende Dynamik des wirtschaftlichen Umfeldes der Unternehmen häufigere Anpassungen der Produktion erfordert. Die schon lange bestehende Forderung nach Veränderungsfähigkeit von Fabriken (MEIBNER 1956, S. 72 f.) gewinnt so stärkere Bedeutung, da ohne sie das Primärziel einer dauerhaften Wirtschaftlichkeit schwer zu erreichen ist. In der Literatur existieren dazu unterschiedliche Ansätze, die in den nachfolgenden Abschnitten voneinander abgegrenzt werden. Aufbauend auf der Interpretation der *Flexibilität* (Abschnitt 2.1.2) erfolgt in Abschnitt 2.1.3 eine Präzisierung von *Wandlungsfähigkeit*, die eine spezielle Form der Veränderungsfähigkeit von Fabrik- und Produktionssystemen darstellt. Das in Abschnitt 2.1.4 vorgestellte *Rezeptormodell* schließlich formalisiert den Zusammenhang zwischen einem wandlungsfähigen Produktionssystem, der Produktionssystemplanung und den dynamischen, sich verändernden Einflussfaktoren des Fabrikumfeldes.

Anhand der Merkmale von Wandlungsfähigkeit, insbesondere auch im Unterschied zur Flexibilität, ist es abschließend möglich, die in Kapitel 1 beschriebene Problemstellung einer adäquaten Bewertung von Anpassungspotenzialen in der Produktion näher zu charakterisieren. In Abschnitt 2.1.5 werden somit die Ausführungen zur Wandlungsfähigkeit als Zielgröße der Fabrikplanung zusammengefasst.

2.1.2 Flexibilität

Der Begriff der Flexibilität stammt aus dem Lateinischen³ und beschreibt allgemein die Fähigkeit, sich an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen. Entsprechend dieser zunächst sehr offenen Bedeutung wird das Konzept der Flexibilität in unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen und auch innerhalb einer Fachrichtung auf vielfältige, sich zum Teil widersprechende Art interpretiert. In die-

³ von lat. *flexibilis* = 1. biegsam, elastisch 2. (übertragen) anpassungsfähig, beweglich, geschmeidig

sem Abschnitt wird deshalb eine Definition für Flexibilität aus Sicht der Produktion eingeführt, auf deren Basis dann in Abschnitt 2.1.3 eine Abgrenzung der Wandlungsfähigkeit erfolgt.

In der Literatur finden sich eine Vielzahl von Definitionen und Erklärungen produktionsbezogener Flexibilitäten sowie mehrere detaillierte Klassifikationsschemata bzw. Taxonomien. Umfangreiche Diskussionen⁴ der Konzepte finden sich bei SETHI & SETHI (1990), DE TONI & TONCHIA (1998), SHEWCHUK & MOODIE (1998), D'SOUZA & WILLIAMS (2000) oder BEACH ET AL. (2000).

Nach SLACK (1983, S. 7) ist die Flexibilität eines Produktionssystems ein Maß für die Bandbreite der Zustände, in denen es betrieben werden kann. Ein Zustand ist dabei durch eine spezielle Kombination von Input- und Outputfaktoren sowie durch das Verhalten des Wertschöpfungsprozesses selbst definiert. Beispiele für Inputfaktoren sind die Art und Menge der verwendeten Rohstoffe, für Outputfaktoren die produzierte Menge einer bestimmten Variante und für das Verhalten die erreichten Durchlaufzeiten. Die Flexibilität bestimmt sich darüber hinaus danach, zu welchen Kosten und in welcher Zeit das System von einem in den anderen Zustand wechseln kann (vgl. DAS & ELANGO 1995, S. 67). Die beiden Größen Zeit und Kosten bezeichnet SLACK als „*friction elements*“ (Reibungselemente), ohne deren Berücksichtigung nahezu jede Veränderung als Ausübung von Flexibilität betrachtet werden kann. Aus einer unterschiedlichen Interpretation der im Sinne einer Flexibilität noch zulässigen Zeit bzw. Kosten lässt sich der teilweise stark divergierende Gebrauch des Begriffs in der Literatur erklären. Da nicht per se festgelegt ist, zu welchem Anteil die Höhe des Flexibilitätsgrades jeweils von den unterschiedlichen Beschreibungsgrößen definiert wird, ist zum Verständnis stets der genaue Anwendungskontext notwendig. Man spricht deshalb auch von einem relativen Konzept, das in einem definierten Zusammenhang nur vergleichende („A ist hinsichtlich der Ausbringungsmenge flexibler als B“), aber keine absoluten Aussagen („A ist doppelt so flexibel wie B“) zulässt (DAS & ELANGO 1995, S. 66).

⁴ Die Vielzahl von Beschreibungen und Definitionen zur Flexibilität in der Produktion geht so weit, dass sich deren Sammlung, Darstellung und Vergleich fast zu einer eigenen Forschungsrichtung entwickelt hat: „(...), *the literature survey has become a characteristic of manufacturing flexibility research*“ (BEACH ET AL. 2000, S. 45). Auf eine ausführliche Gegenüberstellung existierender Arbeiten soll daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet werden.

Im Hinblick auf eine Fabrik interpretiert HERNÁNDEZ (2003, S. 44 f.) Flexibilität aus Sicht der Systemtheorie. Er deutet alle Veränderungen eines Systems, welche primär die Relationen zwischen den Elementen und nicht die Elemente selbst betreffen, als flexible Reaktionen. Die durchführbaren Anpassungen der Beziehungen sind dabei durch Regelmechanismen oder eindimensionale Freiheitsgrade bereits vorbestimmt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dieses Verständnis übernommen und wie folgt erweitert:

Definition 1 (Flexibilität)

Flexibilität beschreibt die Fähigkeit eines Systems, sich schnell und mit sehr geringem finanziellen Aufwand an Veränderungen des Umfeldes anzupassen. Ein flexibles System besitzt zum Zeitpunkt $t=0$ seiner Inbetriebnahme definierte und bekannte obere und untere Grenzen \vec{b}_o und \vec{b}_u , welche die erreichbaren Zustände einschränken. Die Anpassung erfolgt ohne eine Veränderung der Systemelemente.

Die Vektoren \vec{b}_o und \vec{b}_u setzen sich dabei allgemein aus den Komponenten zusammen, die gemeinsam das System (Input, Output, Verhalten) beschreiben. Beispielsweise können dies die maximale Ausbringungsmenge oder die Anzahl montierbarer Varianten sein. Die Definition hebt hervor, dass im Rahmen einer flexiblen Änderung des Systems nahezu keine Umstellungskosten oder zusätzliche Investitionen anfallen. Dies betrifft jedoch nicht die finanziellen bzw. zeitlichen Aufwendungen, die durch den Prozess der Entscheidungsfindung selbst entstehen.

Die Flexibilität konnte in diesem Abschnitt als die Fähigkeit eines Systems identifiziert werden, ohne zeitlichen und finanziellen Aufwand zwischen vordefinierten Zuständen zu wechseln. Dieses Verständnis dient dazu, im Folgenden den Begriff der Wandlungsfähigkeit zu erläutern und in Abgrenzung zur Flexibilität zu definieren.

2.1.3 Wandlungsfähigkeit

In der deutschsprachigen produktionstechnischen Forschung wurde in den letzten Jahren der Begriff der *Wandlungsfähigkeit* als Erweiterung zur Flexibilität geprägt. Dieses Konzept setzt sich zunehmend auch in der industriellen Praxis durch und ist eine wichtige Zielgröße bei der Planung und Gestaltung wettbewerbsfähiger Fabriken (WIENDAHL & HERNÁNDEZ 2000, REITHOFER ET AL. 2002, MÜSSIG 2005). In diesem Abschnitt werden die grundlegenden

Kennzeichen wandlungsfähiger Systeme dargestellt und die bestehenden unterschiedlichen Sichtweisen voneinander abgegrenzt. Darauf aufbauend und mit Bezug zu den in Abschnitt 2.1.2 aufgezeigten Eigenschaften der Flexibilität wird dann der Begriff der Wandlungsfähigkeit definiert und der Unterschied zu ähnlichen, international gebräuchlichen Konzepten erläutert.

Herleitung einer Definition der Wandlungsfähigkeit

HILDEBRAND (2005) begreift die Wandlungsfähigkeit allgemein als universelle Eigenschaft eines Objektes oder Systems, eine signifikante Veränderung durchführen zu können. Er betont, dass Wandel demnach subjektiv ist, da die Signifikanz stets einer Interpretation bedarf. Dies ist nur im Kontext der jeweiligen Betrachtungsebene möglich. Die Bedeutung der Wandlungsfähigkeit hängt somit von der analysierten Systemebene einer Fabrik ab.

Den starken Bezug zur *Unternehmensorganisation* betonen sowohl HARTMANN (1995) als auch WESTKÄMPER (1999). WESTKÄMPER sieht als wichtiges Element der Wandlungsfähigkeit die Fähigkeit des technischen Systems, seine räumliche Strukturierung sowie sein Verhaltensspektrum auch an unbekannte Gegebenheiten anzupassen (WESTKÄMPER ET AL. 2000, S. 24). Eine zentrale Forderung beider Autoren ist jedoch die Gestaltung der Leistungseinheiten nach den drei Grundprinzipien Selbstorganisation, Selbstähnlichkeit und Selbstoptimierung. WESTKÄMPER betont ferner die Bedeutung der individuellen Kreativität und Intelligenz des Menschen, um Veränderungen nicht nur reaktiv, sondern auch proaktiv vornehmen zu können. Die von HARTMANN geforderte Dynamisierung bestehender Systeme, d.h. die Anpassung bereits existierender Strukturen im Zeitverlauf, hängt damit auch von der Fähigkeit der Organisation ab, neue Informationen zu verarbeiten und Veränderungen des technisch-organisatorischen Systems zu initiieren.

Am Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) der Universität Hannover wird ein Schwerpunkt der Arbeiten auf die Erforschung der Wandlungsfähigkeit in der *Fabrikplanung* gelegt (WIENDAHL & HERNÁNDEZ 2000, WIENDAHL 2002, WIENDAHL ET AL. 2005). Insbesondere HERNÁNDEZ (2003) entwickelt diesbezüglich eine ausführliche Systematik und integriert viele der bereits angeführten Aspekte. Er fasst die Wandlungsfähigkeit als eine Systemeigenschaft der Fabrik auf, die durch sog. Wandlungsbefähiger wie z.B. Mobilität und Modularität bestimmt wird. Der Wandel vollzieht sich in dieser Systematik stets an Wandlungsobjekten, welche nach den Ebenen einer Fabrik gegliedert sind. Art und

Umfang der notwendigen Anpassungen werden in der von HERNÁNDEZ vorgestellten Methode mit Hilfe von Szenarios ermittelt.

Nach BAUMEISTER (2003) ist die Turbulenzfähigkeit ein wichtiger Bestandteil der Wandlungsfähigkeit. Darunter wird eine in der Organisation verankerte Fähigkeit verstanden, Veränderungen in nicht vorgehaltenen Dimensionen und Szenarios einzuleiten (vgl. SPATH & BAUMEISTER 2001, SPATH ET AL. 2002). Diese Sichtweise ähnelt derjenigen von REINHART ET AL. (2002) und ZÄH ET AL. (2004), wonach die Flexibilität die Möglichkeit zur Veränderung in vorgehaltenen Korridoren bezeichnet. Ergänzt um die Reaktionsfähigkeit ist die Wandlungsfähigkeit darüber hinaus ein Potenzial, um jenseits vorgehaltener Korridore agieren zu können (REINHART ET AL. 1999, REINHART 2000). Wandlungsfähige Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass sie zum Zeitpunkt ihrer Implementierung keine expliziten Grenzen besitzen und weitestgehend lösungsneutral sind (CISEK ET AL. 2002). Der Zusammenhang zwischen Flexibilität, Reaktions- und Wandlungsfähigkeit sowie deren Abhängigkeit von der Charakterisierung des Unternehmensumfeldes ist in Abbildung 4 illustriert.

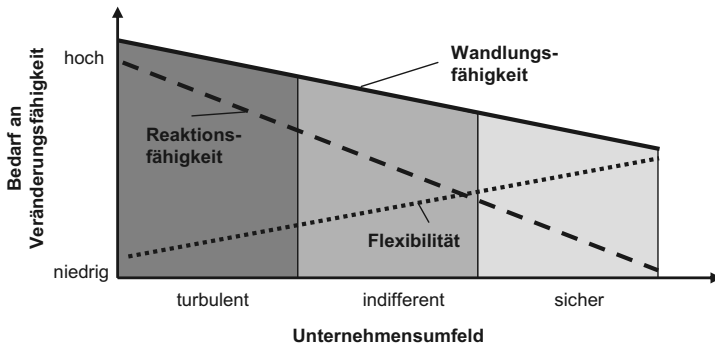


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Wandlungsfähigkeit, Reaktionsfähigkeit und Flexibilität (REINHART 2000, S. 39)

Alle genannten Autoren setzen die benötigte Wandlungsfähigkeit zum herrschenden Grad an Turbulenz in Beziehung. Nur wenn zu erwarten ist, dass die Fabrik bzw. das Produktionssystem in Folge einer starken Veränderung der Umwelt angepasst werden muss, ist die Fähigkeit zur ggf. ungeplanten Adaption wertvoll. Aufbauend auf den dargestellten Sichtweisen und angelehnt an die Definition der Flexibilität in Abschnitt 2.1.1 wird die Wandlungsfähigkeit im Rahmen dieser Arbeit wie folgt definiert:

Definition 2 (Wandlungsfähigkeit)

Wandlungsfähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell an Veränderungen des Umfeldes anzupassen, indem es seine Struktur ändert. Ein solches technisch-organisatorisches System besitzt die in $t=0$ definierte Fähigkeit, neu verfügbar werdende Informationen zum Zeitpunkt $t=i$ ($i>0$) aufzunehmen, zu interpretieren und darauf basierend sich selbst zu verändern. Es verfügt über die technischen, organisatorischen und individuellen Fähigkeiten, die in $t=0$ definierten Grenzen \bar{b}_0 und \bar{b}_V zum Zeitpunkt $t=i$ in minimaler Zeit τ und bei minimalen Kosten c_W zu neuen Grenzen \bar{b}_0^ bzw. \bar{b}_V^* zu verschieben, die in $t=0$ ggf. noch nicht bekannt sind.*

Diese Definition nennt konstituierende und beschreibende Merkmale eines wandlungsfähigen Systems. Die grundsätzliche Fähigkeit, organisatorische und technische Anpassungen vorzunehmen und so Zustände außerhalb eines vorgehaltenen Korridors zu erreichen, ist ebenso wie die Möglichkeit der Informationsaufnahme und -verarbeitung ein konstituierendes Element der Wandlungsfähigkeit. Die für eine Wandlung anfallenden Kosten, die dafür erforderliche Zeit sowie die durch den Wandlungsprozess erreichten Zustandsgrenzen bilden die beschreibenden Merkmale eines wandlungsfähigen Systems. Aufbauend auf dieser Definition werden nachfolgend verwandte Konzepte aufgezeigt und die bestehenden Unterschiede zur Wandlungsfähigkeit verdeutlicht.

Abgrenzung der Wandlungsfähigkeit von verwandten Konzepten

In der englischsprachigen Literatur findet sich der Begriff der Wandlungsfähigkeit als *changeability* oder als *transformability* meist in Veröffentlichungen deutschsprachiger Autoren der Ingenieurwissenschaften. Dennoch werden in der internationalen Forschung ähnliche Konzepte diskutiert. Dies geschieht häufig unter dem Begriff der *strategic flexibility*, die auf ausgewählte, produktionsrelevante Teilbereiche eingegrenzt wird. Einige Autoren fokussieren dabei auch Eigenschaften wie z.B. die Proaktivität, die in der deutschsprachigen Literatur nicht der Flexibilität, sondern der Wandlungsfähigkeit zugeschrieben werden (vgl. HYUN & AHN 1992, UPTON 1994, DE TONI & TONCHIA 1998, S. 1609). Eine der Wandlungsfähigkeit sehr ähnliche Sichtweise vertritt CARLSSON (1989, S. 184). Danach adressiert die *Typ-I-Flexibilität* Veränderungen, die ohne zusätzliche Kosten in einem definierten Korridor vorgenommen werden können, während die *Typ-II-Flexibilität* die Fähigkeit beschreibt, neue Chancen zu nutzen und

sich an unvorhergesagte Veränderungen anzupassen. Das ganzheitliche, systemorientierte Verständnis von Fabriken ist hingegen nicht verbreitet.

Auch in der betriebswirtschaftlichen Literatur werden vergleichbare Konzepte und Begriffe wie *strukturelle Flexibilität* oder *Entwicklungsflexibilität* (vgl. MAYER 2001, S. 71 ff.) meist auf das gesamte Unternehmen bezogen und unterscheiden sich damit vom Verständnis der Wandlungsfähigkeit in dieser Arbeit.

Weitere thematisch angrenzende Forschungsaktivitäten befassen sich mit der *Agilität* von Unternehmen. Dieser Ansatz untersucht die strategische Fähigkeit der gesamten Unternehmung, dem Kunden einen Mehrwert zu bieten, Veränderungen und Wandel zu beherrschen, Kompetenzen zu identifizieren und weiterzuentwickeln, Kooperationen aufzubauen und so die erreichte Marktposition zu halten oder auszubauen (GOLDMAN ET AL. 1996, RAMESH & DEVADASAN 2007). Im Hinblick auf die Produktion soll Agilität durch den Einsatz einer Vielzahl bekannter Methoden und Prinzipien (z.B. Lean Manufacturing, TQM, BPR etc.) erreicht werden und lässt sich deshalb auch als „Werkzeugkasten“ interpretieren (BLECKER & GRAF 2004, S. 906). Agilität ist somit eher ein Konzept, um neue Strukturen zu entwickeln und nicht, wie von HARTMANN gefordert, ein Ansatz, um bestehende Systeme zu dynamisieren.

Unter dem Begriff der *Rekonfigurierbarkeit* werden Ansätze diskutiert, welche die Entwicklung von neuartigen Fertigungseinrichtungen zum Ziel haben. Diese sollen die Lücke zwischen hochspezialisierten und damit für definierte Umweltbedingungen sehr effizienten Systemen (z.B. Transferstraßen) einerseits und sehr anpassungsfähigen, dafür aber langsameren und teureren flexiblen Systemen (z.B. CNC Bearbeitungszentren) andererseits, schließen (KOREN ET AL. 1999, MEHRABI ET AL. 2002, ELMARAGHY 2006). Schlüsselement dazu ist die Entwicklung autonomer und standardisierter Funktionseinheiten, um so in kurzer Zeit neue Maschinen- oder Systemkonfigurationen zu ermöglichen (HEISEL & MARTIN 2004). Diese Ansätze fokussieren sich stark auf die Hardware- und Softwareentwicklung und berücksichtigen organisatorische Aspekte nur am Rande.⁵

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Verwendung aller hier vorgestellten Begriffe (Flexibilität, Wandlungsfähigkeit, Agilität, Rekonfigurierbar-

⁵ Eine Zusammenstellung aktueller Arbeiten zur Rekonfigurierbarkeit von Fertigungs-, Montage- und Fabrikssystemen findet sich in DASHCHENKO 2006.

keit) in der Literatur zum Teil synonym erfolgt. Der Gebrauch eines der aufgeführten Begriffe hängt neben der regionalen Herkunft der Arbeiten auch von dem Fachgebiet (z.B. Maschinenentwicklung, Fabrikplanung, strategisches Management) ab, dem die Ausführungen zuzurechnen sind.

Aufbauend auf Definition 2 (Wandlungsfähigkeit) sowie der erfolgten Abgrenzung zu verwandten Konzepten lässt sich die Wandlungsfähigkeit mit Hilfe folgender Aussagen abschließend charakterisieren:

- Wandlungsfähigkeit ist eine Systemeigenschaft, wobei die betrachtete Systemebene der Fabrik zunächst nicht festgelegt ist.
- Ein wandlungsfähiges System ist in der Lage, sich bei entsprechender Entwicklung der Umwelt auch über vorgehaltene Grenzen hinweg anzupassen. Die Zustände, die das System im Zeitverlauf annimmt, sind zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme ggf. nicht bekannt.
- Im Gegensatz zu einem flexiblen System verarbeiten die Entscheider bei einem wandlungsfähigen System Informationen, die erst im Laufe des Lebenszyklus verfügbar werden und nutzen diese, um Entscheidungen über eine Anpassung der vorhandenen Struktur zu treffen.
- Das Wechseln zwischen verschiedenen Zuständen, die innerhalb der Grenzen der Flexibilität liegen, ist ohne finanziellen Aufwand möglich. Das Verschieben dieser Grenzen, d.h. das Nutzen der Wandlungsfähigkeit, ist mit zusätzlichen Investitionen oder Kosten im Zuge der Anpassung verbunden.

Die folgende Abbildung 5 verdeutlicht diese Eigenschaften und zeigt insbesondere den Unterschied zur Flexibilität auf.

In diesem Abschnitt wurden verschiedenen Sichtweisen auf die Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems vorgestellt und voneinander abgegrenzt. Die daraus abgeleitete Definition beinhaltet die charakteristischen Eigenschaften der Wandlungsfähigkeit, die für die Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme relevant sind. Als weitere Voraussetzung einer solchen Methode muss die bestehende Anpassungsfähigkeit eines Systems jeweils zum herrschenden Grad an Turbulenz in Beziehung gesetzt werden können. Daher ist es in einem nächsten Schritt zunächst notwendig, die Auswirkungen eines turbulenten Umfeldes auf das Produktionssystem näher zu beschreiben und zu systematisieren.

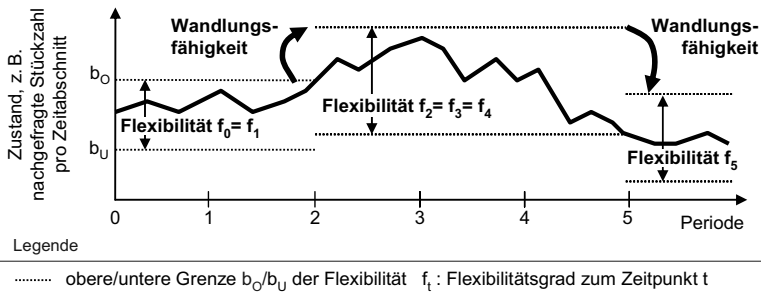


Abbildung 5: Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (in Anlehnung an ZAEH ET AL. 2005b, S. 4)

2.1.4 Rezeptormodell der wandlungsfähigen Produktion

Die Einflussfaktoren, die zu einem als turbulent bezeichneten Umfeld führen, sind in Abschnitt 1.1 bereits aufgeführt worden. Eine wesentliche Herausforderung für die Fabrikplanung besteht darin, die vielfältigen Veränderungen und die daraus resultierenden Auswirkungen auf das Produktionssystem zu erkennen und systematisch zu erfassen. Eine einfache Beschreibungsmöglichkeit bietet dafür das sog. Rezeptormodell. Es basiert auf der Erkenntnis, dass unterschiedliche Einflüsse z.T. zu identischen, in ihrer Anzahl begrenzten Auswirkungen auf die Produktion führen und über definierte Kanäle wirken. Die folgenden Ausführungen zu diesem Modell bauen auf den Arbeiten von CISEK ET AL. (2002), ZÄH ET AL. (2004) sowie ZAEH ET AL. (2005c) auf und ergänzen diese um weitere Aspekte.

Bei einem Produktionssystem handelt es sich um ein offenes System, das über Verbindungen zum Umfeld verfügt und das deshalb nicht isoliert betrachtet werden kann (HERNÁNDEZ 2003, S. 39). Es wird dabei durch die Elementmenge, deren Struktur und die ablaufenden Prozesse charakterisiert (SCHMIGALLA 1995, S. 82). Die Produktionssystemplanung hat entsprechend die Aufgabe, die Voraussetzungen für einen möglichst effizienten Transformationsprozess zu schaffen, welcher auch die generellen Unternehmensziele wie bspw. Umweltziele oder soziale Ziele (vgl. ZAHN & SCHMID 1996, S. 149, DOMSCHKE & SCHOLL 2003, S. 8 f.) berücksichtigt. Dies erfolgt durch die Auswahl einer adäquaten Elementmenge, d.h. von Produktionsressourcen. In ihrer Gesamtheit und durch die für sie gewählte Struktur ermöglichen sie die notwendigen technologischen, logistischen

und informatorischen Prozesse. Abbildung 6 stellt ein Produktionssystem als funktionales Konzept (ROPOHL 1999, S. 75 f.) mit Input und Output dar.

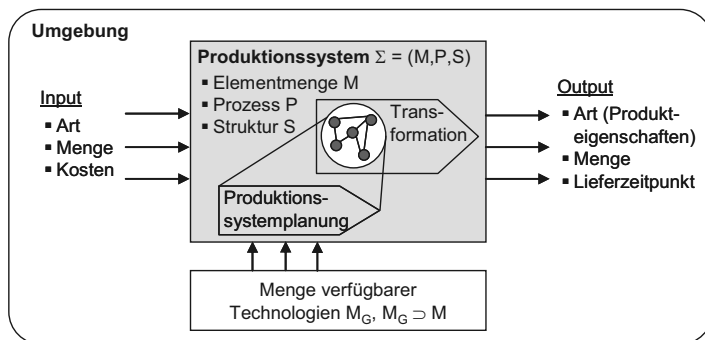


Abbildung 6: Darstellung des offenen Systems Produktion (in Anlehnung an SCHMIGALLA 1995, S. 82, SPUR 1994, S. 21 f.)

Es ist die primäre Aufgabe der Produktion, die so genannten Sachziele der Leistungserstellung zu erfüllen, über die ein Bezug der Produktionstätigkeit zu den Marktanforderungen hergestellt wird. Die Dimensionen dieser Sachziele beziehen sich auf die Art der hergestellten Güter, deren Menge, den Zeitpunkt der Bereitstellung am Markt sowie die Qualität (THOMMEN & ACHLEITNER 2005, S. 326, DOMSCHKE & SCHOLL 2003, S. 9).

Bei den Inputfaktoren handelt es sich zum einen um Rohstoffe, Halbzeuge, Halbfabrikate, Fremtteile und Hilfsstoffe, die weiterverarbeitet und zu substanziellen Bestandteilen der Endprodukte werden. Zum anderen finden auch Betriebsstoffe wie Schmiermittel, Energie sowie Arbeitsleistung (betriebseigene oder Dienstleistungen) Eingang in die Produktion (vgl. zum System industrieller Produktionsfaktoren BEUERMANN 1996 und ZAHN & SCHMID 1996, S. 117). Der Input wird darüber hinaus sowohl durch die benötigte Menge des jeweiligen Faktors als auch durch dessen Preis beschrieben. Letzterer bildet sich am Markt und ist deshalb als einzige Beschreibungsgröße nicht durch die Produktionssystemplanung zu beeinflussen. Hingegen werden die Art und die Menge der Eingangsgrößen durch die Wahl spezifischer Produktionsressourcen bzw. der Technologie mitbestimmt.

Aus den vorangegangenen Ausführungen wird deutlich, dass unterschiedliche Trends und Veränderungen im Unternehmensumfeld nur über eine begrenzte Anzahl an Faktoren auf die Produktion wirken: über die Eigenschaften des her-

zustellenden Produktes, die Stückzahlen, die Bedarfszeitpunkte, das Qualitätsniveau, die Kosten der Produktionsfaktoren sowie über die Menge der zur Verfügung stehenden Ressourcen und Technologien. Zur Beschreibung dieses Phänomens eignet sich die Analogie zu einem Rezeptor. Ein Rezeptor wird in der Biologie beschrieben als „*Empfangs- bzw. Aufnahmeeinrichtungen des Organismus für bestimmte (spezifische) Reize*“ (PSCHYREMBEL 1998, S. 1376). Entsprechend dieser Definition übermitteln die Rezeptoren der Produktion Veränderungen des Umfeldes an das Produktionssystem, wobei jeder einzelne Rezeptor nur für besondere Reize sensibel ist. Reize, für die kein Rezeptor existiert, werden nicht weitergeleitet.

Aus den beschriebenen Faktoren, die auf die Produktion wirken, lassen sich sechs Rezeptoren ableiten:

- *Produkt* bzw. *Produktvarianten* beschreiben den Output des Produktionssystems im Hinblick auf die Funktion, die die Erzeugnisse erfüllen, und deren Eigenschaften wie Masse, Größe oder Form.
- Der Rezeptor *Stückzahl* definiert zunächst statisch, in welcher Menge die Produkte bzw. Produktvarianten insgesamt hergestellt werden müssen. Bezieht man das Sachziel der Bedarfszeitpunkte ein, so ergibt sich auch die jeweilige aggregierte Stückzahl für ein beliebig festzulegendes Zeitintervall.
- Die *Zeit* beschreibt, wie lange die Dauer zwischen der Entstehung eines Bedarfes und dessen Befriedigung durch die Produktion maximal sein darf. Dieser Rezeptor ergibt sich, wenn man das Ziel, den Bedarf zum richtigen Zeitpunkt zu befriedigen, auf eine individuelle Nachfrage bezieht.
- Sämtliche Änderungen der Preise für die Produktionsfaktoren werden über den Rezeptor *Kosten* an das Produktionssystem übermittelt.
- Der Rezeptor *Qualität* beschreibt, in welcher Güte die mit Hilfe des Rezeptors Produkt beschriebenen erforderlichen Funktionen auszuführen sind. Beispiele hierfür sind die Lebensdauer von Bauteilen, die haptische oder optische Güte von Materialien oder maximale Toleranzen.
- Als letzter Rezeptor beschreibt die *Technologie*, wie der Handlungsspielraum der Produktionssystemplanung durch eine veränderte Menge an verfügbaren bzw. strategisch oder gesetzlich zulässigen Ressourcen und Verfahren beeinflusst wird.

Es ist zu betonen, dass Umfeldentwicklungen wie z.B. der demographische Wandel, die Globalisierung oder veränderte gesetzliche Rahmenbedingungen zunächst erkannt sowie ihre *Auswirkungen* auf die Rezeptoren *beschrieben* bzw. *interpretiert* werden müssen. Das geschieht zumeist direkt durch die Unternehmensfunktionen, die die Schnittstellen zu den entsprechenden Märkten bilden. So beobachtet z. B. der Einkauf die Entwicklungen auf den Beschaffungsmärkten für Zukaufteile und Rohstoffe, die Personalabteilung verfolgt die Änderungen im Hinblick auf den Produktionsfaktor Arbeit und das Marketing sowie der Vertrieb analysieren den Absatzmarkt. Eine langfristige Interpretation veränderter Rahmenbedingungen erfolgt durch die Unternehmensleitung, die bspw. das strategische Produktionsprogramm festlegt (WÖHE & DÖRING 2002, S. 401). Über eventuell notwendige Anpassungen des Produktionssystems entscheidet die Produktionssystemplanung auf Basis einer *Veränderung der Ausprägung* der Rezeptoren. Eine Sonderstellung nimmt die Technologie ein, da für sie eine Interpretation der Umfeldänderungen auch in der Produktionssystemplanung selbst erfolgt.

Bei einer Interpretation als Regelkreis stellen die Ausprägungen der Rezeptoren die *Führungsgrößen* dar, die eine Zielvorgabe für die Produktion bilden. Ergibt sich aus dem Abgleich zwischen den Führungs- und den Messgrößen, d.h. der bestehenden Leistungsfähigkeit der Produktion im Hinblick auf die Dimensionen der Rezeptoren, eine Regelabweichung, sollte die Produktionssystemplanung durch geeignete Maßnahmen (Stellgrößen) das Produktionssystem verändern.

Das Rezeptormodell erleichtert es, die vielfältigen Veränderungstreiber im Hinblick auf die Auswirkungen auf die Produktion zu beschreiben. Die klare Definition von *Produkt*, *Stückzahl*, *Zeit*, *Kosten*, *Qualität* und *Technologie* als Einflussgrößen auf die Produktionssystemplanung und damit auch auf die Gestaltung des Produktionssystems erleichtert es, die für die zu erarbeitende Methodik relevanten Unsicherheiten zu systematisieren, mögliche Anpassungen des Systems an Veränderungen zu antizipieren und damit den Wert eines spezifischen Anlagen- oder Systemkonzeptes zu bestimmen. Zusätzlich wird die Komplexität reduziert, indem die verschiedenen Ursachen für Turbulenz im Unternehmensumfeld auf nur noch sechs Rezeptoren verdichtet werden, deren Veränderung die Turbulenz für die Produktion darstellt.

Abbildung 7 fasst das Rezeptormodell zusammen und verdeutlicht den Unterschied zwischen der allgemeinen Umweltturbulenz und deren interpretierten Auswirkungen auf die Produktion.

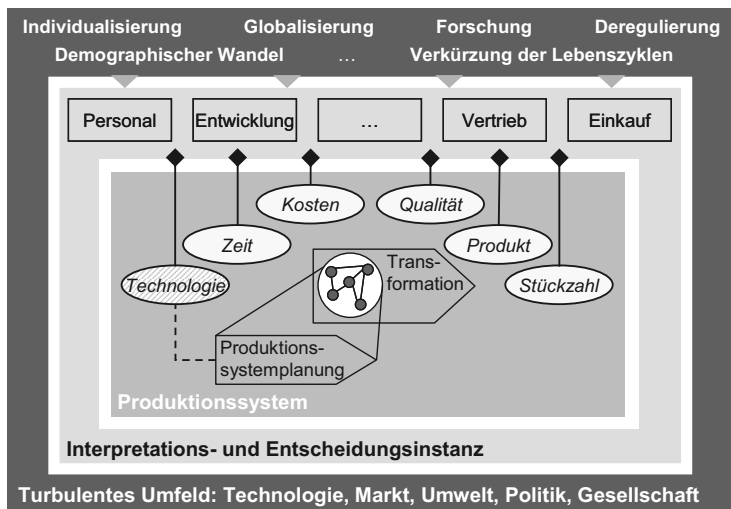


Abbildung 7: Rezeptmodell einer wandlungsfähigen Produktion (in Anlehnung an CISEK ET AL. 2002, S. 442)

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung einer Methode zur monetären Bewertung von wandlungsfähigen Produktionssystemen und zur Auswahl des wirtschaftlich richtigen Grades an Wandlungsfähigkeit. In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Eigenschaften solcher Systeme aufgezeigt und erläutert. Darauf aufbauend lässt sich nun der Charakter des eigentlichen Bewertungsproblems weiter detaillieren und so die Menge der Verfahren, die in einem späteren Schritt im Hinblick auf einen möglichen Beitrag zur Problemlösung zu untersuchen sind, sinnvoll einschränken.

2.1.5 Charakterisierung der Problemstellung

Bei der Entwicklung eines wandlungsfähigen Produktionssystems handelt es sich um eine gestalterisch-planerische Aufgabe, die eine Entscheidung über die Art und den Umfang möglicher Investitionen (SCHMIGALLA 1995, S. 189) beinhaltet. Mit einer Investition legt das Unternehmen fest, in welcher Form das vorhandene Kapital der Unternehmung mittel- bis langfristig verwendet werden soll (WÖHE & DÖRING 2002, S. 599). Es sind zunächst Ausgaben zu tätigen, um zukünftig zusätzliche Einnahmen und damit einen höheren Gewinn bzw. einen geringeren Verlust zu erzielen als zum aktuellen Zeitpunkt (DIXIT & PINDYCK 1994, S. 3, WÖHE & DÖRING 2002, S. 600). Bei Investitionen stehen dem Produktionssys-

templaner bzw. dem Management grundsätzlich mehrere Handlungsmöglichkeiten, auch als Alternativen bezeichnet, zur Auswahl. Es handelt sich dabei um unterschiedliche Systeme, um Systemkonfigurationen oder aber um die Möglichkeit, das Kapital in andere Projekte zu investieren. Die Frage, wie zwischen den zur Verfügung stehenden Alternativen ausgewählt werden sollte, wird von der betriebswirtschaftlichen Entscheidungstheorie behandelt (z.B. WÖHE & DÖRING 2002, S. 120 ff., SALIGER 2003, S. 1). In dieser ist grundsätzlich zwischen zwei Problemklassen unterschieden. Bei *Entscheidungen unter Sicherheit* sind die Zukunft, die zur Auswahl stehenden, hier technisch-organisatorischen Alternativen sowie deren Verhalten vollständig bekannt. Ist dies nicht der Fall, d.h. herrschen zum Zeitpunkt der Entscheidung Unkenntnis oder Zweifel hinsichtlich der Zukunft, der Alternativen oder deren Verhalten, so spricht man von *Entscheidungen unter Unsicherheit*. Da der Nutzen wandlungsfähiger Systeme nur im Kontext einer nicht deterministischen Zukunft zu sehen ist, handelt es sich bei der Problemstellung dieser Arbeit um eine Investitionsbewertung unter Unsicherheit.

Aufgabe einer wirtschaftlichen Investitionsbewertung ist es, die als Folge der Investitionstätigkeit entstehenden Zahlungen zu ermitteln und zu beurteilen. Damit erhält die Bewertungsaufgabe einerseits einen prognostizierenden Charakter, da Annahmen über die zukünftigen Entwicklungen getroffen werden müssen. Andererseits beinhaltet sie auch planende und gestaltende Aspekte, da antizipiert werden muss, wie sich ein System in der vorhergesagten Zukunft verhält und welche Zahlungen es hervorruft. Da speziell bei einer wandlungsfähigen Produktion davon auszugehen ist, dass sich die Fertigung oder Montage mehrfach über ihren Lebenszyklus verändert, haben die Anpassungsprozesse bei der Bewertung besonderes Gewicht. Die Wirtschaftlichkeit kann nur bestimmt werden, wenn die Zahlungen, die ein wandlungsfähiges System in allen Zuständen (vgl. Abschnitt 2.1.2) generiert, ermittelt werden. Es handelt sich somit auch um ein Problem der Lebenszyklusmodellierung und -analyse.

In Abschnitt 2.1.3 wurde herausgearbeitet, dass die Wandlungsfähigkeit nicht nur ein Gestaltungsmerkmal technischer Systeme ist, sondern dass sie die Möglichkeit zu proaktiven Veränderungen beinhaltet, was ausgeprägte Kreativität sowie die Analyse- und Entscheidungskompetenz der Mitarbeiter erfordert. Eine Methode zur Bewertung von Wandlungsfähigkeit muss demnach die Fähigkeit des Managements, zusätzliche Informationen im Zeitverlauf aufzunehmen, anhand dieser ggf. zurückliegende Entscheidungen zu modifizieren und das System anzupassen, berücksichtigen. In der betriebswirtschaftlichen Literatur wird dies als *flexible Planung* bezeichnet (z.B. FRANKE & HAX 1999, S. 270 ff.). Die Forde-

zung danach hängt mit der Erkenntnis zusammen, dass eine zum Zeitpunkt der Planung eines Systems herrschende Unsicherheit mit wachsendem Planungshorizont zunimmt (DOMSCHKE & SCHOLL 2003, S. 24). Bei einer definierten Lebensdauer eines Systems reduziert sich die Unsicherheit nach der initialen Investitionsentscheidung und der Inbetriebnahme schrittweise, wird jedoch nicht vollständig eliminiert. Abbildung 8 zeigt diesen Sachverhalt exemplarisch bei einer von zwei Faktoren definierten Zukunftsunsicherheit, die sich über die Projektlaufzeit reduziert. Die Veränderung eines mit der Fähigkeit zur Anpassung versehenen Systems über die Zeit resultiert somit aus einer Abfolge von Entscheidungen, die unter Unsicherheit getroffen wurden.

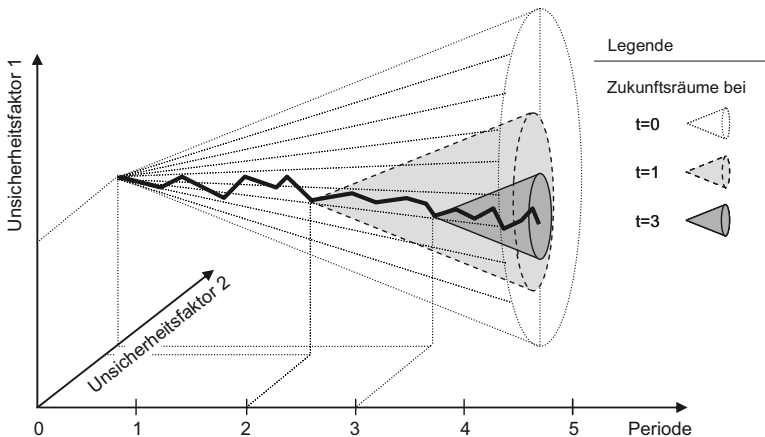


Abbildung 8: Prinzipdarstellung der Entwicklung der Unsicherheit eines Projektes über der Zeit am Beispiel von zwei Einflussgrößen

Die Ausführungen in diesem Abschnitt machen deutlich, dass für eine umfassende Betrachtung der Problemstellung im Wesentlichen zwei Fachgebiete einzubeziehen sind: die Investitionsbewertung unter Unsicherheit, mit der über die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit eines Projektes entschieden werden kann, sowie die Lebenszyklusanalyse, welche die Bestimmung der Kosten über die Lebensdauer eines Projektes adressiert. Zu beiden Gebieten sind in den nachfolgenden Abschnitten 2.2 und 2.3 die für diese Arbeit relevanten Grundlagen erläutert. Weiterhin bleibt festzuhalten, dass es sich bei der vorliegenden Aufgabenstellung um ein dynamisches Problem handelt, das als Verkettung von Entscheidungen unter Unsicherheit interpretiert werden muss. Dies ist bei der Auswahl einer geeigneten Bewertungsmethode zu berücksichtigen.

2.2 Investitionsbewertung unter Unsicherheit

2.2.1 Investitionsrechenverfahren zur Bewertung unter Unsicherheit

Die Investitionsrechnung dient dazu, die Vorteilhaftigkeit eines Investitionsvorhabens unter dem Aspekt der Gewinnerzielung zu beurteilen und damit die Wirtschaftlichkeit der Investition zu bestimmen (WÖHE & DÖRING 2002, S. 608). In diesem Abschnitt erfolgen die Vorstellung von Standardverfahren zur Bewertung bei Unsicherheit und eine Analyse, inwieweit sich diese zur Lösung der vorliegenden Problemstellung eignen. Die dabei aufgezeigten Defizite der verschiedenen Methoden sind die Motivation für die Einführung der Realoptionstheorie zur Investitionsbewertung von Projekten, in denen Handlungsmöglichkeiten bestehen. Dieses recht neue Verfahren wird dann in den nachfolgenden Abschnitten 2.2.2 bis 2.2.4 vorgestellt.

Zunächst soll jedoch der Begriff der *Unsicherheit* näher spezifiziert werden. Die betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre subsumiert darunter Risiko, Ungewissheit und Unwissen. *Risiko* beschreibt einen Zustand, in dem man die Eintrittswahrscheinlichkeiten zukünftiger Ereignisse kennt oder schätzen kann (WÖHE & DÖRING 2002, S. 123, SALIGER 2003, S. 42 f.). Im Gegensatz dazu sind bei *Ungewissheit* die möglichen Ausprägungen der Zukunft bekannt, es liegen jedoch keine konkreten Wahrscheinlichkeiten vor. Bei *Unwissen* erschließen sich auch die Zustände, die möglicherweise eintreten können, nicht vollständig. Investitionsrechenverfahren sind entsprechend nur in Situationen unter Risiko und Ungewissheit einsetzbar, da sich Annahmen über zukünftige Kosten oder Zahlungen, auf denen diese Verfahren basieren, nur für bekannte Zustände ableiten oder schätzen lassen.

Gebräuchliche Methoden zur finanzwirtschaftlichen Bewertung unter Risiko sind das *Kapitalwertverfahren*, die *Sensitivitätsanalyse*, *Simulationen* und das *Entscheidungsbaumverfahren* (FRANKE & HAX 1999, HOMMEL & PRITSCH 1999b, THUESSEN & FABRYCKY 2001). Die Standardverfahren der Investitionsrechnung basieren darauf, dass der Zeitpunkt der Entstehung von Zahlungen und die Zeitpräferenz des Investors über eine Diskontierung mit einem Kalkulationszins berücksichtigt wird (WÖHE & DÖRING 2002, S. 617). Zu diesen einfachen, sog. *Discounted-cash-flow-Verfahren* (DCF-Verfahren) gehören neben der Kapitalwertmethode z.B. die Interne-Zinssatz-Methode oder die Amortisationsdauerermethode. Untersuchungen u.a. von PIKE (1988) oder PETRY & SPROW (1993) bele-

gen, dass Verfahren dieser Klasse in über 85% der Unternehmen zum Einsatz kommen. Die weiteren Ausführungen zu DCF-Verfahren beziehen sich nur auf die Kapitalwertmethode, da sie von einem theoretischen Standpunkt aus den anderen Ansätzen überlegen ist (KILKA 1995, S. 9). Jedoch lassen sich insbesondere die nachfolgend aufgezeigten Defizite aufgrund der gemeinsamen Wurzel aller DCF-Verfahren leicht auf bspw. die Interne-Zinssatz-Methode übertragen.

Der *Kapitalwert* (engl. *Net Present Value*) ergibt sich aus der Summe der auf die Gegenwart abgezinsten Zahlungen, dem sog. Barwert (engl. *Present Value*), zuzüglich der Investitionsausgabe⁶ zu (vgl. WÖHE & DÖRING 2002, S. 619 ff.):

$$NPV_S = I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

CF_t	Aus der Investition resultierende Zahlungsströme (<i>Cash Flows</i>) in Periode t CF_t = Einnahmen zum Zeitpunkt t – Ausgaben zum Zeitpunkt t
i	Kalkulationszins (Diskontierungsfaktor)
NPV_S	Kapitalwert (<i>Net Present Value</i>) bei sicheren Zahlungen
I_0	Investitionszahlung in $t=0$
T	Lebensdauer der Investition bzw. Betrachtungszeitraum

Der Kalkulationszins i spiegelt die Opportunitätskosten der Investition wider, da darauf verzichtet wird, das eingesetzte Kapital in ein alternatives Projekt mit der Rendite i zu investieren. In der Praxis stellt dieser Zins häufig eine Renditevorgabe dar, die sich aus den Kapitalkosten der Unternehmung ableitet (VDI 6025, S. 14, ALKAS 2002, S. 9, MUN 2002, S. 74, BAECKER ET AL. 2003, S. 19).

Bei Entscheidungen unter Risiko werden aufgrund der unsicheren Zukunftsentwicklung die Erwartungswerte der Zahlungsströme verwendet (COPELAND & ANTIKAROV 2001, S. 73):

$$NPV_R = I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{E(CF_t)}{(1+i)^t} \quad (2)$$

$E(\cdot)$	Erwartungswert
NPV_R	Kapitalwert (<i>Net Present Value</i>) bei unsicheren Zahlungen

⁶ Rückflüsse in das Unternehmen besitzen ein positives Vorzeichen, Abflüsse ein negatives.

Anstelle dieser an den Mittelwerten orientierten Betrachtung können alternativ die maximalen bzw. minimalen Zahlungsrückflüsse herangezogen werden, um so den besten (*best case*) oder schlechtesten (*worst case*) anzunehmenden Fall zu erhalten.

Mit Hilfe der *Sensitivitätsanalyse* lässt sich der Einfluss einzelner unsicherer Parameter auf den Kapitalwert ermitteln (KILKA 1995, S. 22 f., FRANKE & HAX 1999, S. 243 ff.). Dazu wird im Allgemeinen eine der Variablen, die Auswirkungen auf die zukünftigen Zahlungen haben, verändert, während die übrigen Einflussgrößen konstant bleiben. Der Nachteil dieses Vorgehens liegt darin, dass sich eventuell verstärkende oder gegenseitig aufhebende Tendenzen nicht aufzeigen lassen (TRIGEORGIS 1996, S. 53 f.). Es ist bspw. davon auszugehen, dass steigende Ölpreise nicht nur die Produktion von Automobilen verteuern, sondern möglicherweise gleichzeitig zu einer Verringerung der Kundennachfrage führen. Um solche Zusammenhänge aufzuzeigen, eignen sich simulative Verfahren.

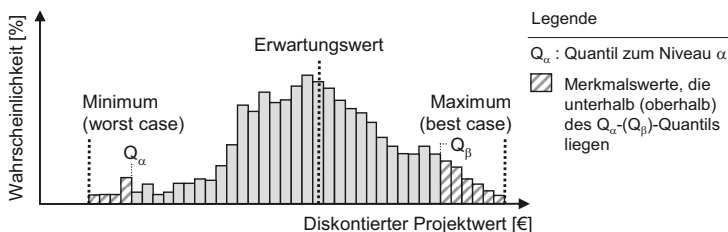


Abbildung 9: Beispielhafte Auswertung einer Monte-Carlo-Simulation in Form eines Histogramms (vgl. REINHART ET AL. 2006, S. 190)

Bei der sog. *Monte-Carlo-Simulation* handelt es sich um ein Verfahren aus der Stochastik, bei dem theoretische Wahrscheinlichkeitsverteilungen durch häufige Zufallsexperimente (empirisch) angenähert werden. Auf diese Weise lassen sich auch komplexe Prozesse, die analytisch nur aufwändig zu lösen sind, mit Rechnerunterstützung auf einfache Art untersuchen. Ziel dieses Verfahrens ist es, aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen mehrerer Zustände (Einflussparameter) die sich bei einer bestimmten Alternative ergebende Wahrscheinlichkeitsverteilung des Kapitalwertes abzuleiten (vgl. auch THUESSEN & FABRYCKY 2001, S. 503 ff., FRANKE & HAX 1999, S. 255 ff., BAECKER ET AL. 2003). Aus solchen Simulationen lassen sich nicht nur diskrete Ergebniswerte bestimmen (z. B. best

und worst case), sondern auch stochastische Größen wie Quantile⁷ ableiten, was eine differenzierte Betrachtung des Risikos einer Investition ermöglicht. In Abbildung 9 ist das Ergebnis einer Simulation in der häufig gebrauchten Form eines Histogramms beispielhaft visualisiert.

Bisher wurde noch nicht beschrieben, wie in den verschiedenen Verfahren mögliche Entscheidungen während der Projektlaufzeit berücksichtigt sind. Dies soll nachfolgend an einem einfachen Beispiel verdeutlicht werden, das drei Perioden umfasst. Ein Unternehmen möchte zu Beginn der ersten Periode⁸ (Zeitpunkt $t=0$) eine Investition in eine Maschine bewerten, welche eine maximale Ausbringungsmenge von 150 Stück pro Periode besitzt und die 1.900 € kostet ($I_0 = -1.900$ €). Sie kann zum Zeitpunkt $t=0$ oder $t=1$ für 200 € erweitert werden, wobei die zusätzliche Kapazität von 75 Stück erst nach Ablauf einer Periode zur Verfügung steht. Die Nachfrageentwicklung ist in Abbildung 10 illustriert. Jeder Pfad stellt eine mögliche Entwicklung der Zukunft dar. Zur Vereinfachung der Berechnung sei ferner angenommen, dass dem Unternehmen pro hergestellter und verkaufter Einheit 10 € zufließen und die Zahlungen nicht diskontiert werden. Es sollen nun zwei Möglichkeiten betrachtet werden, den Kapitalwert zu ermitteln.

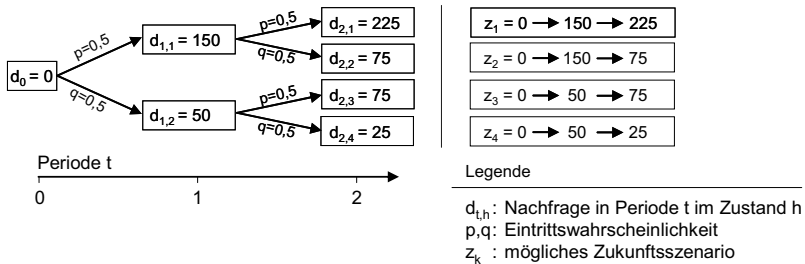


Abbildung 10: Beispielhafte Nachfrageentwicklung über zwei Perioden

Im ersten Fall trifft das Management die Entscheidung über die Erweiterung bereits zu Beginn des Projektes in $t=0$. Als Folge einer zusätzlichen Investition

⁷ Unter einem Quantil Q_α wird in der Statistik ein Merkmalswert bezeichnet, unterhalb dessen ein vorgegebener Anteil α aller Fälle der Verteilung liegt (HARTUNG ET AL. 1995, S. 114).

⁸ Es wird nachfolgend angenommen, dass die Zahlungen immer vollständig in einem Zeitpunkt zu Beginn jeder Periode anfallen. Zu diesem Zeitpunkt, an dem also die Zahlungen der nachfolgenden Periode bereits sicher bekannt sind, werden auch die Entscheidungen getroffen. Es ist deshalb zulässig, in der Beschreibung im Text sowie in den Abbildungen die Periode i auf einen Zeitpunkt $t=i$ zu reduzieren und so die Darstellung zu vereinfachen.

von 200 € kann in $t=1$ und $t=2$ jeweils eine Zahlung von 1.000 € *erwartet* werden. Diese Werte ergeben sich aus den mit ihren Eintrittswahrscheinlichkeiten gewichteten Rückflüssen. Wenn die Zufallsgrößen so auf einen einzelnen deterministischen Wert, hier den Erwartungswert, zusammenschumpfen, spricht man von *starrer Planung* (SCHNEEWEIß 1992, S. 108). Der Kapitalwert ergibt sich in diesem Fall zu -100 € (Fall 1a in Tabelle 2). Bei einer Entscheidung gegen die Erweiterung kann in einem Fall die Nachfrage nicht befriedigt werden, was zu einer Reduktion der *erwarteten* Zahlungen in $t=2$ führt. Dennoch ist der Kapitalwert mit -87,5 € etwas höher als mit der in $t=0$ festgelegten Erweiterung (Fall 1b in Tabelle 2).

Alternativ kann die Entscheidung über eine Erweiterung erst in $t=1$ getroffen werden (Fall 2). Bei einer zunächst isolierten Betrachtung jeder möglichen Entwicklung der Zukunft und anschließenden Berechnung des Erwartungswertes der Zahlungsströme ist der Kapitalwert mit 50 € positiv (Fall 2 in Tabelle 2). Dies folgt daraus, dass die zusätzliche Investition nur dann getätigt wird, wenn sie einen zusätzlichen Nutzen nach sich zieht (hier bei Eintritt von z_1). Bei der beschriebenen Vorgehensweise zerlegt man die Unsicherheit so, dass jeweils eine deterministische Entwicklung vorliegt und deshalb eine *starre Planung* auf der Grundlage *quasi-sicherer Erwartungen* (FRANKE & HAX 1999, S. 236) zur Anwendung kommt. Nachfolgend wird dies als Aufbau einer *quasi-sicheren Zukunft* bezeichnet.

	z_k	I_0 [€]	I_1 [€]	CF_1 [€]	CF_2 [€]	$p(z_i)$	NPV [€]
Fall 1a	E(Z)	-2.100	0	1.000	1.000	1	-100
Fall 1b	E(Z)	-1.900	0	1.000	812,50	1	-87,50
Fall 2	k=1	-1.900	-200	1.500	2.250	0,25	1.650
	k=2	-1.900	0	1.500	750	0,25	350
	k=3	-1.900	0	500	750	0,25	-650
	k=4	-1.900	0	500	250	0,25	-1.150
	E(Z)	-1.900	-50	1.000	1.000	1	50

CF_i: Zahlungsströme in t_i (ohne Investition)

I_i : Investition zum Zeitpunkt t_i

NPV: Kapitalwert

Tabelle 2: Ergebnisse einer Kapitalwertermittlung bei starrer Planung und quasi-sicherer Zukunft

Das *Entscheidungsbaumverfahren* erweitert die diskutierte Vorgehensweise und berücksichtigt die Unsicherheit, indem sequenzielle Entwicklungen und die möglichen Entscheidungen in Form eines Baumes aufgebaut werden (Abbildung 11). Die Berechnung des Projektwertes ist bei Entscheidungsbäumen mit Hilfe des

sog. Rollback-Verfahrens möglich. Es basiert auf dem Prinzip der dynamischen Programmierung, bei der eine Sequenz an Entscheidungen in zwei Komponenten zerlegt wird: die sofortige Entscheidung und eine Bewertungsfunktion, welche die Konsequenzen aller folgenden Entscheidungen zusammenfasst (vgl. SCHNEEWEIF 1992, S. 101-107, DIXIT & PINDYCK 1994, S. 93 f., PRITSCH 2000, S. 149 f.). Bei endlichem Zeithorizont lässt sich das Entscheidungsproblem in der letzten Periode einfach lösen. Die resultierenden Werte dienen dann als Bewertungsfunktion für die Entscheidung in der vorletzten Periode. Auf diese Weise wird der Baum rekursiv von T nach $t=0$ durchschritten. Eine exemplarische Bewertungsfunktion ist bspw. der Erwartungswert des Kapitalwertes (WÖHE & DÖRING 2002, S. 649 f.). Das Vorgehen wird nachfolgend anhand des obigen Beispiels verdeutlicht.

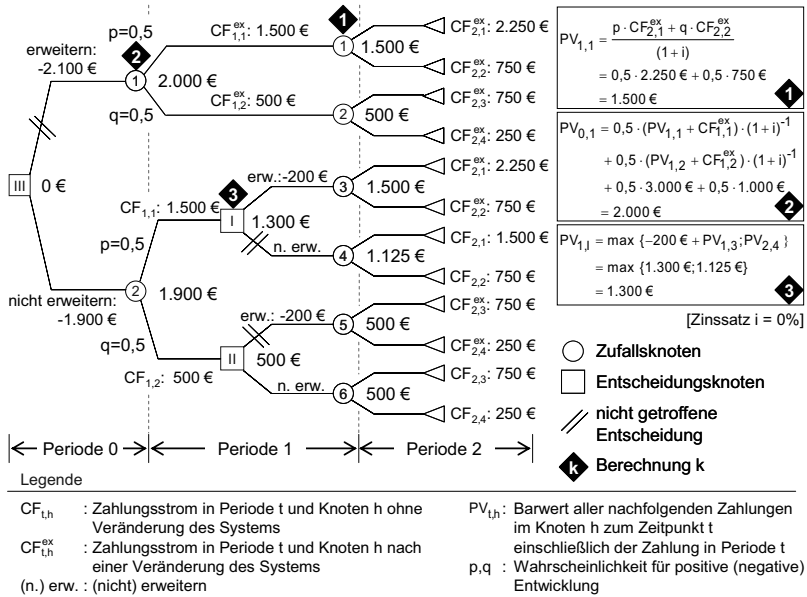


Abbildung 11: Beispielhafte Anwendung des Entscheidungsbaumverfahrens

Im Entscheidungsbaum repräsentieren (runde) *Zufallsknoten* Situationen, in denen eine unsichere Entwicklung eintritt, während (eckige) *Entscheidungsknoten* Wahlmöglichkeiten abbilden. Die Kanten sind mit den Zahlungen verbunden, die sich als Folge einer spezifischen Entwicklung oder Entscheidung ergeben. In Abbildung 11 sind die Entscheidung über eine Erweiterung sowie die unsichere Stückzahlentwicklung und die daraus resultierenden Zahlungsströme visualisiert.

Der aktuelle Barwert des Projektes in einem *Zufallsknoten* wird bestimmt, indem man zunächst für alle der direkt über eine Kante verbundenen Zustände (Entscheidungs- oder Zufallsknoten) die in der Folgeperiode anfallenden Zahlungen sowie den Barwert des Projektes im jeweiligen Nachfolgeknoten addiert. Das gesuchte Ergebnis, das in Abbildung 11 immer rechts neben den jeweiligen Knoten steht, ergibt sich als über alle in einem Zustand möglichen Entwicklungen ermittelter Erwartungswert der im vorigen Schritt kalkulierten Summen, der dann auf die aktuelle Periode diskontiert wird. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 11 in Berechnung 1 und Berechnung 2 (bei einem Zinssatz von $i=0\%$) verdeutlicht. Dagegen wird an den *Entscheidungsknoten* nicht diskontiert und kein Erwartungswert gebildet, sondern untersucht, welche der nachfolgenden Alternativen den höchsten Wert besitzt (vgl. Berechnung 3 in Abbildung 11).

Der mit Hilfe dieses Verfahrens ermittelte Wert des Investitionsprojektes ergibt sich in Knoten III durch $PV_{0,III} = \max\{-2.100 \text{ €} + 2.000 \text{ €}; -1.900 \text{ €} + 1.900 \text{ €}\}$ zu 0 € und ist damit niedriger als der, den man bei Verwendung der einfachen Kapitalwertmethode auf Basis einer quasi-sicheren Zukunft (50 €) erhält. Das resultiert daraus, dass der Entscheidungsbaum die *zum Zeitpunkt der Entscheidung* bestehende Unsicherheit berücksichtigt. Im Beispiel wird dies im Knoten I deutlich: Nach dem oben formulierten Kriterium ergibt sich in Periode 1 die Entscheidung, die Kapazität für Periode 2 zu erhöhen. Tritt dann in Knoten 3 die negative Entwicklung $d_{2,2}$ mit der resultierenden Zahlung $CF_{2,2}^{ex}$ ein, sind 200 € vergeblich investiert. Die Auswirkungen, die sich aus der Annahme einer quasi-sicheren Zukunft ergeben, werden deutlich, wenn für die Erweiterung nicht 200 €, sondern 400 € zu zahlen sind. Nach dem Kapitalwertverfahren würde es sich bei der Entwicklung z_1 , die zu $d_{2,1}$ führt, dann lohnen, die Kapazität zu erhöhen, da der zusätzliche Ertrag von 750 € die Investitionssumme von 400 € übersteigt. In der Realität würde die Erweiterung nie durchgeführt, weil der *erwartete* zusätzliche Gewinn in Knoten I nur 375 € ($=0,5 \cdot 75 \text{ Stück} \cdot 10 \text{ €/Stück}$) beträgt.

Bisher wurde betrachtet, wie eine Bewertung bei Risiko erfolgt. In einer Situation der Ungewissheit ist der Einsatz von auf Wahrscheinlichkeiten basierenden Verfahren (Entscheidungsbaum, Monte-Carlo-Simulation) nicht möglich. Es lassen sich jedoch für einzelne Zukunftsprojektionen (Szenarios) isolierte Kapitalwerte berechnen. Die getroffene Entscheidung hängt dann von der individuellen Präferenz des Investors ab. Er kann bspw. die Alternative wählen, die im optimalen Fall den höchsten Gewinn erzielt, oder versuchen, den Verlust im schlimmsten Fall zu minimieren. Für detaillierte Erklärungen und eine Diskussion verschiedener Entscheidungsregeln wird auf die Literatur verwiesen (z.B. THUES-

SEN & FABRYCKY 2001, WÖHE & DÖRING 2002, S. 127-131, BLANCHARD & FABRYCKY 2006).

Aufbauend auf den vorangegangenen Erläuterungen werden die vorgestellten Ansätze im Folgenden zusammenfassend beurteilt. Die Kapitalwertmethode ist ein wichtiges Verfahren zur Bewertung von Investitionsprojekten. Durch die Diskontierung zukünftiger Zahlungen setzt es die Investition mit alternativen Anlageformen in Beziehung. Es geht jedoch von einer a priori fixierten Strategie aus, die im Projektverlauf nicht aktiv durch Entscheidungen angepasst werden kann (BAECKER ET AL. 2003, S. 22). Sensitivitätsanalysen und Monte-Carlo-Simulation verfeinern die Bewertung, lösen das grundlegende Problem der Passivität des Kapitalwertes jedoch nicht. Dagegen bildet das Entscheidungsbaumverfahren richtig ab, dass sich die Unsicherheit während der Laufzeit des Investitionsprojektes verringert und berücksichtigt dies bei der Entscheidungsfindung – es entspricht somit dem Prinzip der *flexiblen Planung*. Allerdings werden die Bäume bei größeren Problemen sehr schnell unübersichtlich (TRIGEORGIS 1996, S. 66, SMITH & MCCARDLE 1999, PRITSCH 2000, S. 150). Hinzu kommt, dass mit dieser Methode eine finanzmathematisch korrekte Bewertung, bei der der Diskontierungsfaktor das Risiko des Projektes widerspiegelt, schwer zu erreichen ist (TRIGEORGIS 1996, S. 67, BAECKER ET AL. 2003, S. 21, vgl. auch Kapitel 5). Beide Nachteile werden von der Realloptionstheorie adressiert, die in den letzten Jahren in der Forschung populär geworden ist. Viele Autoren beschreiben sie als geeignetes Verfahren zur Bewertung von Projekten, die Handlungsmöglichkeiten beinhalten. In den nächsten beiden Abschnitten wird zunächst die Idee, die diesem Ansatz zugrunde liegt, vorgestellt und zu wandlungsfähigen Produktionssystemen in Beziehung gesetzt. Die Erläuterung der konkreten Bewertungsmethode erfolgt dann in Kapitel 5.

2.2.2 Theorie der Realloptionen

Die Realloptionstheorie beschreibt ein Verfahren zur Bewertung von Investitionen, das konzeptionell darauf ausgerichtet ist, den Wert von Handlungsmöglichkeiten zu erfassen, die sich auf eine Investition beziehen bzw. welche durch sie erst geschaffen werden. Sie ist aus den Modellen zur Bewertung von an den Börsen gehandelten Finanzoptionen entwickelt worden, seit MYERS (1977) realwirtschaftliche Investitionsprobleme in Analogie zu solchen Finanzoptionen interpretierte. Die nachfolgenden Ausführungen sind dementsprechend unterteilt: Zunächst erfolgt eine Darstellung der Grundlagen von Finanzoptionen, anschlie-

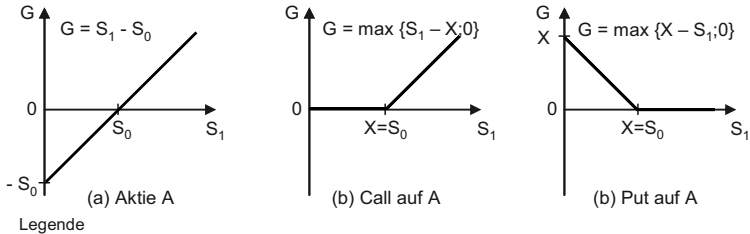
ßend eine Erläuterung der von MYERS und anderen entwickelten Analogie. Darauf aufbauend werden dann die wesentlichen Charakteristika von Realoptionen aufgezeigt.

Grundlagen der Finanzoptionen

Bei einer Option handelt es sich um ein Wertpapier, welches das Recht verbrieft, einen Vermögensgegenstand zu definierten Bedingungen zu kaufen oder zu verkaufen (WÖHE & DÖRING 2002, S. 724 f.). Mit deren Besitz sind keine Pflichten verbunden, so dass der Käufer wählen kann, ob er die Option ausüben möchte oder nicht. Die Vertragsbedingungen legen im Allgemeinen die Art der Option, den Basiswert, den Ausübungspreis und die Laufzeit fest (vgl. für die Ausführungen zu Optionen auch HULL 2006 und LUENBERGER 1998). Eine Verkaufsoption bezeichnet man als Put, Kauf-Optionen als Calls. Der Vermögensgegenstand, der ge- oder verkauft werden darf, ist der sog. *Basiswert*, das *Basisobjekt* oder auch das *Underlying*. Der *Ausübungspreis* (auch *Basispreis*) legt den möglichen Kauf- oder Verkaufspreis fest. Schließlich definiert die *Laufzeit*, wann das Optionsrecht ausgeübt werden kann. *Amerikanische Optionen* erlauben den (einmaligen) Kauf bzw. Verkauf zum Ausübungspreis zu jedem beliebigen Zeitpunkt während der Laufzeit einschließlich des Fälligkeitsdatums (auch Verfallsdatum genannt). Eine *europäische Option* darf hingegen nur direkt am Fälligkeitstermin ausgeübt werden. Daraus folgt, dass die *Wertentwicklung* einer Option sowie die *Entscheidung* für oder gegen eine Ausübung vor allem vom unsicheren zukünftigen Wert des Underlying abhängen, da die übrigen Größen vertraglich fixiert sind. Die Möglichkeit, auf die Ausübung bei ungünstiger Entwicklung zu verzichten, ist eine grundlegende Eigenschaft von Optionen, aus der ein für diese Wertpapierart charakteristisches, asymmetrisches Auszahlungsprofil resultiert. Dies wird im Folgenden durch ein einfaches Beispiel illustriert.

Gegeben sei eine beliebige Aktie, die heute (Zeitpunkt $t_0=0$) zum Preis S_0 gekauft werden kann. Der Preis in der Folgeperiode S_1 sei unsicher. Bei einem Verkauf der Aktie in $t_1=1$ ergibt sich das in Abbildung 12-(a) für beide Perioden saldiert dargestellte Auszahlungsprofil. Die Auszahlungsfunktion, die der Besitzer eines Call bzw. Put auf die Aktie mit Laufzeit $T=t_1-t_0$ und Ausübungspreis X (zur Vereinfachung sei $X=S_0$, Preis der Option $P=0$) erhält, ist in Abbildung 12-(b) bzw. Abbildung 12-(c) aufgezeigt. Liegt S_1 in t_1 unter dem Ausübungspreis, wird der Call nicht ausgeübt, da dessen Besitzer die Aktie billiger am Markt kaufen kann. Der Put hingegen ist in diesem Fall wertvoll, da der Inhaber der Option eine Ak-

tie, die er besitzt, über Marktpreis verkaufen kann. Liegt S_1 in t_1 über dem Ausübungspreis, dreht sich die Vorteilhaftigkeit entsprechend um.



G : Auszahlung zum Zeitpunkt 1 S_i : Wert (Preis) einer Aktie zum Zeitpunkt i X : Ausübungspreis

Abbildung 12: Auszahlungsprofile für Käufer von Aktien und Optionen

Die Eigenschaften von Finanzoptionen lassen sich mit den Begriffen *Flexibilität*, *Unsicherheit* und *Irreversibilität* zusammenfassen (DIXIT & PINDYCK 1994, S. 3, HOMMEL & PRITSCH 1999, S. 9, PRITSCH 2000, S. 137). Flexibilität bedeutet, dass der Besitzer einer Option die Wahl hat, das verbriefte Recht zu nutzen. Der Wert dieses Rechts im Zeitverlauf und damit die Entscheidung über die Ausübung hängen von der Unsicherheit des Underlying ab, im obigen Beispiel also von der eingetretenen Differenz zwischen S_1 und S_0 . Zudem sind die Ausübung und der Verfall einer Option irreversibel, d.h. der Inhaber eines Put oder Call kann das verbriefte Recht nur einmal nutzen und diesen Vorgang nicht rückgängig machen, so dass die durch die Entscheidung entstehenden (im Falle der Nichtausübung ggf. entgangenen) Zahlungen unwiederbringlich verloren sind.

Die asymmetrischen Auszahlungsprofile ermöglichen es den Käufern und Verkäufern von Optionen, mögliche negative Entwicklungen in deren Auswirkungen zu begrenzen. Ihr praktischer Nutzen zeigt sich vor allem in einer Verbindung mit anderen Wertpapieren. Abbildung 13 zeigt das Auszahlungsprofil eines kombinierten Investments in eine Aktie B und eine Verkaufsoption auf B. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die Option das Verlustrisiko begrenzt wird. Hierfür ist an den Verkäufer der Option den Preis P (die sog. Optionsprämie) zu entrichten. Optionen können somit als Versicherung gegen Risiken interpretiert werden. Der Inhalt der sog. *Optionspreistheorie*⁹ ist es, den Preis P richtig zu bestimmen.

⁹ Für genauere Erläuterungen zur Optionspreistheorie sei auf HULL (2006) und auf Kapitel 5 verwiesen.

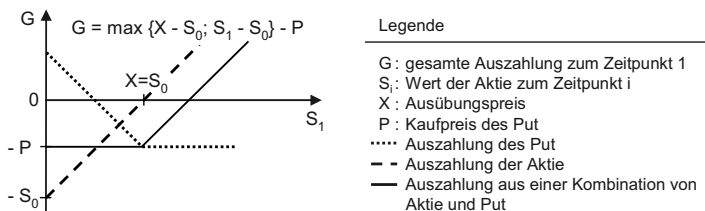


Abbildung 13: Auszahlungsprofil einer Kombination aus Aktie und Put-Option

Analogie zwischen Finanz- und Realloptionen

MYERS (1977) zeigt in seinem Aufsatz, dass zum Wert von Investitionsprojekten die in ihnen enthaltenen Möglichkeiten beitragen, bei bestimmten Entwicklungen der Umweltbedingungen Anpassungen vorzunehmen und interpretiert diesen Bestandteil als Option. Er nutzt als erster den Begriff der „*real options*“ (der im Deutschen als „Realloptionen“ wiedergegeben wird), um die Ähnlichkeit von Investitionen zu Finanzoptionen zu verdeutlichen. HOMMEL & PRITSCH (1999a) definieren eine Realloption wie folgt:

Definition 3 (Realloption)

„Unter einer Realloption versteht man die zukünftigen Handlungsspielräume und Investitionsmöglichkeiten eines Unternehmens in Verbindung mit der Fähigkeit des Managements, operative Entscheidungen an veränderte Umweltbedingungen anzupassen. Realloptionen stellen demnach ein Bündel von Handlungsspielräumen in Bezug auf die Verwendung und Nutzung realer Aktiva dar.“ (HOMMEL & PRITSCH 1999a, S. 123)

Die Analogie zwischen den Eigenschaften einer finanzwirtschaftlichen Option und einer Realloption lässt sich auch anhand eines produktionstechnischen Beispiels aufzeigen. Die Möglichkeit, die Kapazität einer Transferstraße durch Austausch einiger Komponenten zu erhöhen, ist nach Definition 3 eine Realloption, welche die konstituierenden Merkmale einer Finanzoption (Flexibilität, Unsicherheit und Irreversibilität) beinhaltet: Es besteht kein Zwang, die Komponenten zu einem bestimmten Zeitpunkt auszutauschen, sondern die Entscheidung darüber kann in Abhängigkeit der eingetretenen Entwicklung und der daraus resultierenden wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit getroffen werden (Flexibilität, Unsicherheit). Investitionen sind oft firmen- oder branchenspezifisch, so dass sich eine einmal erworbene Anlage meist nur zu im Vergleich zu den Anschaffungskosten deutlich niedrigeren Preisen verkaufen lässt. Entsprechend sind reale Investitionsprojekte vollständig oder zumindest teilweise durch Irreversibilität

gekennzeichnet (PINDYCK 1991, S. 1110 ff., ALKAS 2002, S. 20). Es lässt sich darüber hinaus zeigen, dass sowohl Real- als auch Finanzoptionen nicht nur dieselben konstituierenden Merkmale besitzen, sondern beide auch die charakteristischen asymmetrischen Zahlungsprofile aufweisen (vgl. HOMMEL & PRITSCH 1999a, S. 123 f.). Als Folge der aufgezeigten strukturellen Analogie liegt der Schluss nahe, dass sich Investitionsprojekte, die Handlungsspielräume beinhalten, mit Methoden der Finanzmathematik monetär bewerten lassen.

2.2.3 Wandlungsfähigkeit als ein Bündel von Realoptionen

Die Ausführungen in den vorangegangenen Abschnitten beleuchten mit der Wandlungsfähigkeit und der Realoptionstheorie zwei Konzepte, deren Entwicklung jeweils aus der unsicheren Zukunftserwartung resultierte. In diesem Abschnitt wird erläutert, welche Beziehung zwischen den beiden Ansätze besteht und dass sich die Wandlungsfähigkeit als ein Bündel von Realoptionen interpretieren lässt.

Die Wandlungsfähigkeit wurde als das Potenzial eines Produktionssystems zur proaktiven Anpassung an Veränderungen des Umfeldes definiert (vgl. Definition 2 auf S. 20). Im Gegensatz zur Flexibilität erfordern die Anpassungsmaßnahmen im Rahmen der Wandlungsfähigkeit zusätzliche Investitionen bzw. sie rufen Kosten hervor. Bei Realoptionen handelt es sich im Sinne der vorliegenden Arbeit um Handlungsspielräume und Investitionsmöglichkeiten, die ein aktives Management besitzt, um reale Aktiva an veränderte Umweltsituationen anzupassen. Abbildung 14 stellt diese beiden Konzepte gegenüber und verdeutlicht die bestehende Analogie.

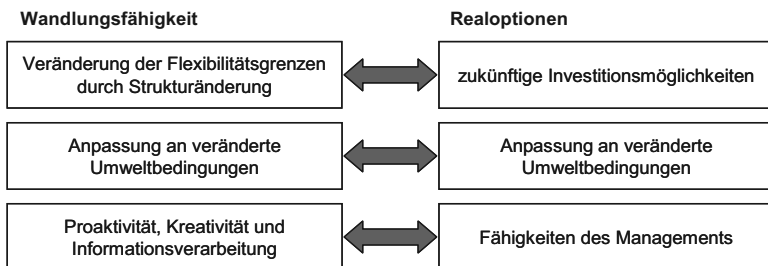


Abbildung 14: Gegenüberstellung der Charakteristika von Wandlungsfähigkeit und Realoptionen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Wandlungsfähigkeit deshalb auch als ein Bündel von Realoptionen interpretiert:

Definition 4 (Wandlungsfähigkeit als Realoption)

Die Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems stellt ein Bündel von Realoptionen im Sinne von Handlungsmöglichkeiten dar. Das Management kann die während des Projektes neu hinzukommenden Informationen nutzen, um die durch in der Vergangenheit getroffene Entscheidungen festgelegten Abläufe und Strukturen durch das Ausüben der Optionen an die geänderten Umfeldbedingungen anzupassen und dadurch die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit des Produktionssystems zu erhöhen.

Diese Definition lässt sich weiter präzisieren, indem die Parameter, welche den Charakter und den Preis einer Finanzoption bestimmen, auf Realoptionen übertragen und im Kontext von Definition 4 interpretiert werden. Die wichtigsten Größen sind neben der Beschreibung des vorliegenden Optionsrechtes der Ausübungspreis, der Preis und das Risiko (die Volatilität) des Underlying, die Laufzeit der Option, die evtl. ausgezahlten Dividenden des Underlying sowie der am Kapitalmarkt verfügbare risikolose Zins (HULL 2006, S. 256). Diese Parameter lassen sich auch aus der Sicht von Realoptionen interpretieren (vgl. TRIGEORGIS 1996, S. 125, LUEHRMAN 1998a).

Das *Optionsrecht* wird dadurch bestimmt, auf welches Underlying es sich bezieht, ob es sich um einen Call oder um einen Put handelt und ob ein europäischer oder amerikanischer Kontrakt zugrunde liegt. Dies ist bei Realoptionen prinzipiell ähnlich, nur dass es sich bei dem Underlying nicht um ein Wertpapier handelt, sondern um ein Investitionsprojekt.

Im Falle einer Finanzoption lässt sich der *Preis des Underlying* an den Wertpapierbörsen beobachten. Hingegen besteht bei Realoptionen das Recht darin, reale Aktiva zu erwerben oder zu verkaufen. Der Wert dieses Vermögensgegenstandes (z.B. eine Maschine, eine Lizenz, ein spezielles Werkzeug etc.) besteht nicht in dem reinen Anschaffungswert, sondern in den Zahlungen, die mit Hilfe des Gegenstandes zukünftig generiert werden können¹⁰. Analog zu den Finanzoptionen ist somit der Barwert der zukünftigen Zahlungen das Basisobjekt (Underlying), auf das sich eine reale Option bezieht. Es sei als Beispiel die Möglichkeit ge-

¹⁰ Vgl. dazu die Definition einer Investition in Abschnitt 2.1.5.

ben, eine Maschine zu erweitern und damit für fünf Jahre je 50 € zusätzlich zu verdienen. Nach einer Diskontierung dieser Zahlungen mit einem Kalkulationszins von $i=10\%$ folgt für den heutigen Wert PV_0 dieser Zahlungen:

$$PV_0 = \sum_{t=1}^5 \frac{50 \text{ €}}{(1+0,1)^t} = 189,54 \text{ €} \quad (3)$$

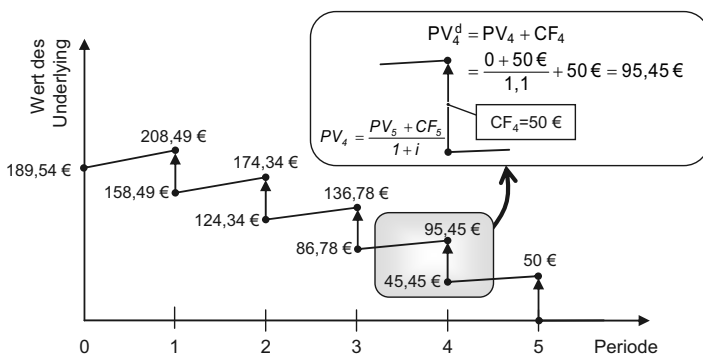
Der *Preis des Underlying* im Kontext der Wandlungsfähigkeit ist somit der Barwert der Zahlungen, die nach einer Auslösung der Option *zusätzlich* anfallen. Analog wird die *Volatilität* interpretiert. Bezogen auf eine Finanzoption handelt es sich bei diesem Unsicherheitsmaß um die Standardabweichung des Wertpapierpreises, d.h. um die Größe möglicher Abweichungen von einem Mittelwert. Bei Realoptionen berechnet sich die Volatilität entsprechend aus der Schwankung des Barwertes zusätzlicher Zahlungen als Folge einer Optionsausübung.

Im Falle einer Entscheidung, die Option auszuüben, kann das Basisobjekt zum *Ausübungspreis* gekauft oder verkauft werden. Bei einer Realoption stellt dieser entsprechend den finanziellen Aufwand dar, der die direkte Folge der getroffenen Entscheidung ist. Besteht die Realoption z.B. aus der Möglichkeit, das Layout umzustellen, setzt sich der Ausübungspreis aus den Kosten für den Ab- und Aufbau, aus eventuellen Investitionen in die Medienversorgung oder eine neue Fundamentierung, aus Produktionsausfällen etc. zusammen. Je wandlungsfähiger ein System ist, desto geringer ist tendenziell der Ausübungspreis.

Die *Laufzeit* einer Option definiert, wie lange (amerikanische Option) bzw. zu welchem Zeitpunkt (europäische Option) das Optionsrecht besteht. Bei einer Realoption ist dies analog zu interpretieren. Die Laufzeit bestimmt, (bis) zu welchem Zeitpunkt eine Ausübung, d.h. eine spezielle Veränderung des Systems, möglich ist.

Dividenden, die an den Besitzer einer Aktie ausgezahlt werden, beeinflussen den Preis dieses Wertpapiers. Bei einer Realoption sind die Dividenden die Zahlungen, die aufgrund der Nichtausübung der Option entstehen (TRIGEORGIS 1996, S. 325, COPELAND & ANTIKAROV 2001, S. 169, LEITHNER & LIEBLER 2003, S. 230). Für das obige Beispiel einer Maschinenerweiterung bedeutet dies, dass in jedem Jahr ohne eine Ausübung der Realoption die 50 € nicht realisiert und somit quasi an einen Konkurrenten ausgezahlt werden, der an Stelle des eigenen Unternehmens die zusätzliche Nachfrage bedient. Diese Zahlungen gehen unwiderruflich verloren. Aber auch Kosten, die zur Aufrechterhaltung einer Option notwendig sind (bspw. Patentgebühren oder Lizenzen) stellen somit Dividenden

dar. Die Wertentwicklung, die sich ausgehend von der letzten Periode ergibt, ist für das genannte Beispiel in der nachfolgenden Abbildung 15 illustriert.



Legende

PV_t^d : Barwert der nachfolgenden und in t anfallenden Zahlungen zum Zeitpunkt t
 PV_t : Barwert der nachfolgenden Zahlungen zum Zeitpunkt t

Abbildung 15: Wertentwicklung eines Investitionsprojektes über die Zeit mit als Dividenden interpretierten Zahlungsströmen

Der am Kapitalmarkt beobachtbare Zinssatz für eine risikolose Anlage ist eine weitere Größe, die den Preis der Option (Optionsprämie) bestimmt. Sie ist unabhängig von einer speziellen Option oder deren Ausgestaltung und hat für Finanz- und Realloptionen dieselbe Bedeutung.

Der Interpretation aller Parameter ist in Tabelle 3 nochmals zusammengefasst. Es bleibt nach den vorangegangenen Ausführungen festzuhalten, dass ein wandlungsfähiges im Vergleich zu einem wandlungsträgen System entweder mehr Realloptionen beinhaltet (d.h. mehr Anpassungen erlaubt), Optionen mit einem geringeren Ausübungspreis umfasst (d.h. eine billigere und schnellere Umsetzung ermöglicht) oder beide Vorzüge in sich vereint.

Die aufgezeigte Analogie zwischen Finanz- und Realloptionen einerseits sowie zwischen Realloptionen und der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen andererseits führt zu dem Schluss, dass die Realloptionsbewertung ein für die Aufgabenstellung dieser Arbeit geeignetes Verfahren sein kann. Vor einer abschließenden Beurteilung ist es jedoch erforderlich, im folgenden Abschnitt den Bezug von Realloptionen zu produktionstechnischen Fragestellung vertiefend zu untersuchen.

Parameter einer Finanzoption	Formelzeichen	Interpretation bei Realloptionen
Ausübungspreis	X	Zahlungen, die für die Änderung der Produktionsstruktur notwendig sind.
Preis des Underlying zum Zeitpunkt t	S_t	Barwert PV_t aller zukünftigen aus dem Investitionsprojekt resultierenden Zahlungen
Volatilität des Underlying	σ	Volatilität des Barwertes des Investitionsprojektes
Laufzeit der Option	T	Zeitdauer, während der eine Veränderung des Systems möglich ist
Dividenden	D_t	Wertverlust des Projektes, der durch die Nichtausübung einer Option entsteht bzw. Projekt-Zahlungsströme, die aus einer Ausübung der Option resultieren
Risikoloser Zins	r_f	Risikoloser Zins (Zins 10-jähriger Anleihen von Staaten mit sehr guter Bonität, alternativ EURIBOR Zinssatz)

Tabelle 3: Interpretation der Parameter einer Finanzoption bei einer Realoption

2.2.4 Systematik der Realloptionen

Bisher wurden Realloptionen sehr allgemein als Put bzw. Call oder als Handlungsspielräume beschrieben. In der Praxis können sie jedoch sehr unterschiedliche Formen annehmen und lassen sich in verschiedene Kategorien und Typen gliedern. Eine grobe Unterteilung ist an den unterschiedlichen ökonomischen Investitionsmotiven orientiert. Mehrere Autoren differenzieren zwischen Wachstumsoptionen, Versicherungsoptionen und Lernoptionen (vgl. HOMMEL & PRITSCH 1999a, S. 125, COURTNEY 2001, S. 69 ff., ähnlich COPELAND & KEENAN 1998, S. 47 f.). Eine feinere Klassifizierung bezieht sich auf die unterschiedlichen Entscheidungen, die durch Realloptionen ermöglicht werden (MCGRATH ET AL. 2004, S. 87 f.). Die in dieser Richtung bekannteste Einteilung stammt von TRIGEORGIS (1996, 2002) und wurde von weiteren Autoren übernommen und detailliert (vgl. LANDNER & PINCHES 1998, HOMMEL & PRITSCH 1999a, BENAROCH 2002). Danach lassen sich Grundtypen von Realloptionen unterscheiden, die einzeln oder in Kombination auftreten können. Beide Sichtweisen, orientiert am Investitionsmotiv oder an der Art der Entscheidung, werden in diesem Abschnitt kurz vorgestellt.

Wachstumsoptionen ermöglichen es dem Unternehmen, bei günstigen Entwicklungen des Marktes bestehende Gewinnpotenziale durch Folgeinvestitionen zu erschließen. Dagegen schützen *Versicherungsoptionen* das Unternehmen gegen

unerwartet ungünstige Marktentwicklungen. Dies wird ermöglicht, wenn ein bestehendes Projekt so ausgeprägt ist, dass es operative Anpassungen zulässt. Der Wert einer *Lernoption* schließlich basiert darauf, dass sich eine Unsicherheit im Laufe der Zeit auflöst und die Möglichkeit besteht, die Ausgestaltung seines Investitionsvorhabens erst danach vollständig festzulegen (PRITSCH 2000, S. 140). Der konzeptionelle Unterschied zu einer Wachstums- oder Versicherungsoption liegt darin, dass jene die Möglichkeit beschreiben, ein bestehendes Projekt zu verändern. Eine Lernoption hingegen ist darauf ausgerichtet, Entscheidungen über große Investitionssummen erst dann zu treffen, wenn das Risiko einer Fehlinvestition sehr gering geworden ist (vgl. NIPPA & PETZOLD 2000, S. 8 f.).

Die Einteilung in Realoptionstypen ist an der Art der Gestaltungsmöglichkeiten orientiert, die durch die Optionen geschaffen werden. Eine Übersicht hierzu findet sich in Tabelle 4. In der Produktion treten häufig die sog. *Skalierungsoptionen* (*scaling options*) wie die *Erweiterungsoption* (*option to expand*), die *Konsolidierungsoption* (*option to contract*) sowie die Option der *temporären Schließung* (*option to shut down and restart*) auf. Sie beschreiben eine Veränderung der Kapazität in Abhängigkeit von der Marktentwicklung. Eine verwandte Gruppe bilden die *Ausweitungs-* (*scope-up*) bzw. *Einschränkungsoptionen* (*scope-down*), die sich nicht auf die Produktionsmenge beziehen, sondern auf die Breite des Leistungsangebotes der Unternehmung. Von großer Bedeutung für die Produktion ist auch die *Wechseloption* (*switching option* oder *option to switch mode/use*). Sie beschreibt die Möglichkeit, die Produktionstechnologie auszutauschen, um einen anderen Output zu erreichen oder durch einen unterschiedlichen Einsatz von Input-Faktoren die Kostenstruktur zu ändern. Darunter fallen bspw. Maßnahmen wie Outsourcing, die Verwendung anderer Technologien und Ressourcen oder auch die Verlagerung ganzer Wertschöpfungsstufen an andere Standorte. Für Erläuterungen zu den anderen Realoptionstypen sei auf TRIGEORGIS (1996) und die Referenzen in Tabelle 4 verwiesen.

Optionstyp	Quellen	
Verzögerung <i>option to wait</i>	DIXIT & PINDYCK 1994 MCGRATH 1997	FRIEDL 2002
Mehrstufigkeit <i>option to stage investment</i>	COPELAND & ANTIKAROV 2001, S. 174 ff.	FRIEDL 2002
Abbruch- und Wiedereröffnung <i>option to shut down and restart</i>	VOLLERT 2003, S. 175	ZAEH ET AL. 2005a
Schließung <i>option to abandon</i>	ALVAREZ 1999	COPELAND & ANTIKAROV 2001, S. 301-318
Erweiterung / Konsolidierung <i>option to expand/contract</i> Ausweitung / Einschränkung <i>option to scope up/scope down</i>	BOLLEN 1999 KAMRAD & ORD 2004 ZAEH ET AL. 2005a	
Wechsel <i>option to switch mode</i>	KOGUT & KULATILAKA 1994 KULATILAKA & TRIGEORGIS 1994 SCHAUERHUBER 1998 NEMBHARD ET AL. 2001 BENGTSSON & OHLHAGER 2002 AMICO ET AL. 2003b BAUMGARTEN ET AL. 2003	ZAEH ET AL. 2004 NEMBHARD ET AL. 2005 ZAEH ET AL. 2005d SCHÄFER & SOCHOR 2005 DU ET AL. 2006 SUDHOFF 2007
Innovation <i>option to innovate</i>	MAUER & OTT 1995 TRIGEORGIS 1996, S. 340-347	KULATILAKA & PEROTTI 1998

Tabelle 4: Realoptionstypen (in Anlehnung an TRIGEORGIS 1996, S. 9-14) und exemplarische Auswahl von Referenzen mit Anwendungen des Konzeptes auf produktionstechnische Fragestellungen

Beide Dimensionen der Einteilung lassen sich zudem kombinieren (Abbildung 16 auf S. 48). Danach zählen die Warteoption und der Optionstyp der Mehrstufigkeit zu den Lernoptionen. Die Erweiterungs-, die Ausweitungs- und die Innovationsoption können den Wachstumsoptionen zugeordnet werden. Die Schließungs-, die Konsolidierungs- und die Einschränkungsoption sowie die Option des Abbruchs und der Wiedereröffnung versichern das Unternehmen gegen eine ungünstige Marktentwicklung. Die Umstellungsoption kann sowohl expandierenden (*switch-up*) als auch versichernden (*switch-down*) Charakter besitzen.

Eine eindeutige Zuordnung von in der Praxis auftretenden Optionen zu einem der aufgeführten Optionstypen ist meist nicht möglich. Das hat zunächst einen einfachen formalen Grund. Da mit einem Put und einem Call, jeweils in europäischer oder amerikanischer Ausführung, zunächst nur vier Grundtypen der Finanzoptionen zur Verfügung stehen, die obige Einteilung aber bereits elf verschiedene Realoptionen unterscheidet, muss es zu Überschneidungen kommen. Schwerer wiegt jedoch, dass reale Optionen in der unternehmerischen Praxis meist nicht isoliert auftreten (TRIGEORGIS 1996, S. 227-271, WANG & DE NEUFVILLE 2004).

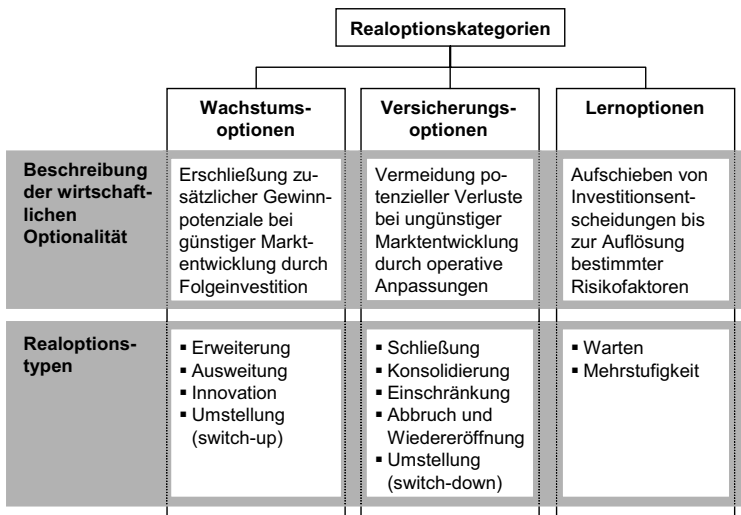


Abbildung 16: Kategorisierung und Typisierung von Realloptionen (in Anlehnung an COPELAND & KEENAN 1998, S. 48, HUNGENBERG ET AL. 2005, S. 19)

Eine Wechseloption lässt sich bspw. als Put auf die zuvor bestehende Art des Produzierens mit gleichzeitigem Call auf eine neue Technologie und/oder eine neue Organisation interpretieren. Auch ist es sehr unwahrscheinlich, dass die Mehrstufigkeit ohne die Möglichkeit zur Erweiterung oder zum Abbruch auftritt. Investitionsprojekte beinhalten meist mehrere Realloptionen, die voneinander abhängen können. Eine der bedeutendsten Aufgaben bei der Bewertung besteht deshalb darin, die einzelnen Optionen zu erkennen und zu isolieren (AMRAM & KULATILAKA 1999, S. 96 f., PRITSCH 2000, Kap. 5, BRÄUTIGAM ET AL. 2003, S. 1).

Die in diesem Abschnitt dargestellte Einteilung dient in erster Linie dazu, auch ohne die Kenntnis der mathematisch-technischen Zusammenhänge ein bildliches Verständnis von Realloptionen zu ermöglichen. Aus bewertungstechnischer Sicht ist eine solch feine Einteilung nicht notwendig. Sie erleichtert es jedoch, in einem späteren Schritt (vgl. Abschnitt 6.4) die aus produktionstechnischer Sicht wertvollen Optionen gedanklich zu strukturieren, zu identifizieren und zu priorisieren.

2.3 Lebenszyklusbewertung von Produktionssystemen

Bereits in den 1930er und 1940er Jahren setzte sich im militärischen Bereich die Erkenntnis durch, dass die reinen Akquisitionskosten nur einen kleinen Teil der Aufwendungen ausmachen, die durch eine Investitionsentscheidung bestimmt werden. Seit den 1960er Jahren schreiben Richtlinien in den USA vor, dass bei der Beschaffung von militärischer Ausrüstung nicht nur der reine Kaufpreis zu berücksichtigen ist, sondern auch alle Ausgaben in die Investitionsentscheidung einzubeziehen sind, die bis zum Zeitpunkt der Außerdienststellung eines Gerätes anfallen (vgl. WOODWARD 1997, EMBLEMSVÅG 2003, S. 2). Auch der (Groß-)Anlagenbau forcierte entsprechende Konzepte seit den 1970er Jahren (VON DER OSTEN-SACKEN 1999, S. 40). Inzwischen ist die lebenszyklusorientierte Betrachtungsweise in vielen Branchen verbreitet (vgl. z.B. ABELE ET AL. 2006a, DERVISOPOULOS ET AL. 2006). In diesem Abschnitt soll zunächst der grundlegende Begriff des Lebenszyklus erläutert und für den Gebrauch im Rahmen dieser Arbeit spezifiziert werden. Anschließend erfolgt eine Abgrenzung unterschiedlicher Sichtweisen einer lebenszyklusorientierten Betrachtung.

Der Lebenszyklus beschreibt die Lebensdauer eines Gegenstandes aus einer spezifischen Sicht und wird in verschiedene Phasen unterteilt (EHRENSPIEL ET AL. 2003, S. 121, EMBLEMSVÅG 2003, S. 16). Aus der Perspektive des Marktes sind dies *Einführung*, *Wachstum*, *Sättigung* und *Rückgang*. Dagegen unterscheidet der Kunde *Kauf*, *Nutzung*, *Unterstützung*, *Wartung* und *Entsorgung*, während aus Sicht der Produktion die Phasen *Konzeption*, *Entwurf*, *Entwicklung*, *Produktion* und *Logistik* von Bedeutung sind (EMBLEMSVÅG 2003, S. 16 f.).

Für ein Unternehmen stellt ein Produktionssystem ein Produkt bzw. Investitionsgut dar, das für die Herstellung anderer Produkte genutzt wird (HILDEBRAND ET AL. 2004, RIGAMONTI ET AL. 2005, S. 101). Die Untersuchung wird dadurch erschwert, dass sich die Längen der beiden zugehörigen Lebenszyklen zunehmend unterscheiden (KLIMKE 2002, WIENDAHL ET AL. 2007). Die wachsende Zahl der Produktvarianten und eine schnelle Abfolge von angepassten oder neu entwickelten Produkten verkürzen den Marktlebenszyklus, während wirtschaftliche Überlegungen tendenziell eine längere Nutzung von Betriebsmitteln erfordern (URBANI & AVAI 2005). In der Folge kann es notwendig werden, mehrere Produktgenerationen mit denselben Betriebsmitteln zu fertigen. SCHENK & WIRTH (2004) illustrieren dies exemplarisch am Lebenszyklus eines Fabrikgebäudes, der deutlich länger ist als der der eingesetzten Technologien, die wieder-

um zur Herstellung mehrere Produktgenerationen eingesetzt werden (Abbildung 17).

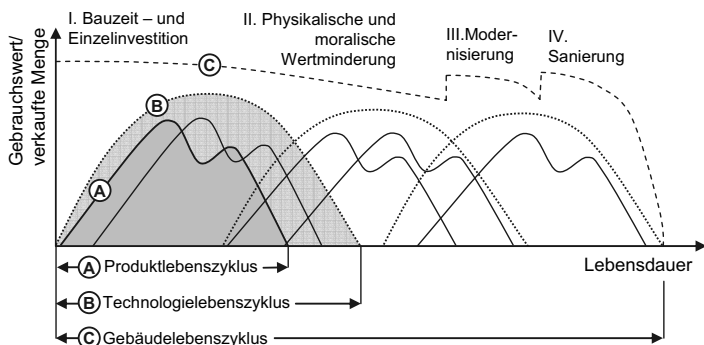


Abbildung 17: Divergierende Lebenszyklen von Produkten, Technologien und Gebäude (in Anlehnung an SCHENK & WIRTH 2004, S. 106)

Die Lebenszykluskostenrechnung (*life cycle costing* - LCC) untersucht die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit von Investitionsalternativen unter Berücksichtigung aller Kosten, die während der Lebensdauer des Betrachtungsgegenstandes entstehen. Bereits in einem frühen Entwicklungsstadium sollen die möglicherweise zukünftig entstehenden finanziellen Aufwendungen analysiert werden, da zu diesem Zeitpunkt deren Beeinflussbarkeit noch vergleichsweise hoch ist (EHRENSPIEL ET AL. 2003, S. 11). Der jeweilige Anwendungsfall bestimmt dabei die konkrete Ausprägung der Methode. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit eines Investitionsgutes über den Besitzzeitraum von Interesse, die häufig auch mit dem Begriff *Total Cost of Ownership* beschrieben wird (BARRINGER 2003). Die Lebenszykluskostenrechnung ist Gegenstand internationaler Standardisierungs- und Normungsaktivitäten, die für unterschiedliche Anwendungsschwerpunkte des LCC die Definition einheitlicher Vorgehensweisen zum Ziel haben (DIN EN 60300-3-3, SAE M-110.2, VDI 2884, VDMA 34160).

Den Ansätzen des LCC ist gemein, dass sie auf der Analyse von Zahlungsströmen basieren und dass sie den Zeitwert des Geldes berücksichtigen. Entsprechend wird in den meisten Fällen als wirtschaftliche Kenngröße der Kapitalwert herangezogen (vgl. z.B. DIN EN 60300-3-3, S. 44-50, BARRINGER & WEBER 1996) und mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen detailliert untersucht (DIN EN 60300-3-3, S. 17).

Einzelne Autoren spezifizieren sehr genau, ab wann der höhere Aufwand des LCC gegenüber einer „einfachen“ Kostenrechnung gerechtfertigt ist: „*For capital expenditures above \$10.000 - \$25.000 it is wise to consider the use of LCC*“ (BARRINGER 2003, S. 2). Andere sehen einen sinnvollen Einsatz bei „(...) *products (or systems) that are open. An open system is a system that evolves over time and changes with its environment*“ (EMBLEMSVÄG 2003, S. 24). Beide Bedingungen sind bei wandlungsfähigen Systemen in der Regel erfüllt, so dass eine hinreichende Indikation für den Einsatz der Lebenszykluskostenrechnung und damit die Relevanz des Ansatzes für die Problemstellung dieser Arbeit gegeben ist.

2.4 Zwischenfazit

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Grundlagen für diese Arbeit erläutert. Die Wandlungsfähigkeit als Zielgröße bei der Fabrikplanung beschreibt die Fähigkeit eines Systems zur Anpassung seiner Struktur, sofern dies durch veränderte Umweltbedingungen notwendig wird. Sie unterscheidet sich von der Flexibilität insoweit, als dass Veränderungen auch außerhalb eines vorab geplanten Korridors möglich sind und deren Durchführung mit zusätzlichen Investitionen bzw. Kosten verbunden ist.

Bei der Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme handelt es sich um ein Investitionsproblem unter Unsicherheit, das in engem Zusammenhang mit der Methode der lebenszyklusorientierten Analyse steht. Mit der Realloptionstheorie wurde in Abschnitt 2.2.2 ein Ansatz vorgestellt, durch den der Wert der für die Wandlungsfähigkeit charakteristischen Handlungsmöglichkeiten monetär erfasst werden kann. Aufgrund der aufgezeigten strukturellen Analogie lässt sich die Wandlungsfähigkeit deshalb als ein Bündel von Realoptionen interpretieren, das die Anpassung der Produktion an veränderte Umweltbedingungen ermöglicht.

Die Ausführungen in den Abschnitten dieses Kapitels machen deutlich, dass die in dieser Arbeit aufgeworfene Fragestellung unterschiedliche Forschungsgebiete berührt. Eine Herausforderung bei der Gestaltung einer entsprechenden Methode zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme liegt somit in der Verbindung von Fabrikplanung, Investitions- und Lebenszyklusrechnung.



3 Stand der Erkenntnisse

3.1 Untersuchungsrahmen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde gezeigt, welche unterschiedlichen Fachgebiete bei der Lösung der vorliegenden Aufgabenstellung eine wesentliche Rolle spielen. Die unternehmerische Disziplin Fabrikplanung und die damit verbundene Forschung prägen den Begriff der Wandlungsfähigkeit. Ausgehend von der Frage, wie ein wandlungsfähiges System zu planen und zu gestalten ist, werden auch entsprechende Bewertungsansätze entwickelt. Die Lebenszyklusanalyse fokussiert stark die verschiedenen Phasen, die ein System durchläuft und analysiert im Hinblick auf das Produktionssystem die insgesamt entstehenden Kosten einschließlich der durch Systemumstellungen hervorgerufenen Aufwendungen. Arbeiten zur Realoptionsbewertung hingegen setzen einen besonderen Schwerpunkt auf die Verfahrensauswahl und deren mathematische Gestaltung.

Die aus den genannten Fachgebieten für die formulierte Problemstellung relevanten Ansätze werden in den nächsten Abschnitten einheitlich anhand der Größen Bewertungsfokus, Bewertungsziel, Bewertungsobjekt, Bewertungsdimension, Bewertungskriterien und Bewertungsmethode verglichen (vgl. auch FÖRSTER 1999). Der *Bewertungsfokus* beschreibt, ob in der jeweiligen Arbeit das Hauptaugenmerk auf die Entwicklung eines Bewertungsverfahrens gelegt ist. Im anderen Fall ist dieses als Bestandteil einer übergeordneten Planungsmethode meist weniger detailliert dargestellt. Das *Bewertungsziel* umfasst die globalen Motive für die Bewertung und ist in Initialplanung und betriebsbegleitende Planung unterschieden. Aus der Ausprägung dieses Kriteriums lässt sich u. a. ableiten, wann und von wem bzw. von welcher unternehmerischen Instanz eine Bewertung angestoßen wird. Das *Bewertungsobjekt* stellt die untersuchte Einheit dar und lässt sich einer der Ebenen eines Produktionssystems (vgl. Abbildung 2 auf S. 11) zuordnen. Die *Bewertungsdimension* bezeichnet im Zusammenhang mit Wandlungsfähigkeit die Frage, ob ein spezieller Aspekt der Veränderungsfähigkeit in den Blick genommen wird (z. B. die räumliche Veränderbarkeit) oder ob ggf. mehrere charakteristische Größen in die Untersuchung einfließen. Die *Bewertungskriterien* sind die Merkmale, mit deren Hilfe der Unterschied zwischen verschiedenen Bewertungsobjekten im Hinblick auf das Bewertungsziel aufgezeigt werden kann. Der Untersuchungspunkt *Bewertungsmethode* lässt sich in die Unterebenen des gewählten (formalen) *Verfahrens*, der *Abbildung der Unsicherheit* und der Aspekte einer *praktischen Anwendung* einteilen. Für die praktische An-

wendung wiederum sind drei Kriterien von Bedeutung. Die *Übertragbarkeit* ist gegeben, wenn das Verfahren leicht auch in einem anderen Anwendungskontext nutzbar ist. Es ist darüber hinaus *erweiterbar*, wenn zusätzliche, spezifische Anforderungen berücksichtigt, vom Nutzer in der Vorgehensweise abgebildet und, sofern vorhanden, in ein unterstützendes Softwarewerkzeug integriert werden können. Unter dem Begriff der *Integrationsfähigkeit* wird die Möglichkeit, die vorgestellten Konzepte mit bereits bestehenden Systemen (technische Integrationsfähigkeit) oder etablierten Vorgehensweisen und Abläufen (methodisch-organisatorische Integrationsfähigkeit) zu verknüpfen, zusammengefasst. Da es ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist, die Praxistauglichkeit der zu entwickelnden Methode sicherzustellen, kommt den drei letztgenannten Kriterien der praktischen Anwendung eine große Bedeutung zu. Auf sie wird deshalb jeweils gesondert eingegangen.

Im folgenden Abschnitt 3.2 sind zunächst Ansätze aus der Fabrikplanung beschrieben und in ihrer jeweiligen Ausprägung hinsichtlich der genannten Kriterien analysiert. Darauf folgt eine Diskussion von Konzepten, die der Lebenszyklusrechnung entstammen (Abschnitt 3.3), ehe in Abschnitt 3.4 auf aktuelle Arbeiten zu Realoptionsbewertung eingegangen wird. Den Abschluss des Kapitels bildet in Abschnitt 3.5 die Zusammenfassung und ein Zwischenfazit zum Stand der Erkenntnisse.

3.2 Bewertungsansätze aus der Fabrikplanung

In diesem Abschnitt werden bestehende Arbeiten vorgestellt, die sich explizit mit der Bewertung wandlungsfähiger Systeme befassen. Entsprechend der Prägung dieses Konzeptes sind sie dem Fachgebiet der Fabrikplanung zuzuordnen und stammen aus der deutschsprachigen Forschung.

Aufbauend auf den Arbeiten von HARTMANN (1995) entwickelt FÖRSTER (1999) eine Vorgehensweise, um die Wandlungsfähigkeit von Organisationseinheiten zu bewerten. Er zeigt eine Möglichkeit auf, den aktuellen Zustand eines Produktionsbereiches anhand der bestehenden Ziele, der vorhandenen Ressourcen sowie der geltenden Randbedingungen abzubilden. Auf Basis eines Soll-Ist-Vergleichs können so notwendige Anpassungsmaßnahmen identifiziert werden. Die Differenz zwischen der für die Durchführung dieser Veränderungen notwendigen und der dafür zur Verfügung stehenden Zeit ist in diesem Modell ein Maß für die Wandlungsfähigkeit. Die vorgeschlagene Vorgehensweise zur Beschreibung der Zustände des Produktionssystems ist intuitiv, gut visualisierbar und leicht zu er-

weitem. Allerdings werden die Veränderungen, aus denen die angestrebte Wandlungsfähigkeit abgeleitet wird, nur isoliert betrachtet. FÖRSTER geht nicht darauf ein, wie sich widersprechende Anforderungen, die sich ggf. aus der Berücksichtigung mehrerer Anpassungsprozesse ergeben, berücksichtigen lassen. Auch ein möglicher Zusammenhang zwischen den Kosten einer Veränderung und der Veränderungsgeschwindigkeit wird nicht betrachtet.

DOHMS (2001) fokussiert in seiner Arbeit zur Bewertung und Gestaltung wandlungsfähiger Produktionsstrukturen die Ausgestaltung des betriebsbegleitenden Controllings. Er leitet ein umfangreiches Kennzahlensystem ab, mit dessen Hilfe die Effizienz einer bestehenden wandlungsfähigen Produktionsstruktur beurteilt werden kann. Darauf aufbauend lässt sich analysieren, in welchen Situationen bzw. bei welchen Entwicklungen einzelner Kennzahlen das vorhandene Potenzial genutzt und die Struktur angepasst werden sollte. Die Bestimmung eines anzustrebenden Grades an Wandlungsfähigkeit oder der Vergleich unterschiedlich wandlungsfähiger Alternativen ist jedoch nicht Inhalt der Arbeit.

In seiner Arbeit zur Planung und zum Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion folgt DÜRRSCHMIDT (2001) der in Abschnitt 2.1.3 erläuterten Trennung von Flexibilität und Reaktionsfähigkeit. Er legt die These zugrunde, dass die Reaktionsfähigkeit, die die Fähigkeit zur Anpassung bei unvorhergesehenen und nicht vorausgeplanten Ereignissen beschreibt, prinzipiell nicht geplant und bewertet werden kann. Dies liegt seinen Ausführungen nach darin begründet, dass zur Planung Informationen über den Zustand des Systems, der Umwelt und möglicher Zielszenarien notwendig sind, die Reaktionsfähigkeit aber eine völlig dimensionslose und ungerichtete Eigenschaft eines Systems ist (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 91). Diese Argumentation muss hinterfragt werden, da sie die Existenz lösungsneutraler, technischer Gestaltungsmerkmale wie beispielsweise der Modularität ausschließt. Wertvoll für die vorliegende Arbeit ist die detaillierte Beschreibung von Wandlungsstrategien, um das Logistiksystem an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen.

Im Rahmen der Systematisierung der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung geht HERNÁNDEZ (2003, S. 83-91) auch auf die Bewertung verschiedener alternativer Gestaltungsmöglichkeiten ein. Er entwickelt eine qualitatives Vorgehen, welches der Unterstützung von Planung und Gestaltung dient. Durch Systematisierung und Visualisierung erleichtert das Modell den Abgleich zwischen den Anforderungen an die Wandlungsfähigkeit, die von mehreren unterschiedlichen Szenarios aufgespannt werden, und den Fähigkeiten einzelner Gestaltungsobjek-

te. Die Arbeit gibt wichtige Anregungen, wie sich mit Hilfe der Szenariotechnik zukünftige Anforderungen an Produktionssysteme ableiten lassen. Die einzelnen Szenarios werden bei der Ausgestaltung der Wandlungsfähigkeit jedoch als gleich wahrscheinlich angesehen, was ggf. zu einer überproportionalen Ausrichtung an Extrementwicklungen führt.

Ein Ziel des Forschungsprojektes „Modular Plant Architecture“ war es, durch Modularisierung der Produktionsstruktur den Grad der Wandlungsfähigkeit zu erhöhen (SCHUH ET AL. 2004b). Die entwickelte Methode erlaubt es, in Abhängigkeit von einer projizierten unsicheren Zukunft sinnvolle Fabrikmodule zu identifizieren. Eine vergleichende wirtschaftliche Bewertung unterschiedlicher Alternativen soll mit Hilfe der Methode von SESTERHENN (vgl. dazu Abschnitt 3.4) erfolgen.

VIELHABER (2004) beschreibt in seiner Arbeit einen Wandlungsfähigkeitsindex, der sich aus den Kosten und der Zeit der Anpassungsmaßnahmen berechnet. VIELHABER selbst führt an, dass die Wandlungszeiten gewichtet werden müssen und dass es bisher nicht gelungen ist, eine allgemeingültige Definition des Wandlungsfähigkeitsindex festzuschreiben. Als Alternative wird eine dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung vorgeschlagen, welche die Anpassungskosten, die sich verändernde Systemleistung und den Zeitpunkt von Zahlungen berücksichtigt (VIELHABER 2004, S. 46). Weitere Details finden sich dazu allerdings nicht in ausreichendem Maße, so dass auf den geleisteten Arbeiten schwer aufgebaut werden kann.

Speziell für wandelbare Materialflusssysteme entwickelt HEINECKER (2006) einen Bewertungsansatz. Dieser baut auf einer Punktebewertung ähnlich der Nutzwertanalyse auf, in welcher der Erfüllungsgrad der Kriterien Fördergutflexibilität, Layoutflexibilität und Durchsatzflexibilität bestimmt wird. In der Methode ist zwar berücksichtigt, ob eine Systemanpassung durch Erweiterung erfolgt. Eine wirtschaftliche Bewertung fokussiert HEINECKER jedoch nicht selbst, sondern er verweist diesbezüglich auf bestehende Arbeiten (z.B. SCHUH ET AL. 2005, WIENDAHL ET AL. 2005, ZAEH ET AL. 2005a). Hilfreich für die vorliegende Problemstellung ist das für verschiedene Fördersysteme abgeleitete (qualitative) Maß der Veränderungsfähigkeit, das die Bestimmung der Veränderungskosten eines Produktionssystems erleichtern kann.

Aufbauend auf den Arbeiten von HERNÁNDEZ (2003) entwickelt HEGER (2007) ein Vorgehen zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Dabei

verbindet er die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit einer sog Wandlungspotentialwertanalyse. In dieser wird für alle Fabrikobjekte bestimmt, inwieweit sie allgemeine Gestaltungsprinzipien (z.B. Universalität, Neutralität, etc.) erfüllen. Diese sind für die Objekte jeweils durch technische Merkmale wie z.B. „Tragfähigkeit“ konkretisiert, für die wiederum spezielle Zielerreichungskriterien entwickelt wurden. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse basiert auf dem Kapitalwertverfahren, mit dem eine unsichere Wandlungshäufigkeit über Erwartungswerte berücksichtigt wird. Entsprechend besitzt diese Vorgehensweise auch die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Schwächen. Der Beitrag des Ansatzes von HEGER liegt somit weniger in der Berechnung einer monetären Bewertungsgröße, sondern in der sehr umfassenden Detaillierung der technischen Merkmale der Wandlungsfähigkeit für Fabrikobjekte, die auch für die zielgerichtete Gestaltung von Produktionssystemen hilfreich ist.

Abschließend können noch die *praktische Ausgestaltung* der vorgestellten Ansätze und die *Übertragbarkeit* auf einen anderen Kontext, ihre *Erweiterbarkeit* und die Möglichkeit ihrer *Integration* in bestehende Systematiken bzw. Werkzeuge beurteilt werden. Alle dargestellten Ansätze haben den Anspruch, für die weit gefasste Wandlungsfähigkeit ein allgemeingültiges Bewertungsverfahren zu entwickeln. Sie sind damit bewusst sehr universell ausgestaltet, so dass eine Übertragung leicht möglich ist.

Das von SCHUH ET AL. vorgeschlagene Verfahren zielt nur auf die Bestimmung des Modularitätsgrades ab und ist nicht darauf ausgerichtet, bspw. auf die übrigen Wandlungsbefähiger nach HERNÁNDEZ angewandt zu werden. Das von FÖRSTER genutzte System zur Darstellung des Zustandes eines Produktionsbereiches ist zwar einfach um beliebige Komponenten zu ergänzen, die eigentliche Bewertung stützt sich jedoch sehr stark auf den Faktor Zeit. Eine Erweiterung um andere Größen ist zwar möglich, bedarf aber eines relativ hohen Anpassungsaufwandes. DOHMS nutzt in dem von ihm entwickelten Vorgehen ein Controllingssystem, das aus einer Vielzahl interdependenter Faktoren besteht. Eine Erweiterung ist prinzipiell möglich, erscheint aufgrund der hohen Komplexität aber schwierig. Die übrigen Arbeiten können aufgrund ihres offenen Charakters und der begrenzten Komplexität leicht erweitert werden.

3 Anforderungen an die Methode

Legende

- Kriterium vollständig erfüllt
- ⊕ Kriterium teilweise erfüllt
- ⊖ Kriterium kaum erfüllt
- Keine Bewertung möglich

		FORSTER (1999)	DOHMS (2001)	DÜRRSCHMIDT (2001)	HERNÁNDEZ (2003)	SCHUH ET AL. (2004b)	VIELHABER (2004)	HEINECKER (2006)	HEGER (2007)
Fokus	Bewertung	●					●	⊕	●
	Planung		●	●	●	●		●	⊖
Bewertungsziel	Initialplanung				●	●	●	●	●
	Betriebsbegleitende Planung	●	●	⊕					
Bewertungsobjekt	Produktionsnetz								
	Fabrikssystem	●	⊖	●	●	●	●	⊖	●
	Prozess/Ressource		●	●	⊖	⊖	●	●	●
Bewertungsdimension	Eindimensional								
	Mehrdimensional	●	●	●	●	●	●	●	●
Bewertungskriterien (primär)	Qualitativ			●	●	●			⊖
	Quantitativ	●	●				●	●	●
	Quantitativ-monetär		⊖				●		⊖
Bewertungsmethode	Controlling/Kostenrechnung		●				●		
	Kapitalwertverfahren								⊖
	Optionsbewertung								
	Sonstige	●		●	●	●		●	●
	Statische Zukunft (ein Szenario)	●	●	●					
	Dynamische Zukunft (viele Szenarios)				●				⊖
	Übertragbarkeit	●	●	●	●	●	■	■	●
	Erweiterbarkeit	⊖	⊖	⊖	●	⊖	■	■	●
Integrationsfähigkeit	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	■	■	⊖	

Tabelle 5: Vergleichende Darstellung der untersuchten Verfahren aus der Fabrikplanung zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen

Die Vorgehensweisen von FÖRSTER und SCHUH ET AL. sind in sich abgeschlossen und fokussieren die Entwicklung einer eigenständigen und sehr spezifischen Bewertungsmethode. Es werden für ihre Anwendung spezielle Daten benötigt, so dass eine Einbettung in bestehende Vorgehensweisen und Systeme tendenziell aufwändiger sein wird. Die Integrationsfähigkeit der Ansätze von DOHMS, DÜRRSCHMIDT, und HERNÁNDEZ ist insofern gegeben, als dass bekannte Methoden verwendet werden, für die jedoch auf die Problemstellung abgestimmte Informationen zu erheben sind. Sie sind als zusätzliche Verfahren anzusehen und stehen nicht in enger Beziehung zu den bereits bestehenden. Das gilt z.T. auch für das Vorgehen nach HEGER, jedoch ist das Kapitalwertverfahren in den Unter-

nehmen etabliert und die Methode diesbezüglich gut integrierbar. Die Anwendung des Ansatzes von HEINECKER wird nicht beurteilt, da er keine eigene Wirtschaftlichkeitsbewertung beinhaltet; eine Aussage zum selben Kriterium ist für die Arbeit von VIELHABER aufgrund der knappen Darstellung nicht möglich. Die Ergebnisse der Analyse sind zusammenfassend in Tabelle 5 dargestellt.

3.3 Optionsorientierte Ansätze

Seit MYERS (1977) Ende der 1970er Jahre den Begriff der realen Optionen prägte, beschäftigt sich eine Vielzahl von Autoren mit der theoretischen und praktischen Weiterentwicklung dieses Konzeptes. Insbesondere in den letzten fünfzehn Jahren erfuhr die Idee, unternehmerische Handlungsspielräume analog zu Finanzoptionen zu bewerten, wachsende Popularität.

Die existierende und für die Aufgabenstellung relevante Literatur zu Realoptionen lässt sich in drei Bereiche einteilen. So behandeln viele Arbeiten die *formale Technik der Realoptionsbewertung*. Das darin verfolgte Ziel ist es, die im Bereich der Bewertung von Finanzoptionen bestehenden Verfahren möglichst gut auf die Spezifika der Realoptionen zu übertragen und ggf. notwendige Weiterentwicklungen vorzunehmen. Im Rahmen dieser Arbeit soll kein neues Verfahren entwickelt, sondern ein oder mehrere geeignete ausgewählt werden.

Der zweite Bereich umfasst die *Anwendung der Realoptionsbewertung*. Insgesamt existieren mehrere hundert solcher Arbeiten (vgl. BAECKER & HOMMEL 2004, S. 3, MCGRATH ET AL. 2004, S. 87), von denen einige Dutzend produktionsnahe Fragestellungen behandeln (vgl. Tabelle 4 auf S. 45, LANDNER & PINCHES 1998, BENGTSOON 2001, MILLER & PARK 2002, BAECKER & HOMMEL 2004). Die z.T. sehr spezifischen Vorgehensweisen sind oft nicht übertragbar bzw. erfordern ein großes Maß theoretischen Methodenwissens, um bei anderen Problemstellungen genutzt werden zu können. Eine leichte praktische Anwendung ist deshalb häufig nicht gegeben. Vor allem befassen sich die Arbeiten nicht mit der wichtigen Fragestellung, wie man in der Produktion vorhandene Realoptionen identifiziert und welche im konkreten Fall bewertet werden sollten.

In ihrer Arbeit beschreiben SCHÄFER & SOCHOR (2005) die Bewertung von Wandlungsfähigkeit mit Hilfe einer Wechseloption. Der von den Autoren gewählte Ansatz, die Unsicherheiten in einem Binomialbaum abzubilden und für verschiedene Produktionskonzepte alternative Wertebäume aufzustellen, zwischen denen gewechselt werden kann, ist vielversprechend und kommt auch in

der vorliegenden Arbeit zur Anwendung. Die Ausführungen zum Vorgehen bleiben jedoch sehr abstrakt. SUDHOFF (2007) präzisiert sie im Hinblick auf die Mobilität als ein Bestandteil der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen (vgl. dazu auch SCHILLING-PRAETZEL ET AL. 2002, REINHART & CISEK 2003, ZÄH ET AL. 2003a). Die Möglichkeit, in Abhängigkeit von der regionalen Markt-, Währungs- oder Kostenentwicklung den Produktionsstandort zu verlegen, wird ebenfalls mit Hilfe einer Wechseloption abgebildet (ZÄH ET AL. 2003b, ZAEH ET AL. 2004, ZAEH ET AL. 2005d). Auch BAUMGARTEN ET AL. (2003) nutzen Realloptionen, um die Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems zu bewerten. Sie beschreiben sowohl Investitionen in die Reduktion der Komplexität einer strategischen Geschäftseinheit als auch in die Erhöhung der Flexibilität der Produktionsprozesse als Realloption. Zwar stellen sie ein Vorgehensmodell zur Realloptionsbewertung vor, bleiben dabei jedoch auf sehr abstraktem Niveau. Darüber hinaus verwenden sie die Optionsanalyse nur, um in einem ersten Schritt die notwendige Gesamtflexibilität eines Systems zu bewerten. Die Berücksichtigung von dessen Anpassungskosten über den Lebenszyklus hinweg erfolgt erst anschließend. Somit ist ein wichtiges Element wandlungsfähiger Systeme bei der Realloptionsbewertung nicht durchgängig mit einbezogen.

Der dritte Bereich, der den *Prozess der Realloptionsbewertung* ganzheitlich und stark praxisorientiert betrachtet, wird erst seit wenigen Jahren intensiver bearbeitet. MÜLLER (2003) skizziert eine Vorgehensweise, bei der zunächst der Barwert eines Projektes ohne Unsicherheiten und Optionen berechnet wird. Dieser dient dann dazu, mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen und Simulationen zu ermitteln, welches die wichtigsten Unsicherheiten sind und zu welcher Schwankung des Projektwertes deren Einfluss führt. Dies ist ein wichtiger Aspekt für die vorliegende Aufgabenstellung. Allerdings sind die Entscheidungen in diesem Modell nur an die Projektwerte geknüpft. Die Frage, ob bei Erreichen eines bestimmten *Zustandes* die Produktionsstruktur geändert werden soll, lässt sich so nicht beantworten. Darüber hinaus finden sich keine Hinweise, wie man die zu bewertenden Realloptionen identifizieren kann. KROLLE & OBWALD (2003) hingegen schlagen Kreativitätstechniken und allgemeine Methoden der Strategiefindung vor, um die entsprechenden Handlungsmöglichkeiten festzulegen. Sie kombinieren die Realloptionsbewertung mit einem Entscheidungsbaum, so dass Entscheidungen in Abhängigkeit von beliebigen Größen (wie z. B. dem Erreichen der Kapazitätsgrenze) modelliert werden können. Wie die identifizierten Realloptionen zu priorisieren sind, wird jedoch nicht ausgeführt. Beide Ansätze fokussieren die

allgemeine Strategiefindung und -bewertung und legen keinen speziellen Schwerpunkt auf die Produktion.

Einen Prozess zur Realloptionsbewertung bei IT-Projekten entwickelt BENAROCH (2002). Auch er kombiniert Entscheidungsbäume und Optionsanalyse, legt aber ein besonderes Gewicht auf das Erkennen vorhandener Realloptionen und die Auswahl wertvoller Handlungsmöglichkeiten für eine Bewertung. Elementarer Bestandteil seines Ansatzes ist die Gegenüberstellung von möglichen Risiken in IT-Projekten und Realloptionen, mit denen diese Risiken verringert werden können. Einen ähnlichen Ansatz wählen BRÄUTIGAM ET AL. (2003), die das Konzept von BENAROCH aufgreifen und verallgemeinern. Die Idee, Risiken und Realloptionen integriert zu betrachten, scheint auch für die vorliegende Arbeit vielversprechend. Vor dem Hintergrund der genauen Zielstellung ist dann jedoch eine Berücksichtigung der speziellen Anforderungen in der Produktion notwendig, die in beiden Arbeiten nicht gesondert fokussiert werden.

Auf die pharmazeutische Entwicklung bezieht sich der von PRITSCH (2000) dargestellte Prozess zur Identifikation und Priorisierung von Realloptionen. Auf Basis von Experteninterviews erstellt er einen Katalog der Optionen, die im F&E-Prozess von Medikamenten sinnvoll sein können. Aufgrund der dabei herrschenden sehr speziellen Abläufe und gesetzlichen Vorgaben bei der Entwicklung und Markteinführung von pharmazeutischen Produkten scheint eine Übertragung in andere Branchen kaum möglich. Die Untersuchungen von PRITSCH liefern jedoch für die vorliegende Arbeit insofern einen wichtigen Beitrag, als eine intensive Diskussion unterschiedlicher Realloptionsverfahren (vgl. Abschnitt 5.3) im Hinblick auf einen Einsatz in der Praxis erfolgt.

Die Frage, wie die Realloptionsbewertung genutzt werden kann, um die Gestaltung von komplexen technischen Systemen zu verbessern, ist ein Forschungsschwerpunkt der Engineering Systems Division am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Realloptionen werden als wichtiges Element gesehen, um herrschende Unsicherheit schon bei der Konzeptionierung eines Systems adäquat zu berücksichtigen (DE NEUFVILLE 2001, 2002). WANG (2005) stellt einen Ansatz vor, bei dem sinnvolle Optionen in einem Staudammprojekt mit Hilfe statischer Screening-Modelle ermittelt werden. Dabei ist das Gesamtsystem zu Beginn in unabhängige Subsysteme zerlegt, die dann bei Bedarf jeweils einzeln hinzugefügt werden können. WANG nutzt die Realloptionsbewertung, um die Reihenfolge und den Zeitpunkt der Investition zu bestimmen. Die Interpretation von technischen Modulen als „Designoptionen“, in die bei Bedarf investiert wird,

scheint auf Produktionssysteme übertragbar zu sein. Das von WANG entwickelte Screening-Modell ist jedoch spezifisch auf die Anwendung in einem Staudammprojekt ausgelegt.

Auch der Ansatz von HUNGENBERG ET AL. (2005) ist nicht speziell auf eine Anwendung im Kontext der Produktion ausgerichtet. Im Mittelpunkt der Arbeit steht stattdessen die Frage, ob eine Handlungsmöglichkeit zukünftig eine wertvolle Realoption werden kann. Dazu schlagen HUNGENBERG ET AL. die Verwendung mehrerer Kennzahlen vor, um die Signifikanz und damit die Priorität spezieller Optionen zu beurteilen. Wie und mit welchem Aufwand sich die zur Berechnung dieser Kennzahlen notwendigen Eingangsgrößen erheben lassen, wird nicht ausgeführt. Darüber hinaus bleiben die Ausführungen zur eigentlichen Bewertung recht abstrakt. Die Suche nach konkreten Realoptionen wird durch die aufgezeigte Vorgehensweise auf grobem Niveau unterstützt. Die Arbeit bietet insgesamt betrachtet eine sehr gute Basis, die für eine Anwendung im Bereich der Produktion konkretisiert werden muss.

Eine detaillierte Aufführung der einzelnen Untersuchungsdimensionen (vgl. Tabelle 5) erübrigt sich für optionsorientierte Ansätze: Sie sind eindimensionale, quantitativ-monetäre und an der Bewertung ausgerichtete Verfahren. Arbeiten, die einen spezifischen Anwendungsfall der Realoptionsbewertung in der Produktion beinhalten, sind prinzipiell für alle Ebenen (Produktionsnetz, Fabriksystem, Prozess/Ressource) zu finden, wobei die abstrakten Fragestellungen dominieren. Die Ansätze, die sich mit dem Prozess der Realoptionsbewertung befassen, sind ebenfalls sehr allgemein gehalten und damit grundsätzlich übertragbar. Allerdings zieht der hohe Abstraktionsgrad großen Anpassungsaufwand nach sich bzw. erfordert Bewertungsspezialisten. Eine Ausnahme bilden die Arbeiten von WANG (2005) und BENAROCH (2002). Diese geben sehr konkrete Handlungshinweise, scheinen durch ihren speziellen Fokus jedoch schwer auf produktionstechnische Fragestellungen übertragbar. Eine Integration in bestehende technische Systeme wird von keinem Autor thematisiert und eine methodisch-organisatorische Integration gestaltet sich aufgrund der hohen Komplexität insgesamt schwierig.

3.4 Lebenszyklusorientierte Ansätze

Bei einer lebenszyklusorientierten Analyse von Produkten ist es notwendig, die unterschiedlichen Entwicklungsstufen des untersuchten Objektes, in der vorliegenden Arbeit das als Produkt interpretierte Produktionssystem (vgl. Ab-

schnitt 2.3), bei dessen Planung und Bewertung zu berücksichtigen und dessen Ausgestaltung im Hinblick auf die gesamte Lebenszeit zu optimieren. Entsprechend der in Abschnitt 1.2 formulierten Zielsetzung werden in diesem Abschnitt Arbeiten untersucht, die eine Bewertung von Produktionssystemen bzw. -konzepten im Rahmen einer Initialplanung beinhalten und dazu eine primär kostenrechnerische, am gesamten Lebenszyklus orientierte Vorgehensweise wählen. Es muss dabei die Abgrenzung zu Ansätzen des Controlling und der kontinuierlichen Adaption von Produktionssystemen betont werden, die eine optimale Nutzung eines bestehenden Potenzials fokussieren (vgl. dazu bspw. DOHMS 2001, MEIER & HANENKAMP 2003, CISEK 2005, NIEMANN & WESTKÄMPER 2006).

Auf die grundlegenden Ansätze der Lebenszykluskostenrechnung wurde bereits in Abschnitt 2.3 eingegangen. Um eine einheitliche Berechnung der sog. *Total Costs of Ownership (TCO)* zu ermöglichen, definieren Normungsgremien bzw. große Unternehmen verbindliche Kostengliederungsstrukturen oder Vorgehensweisen, die durch die Standardisierung einen unternehmensübergreifenden Vergleich der TCO möglich machen sollen (DIN EN 60300-3-3, SAE M-110.2, VDI 2884). Diese Richtlinien leisten einen wichtigen Beitrag im Rahmen der vorliegenden Arbeit, da sie verbindliche und allgemein akzeptierte Kosteneinteilungen vorgeben. Allerdings wird zur Berücksichtigung einer möglichen Dynamik zukünftiger Entwicklungen nur die Durchführung von Sensitivitätsanalysen empfohlen. Die Abbildung von Entscheidungen in einer unsicheren Zukunft ist in den entsprechenden Richtlinien ebenfalls nicht erläutert.

Gegenstand aktueller Forschung ist die Prognose des Ausfallverhaltens von Werkzeugmaschinen, einzelner Komponenten oder komplexer Produktionssysteme über deren Lebenszyklus (vgl. ABELE ET AL. 2006a, FLEISCHER ET AL. 2006b, DENKENA ET AL. 2007). Es wird eine verbesserte Risikoabschätzung für Maschinen- und Anlagenbauer im Rahmen von TCO-Verträgen angestrebt (z.B. FLEISCHER & WAWERLA 2006) sowie die Einbeziehung von Service- bzw. adäquater Dienstleistungen in die Lebenszyklusanalyse forciert (z.B. NESGES 2005, FLEISCHER ET AL. 2006a, FLEISCHER ET AL. 2007, SCHUH & KLOTZBACH 2007). Da in der vorliegenden Arbeit fabrikplanerische Aspekte im Mittelpunkt stehen, werden solche Ansätze nachfolgend nicht weiter vertieft.

VON BRIEL (2002) entwickelt ein umfangreiches Modell zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Anpassungsinvestitionen in Fertigungssysteme. Er geht damit über die Arbeit von VON DER OSTEN-SACKEN (1999) hinaus, der seine Untersuchungen auf Werkzeugmaschinen beschränkt. Beide stellen eine umfangrei-

che Kostengliederungsstruktur auf, die weit über die Vorgaben bspw. der VDI 2884 hinausgehen, berücksichtigen jedoch nicht den stochastischen Charakter der Zukunft und gehen entsprechend auch von einer definierten Entwicklung des Bewertungsobjektes aus.

SESTERHENN (2003) betrachtet dagegen struktur- und betriebsvariable Produktionssysteme, die die Fähigkeit zur Anpassung im Zeitablauf besitzen. Die Vorgehensweise baut auf den Kostenmodellen von VON BRIEL und VON DER OSTENSACKEN auf, besitzt jedoch einen größeren Detaillierungsgrad. Für die Bewertung sind nach diesem Ansatz zunächst mehrere alternative Strukturstufen festzulegen, in die das Produktionssystem überführt werden kann. Der Übergang zwischen den einzelnen Stufen wird entweder vom Planer definiert oder in einer Simulation automatisch ermittelt. Prinzipiell ist diese Trennung sinnvoll, da sich so der Aufwand zur Formulierung notwendiger Anpassungsregeln reduziert und sich die Möglichkeit der Beeinflussung durch den Planer verbessert. Allerdings berücksichtigt SESTERHENN nur Veränderungen auf der Basis der Auslastung. Diese Vorgehensweise ist auf den seiner Arbeit zugrunde liegenden Anwendungsfall des automobilen Rohbaus zugeschnitten. Für andere Branchen ist diese Fokussierung jedoch weniger sinnvoll. SESTERHENN reduziert die Betrachtung von Unsicherheiten auf die Bildung von Szenarios und geht dann bei der simulativen Ermittlung der notwendigen Anpassungen und der resultierenden Kosten eines Systems von einer quasi-sicheren Zukunft aus.

Mit einer lebenszyklusorientierten Bewertung von Produktionssystemen befassen sich auch die Arbeiten, die im Rahmen des Projektes *LicoPro*¹¹ durchgeführt wurden. Ähnlich wie SESTERHENN fokussieren ALEXOPOULOS ET AL. (2005) in ihrer Methode *DESYMA*¹² die Auslastung und daraus resultierende Anpassungen. Dabei berücksichtigen sie jedoch stärker die Risikoaspekte, indem sie umfangreiche Sensitivitätsanalysen durchführen. Im Konzept von URBANI & AVAI (2005) und dem daraus abgeleiteten Programm *LifeC*³ hingegen werden die Möglichkeiten zur Anpassung erweitert (vgl. auch URBANI & BECCARIS 2005, URBANI 2006).

Hervorzuheben sind die Arbeiten, die vom WZL der RWTH Aachen und dem DaimlerChrysler Forschungszentrum im Zuge von *LicoPro* zur Anwendung in

¹¹ *Lifecycle Design for global collaborative Production* (EU-Forschungsprojekt IST-2001-37603)

¹² *Design of Systems for Manufacture*.

der Automobilbranche durchgeführt wurden. Im Gegensatz zu bspw. SESTERHENN nutzen sie die Simulation nicht zur Bestimmung des Systemverhaltens, sondern zur Variation der zukünftigen Entwicklung (WEMHÖNER 2006). Die ggf. durchzuführenden Anpassungsmaßnahmen und die resultierenden Kosten werden mit Hilfe mathematischer Verfahren aus dem Bereich des Operations Research bestimmt. Dies erfolgt sowohl auf der Ebene von Produktionsnetzen (FRIESE ET AL. 2004, FRIESE ET AL. 2005), umgesetzt in der Software *NetworkAnalyzer*, als auch einzelner Werke bzw. Linien, umgesetzt mit dem sog. *Lifecycle Adaptation Planner* (BÜRKNER ET AL. 2005). Mit den Flexibilitätsfenstern wird eine Analyseverfahren vorgestellt, die den Zusammenhang zwischen Stückkosten und Lieferfähigkeit in Abhängigkeit von der Auslastung aufzeigt (SCHUH ET AL. 2004a, SCHUH ET AL. 2004c, WEMHÖNER 2006). Die Ansätze erweitern die Arbeiten von JORDAN & GRAVES (1995), die sich mit der optimalen Produktflexibilität von Automobilwerken in Abhängigkeit von einer unsicheren Nachfrage beschäftigen. Da Strukturanpassungen (z.B. Aus- oder Umbau) vor allem im automobilen Rohbau technisch-wirtschaftlich kaum möglich sind, werden in den Arbeiten nur Betriebsanpassungen (d.h. Änderung von Schichtmodell, Bandbelegung oder Prioritäten erlaubter Fertigungsflüsse) betrachtet (WEMHÖNER 2006, S. 130). Dies schränkt den Einsatz der entwickelten Methoden in anderen Anwendungsfällen erheblich ein, da dort häufig gerade die mögliche Anpassung der Struktur einen wichtigen Bestandteil der Wandlungsfähigkeit eines Systems darstellt. Sinnvoll erscheint die Vorgehensweise der Autoren, bei bestehender Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung die Ergebnisse einer Kosten- bzw. Kapitalwertberechnung zur Vermeidung von Scheingenauigkeit nicht auf einen einzelnen Wert zu verdichten. Die stattdessen vorgeschlagene Ausweisung des Ergebnisses in Form einer stochastischen Häufigkeitsverteilung erlaubt dagegen differenzierte Analysen.

Abschließend werden wieder die *Übertragbarkeit*, die *Erweiterbarkeit* und die *Integrationsfähigkeit* der vorgestellten lebenszyklusorientierten Bewertungsansätze analysiert. Die im Rahmen des *LicoPro*-Projektes entstandenen Arbeiten sowie das Konzept von VON DER OSTEN-SACKEN sind stark an den Anforderungen spezifischer Industriezweige ausgerichtet und lassen sich, auch aufgrund der implementierten spezifischen Optimierungsverfahren, nur eingeschränkt übertragen. Eine Ausnahme bildet der *NetworkAnalyzer*, dessen hoher Abstraktionsgrad eine breite Nutzung erlaubt. Die Erweiterungsfähigkeit der lebenszyklusorientierten Ansätze kann insgesamt als eingeschränkt beurteilt werden. Dies liegt zum

3 Anforderungen an die Methode

Legende

- Kriterium vollständig erfüllt
- ◐ Kriterium teilweise erfüllt
- ⊕ Kriterium kaum erfüllt
- ▒ Keine Bewertung möglich

		VON DER OSTEN-SACKEN (1999)	VON BRIEL (2002)	TCO-Modelle/Normen	SESTERHENN (2003)	FRIESE ET AL. (2005)	BÜRKNER ET AL. (2005)	WEINHÖNER (2006)	ALEXOPOULOS ET AL. (2005)	URBANI (2005, 2006)
Fokus	Bewertung	●	●	●	◐	●	●	●	●	●
	Planung				●					
Bewertungsziel	Initialplanung	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Betriebsbegleitende Planung		◐							
Bewertungsobjekt	Produktionsnetz					●				
	Fabrikssystem		⊕		●		●	●	●	●
	Prozess/Ressource	●	●	●						
Bewertungsdimension	Eindimensional					●		●		
	Mehrdimensional	●	●	●	●		●	◐	●	●
Bewertungskriterien (primär)	Qualitativ									
	Quantitativ									
	Quantitativ-monetär	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Bewertungsmethode	Controlling/Kostenrechnung									
	Kapitalwertverfahren	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Optionsbewertung									
	Sonstige							●		
	Statische Zukunft (ein Szenario)	●	●	●						
	Dynamische Zukunft (viele Szenarios)				●	●	●	●	●	●
	Übertragbarkeit	⊕	●	●	●		◐	◐	◐	◐
	Erweiterbarkeit	●	◐	●	⊕	◐	◐	◐	▒	⊕
	Integrationsfähigkeit	◐	◐	⊕	◐		●	●	▒	◐

Tabelle 6: Vergleichende Darstellung der untersuchten Verfahren aus dem Bereich lebenszyklusorientierter Bewertung

einen an der hohen Komplexität der Modelle und Optimierungsverfahren, zum anderen ist die (prototypische) Umsetzung in Spezialsoftware erfolgt, was eine Modifikation nur mit hohem Aufwand erlaubt. Eine Ausnahme bilden hier natürlich die TCO-Ansätze, die eine Vorgehensweise zur Anpassung der enthaltenen Kalkulationsschemata an die eigenen Bedürfnisse enthalten. Die Integrationsfähigkeit muss differenziert beurteilt werden. Grundsätzlich bauen die vorgestellten Ansätze auf allgemeinen Kostenrechnungsprinzipien auf, die in jeder Unternehmung Anwendung finden sollten – eine methodische Integration ist somit zumin-

dest prinzipiell leicht möglich. Allerdings wird z.B. beim Ansatz von VON BRIEL eine große Menge an Informationen benötigt, die in der Praxis oft nicht gesammelt vorliegt und deren Sammlung bzw. Erhebung sehr zeitaufwändig sein kann. Darüber hinaus stellt die Verwendung von Spezialsoftware (hier *NetworkAnalyzer* und *LifeC³*) eine rein technische Hürde dar. Die Verwendung von Standardsoftware hingegen erleichtert die Integration in eine bestehende Systemlandschaft.

Die Ergebnisse der Analyse sind zusammenfassend in Tabelle 6 dargestellt.

3.5 Zwischenfazit

Die Ausführungen zeigen, dass bereits eine Vielzahl von Arbeiten existiert, die sich mit der Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme befassen. Gleichzeitig wurde aber auch deutlich, dass noch eine Reihe von Defiziten besteht, so dass die Bestimmung des „richtigen“ Grades an Wandlungsfähigkeit in der Praxis immer noch eine Herausforderung darstellt. Die in den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels beschriebenen Untersuchungen sollen nachfolgend nochmals kurz zusammengefasst und gegenübergestellt werden.

Ansätze aus dem Fachgebiet der Fabrikplanung orientieren sich an der Aufgabe, den Auswahl- und Gestaltungsprozess von Fertigungs-, Montage- und Logistiksystemen zu unterstützen. Dabei stehen vor allem technische, aufbau- und ablauforganisatorische Fragen im Mittelpunkt. Die Investitionsbewertung, die auch nach der klassischen Fabrikplanungslehre selbstverständlich angewandt wird, ist dabei relativ einfach gehalten. Mathematisch komplexere Verfahren, die einen aussagekräftigen Zusammenhang zwischen unsicheren Einflussgrößen (bspw. Nachfrageentwicklung) und der zu erwartenden wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit eines Systems herstellen können, finden sich in den untersuchten Ansätzen nicht. Ihre Stärke liegt in der engen Verbindung zu den „klassischen“ Aufgaben der Layout- und Strukturgestaltung sowie der technischen Ausgestaltung von Systemen und Subsystemen.

Einen anderen Blickwinkel nimmt hier die Lebenszyklusanalyse ein, in welcher die Produktionssysteme allgemein aus der Sicht der insgesamt im Zeitablauf entstehenden Kosten untersucht werden. In ihr erfolgt eine Konzentration auf solche technisch-organisatorische Gestaltungsparameter, die über den Lebenszyklus Auswirkungen auf die Kostenstruktur des Systems haben. Durch das dadurch im Vergleich zu den Ansätzen aus der Fabrikplanung höhere Abstraktionsniveau

sind die angewandten Methoden der Kosten- und Investitionsrechnung der Lebenszyklusrechnung deshalb deutlich feiner ausgestaltet. Die Vorgehensweise zur Erfassung, Einteilung und Berechnung relevanter Kosten eines Systems ist durch die untersuchten Ansätze, Normen und Richtlinien klar aufgezeigt. Es finden sich ausgereifte Methoden, die auch die Unsicherheit der Zukunft bei der Berechnung und bei der Beurteilung der Investitionsalternativen berücksichtigen. Eine direkte Übertragung auf andere Branchen erscheint aufgrund der z.T. sehr restriktiven Annahmen jedoch schwierig. Insgesamt wird bei keiner der untersuchten Arbeiten berücksichtigt, dass die während der Lebensdauer auftretende schrittweise Reduktion der Unsicherheit Auswirkungen auf das menschliche Entscheidungsverhalten hat. Folglich kann auch das durch die Wandlungsfähigkeit gebildete Potenzial zur Anpassung nicht richtig erfasst werden.

Speziell diesen Aspekt fokussiert die Realloptionsbewertung. Die zugrunde liegende Theorie ist aus wissenschaftlicher Sicht hinreichend genau erarbeitet, allerdings ist die Verbreitung in der Praxis noch gering. Zwar hat in der jüngeren Zeit das Kriterium der Anwendbarkeit in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen an Gewicht gewonnen. Die wichtige Frage, wie bestehende Optionen zu identifizieren und welche Realloptionen im konkreten Fall zu bewerten sind, wurde für Produktions- und Fabrikssysteme, im Gegensatz bspw. zu IT-Systemen, jedoch noch nicht vollständig beantwortet.

Es bleibt festzuhalten, dass keiner der untersuchten Ansätze in der Lage ist, das Potenzial der Wandlungsfähigkeit hinreichend genau monetär zu erfassen. Sowohl die klassische Fabrikplanung als auch die Lebenszyklusanalyse und die Realloptionstheorie fokussieren Teilaspekte, die in einer Methode zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme zu berücksichtigen sind. Die Anforderungen an eine solche Methode, die sich aus den aufgezeigten Grundlagen und den Defiziten bestehender Ansätze ableiten lassen, werden im nachfolgenden Abschnitt 4 detailliert formuliert.

4 Anforderungen an eine Methode zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme

4.1 Allgemeines

Es ist die übergeordnete Zielsetzung dieser Arbeit, den Einsatz wandlungsfähiger Produktionssysteme in Unternehmen zu fördern. Als prinzipielle Lösungsansätze gelten nach den Ausführungen in Abschnitt 1.2 dabei zum einen die Entwicklung neuer technisch-organisatorischer Gestaltungsformen für Fertigungs- und Montagesysteme, um die *Kosten der Wandlungsfähigkeit* zu reduzieren. Zum anderen ist ein verbesserter *Nachweis des finanziellen Nutzens* anpassungsfähiger Systeme im Rahmen einer Investitionsbewertung zielführend. Diesen Aspekt der Bewertung fokussiert die vorliegende Arbeit.

Aufbauend auf den in Kapitel 2 verdeutlichten grundlegenden Eigenschaften von Wandlungsfähigkeit, der Charakterisierung der Problemstellung sowie den in Kapitel 3 aufgezeigten Defiziten bestehender Verfahren werden im Folgenden zunächst die allgemeinen Anforderungen beschrieben, die eine Methode zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme erfüllen muss (Abschnitt 4.2). Aufgrund der besonderen Bedeutung der Bewertungsmethode sind für diese in den Abschnitten 4.3 bis 4.5 zusätzliche, spezielle Anforderungen definiert.

4.2 Allgemeine Anforderungen

Die Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme erfolgt im Rahmen der Fabrikplanung und ist der Initialplanung zuzurechnen. Ein wichtiges Planungsprinzip in dieser Phase stellt die Alternativplanung dar. Danach werden zunächst parallel mehrere Lösungsmöglichkeiten entwickelt, bewertet und dann schrittweise verfeinert sowie erneut bewertet, bis schließlich die umzusetzende technische Lösung feststeht (KETTNER ET AL. 1984, S. 5 f., WIENDAHL ET AL. 1996, S. 9-7 ff.). In diesen iterativen Prozess ist die zu entwickelnde Methode zu integrieren, die entsprechend eine *a-priori-Bewertung* unterstützen muss, indem sie einen *Alternativenvergleich* als *Bewertungsziel* hat. Diese Alternativen werden im weiteren Verlauf der Arbeit als gegeben angesehen. Die Darstellung der allgemeinen Anforderungen an die Methode ist nachfolgend nach der in Abschnitt 3.1 eingeführten Einteilung in *Bewertungsziel*, *Bewertungsobjekt*, *Bewertungsdimension* und *Bewertungskriterien* strukturiert.

Die Systemebene, auf der die Wandlungsfähigkeit betrachtet wird, ist nach Definition 2 (Wandlungsfähigkeit) und den Erläuterungen in Abschnitt 2.1.3 nicht eindeutig festgelegt. Die zu entwickelnde Methode ist demnach so auszulegen, dass sie die Bewertung der Wandlungsfähigkeit auf verschiedenen Ebenen mit deren spezifischen Wandlungsobjekten, die das jeweilige *Bewertungsobjekt* darstellen, ermöglicht. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt jedoch eine Einschränkung von der Fabrik- bis zur Zellebene (vgl. Abbildung 2 auf S. 10). Es müssen deshalb keine Aspekte berücksichtigt werden, die sich durch die Interaktion einzelner Einheiten in komplexen Produktionsnetzen ergeben.

Die Wandlungsfähigkeit wird durch eine Kombination unterschiedlicher Gestaltungsdimensionen (z.B. Mobilität von Betriebsmitteln, Ablauforganisation, etc.) verwirklicht. Die zu entwickelnde Methode soll diese als *Bewertungsdimensionen* ganzheitlich berücksichtigen und bei der Bewertung integriert betrachten.

Die Methode soll helfen, die höheren Kosten, die durch ein wandlungsfähiges System zunächst entstehen, durch den Nachweis eines Nutzens zu rechtfertigen. Eine rein qualitative Beurteilung ist nicht geeignet, da sie sich nicht hinreichend genau mit dem entstehenden finanziellen Aufwand in Beziehung setzen lässt. Der Nutzen ist demnach quantitativ zu bestimmen.¹³ Da Kennzahlen über das Maß der vorhandenen Wandlungsfähigkeit, analog zur Flexibilität, keine direkte Aussage über den Nutzen erlauben (vgl. JORDAN & GRAVES 1995), erscheint nur die Verwendung von monetären *Bewertungskriterien* zielführend (vgl. den folgenden Abschnitt 4.3 und WEMHÖNER 2006, S. 75).

4.3 Spezielle Anforderungen an das Bewertungsverfahren

Für das Bewertungsverfahren lassen sich aus der Zielsetzung der Arbeit und den aufgezeigten Randbedingungen die folgenden Anforderungen ableiten:

- Monetäres Verfahren: Die Wahl eines monetären Verfahrens begründet sich zunächst aus der in Abschnitt 1.2 angeführten Absicht, den Einsatz wirtschaftlicher, wandlungsfähiger Produktionssysteme zu fördern. Als übergeordnetes Erfolgsziel von Unternehmen (THOMMEN & ACHLEITNER 2005)

¹³ Bei der endgültigen Entscheidungsfindung sind sowohl qualitative als auch quantitative Aspekte zu berücksichtigen. Da der rein qualitative Nachweis des wirtschaftlich schwer zu bewertenden Nutzens in der Literatur bereits umfassend dokumentiert ist (z.B. ZANGEMEISTER 1973, GHANDFOROUSH ET AL. 1985), wird im Rahmen dieser Arbeit auf dessen umfassende Darstellung verzichtet.

misst die Wirtschaftlichkeit das Verhältnis aus Ertrag und Aufwand bzw. Erlösen und Kosten und ist somit eine monetäre Bewertungsgröße (DOMSCHKE & SCHOLL 2003, S. 8). Ebenso folgt die Festlegung aus der Einordnung der Fragestellung dieser Arbeit als Investitionsproblem.

- Abbildung von Anpassungen: Die Methode muss im Sinne der Definition der Wandlungsfähigkeit (vgl. Definition 2 auf S. 18) die dynamische Konfiguration des Systems einbeziehen.
- Berücksichtigung von Unsicherheiten: Die Fähigkeit zur Adaption des Produktionssystems im Sinne der Wandlungsfähigkeit ist nur dann wertvoll, wenn keine deterministischen Entwicklungen vorliegen. Entsprechend muss eine Methode zur Bewertung von Wandlungsfähigkeit die bestehende Unsicherheit hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung abbilden und berücksichtigen.
- Informationsgewinnung: Ein wichtiges Merkmal der Wandlungsfähigkeit ist die Fähigkeit der agierenden Personen, Informationen, die im Laufe des Lebenszyklus verfügbar werden, zu verarbeiten und zu nutzen. Dies ist in die zu entwickelnde Methode zu integrieren.

Ausgehend von der oben aufgeführten Anforderung nach einer monetären Investitionsbewertung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten sind zunächst alle der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Verfahren für die vorliegende Aufgabenstellung prinzipiell geeignet. Allerdings ist es nur mit dem Entscheidungsbaum oder der Realoptionsbewertung, die strukturell verwandt sind (COPELAND & KEENAN 1998), möglich, einen Informationsgewinn im Lauf der Zeit und eine darauf aufbauende flexible Anpassung des Produktionssystems abzubilden. Aufgrund der beschriebenen konzeptionellen Ähnlichkeit zwischen Realoptionen und Wandlungsfähigkeit sowie der aufgeführten Vorteile gegenüber dem Entscheidungsbaumverfahren wird in dieser Arbeit die Realoptionsbewertung eingesetzt.

4.4 Spezielle Anforderungen an die Modellierung des Unternehmensumfeldes

Die geforderte Ableitung der wirtschaftlichen Kenngrößen Aufwand und Ertrag bzw. Kosten und Erlöse kann nur erfolgen, wenn die Produktion und deren Eigenschaften nicht als isoliertes System modelliert werden, sondern auch ihre Einbettung in das wirtschaftlich-technische Umfeld abgebildet ist. Für diese not-

wendige Umweltmodellierung ergeben sich auf Basis der Ausführungen in den vorangegangenen Abschnitten zwei Anforderungen.

- Dynamische Umwelt: Die für Wandlungsfähigkeit charakteristischen Anpassungen eines Systems im Zeitverlauf erfolgen aufgrund einer Veränderung des Umfelds. Damit die Fähigkeit zur schnellen und aufwandsarmen Anpassung bewertet werden kann, ist eine dynamische Modellierung der Umwelt erforderlich.
- Zeitabhängige Unsicherheit: Es wurde gezeigt, dass die Überführung der Unsicherheit in eine quasi-sichere Zukunft die Realität unzulässig vereinfacht (vgl. Abschnitt 2.2.1). Es ist deshalb eine Form der Modellierung zu wählen, welche die schrittweise Reduktion der Unsicherheit im Verlauf der Zeit (vgl. Abbildung 8 auf S. 27) widerspiegelt.

Eine vollständige Abbildung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen und sich daraus ergebenden dynamischen Entwicklungen des wirtschaftlich-technischen Umfelds ist aufgrund der vielschichtigen Abhängigkeiten nicht zu leisten. Eine Reduktion der Komplexität ist daher erforderlich und kann mit Hilfe des in Abschnitt 2.1.4 erläuterten Rezeptormodells erfolgen.

4.5 Spezielle Anforderungen für die praktische Anwendung

Das Ziel dieser Arbeit, den Einsatz wandlungsfähiger Produktionssysteme durch die Entwicklung geeigneter Bewertungsverfahren zu unterstützen, kann nur erreicht werden, wenn die konzipierte Methode nicht nur theoretisch korrekt ist, sondern auch in der Praxis Verwendung findet. Dazu ist es wichtig, dass der Aufwand für die Anwendung den erzielten Nutzen nicht übersteigt. Aus der Charakterisierung der Problemstellung sowie der adressierten Anwendergruppe lassen sich folgende Anforderungen ableiten, deren Erfüllung einen praktischen Einsatz der Methode fördert:

- Übertragbarkeit: Die Übertragbarkeit ist wichtig, da Fabrikplanungsprojekte stets eine gewisse Einmaligkeit besitzen. Entsprechend muss die zu entwickelnde Methode durch den Anwender auf einen jeweils neuen Einsatzfall übertragen werden. Die wesentliche Voraussetzung dafür ist zunächst die *Allgemeingültigkeit* der grundsätzlichen Vorgehensweise. Nur durch eine hinreichende *Transparenz* der Methode ist es für den Anwender möglich zu erkennen, an welcher Stelle ggf. Anpassungen vorgenommen werden müssen.

- Erweiterbarkeit: Es ist möglich, dass aufgrund der Individualität der geplanten Fabriken und der Einmaligkeit der Planungen benötigte Spezialfunktionen in der Methode nicht vorgesehen sind. Deshalb muss sie Erweiterungen durch den Anwender zulassen. Dazu ist es erforderlich, dass die bestehenden Berechnungsvorschriften im unterstützenden Softwaretool *veränderbar* sind. Sofern dies nicht gegeben ist, benötigt man auf technischer Ebene definierte *Schnittstellen* oder die Möglichkeit zur *Programmierung*.
- Integrationsfähigkeit: Unter diesem Punkt werden die technische und die methodische Integrationsfähigkeit in bereits bestehende Strukturen zusammengefasst. Der Einsatz der Methode wird erleichtert, wenn sie auf bereits etablierten Verfahren und Berechnungen aufbaut und somit *Standardgrößen* sowie *Standardverfahren* eingesetzt werden. Die Verwendung von *Standardsoftware* erleichtert die Verknüpfung mit anderen Systemen und vereinfacht darüber hinaus auch die Benutzung.

Die aufgeführten Anforderungen gelten nicht nur für die zu entwickelnde Methode, sondern im Speziellen auch für die verwendete Form der Realoptionsbewertung. Es wird allgemein betont, wie wichtig deren Anpassungsfähigkeit (BAECKER & HOMMEL 2004, S. 28) sowie eine geringe (mathematische) Komplexität und hohe Transparenz (ebd. und VOLLRATH 2003, S. 371) für deren Akzeptanz im Unternehmen sind. Darüber hinaus muss ihre Kompatibilität zu existierenden Bewertungstechniken sowie die Integrationsfähigkeit in bestehende Bewertungsprozesse und -systeme (LUEHRMAN 1998a, S. 51 u. 67, TRIANTIS & BORISON 2001, S. 21) sichergestellt sein.

4.6 Zusammenfassung

Die definierten Anforderungen, die eine Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme erfüllen muss, sind zusammenfassend in Abbildung 18 aufgeführt.

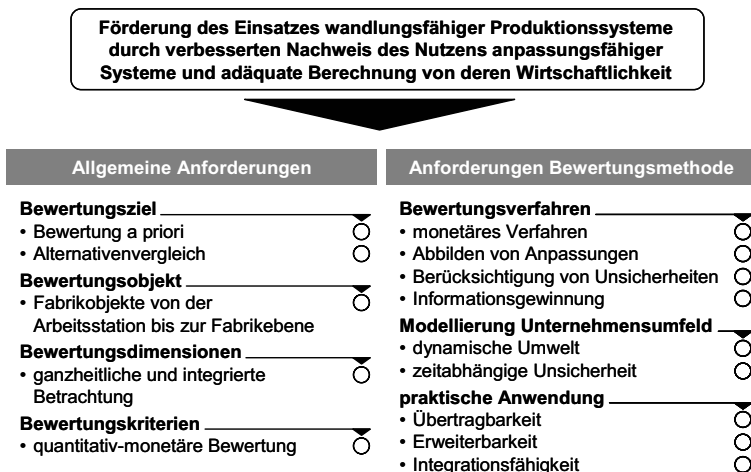


Abbildung 18: Übersicht der Anforderungen an eine Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme

In diesem Kapitel wurden jedoch nicht nur die Anforderungen an die zu entwickelnde Methode definiert, sondern auch die Realloptionsbewertung abschließend als geeignetes Verfahren zur Lösung der Aufgabenstellung festgelegt. In Kapitel 5 werden deshalb nachfolgend zunächst die Ausführungen der Abschnitte 2.2.2 bis 2.2.4 vertieft und die finanztheoretischen Grundlagen der Realloptionsbewertung verdeutlicht. Darauf aufbauend erfolgt dann in Kapitel 6 die Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme.

5 Bewertung von Realloptionen

5.1 Allgemeines

In Abschnitt 2.2 wurde die Analogie zwischen Finanzoptionen und Investitionsprojekten aufgezeigt, Wandlungsfähigkeit als ein Bündel von Realloptionen definiert und ein Überblick über verschiedene Erscheinungsformen realer Optionen gegeben. In diesem Kapitel wird nun die Bewertung von Realloptionen ausführlicher beschrieben.

Dazu ist es zunächst notwendig, wichtige investitions- und finanztheoretische Grundlagen zu erläutern (Abschnitt 5.2). Aufbauend auf den zwei Grundprinzipien der Arbitragefreiheit (Abschnitt 5.2.1) sowie der Bewertung durch Duplikation (Abschnitt 5.2.2) wurden in der Vergangenheit verschiedene Verfahren entwickelt, um die korrekten Preise zunächst für Finanz- und später auch für Realloptionen zu ermitteln. Deren bedeutendste Vertreter sind in Abschnitt 5.3 kurz beschrieben.

Anschließend wird in Abschnitt 5.4 erörtert, welche der vorgestellten Modelle und Ansätze sich für die Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme eignen. Da auch in der Forschung keine einheitliche Meinung hinsichtlich einer Anwendbarkeit der Realloptionsbewertung auf produktionstechnische Fragestellungen besteht, wird zusammenfassend deren Relevanz für die vorliegende Arbeit kritisch diskutiert (Abschnitt 5.5).

5.2 Fundamentalprinzipien der Optionsbewertung

5.2.1 Arbitragefreiheit bei stochastischen Zahlungsströmen

Die Bewertung von Optionen beruht auf dem grundlegenden Prinzip der Arbitragefreiheit, das nachfolgend für stochastische Zahlungsströme kurz an einem Beispiel in Anlehnung an FRANKE & HAX (1999, S. 358 f.) erläutert wird.

Gegeben seien drei auf einem Kapitalmarkt gehandelte Wertpapiere (WP), für die im Zeitpunkt $t=0$ jeweils ein bekannter Preis existiert. Die Unsicherheit der Zukunftsentwicklung ist im Beispiel vereinfacht durch zwei in $t=1$ mögliche diskrete Zustände abgebildet. Nach einer Periode erhält der Inhaber der Wertpapiere

Zahlungen, die vom eingetretenen Zustand abhängen. Sowohl die Preise als auch die zustandsbedingten Auszahlungen sind in Abbildung 19 aufgeführt.

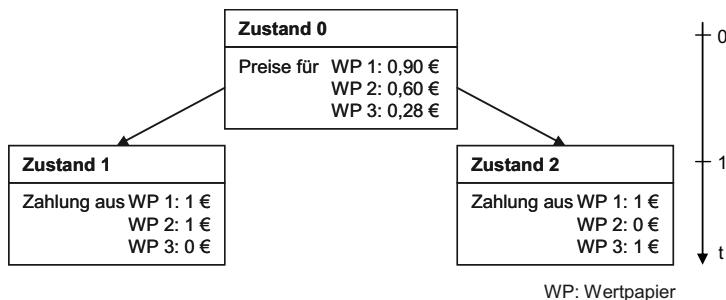


Abbildung 19: Preise und zustandsbedingte Zahlungen von drei Wertpapieren

Der Besitzer von WP 1 erhält für 0,90 € Einsatz sowohl in Zustand 1 als auch in Zustand 2 jeweils 1 € ausbezahlt. Somit beträgt der risikolose Zinssatz, mit dem die sicheren Zahlungen in Höhe von 1 € in $t=1$ zu diskontieren sind, in diesem Beispiel 11,1%.

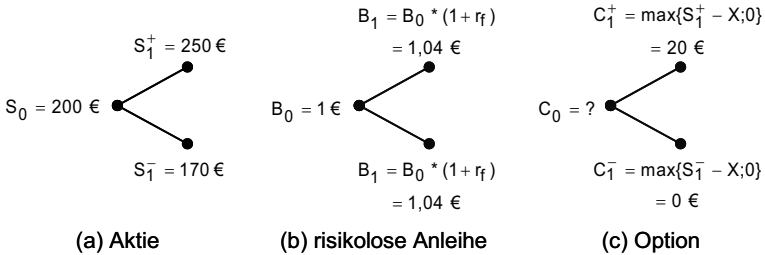
Eine identische Auszahlung erhält der Investor, wenn er je ein Stück von WP 2 und WP 3 kauft, wofür bei den in $t=0$ herrschenden Preisen insgesamt 0,88 € Einsatz erforderlich sind. Wenn er nun in $t=0$ WP 1 verkauft (d.h. emittiert), also einen Kredit über 0,90 € aufnimmt, kann der Investor die anderen beiden Wertpapiere für 0,88 € kaufen. In $t=1$ wird der Kredit aus den Erlösen aus WP 2 bzw. WP 3 zurückgezahlt. Übrig bleibt ein risikoloser Gewinn von 0,02 €. Dieses gewinnbringende Ausnutzen von Preisdifferenzen durch simultanes Kaufen und Verkaufen von Gütern wird als Arbitrage bezeichnet (FRANKE & HAX 1999, S. 358). Man geht nun bei der Optionsbewertung davon aus, dass solche Situationen am Markt nicht vorkommen. Da die Marktteilnehmer die Arbitragemöglichkeit erkennen, kaufen sie solange WP 2 und WP 3, bis sich durch die erhöhte Nachfrage deren Preis so stark erhöht, dass keine Preisdifferenz zu WP 1 mehr besteht.

5.2.2 Bewertung mit Hilfe von Duplikationsportfolios

Der Ansatz der Duplikation leitet sich aus der im vorigen Abschnitt dargestellten und für die Kapitalmärkte angenommenen Arbitragefreiheit ab. Er basiert auf der Annahme, dass zwei unterschiedliche Investitionen, die zukünftig den gleichen

Ertrag liefern, wie gezeigt auch heute den gleichen Wert besitzen müssen. In der modernen Optionspreistheorie wird nun versucht, „(...) aus bereits bewerteten unsicheren Zahlungsströmen auf der Basis des Duplizierungsgedankens (...) den Wert anderer unsicherer Zahlungsströme abzuleiten“ (KROLLE & ÖBWALD 2003, S. 180). Dieses Vorgehen ist nachfolgend anhand eines einfachen Beispiels in Anlehnung an PESKE (2002, S. 52 f.) verdeutlicht.

Gesucht wird der Wert C_0 einer Option zum Zeitpunkt $t=0$, die das Recht verbrieft, eine Aktie nach einer Periode zum Preis von $X=230$ € zu kaufen. Die Aktie notiert in $t=0$ bei 200 €. Ihr zukünftiger Kurs wird, ebenso wie der Wert der Option, vereinfacht in einem binomischen Modell mit nur zwei möglichen Zuständen in $t=1$ in Abbildung 20 dargestellt. Weiterhin beträgt der risikolose Zinssatz 4%.



Legende

B_t : Wert einer risikolosen Anleihe zum Zeitpunkt t r_f : risikoloser Zins
 C_t : Wert der Option zum Zeitpunkt t , $C_t \in \{C_t^+; C_t^-\}$ X : Ausübungspreis
 S_t : Wert einer Aktie zum Zeitpunkt t , $S_t \in \{S_t^+; S_t^-\}$

Abbildung 20: Beispielhafte Wertprofile von Aktie, risikoloser Anleihe und Kaufoption für die Zeitpunkte $t=0$ und $t=1$, dargestellt in einem vereinfachten binomischen Modell

Es lässt sich nun durch das Kaufen und Verkaufen der Aktie sowie der mit dem risikolosen Zinssatz verzinsten Anleihe ein Portfolio konstruieren, das in jedem Zustand in $t=1$ denselben Wert wie die Option besitzt. Eine solche Nachbildung des Werteprofiles mit Hilfe anderer Wertpapiere wird als *Duplikation* bezeichnet. Die Kombination aus m Anteilen einer Aktie und B Anteilen einer Anleihe, welche die gesuchte Bedingung erfüllt, heißt *Duplikationsportfolio* und lässt sich durch Lösen des folgenden Gleichungssystems bestimmen:

$$\begin{aligned} mS_1^+ + (1+r_f)B_0 &= C_1^+ \\ mS_1^- + (1+r_f)B_0 &= C_1^- \end{aligned} \quad (4)$$

m	Anteil der Aktie am Duplikationsportfolio
r_f	risikoloser Zinssatz
C_t^+	Wert der Option zum Zeitpunkt t bei positiver Entwicklung des Underlying
C_t^-	Wert der Option zum Zeitpunkt t bei negativer Entwicklung des Underlying
S_t^+ / S_t^-	Wert der Aktie zum Zeitpunkt t bei positiver/negativer Entwicklung von S_{t-1} , entspricht dem Preis der Aktie an der Börse
B_t	Wert einer mit dem risikolosen Zins verzinsten Anleihe zum Zeitpunkt t , $t \in \{0;1\}$
C_t	Wert der Option zum Zeitpunkt t , $t \in \{0;1\}$, $C_1 \in \{C_1^+; C_1^-\}$
S_t	Wert der Aktie zum Zeitpunkt t , $t \in \{0;1\}$, $S_1 \in \{S_1^+; S_1^-\}$

Daraus ergibt sich im vorliegenden Beispiel:

$$\begin{aligned} m \cdot 250 \text{ €} + 1,04 B_0 &= 20 \text{ €} \\ m \cdot 170 \text{ €} + 1,04 B_0 &= 0 \text{ €} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Rightarrow m = \frac{20 \text{ €} - 0 \text{ €}}{250 \text{ €} - 170 \text{ €}} = 0,25 \quad (6)$$

$$\Rightarrow B_0 = \frac{20 \text{ €} - 0,25 \cdot 250 \text{ €}}{1,04} = -40,87 \text{ €} \quad (7)$$

Das negative Ergebnis von B_0 ist als Kreditaufnahme zu interpretieren. Aufgrund des Arbitragegedankens muss nun das Portfolio, das die Zahlungsströme der Option vollständig dupliziert, denselben Wert wie die Option besitzen. Daraus ergibt sich der gesuchte Preis der Option (C_0) in $t=0$ zu

$$C_0 = mS_0 + B_0 = 0,25 \cdot 200 \text{ €} - 40,87 \text{ €} = 9,13 \text{ €}. \quad (8)$$

Um ein Duplikationsportfolio bilden zu können, ist ein Gut notwendig, aus dessen Wert sich in jedem beliebigen Umweltzustand *eindeutig* der Wert des zu bewertenden Vermögensgegenstandes ableiten lässt. Das bedeutet, dass sich der Optionswert bezogen auf einen definierten Zeitpunkt nicht ändert, ohne dass sich der Wert des so genannten *perfekt korrelierten* Gutes (engl. *twin security*) geändert hat. Als weitere wichtige Voraussetzung muss die Möglichkeit bestehen, den

Wert dieses Gutes am Markt direkt zu beobachten oder ihn so zu bestimmen, dass die zukünftigen Chancen und Risiken korrekt einkalkuliert sind.

Die Berücksichtigung des Risikos bei der Bewertung ist das Kernproblem, das die Verwendung des Duplikationsansatzes motiviert. Eine grundlegende Annahme in der Investitionstheorie ist die der Risikoaversität (vgl. dazu und nachfolgend LUENBERGER 1998, S. 5). Sie besagt, dass ein Investor aus zwei alternativen Projekten mit demselben angenommenen Erfolg, ausgedrückt durch den Erwartungswert der zukünftigen Zahlungen, dasjenige wählt, dessen zukünftige Zahlungen ein geringeres Risiko aufweisen. Risiko ist dabei als mögliche Abweichung vom Erwartungswert definiert und wird durch die Varianz der zukünftigen Zahlungen ausgedrückt. Je höher es ist, desto größer ist der notwendige Risikozuschlag, der sich in einem erhöhten Kalkulationszins niederschlägt (vgl. dazu auch Abschnitt 2.2.1).

Der notwendige Zuschlag lässt sich jedoch nicht einfach bestimmen (für weiterführende Ausführungen vgl. z.B. COPELAND & WESTON 1992, LUENBERGER 1998, COPELAND ET AL. 2000). Hier setzt das Duplikationsverfahren an, das den risikoangepassten Zins implizit auf der Basis des Arbitragegedankens aus anderen risikobehafteten und bereits korrekt bewerteten Zahlungen ableitet. Für die angeführte Option lässt sich z.B. im Nachhinein bei gleicher Wahrscheinlichkeit für eine positive bzw. eine negative Entwicklung mit (9) ein angepasster Kalkulationszins von $i=9,53\%$ bestimmen, der deutlich über den risikolosen 4% liegt:

$$1 + i = \frac{0,5 C_1^+ + 0,5 C_1^-}{C_0} = \frac{10 \text{ €} + 0 \text{ €}}{9,13 \text{ €}} = 1,0953 \Leftrightarrow i = 9,53 \% \quad (9)$$

Das Prinzip der Duplikation bildet die Grundlage der bedeutendsten Bewertungsmodelle für Finanz- und Realloptionen (PESKE 2002, S. 51). Bisher wurde jedoch nur ein stark vereinfachter Einperiodenfall angenommen. Im weiteren Verlauf ist es deshalb notwendig, die Überlegungen auf einen allgemeinen Mehrperiodenfall auszuweiten und dafür geeignete Bewertungsmodelle abzuleiten.

5.3 Verfahren zur Realoptionsbewertung

5.3.1 Allgemeines

Die dargestellten Prinzipien der Arbitragefreiheit und der Bewertung mit Hilfe von Duplikationsportfolios bilden die Grundlage, um den Wert von Optionen zu bestimmen. In der Realität ist die Betrachtung des in Abschnitt 5.2 erläuterten diskreten Einperiodenfalls jedoch nicht ausreichend. Um auch bei einer Verallgemeinerung auf einen Mehrperiodenfall, bei dem die Wertentwicklung des Underlying nicht durch einzelne Werte, sondern durch einen stochastischen Prozess beschrieben wird, den Optionswert bestimmen zu können, wurden in der Finanzmathematik mehrere sog. *Optionspreismodelle* entwickelt, die in Abschnitt 5.3.2 erläutert werden.

Für eine Anwendung zur Bewertung von Realoptionen müssen die ursprünglich für Finanzoptionen entwickelten Modelle angepasst werden. Insbesondere die Definition des Underlying gestaltet sich schwierig, da die entsprechenden Investitionsprojekte, welche Realoptionen darstellen, nicht an öffentlichen Börsen gehandelt werden. Zur Lösung dieses Problems existieren in der Literatur mehrere Ansätze, die in Abschnitt 5.3.3 vorgestellt und diskutiert werden.

Auf der Basis der Ausführungen in den nachfolgenden Abschnitten sowohl zu den Optionspreismodellen als auch zu der Bestimmung eines Underlying ist es dann möglich, in Abschnitt 5.4 einen für die Problemstellung dieser Arbeit geeigneten Bewertungsansatz auszuwählen.

5.3.2 Optionspreismodelle

Zur Berechnung des Wertes einer Option wurden in der Forschung mehrere alternative Modelle entwickelt, die in Abbildung 21 in einer Übersicht dargestellt sind. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Ansätze kurz beschrieben. Für eine ausführliche Diskussion sei exemplarisch auf LANDNER & PINCHES (1998), PRITSCH (2000) und BAECKER & HOMMEL (2004) verwiesen.

Auch die auf den Mehrperiodenfall verallgemeinerten Modelle basieren auf der Bildung eines Duplikationsportfolios aus der Option und einem zugehörigen Underlying (vgl. Abschnitt 5.2). Aufgrund der Arbitragefreiheit muss die Wertentwicklung eines risikolosen Portfolios *zu jedem Zeitpunkt* mit der Rendite aus einem risikolosen Wertpapier übereinstimmen. Über die Zeit verändert sich jedoch

der Wert des Underlying (und damit auch der des Derivats¹⁴), was mit Hilfe unterschiedlicher, in Form von Differentialgleichungen formalisierter stochastischer Prozesse darstellbar ist (vgl. DIXIT & PINDYCK 1994, S. 59-92). Aufgrund der sich fortlaufend verändernden Werte muss auch die Zusammensetzung des Portfolios kontinuierlich angepasst werden, um die Bedingung der Risikolosigkeit jederzeit zu erfüllen. Diese Gleichgewichtsbedingung lässt sich für den jeweiligen stochastischen Prozess ebenfalls in partiellen Differentialgleichungen (PDG) formulieren.

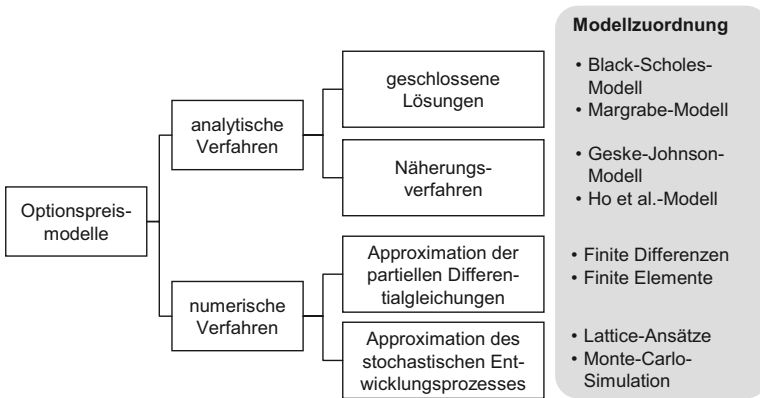


Abbildung 21: Überblick der Optionspreismodelle (in Anlehnung an BAECKER ET AL. 2003, S. 26, HUNGENBERG ET AL. 2005, S. 8)

Mit *analytischen Verfahren* wird versucht, für genau spezifizierte Optionen und ihre geltenden Nebenbedingungen (z. B. die Bedingungen der Ausübung) diese Differentialgleichungen exakt zu bestimmen und eine geschlossene Lösung zu ermitteln. Der bekannteste Repräsentant dieser Verfahrensklasse ist das Black-Scholes-Modell, das für ein spezielles stochastisches Verhalten von Aktienkursen eine Bewertungsformel für europäische Call- und Put-Optionen formuliert (BLACK & SCHOLES 1973). Mehrere Autoren haben diesen Ansatz konzeptionell verfeinert oder durch analytische Näherungen den Anwendungsbereich ausgeweitet (z. B. MARGRABE 1978, GESKE & JOHNSON 1984, HO ET AL. 1997).

¹⁴ Als Derivate werden Wertpapiere bezeichnet, deren Wert sich vom Preis sowie den Preisschwankungen und -erwartungen eines zugrunde liegenden Basisinstrumentes ableitet (BREALEY & MYERS 2000, S. 1064).

Häufig ist es jedoch nicht möglich, die die Wertentwicklung der Option beschreibende PDG exakt zu lösen. Zu deren numerischer Approximation findet in der Finanzmathematik vor allem die Methode *expliziter* oder *impliziter finiter Differenzen* Verwendung, selten die der *finiten Elemente*. Dabei werden sowohl die Zeit- als auch die Preisachse des Underlying diskretisiert und auf ein in Abhängigkeit von der zu bewertenden Option sinnvolles Intervall eingeschränkt.

Alternativ lässt sich an Stelle der PDG auch der stochastische Preisprozess des Underlying approximieren. Zunächst wird der Bewertungszeitraum in einzelne Zeitintervalle mit den diese begrenzenden Zeitpunkten unterteilt. Bei Verwendung einer *Monte-Carlo-Simulation* erzeugt man nacheinander viele einzelne mögliche Entwicklungen des hinterlegten Preisprozesses (Pfade), berechnet dann für jede davon die resultierenden Zahlungen zu den einzelnen Zeitpunkten und bestimmt daraus den Wert der Option. Durch die Gewichtung der Ergebnisse aus den einzelnen Repräsentationen mit der relativen Häufigkeit ihres Auftretens erhält man eine Näherungslösung.

Eine weitere Verfahrensklasse stellen die sog. *Lattice-Ansätze* oder *Baumansätze* dar, welche die stochastische Preis- bzw. Wertentwicklung des Underlying durch einen zeitdiskreten Prozess mit zwei oder mehr Folgezuständen annähern. Über mehrere Perioden ergibt sich ein Gitter (engl. *lattice*), das die möglichen Ausprägungen bspw. eines Aktienpreises in diskreten Punkten darstellt, in denen der Wert der Option somit ebenfalls bestimmbar ist. Die Genauigkeit der Näherung hängt dabei von der Anzahl der Schritte und somit von der Länge des mit einem Schritt abgebildeten Zeitintervalls ab.

5.3.3 Ansätze zur Bestimmung des Underlying einer Realloption

Optionspreismodelle wurden ursprünglich zur Bewertung derivativer Wertpapiere entwickelt. Im Vergleich zu diesem Einsatzfeld erschwert sich bei ihrer Anwendung auf Realloptionen die konzeptionelle Bestimmung der benötigten Parameter (vgl. Tabelle 3 auf S. 45). Insbesondere ist das eigentliche Underlying zu identifizieren, dessen aktueller Wert zu bestimmen sowie die zukünftige Wertentwicklung bzw. deren Volatilität zu schätzen. Die wissenschaftliche Forschung schlägt zur Lösung dieses Problems mehrere Ansätze vor, die nachfolgend in Anlehnung an BORISON (2003) kurz vorgestellt und im Anschluss in Abschnitt 5.4 auf ihre Eignung für diese Arbeit untersucht werden.

Der *klassische Ansatz* fußt auf der Annahme, dass an den Kapitalmärkten das zur Bewertung benötigte perfekt korrelierte Gut (vgl. Abschnitt 5.2.2) existiert. Das können bspw. Aktien eines Unternehmens sein, welches ein identisches Risiko wie das Investitionsprojekt besitzt, auf das sich die Option bezieht. Oft werden als *twin security* auch Rohstoffe verwendet, deren Preise an Terminmärkten zu beobachten sind (z. B. BRENNAN & SCHWARTZ 1985). Stark an diese Vorgehensweise angelehnt ist der *subjektive Ansatz*, der grundsätzlich auf denselben theoretischen Annahmen beruht, aber Schätzungen für Parameter explizit zulässt. LUEHRMAN (1998a, 1998b) schlägt vor, den Wert der durch die Auslösung einer Option geschaffenen Zahlungen mit dem herkömmlichen Kapitalwertverfahren zu bestimmen und dabei Durchschnittswerte zu nutzen. Erst in einem zweiten Schritt ist das so errechnete Ergebnis mit einer geschätzten Unsicherheit zu beaufschlagen. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, die Optionsanalyse in bestehende Bewertungssysteme zu integrieren.

Der sog. Market-Asset-Disclaimer (*MAD-Ansatz*) nach COPELAND & ANTIKAROV (2001) löst den strengen Bezug zu den Kapitalmärkten (vgl. auch BREALEY & MYERS 2000). Zunächst wird unter Einbeziehung bestehender Unsicherheiten der Wert des Projektes mit Hilfe herkömmlicher Verfahren (Kapitalwertverfahren, Monte-Carlo-Simulation) so berechnet, als ob es keine Flexibilität, d. h. Optionen, beinhalten würde. Dieses starre Projekt bildet dann das Underlying für die Optionsbewertung.

Entgegen dem MAD-Ansatz sind einige Autoren der Ansicht, dass die Bewertung mit Hilfe des Arbitragegedankens, auf dem die Realoptionstheorie basiert, nur dann korrekt ist, wenn das in einer als Realoption interpretierten Investition enthaltene Risiko tatsächlich an Finanzmärkten gehandelt wird. Es ist jedoch unstrittig, dass ein Teil von Projektrisiken sog. private Risiken sind, die nur ein Unternehmen oder ein spezifisches Projekt betreffen. Im *revidierten klassischen Ansatz* nach DIXIT & PINDYCK (1994) wird deshalb gefordert, die Realoptionsbewertung nur dann anzuwenden, wenn die Marktrisiken eines Projektes die privaten Risiken überwiegen. Auch der *integrierte Ansatz* greift diese Unterscheidung auf. Die Zahlungsströme werden danach in die privaten Anteile und die Marktanteile zerlegt und je nach Zugehörigkeit nach den Grundsätzen des Entscheidungsbaum- oder des Realoptionsverfahrens bewertet (SMITH & NAU 1995, NEELY & DE NEUFVILLE 2001).

Bisher ist nicht entschieden, welche der Vorgehensweisen generell überlegen ist (KALLIGEROS 2004, S. 4). Deshalb ist für jede Bewertungsaufgabe nicht nur

grundsätzlich zu untersuchen, ob das Konzept der Realoptionen angewendet werden sollte, sondern es ist in Abhängigkeit von der jeweiligen Zielsetzung und den Randbedingungen auch ein konkretes Verfahren auszuwählen.

5.4 Auswahl eines Bewertungsverfahrens

Aus dem vorangegangenen Abschnitt geht hervor, dass derzeit keine einzelne, allgemeingültige Vorgehensweise existiert, nach der Realoptionen zu bewerten sind. Deshalb wird nachfolgend dargelegt, welches der Optionspreismodelle bzw. welcher Ansatz zur Bestimmung des Underlying einer Realoption geeignet ist, um in einer Methode zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme Verwendung zu finden.

Auswahl des Optionspreismodells

Die analytischen Verfahren zur Optionsbewertung sowie die Ansätze zur Approximation der PDG der Option werden wegen ihrer Exaktheit geschätzt (ALKAS 2002, S. 51). Allerdings sind bei beiden Vorgehensweisen sehr restriktive Annahmen über die Wertentwicklung des Underlying zu treffen, die in der Praxis jedoch oft nicht gelten. Insbesondere ist der Wertverlauf von Investitionsprojekten meist von Sprüngen gekennzeichnet, die bspw. durch das Erreichen von Kapazitätsgrenzen hervorgerufen werden (vgl. ALKAS 2002, S. 48).

Ferner müssen für die Bewertung realer Investitionsoptionen die möglichen zukünftigen Zahlungen geschätzt werden. Diese Aufgabe ist mit vertretbarem Aufwand nur für längere diskrete Zeitabschnitte, bspw. Monate, Quartale oder Jahre, durchführbar. Eine Berechnung, die auf einem stetigen Modell beruht, täuschte in diesem Fall eine Genauigkeit vor, die durch eine relativ ungenaue, zeitdiskrete Ermittlung der Eingangsgrößen kontrastiert würde. Weitere Kritik an den analytischen Verfahren betrifft den Verlust von Transparenz. Durch die Reduktion komplexer Problemstellungen auf einfache, in einer Formel ausgedrückte Lösungen entziehen sich deren methodische Details und die getroffenen Annahmen dem Verständnis des nicht vertieft geschulten Anwenders (BAECKER ET AL. 2003, S. 27). Bei den Verfahren zur Lösung der PDG hingegen ist die mathematische Komplexität sehr hoch (PRITSCH 2000, S. 237). Beides, zu große Einfachheit und zu hohe Komplexität, verringert die geforderte Transparenz und erschwert die Anpassbarkeit an industrielle Fragestellungen. Aus den aufgeführten Gründen werden deshalb weder die analytischen Verfahren noch die Methode

expliziter oder impliziter finiter Differenzen zur Anwendung auf die Fragestellung dieser Arbeit berücksichtigt.

Sowohl die Monte-Carlo-Simulation als auch die Baumverfahren sind dagegen intuitiv zugänglich und deshalb für den praktischen Einsatz tendenziell besser geeignet (BAECKER ET AL. 2003, S. 28). Die Simulation hat Vorteile, wenn die Optionsausübung von mehreren Unsicherheitsfaktoren gleichzeitig abhängt. In diesem Fall steigt die Komplexität von Bäumen aufgrund der zweidimensionalen Darstellung schnell an (SICK 2005, S. 22). Auf der anderen Seite lassen sich amerikanische Optionen nur eingeschränkt mit Hilfe von Simulationen bewerten (SCHULMERICH 2003, S. 87), wobei die hierfür entwickelten Verfahren einen hohen Rechenaufwand erfordern (z. B. LONGSTAFF & SCHWARTZ 2001, GAMBA 2003). Bei der Verwendung von Bäumen sind derartige Bewertungen durch die Anwendung der dynamischen Programmierung leicht möglich. Da die Wandlungsfähigkeit einem zeitlich unbestimmten Potential und damit einer amerikanischen Option entspricht, ist für diese Arbeit ein Baumansatz als Basis eines Bewertungsverfahrens besser geeignet. Hinzu kommt, dass es dessen Anwendung erfordert, „(...) *Projektspezifika transparent zu machen und Risiken und Chance der Entscheidungssituation einer detaillierten Analyse zu unterziehen*“ (BAECKER ET AL. 2003, S. 30). Dies entspricht dem Ziel dieser Arbeit, den Einsatz von Wandlungsfähigkeit nicht nur durch adäquate Bewertungsverfahren auf strategischer Ebene, sondern auch durch einen verbesserten Nachweis des finanziellen Nutzens über den Lebenszyklus auf taktischer Ebene zu fördern (vgl. Abschnitt 1.2).

Ansatz zur Bestimmung des Underlying

Die Wahl eines geeigneten Ansatzes zur Bestimmung des Underlying begründet sich vor allem aus dem in Abschnitt 4.2 formulierten Ziel, mehrere alternative Produktionssysteme miteinander zu vergleichen. Dabei soll die Nutzung der Methode in unterschiedlichen Fabrikplanungsprojekten möglich sein, was eine leichte Anwendbarkeit und Übertragbarkeit erfordert. Sowohl beim (revidierten) klassischen als auch beim integrierten Ansatz ist es für jedes Projekt notwendig, ein börsengehandeltes Gut als Underlying zu finden. Dieses muss die spezifische Risikostruktur des Investitionsprojektes mit Optionscharakter widerspiegeln, um so den am Kapitalmarkt ermittelten Preis für ein spezifisches Risiko bei der Bewertung berücksichtigen zu können. Dieses Vorgehen ist ohne entsprechende Spezialkenntnisse über Wertpapiere und deren Märkte nicht möglich und scheint deshalb in Fabrikplanungsprojekten wenig praktikabel.

Der Market-Asset-Disclaimer hingegen baut auf der in der Praxis verbreiteten Vorgehensweise auf, dem gesamten Unternehmen, einzelnen Geschäftsfeldern oder Projektklassen einen Kalkulationszins als Mindestrendite vorzugeben. Dieser wird in gewissen Abständen überprüft und an die globalen Randbedingungen (z. B. Zinsniveau, Markttrends, allgemeine Finanzierungskosten des Unternehmens, etc.) angepasst. Bei Verwendung des MAD-Ansatzes wird nun für eine der Investitionsalternative im Projekt angenommen, dass sie mit dem vorgegebenen Zins richtig bewertet ist. Sie bildet deshalb das Referenzobjekt. Alle anderen Alternativen werden dann relativ zu dieser Referenz richtig bewertet.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Vergleich von produktionstechnischen Alternativen mit einem unterschiedlichen Grad an Wandlungsfähigkeit angestrebt. Es ist zusammenfassend festzuhalten, dass der MAD-Ansatz genau auf diese Fragestellung ausgerichtet ist. Da er sich zudem durch hohe Anwendungsorientierung auszeichnet (KALLIGEROS 2006, S. 43), baut die in Kapitel 6 dargestellte Methode auf diesem Verfahren auf und kombiniert sie mit einem Baumansatz, der im Vergleich zu analytischen oder simulativen Modellen die höchste Transparenz besitzt.

5.5 Zwischenfazit und kritische Würdigung der Realoptionstheorie

Es ist unbestritten, dass die Realoptionsbewertung in der Praxis bisher wenig Verbreitung gefunden hat (PESKE 2002, S. 90 ff., VOLLRATH 2003). In der Forschungslandschaft überwiegen zwar die Arbeiten, die ihr eine hohe Bedeutung zumessen und sie als anderen Methoden deutlich überlegenes Verfahren zur Bewertung von Handlungsmöglichkeiten ansehen (z. B. COPELAND ET AL. 2000, S. 395). Es gibt aber auch gegenteilige Meinungen, wonach eine deutlich differenziertere Beurteilung erforderlich sei (z. B. ADNER & LEVINTHAL 2004). Auch für die Bewertung produktionstechnischer Handlungsfreiräume erachten einige Autoren Realoptionen als geeignet (AMICO ET AL. 2003a, ABELE ET AL. 2006b, SUDHOFF 2007), andere lehnen ihre Anwendung ab (HEGER 2007). Vor dem Hintergrund dieses uneinheitlichen Bildes ist die Bedeutung der Realoptionsbewertung auch in dieser Arbeit zu hinterfragen.

Die Kritik zielt meist darauf ab, dass die Analogie zwischen Finanz- und Realoptionen in der Praxis Einschränkungen unterliegt (HOMMEL & PRITSCH 1999b, S. 15 ff., HUNGENBERG ET AL. 2005, S. 12). Es wird vor allem auf das Fehlen eines am Markt gehandelter Basiswertes, der die Risikostruktur des zu bewertenden

den Investitionsprojektes widerspiegelt, hingewiesen sowie die hohe Komplexität des Verfahrens bemängelt (HEGER 2007, S. 47). Der Verlust des Marktbezuges verhindere eine korrekte Ermittlung eines risikoangepassten Zinses (DANGL & KOPEL 2003, S. 39), so dass die Optionsbewertung eine Scheingenauigkeit erzeuge.

Auch die Befürworter der Realoptionsbewertung räumen diese Probleme ein (HUNGENBERG ET AL. 2005, S. 12). Allerdings betonen sie, dass es sich bei dem Konzept nicht nur um eine elegante Möglichkeit handelt, einen risikoangepassten Zins zu bestimmen. Vielmehr sind Realoptionen ein Weg, um Handlungsmöglichkeiten zu beschreiben (WANG 2005, S. 132). Mehr und mehr setzt sich die Meinung durch, dass es sich um „*Real Options as a Way of Thinking*“ handelt (TRIANIS & BORISON 2001, S. 10, ähnlich LANDNER & PINCHES 1998, S. 541, HOMMEL & PRITSCH 1999b, S. 43, PRITSCH 2000, S. 197, DE NEUFVILLE 2001, S. 12, WANG 2005, S. 131 ff.), dessen formalisierter Modellierungsprozess häufig erhebliche Erkenntnisgewinne ermöglicht (HOMMEL & PRITSCH 1999b, S. 43)

Diese Sichtweise ist insbesondere bei der Bewertung von ingenieurwissenschaftlichen Projekten sinnvoll, bei denen Annahmen über die Zukunft häufig grobe Schätzungen sind. Das Augenmerk ist hier nicht auf die Ermittlung eines absoluten Wertes gerichtet, sondern auf einen Vergleich zwischen Alternativen und damit zweier Werte relativ zueinander, um so eine Entscheidung treffen zu können (DE NEUFVILLE 2001, S. 11, KALLIGEROS 2006, S. 45 ff.). Dazu ist oft auch eine unpräzise Näherung ausreichend, die anders als der bisher als Maßgröße angewandte Kapitalwert zusätzlich Handlungsmöglichkeiten berücksichtigt (LUEHRMAN 1998a, S. 51). Diese Sichtweise korrespondiert mit der in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Auswahl eines Baumansatzes und des Market-Asset-Disclaimers.

Bei der Kritik muss auch berücksichtigt werden, dass die Realoptionsbewertung und das Entscheidungsbaumverfahren nicht nur konzeptionell eng miteinander verwandt sind (COPELAND & KEENAN 1998, S. 44), sondern dass beide Vorgehensweisen bei korrekter Anwendung zu identischen Ergebnissen führen (SMITH & NAU 1995, DANGL & KOPEL 2003). Der Vorteil der Realoptionsbewertung liegt somit vor allem in der *Formalisierung* des *Options Thinking*. Durch die Duplikation und die beim MAD-Ansatz notwendige Berechnung der Projektwerte jeweils mit und ohne Optionen werden die bestehenden Unsicherheiten stärker fokussiert und der Wert von Handlungsmöglichkeiten besonders hervorgehoben

(DE NEUFVILLE 2001). Hinzu kommt eine durch die Modelle offerierte Formalisier- und Explizierbarkeit (NIPPA & PETZOLD 2000, S. 18), die hilft, sich bei der Analyse, Modellierung und Bewertung auf die wichtigsten Optionen zu konzentrieren (WANG 2005, S. 133).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass

- der Mehrwert der Realoptionsbewertung für diese Arbeit nicht primär in der präziseren Bestimmung eines risikoangepassten Zinssatzes besteht, sondern dass
- durch *Options Thinking* die Identifikation wichtiger Optionen und deren wertorientierte Verwendung und Steuerung gefördert wird und dass
- die gewählten Modelle und Ansätze zur Bestimmung des Underlying (Baumansatz, MAD-Ansatz) darauf abzielen, einen Vergleich mehrerer Alternativen durchzuführen und dabei die produktionstechnischen Handlungsmöglichkeiten zu berücksichtigen.

Aus diesen Gründen wird die Realoptionsbewertung als geeignetes und vergleichbaren anderen Bewertungsverfahren überlegenes Hilfsmittel angesehen, um die Zielstellung einer Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme zu erreichen.

6 Methode zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme

6.1 Bewertungsvorgehen und Aufbau der Methode

Die Methode, die in der vorliegenden Arbeit entwickelt und in diesem Kapitel beschrieben wird, hat eine monetäre Bewertung mehrerer technischer Alternativen relativ zueinander zum Ziel. Es soll der Wert der Anpassungsfähigkeit quantifiziert und so der Nutzen der Wandlungsfähigkeit aufgezeigt werden. Ein geeignetes Verfahren dafür ist die im vorangegangenen Kapitel detailliert untersuchte Realloptionsbewertung, die jedoch im Vergleich zu herkömmlichen Investitionsrechenverfahren deutlich komplexer ist und deshalb ein effizientes und effektives Vorgehen erfordert. In diesem Abschnitt wird erläutert, aus welchen Schritten der *Prozess der Realloptionsbewertung* für wandlungsfähige Produktionssysteme besteht und wie diese in einer Methode zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme zusammenwirken.

Bei Investitionsrechenverfahren als zukunftsorientierte Entscheidungsmodelle handelt es sich, wie bei allen Modellen, um eine Abstraktion der Wirklichkeit. Grundsätzlich besteht dabei ein Zielkonflikt zwischen der Modellkomplexität, der Genauigkeit und der Richtigkeit einerseits sowie der Verständlichkeit und Handhabbarkeit andererseits. Je umfassender das Modell ist, desto schwerer fällt es, die bestehenden Zusammenhänge zu erkennen und die für eine Entscheidungsfindung wesentlichen Informationen zu extrahieren.

Um eine Analyseparalyse (COURTNEY 2001, S. 132) als Folge eines zu komplexen Modells zu vermeiden, wird deshalb ein stufenweises Vorgehen vorgeschlagen, in dem die Bewertungsgenauigkeit und damit der Bewertungsaufwand schrittweise zunehmen (Abbildung 22). Durch die Skalierung des Modellumfangs wird zum einen der Nutzer des Modells Stück für Stück mit der Problemstellung vertraut gemacht. Zum anderen können viele Entscheidungen bereits auf der Basis weniger Informationen zu Beginn der Bewertung getroffen werden, so dass im Anwendungsfall die komplexe Modellierung zielgerichtet auf wenige technische Alternativen eingeschränkt ist oder ganz entfallen kann.

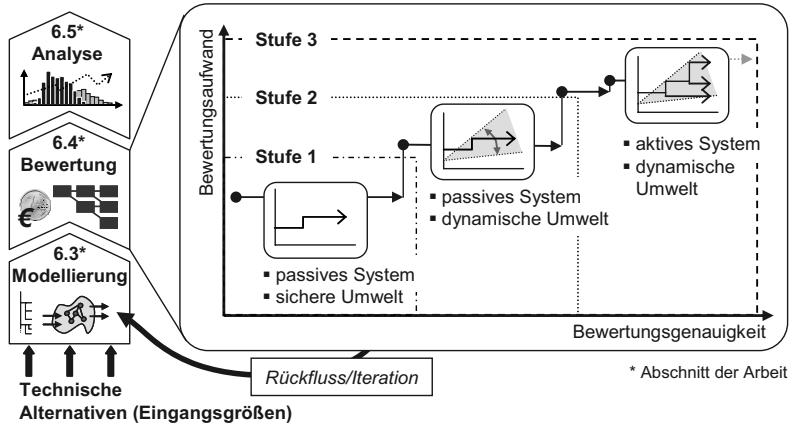


Abbildung 22: Bestandteile der Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme und wesentliche Schritte eines iterativen Bewertungsprozesses

Den Ausgangspunkt des Bewertungsprozesses bildet eine statische Kapitalwertrechnung, wie sie auch bisher in der Unternehmenspraxis verbreitet ist (Stufe 1). Diese geht zwar von einer erwarteten, quasi-sicheren Zukunft sowie einer starren Planung und damit passiven, nicht zu ungeplanten Anpassungen fähigen Produktionssystemen aus. Sie ist aber geeignet, um im Sinne eines Screening nach WANG (2005) diejenigen Alternativen von einer weiteren Bewertung auszuschließen, die trotz geringerer Wandlungsfähigkeit einen niedrigen (statischen) Kapitalwert besitzen.

In Stufe 2 wird untersucht, welchen Einfluss ein sich dynamisch veränderndes Umfeld auf die Wirtschaftlichkeit der verbleibenden technisch-organisatorischen Alternativen besitzt. Das hängt sowohl von der Größe der Unsicherheit ab als auch von der Stärke und Intensität, in der das Produktionssystem auf eine Veränderung der Eingangsgrößen reagiert. Zusätzlich zur Ermittlung dieses *Anpassungsbedarfes* wird in der zweiten Phase der Bewertung auch abgeschätzt, welches *Anpassungspotenzial* durch verschiedene Realloptionen besteht und auf der Basis beider Kriterien eine Rangfolge der Optionen gebildet.

Die Annahme passiver Systeme bleibt bis zur 3. Stufe bestehen, die die eigentliche Realloptionsbewertung umfasst. In dieser werden nacheinander einzelne Handlungsmöglichkeiten, welche die Fähigkeit einer Alternative zu einer aktiven Anpassung während der Projektlaufzeit beschreiben, wirtschaftlich bewertet.

Hierbei ist auf dieser Stufe auch die Fähigkeit zur Informationsverarbeitung und zu aktiven Entscheidungen während der Projektlaufzeit berücksichtigt. Da nach jeder einzelnen Berechnung eines Realloptionswertes über die Fortführung der Bewertung entschieden wird, ist die geforderte Effizienz und schrittweise Verfeinerung des Bewertungsprozesses sichergestellt.

Grundsätzlich ist es unmöglich, alles genau zu bewerten (FABRYCKY & BLANCHARD 1991, S. 131) und insbesondere bereits zu Beginn eines Projektes die relevanten Einflussgrößen zu identifizieren. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die einzelnen Stufen nicht einmalig sequenziell durchlaufen werden, sondern dass es zu Iterationen kommt. Entsprechend erfolgt die Darstellung der Methode nicht unterteilt nach Stufen und den damit verbundenen Prozessschritten, sondern sie ist inhaltlich in die Modellierung (Abschnitt 6.3), die Bewertung (Abschnitt 6.4) und die Analyse (Abschnitt 6.5) gegliedert (Abbildung 22).

6.2 Annahmen und Eingrenzungen

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird von mehreren Annahmen und Einschränkungen ausgegangen, die nachfolgend zusammengefasst aufgeführt sind:

- Als Eingangsgröße liegen bereits geplante, alternative Produktionssysteme vor, deren Wirtschaftlichkeit zu ermitteln ist.
- Für jede zu bewertende Alternative A_j ist der Grad der Wandlungsfähigkeit $w(A_j)$ mit einer geeigneten Methode (vgl. z.B. ZÄH ET AL. 2004, ZAEH ET AL. 2005c, DRABOW 2006, HEGER 2007) bestimmt und die Konzepte sind entsprechend nach ihrer relativen Veränderungsfähigkeit sortiert worden.
- Es wird angenommen, dass alle Ausgaben bzw. Einnahmen sofort zahlungswirksam werden und somit kein Unterschied zu Auszahlungen bzw. Einzahlungen besteht. Die beiden Begriffspaare sind in dieser Arbeit nachfolgend bedeutungsgleich verwendet (vgl. WÖHE & DÖRING 2002, S. 826 ff.).
- Ferner seien Ausgaben, Aufwand und Kosten bzw. Einnahmen, Ertrag und Leistung ebenfalls deckungsgleich. Eine Voraussetzung dafür ist, dass nur der betriebliche Aufwand (Zweckaufwand) und nur die Grundkosten in die Berechnung Eingang finden. Insbesondere werden kalkulatorische Kosten nicht berücksichtigt (vgl. WÖHE & DÖRING 2002, S. 826 ff.).

- Der risikolose Zins wird, je nach Projektlaufzeit, aus der Rendite deutscher Staatsanleihen oder dem EURIBOR ermittelt (vgl. WÖHE & DÖRING 2002, S. 717).
- Die unterschiedlichen technischen Alternativen besitzen dieselbe Lebensdauer bzw. die Wirtschaftlichkeit eines Systems wird nur anhand einer definierten Zeitspanne beurteilt. Darüber hinaus gehende Nutzungen werden über Abschlusszahlungen (z.B. angenommene Verkaufserlöse) berücksichtigt.
- Im Unternehmen sind Renditevorgaben definiert, welche die Kapitalstruktur des Unternehmens, das bestehende Zinsniveau an den Kapitalmärkten sowie die branchen- und unternehmensspezifische Risikostruktur berücksichtigen. Diese Renditevorgaben werden in regelmäßigen Abständen überprüft und ggf. angepasst.

6.3 Bewertungsorientierte Modellierung der Produktion

6.3.1 Modellbestandteile und Vorgehensschritte

Vor der Durchführung der eigentlichen Bewertung muss zunächst ein bewertungsorientiertes Modell der Produktion aufgestellt werden, in dem gemäß der allgemeinen Modelldefinition die wesentlichen der für diese Aufgabe notwendigen Eigenschaften des Systems hervorgehoben sind und die übrigen vernachlässigt werden (BROCKHAUS 1991, S. 706).

Aus der Charakterisierung der Problemstellung (Abschnitt 2.1.5) und den in Kapitel 4 beschriebenen Anforderungen lassen sich drei Elemente ableiten, die für eine Bewertung flexibler und wandlungsfähiger Produktionssysteme zu berücksichtigen sind: *Unsicherheiten* über zukünftige Entwicklungen, die *Lebenszykluskosten* der jeweiligen Systemkonzepte sowie deren *Anpassungsmöglichkeiten* an ein verändertes Umfeld. In den folgenden Abschnitten wird die Entwicklung entsprechender Teilmodelle beschrieben.

Aus dem in Abschnitt 2.1.4 bereits erläuterten Rezeptormodell lässt sich nach einer weiteren Detaillierung der Rezeptoren ein *Umfeldprofil* für das Projekt aufstellen (Abschnitt 6.3.2), das die Führungsgrößen der Produktion definiert sowie die herrschenden Unsicherheiten aufzeigt und beschreibt. Aufbauend auf einer allgemeinen Kostengliederung und etablierten Kostenfunktionen ergeben sich für die zu vergleichenden Systeme ferner *Kostenprofile* (Abschnitt 6.3.3). Aus einem

Katalog, der generelle Handlungsmöglichkeiten zur Anpassung der Produktion enthält, werden für die einzelnen Alternativen durchführbare Veränderungsmaßnahmen bestimmt und in ihrer spezifischen Ausprägung konkretisiert. Durch deren weitere Priorisierung und Filterung ergibt sich daraus schließlich das *Optionsprofil* der jeweiligen technischen Alternative (Abschnitt 6.3.4). Die folgende Abbildung 23 fasst die aufgezeigten Modellbestandteile in einer Übersicht zusammen.

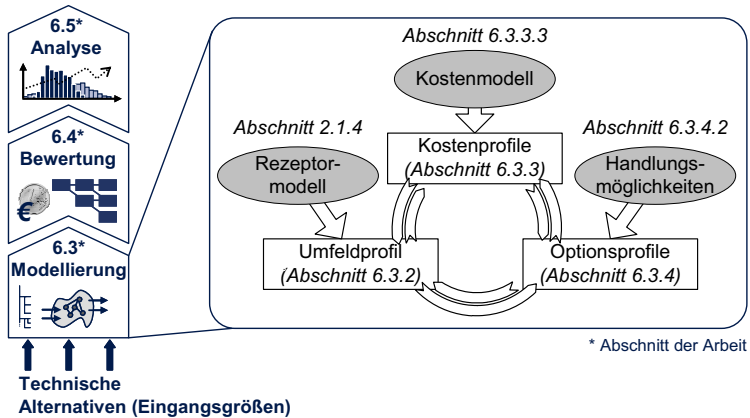


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen den einzelnen Vorgehensschritten zur Vorbereitung der Realloptionsbewertung

Aus Abbildung 23 wird ersichtlich, dass zwischen dem Umfeldprofil sowie den Kosten- und Optionsprofilen wechselseitige Beziehungen bestehen. Das Umfeldprofil hat Einfluss darauf, welche Kosten zu modellieren sind und welches Detaillierungsniveau, bspw. in Abhängigkeit von den verfügbaren Daten, sinnvoll ist. Umgekehrt sind in einer bestehenden Kostenstruktur Informationen technologischer und organisatorischer Art enthalten, die zu einer sinnvollen Fokussierung des Umfeldprofils beitragen. Die Optionsprofile werden erst durch den Bezug zur Umwelt sinnvoll eingeschränkt und beeinflussen je nach der zu bewertenden Realloption die Art und die Genauigkeit der Kostenmodellierung. Sie können aber auch nicht ohne Kenntnis der bestehenden Kostenstruktur priorisiert werden. Aus diesem Grund ist keine rein sequenzielle Vorgehensweise möglich, sondern ein mehrfaches Durchlaufen der in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen Tätigkeiten notwendig.

6.3.2 Umfeldprofil

6.3.2.1 Begriffsklärung

Ein *Umfeldprofil* beschreibt, welche außerhalb der Systemgrenze festgelegten Anforderungen die Produktion erfüllen muss und wie sich diese in der Zukunft verändern werden. Es hängt somit von den definierten Projekthaltungen ab, die z.B. die zu erfüllende Produktionsaufgabe oder auch den Planungsinhalt und -umfang bestimmen. Zentrale Aufgabe des Umfeldprofils ist es, die unsicheren Einflussfaktoren zu identifizieren, deren mögliche Entwicklungen darzustellen und ihre Bedeutung in Abhängigkeit ihrer Wirkung auf die wirtschaftliche Leistung des Projektes zu bewerten. In den folgenden Abschnitten sind die zum Aufstellen des Umfeldprofils erforderlichen Schritte erklärt.

6.3.2.2 Übernahme der Planungsdaten

Zu Beginn der Bewertung erfolgt eine Ermittlung der Daten und der Annahmen, auf deren Basis die zu vergleichenden Konzepte für alternative Produktionssysteme erarbeitet worden sind. Es handelt sich dabei um die Rekapitulation der bereits im Rahmen der Ziel- und Vorplanung des Projektes sowie der Konzeptplanung generierten Daten bzw. um deren ggf. erforderliche Ergänzung.

Die Informationen lassen sich im Wesentlichen vier Bereichen zuordnen. Durch die Analyse von *Prozess- oder Ablaufdarstellungen* wird die organisatorische und logistische Einbindung des geplanten Bereiches im Kontext der Auftragsabwicklung (AGGTELEKY 1990, S. 36 ff.) verdeutlicht. Eine *Produktanalyse* beschreibt das mit einem neuen System zu produzierende Produktspektrum, die funktionale und technische Struktur der Produkte sowie deren Arbeitspläne (EVERSHEIM 1989, S. 162 ff., BERGHOLZ 2005, S. 164). Die Analyse des *Produktionsprogramm* ermöglicht Aussagen über Auftragsarten, Stückzahlen und das Abrufverhalten der Kunden (KETTNER ET AL. 1984, S. 43 ff., GRUNDIG 2006, S. 52 ff.). Bei der *Wertkettenanalyse* schließlich wird die Eigenwertschöpfungstiefe und -breite geprüft, was sich in einer Sammlung der internen und externen Lieferantenbeziehungen für den Planungsbereich äußert (BERGHOLZ 2005, S. 165). Sollten einzelne oder mehrere dieser Informationen nicht verfügbar sein, ist deren Erhebung vor Beginn der Bewertung erforderlich. Zu klären sind darüber hinaus auch der Planungsstand der alternativen Produktionssysteme sowie die Fabrikebene, auf der die Konzepte eingeordnet werden können (vgl. dazu

WIENDAHL ET AL. 2007). Beides sind wichtige Indikatoren dafür, um das anfängliche Detaillierungsniveau der Modellierung festzulegen.

Insgesamt ist es das Ziel dieses Arbeitsschrittes, vorhandene bzw. bereits erhobene Daten der vorangegangenen Planungsphasen zu sammeln, diese allen an der Bewertung beteiligten Personen zugänglich zu machen und so ein einheitliches Verständnis vom Projekt und der technischen Planungssituation zu schaffen. Dies umfasst sowohl die bestehenden Fabrikstrukturen und Randbedingungen als auch die Einbindung in den Prozess der Auftragsabwicklung.

6.3.2.3 Aufnahme des Planungsumfeldes

In den meisten Fällen sind bei der Planung und der Ermittlung von Planungsdaten mögliche Unsicherheiten bereits teilweise berücksichtigt, bspw. in Form von Best- oder Worst-Case-Betrachtungen. In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie mit Bezug auf das Rezeptormodell (vgl. Abschnitt 2.1.4) eine systematische Beschreibung dynamischer Entwicklungen erfolgen kann. Die Untersuchung baut auf der vorangegangenen Übernahme der Planungsdaten auf, die mit einer primär internen Sicht vor allem ein einheitliches Verständnis des technischen Projektes fördert, und fokussiert das unsichere externe Produktionsumfeld.

Wie in Abschnitt 2.1.4 erläutert wurde, lassen sich die an die Produktion und die Produktionssystemplanung gestellten Anforderungen durch die sechs Rezeptoren *Stückzahl*, *Produkt*, *Qualität*, *Zeit*, *Kosten* und *Technologie* logisch zusammenfassen und als Führungsgrößen deuten. Die Einteilung reicht jedoch für eine Beschreibung konkreter Managementvorgaben nicht aus. In Tabelle 7 sind die einzelnen Rezeptoren deshalb weiter detailliert. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass die aufgeführten möglichen Anforderungen an die Produktion bereits das Ergebnis einer Interpretation von Entwicklungen im Umfeld des Unternehmens durch das Management sind. Dies lässt sich mit einem Beispiel illustrieren: Als Reaktion auf generelle Marktentwicklungen (z.B. Markteintritt eines Anbieters kostengünstiger Produkte) werden unternehmensspezifische Handlungsstrategien entwickelt (z.B. Differenzierung durch stärkere Kundenorientierung), die sich für die Produktion in veränderten Vorgaben (z.B. kürzere Lieferzeit) äußern. Die Produktionssystemplanung hat dann verschiedene Möglichkeiten, auf die Veränderung der Führungsgröße zu reagieren (z.B. Verschiebung des Kundenentkopplungspunktes und teilweise Umstellung auf Pull-Fertigung), aus denen sich Herausforderungen (z.B. Verringerung der Losgrößen) und konkreter Anpassungsbedarf (z.B. neues Werkzeug) ergeben.

Rezeptor	Führungsgrößen der Produktion	
Stückzahl	<u>auftragsunabhängig (lang- u. mittel-fristig)</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ kumulierte Gesamtmenge über den Lebenszyklus ▪ gesamte Produktionsmenge einer Periode ▪ (Gesamt-)Stückzahlanteil einzelner Varianten ▪ Länge des Lebenszyklus ▪ Stärke der Saisonalität 	<u>auftragsabhängig (kurzfristig)</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anzahl Aufträge pro Zeiteinheit: erwarteter Wert und Schwankung ▪ Bestellmenge pro Kundenauftrag: erwarteter Wert und Schwankung ▪ Variantenverteilung pro Kundenauftrag: erwarteter Wert und Schwankung
Produkt	<u>Baustruktur</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anzahl verbauter Teile ▪ Art der verbauten Materialien und Teile ▪ Fertigungs- und Verbaureihenfolge 	<u>Fertigungs- und Montagetechnologien</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anzahl und Art der Verfahren ▪ Prozesszeiten <u>Werkstückgestaltung</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Form ▪ Abmessungen ▪ Masse
Qualität	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Material ▪ Toleranzen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lieferqualität (gefordertes ppm-Niveau) ▪ Prüfstandards (Normen)
Zeit	<u>Outbound</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Länge der Bestellvorausschau ▪ Kundenreaktionszeit (Delivery Lead Time) 	<u>Inbound</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Länge der Wiederbeschaffungszeit ▪ Schwankung der Wiederbeschaffungszeit
Kosten	<u>Kosten für Leistungsfaktoren</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Arbeit <ul style="list-style-type: none"> ○ Lohn- und Gehaltsniveau für dispositive Arbeit (Planung, Steuerung, Kontrolle) ○ Lohn- und Gehaltsniveau für operative Arbeit (wertschöpfende Arbeit, produktionsnahe Dienstleistungen wie Logistik, Instandhaltung) ▪ Betriebsmittel <ul style="list-style-type: none"> ○ Preise und Mieten für Grundstücke und Gebäude ○ Preise für Maschinen und Anlagen ○ Preise für Einrichtungen (Werkzeuge, Vorrichtungen, Hilfsmittel) ▪ Werkstoffe <ul style="list-style-type: none"> ○ Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffpreise (inkl. Energie) ○ Marktpreise für Halb- und Fertigerzeugnisse ▪ externe Dienstleistungen 	
Technologie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ neue Technologie verfügbar (Rationalisierung, Verbesserung) ▪ neue Technologie gefordert (externe Anforderung) 	

Tabelle 7: *Detailierung der Rezeptoren der Produktion*

Mit Hilfe des in Abbildung 24 illustrierten Schemas lassen sich die zukünftigen, erwarteten Entwicklungen der Führungsgrößen übersichtlich darstellen. Für die einzelnen Faktoren wird qualitativ bestimmt, ob eine Änderung der aktuellen Ausprägung über die Zeit zu erwarten ist (*Dynamik*), welche Ereignisse zu Veränderungen der Produktionsstruktur führen könnten (*Strukturbrüche*) und ob eine gewisse *Unschärfe* in der Prognose besteht. Diese tritt insbesondere bei Faktoren auf, die sich über einen größeren, zusammenhängenden Wertebereich erstrecken und bei denen die zukünftigen Ausprägungen um den prognostizierten, erwarteten Wert schwanken können. Die sog. ereignisgetriebenen Veränderungen hingegen besitzen einen binären Charakter (Ereignis tritt ein oder tritt nicht ein) und sind deshalb frei von Unschärfe im obigen Sinn, was für eine spätere detaillierte Modellierung von Bedeutung ist. Abschließend ist die jeweilige Führungsgröße noch nach ihrer Bedeutung abzuschätzen, um die Komplexität der nachfolgenden Analysen zu reduzieren.

Führungsgröße		Strukturbrüche Dynamik	Ereignisse	Bedeutung* Unschärfe
S	kumulierte Gesamtmenge über den Lebenszyklus hinweg			X B
	maximale Produktionsmenge der Variante 1 pro Periode	X		X A
Q	Material		X ▪ Einführung eines Kunststoffgehäuses	B
Z	Kundenreaktionszeit		X ▪ Umstellung auf eine JIS-Versorgung	B
	Wiederbeschaffungszeit	X		X A
K	Lohnniveau für operative Arbeit	X		X B
T	neue Technologien		X ▪ positiver Versuch in der Vorentwicklung	A

Legende * Bedeutung hier beispielhaft bewertet

S : Stückzahl Z : Zeit T : Technologie A : große Bedeutung C : geringe Bedeutung
 Q : Qualität K : Kosten B : mittlere Bedeutung

Abbildung 24: Schema zum Aufstellen eines qualitativen Umfeldprofils mit beispielhaft ausgewählten Rezeptoren und Führungsgrößen

SUDHOFF (2007, S. 120 f.) stellt dafür ein geeignetes Verfahren vor. Mit diesem lässt sich die Bedeutung einer Unsicherheit anhand des Kriteriums *Auswirkungen der Unsicherheit auf den Kapitalwert, der Wahrscheinlichkeit des Auftretens ei-*

ner Schwankung und ihrer Prognosefähigkeit differenziert beurteilen. Das Verfahren ist damit grundsätzlich auch für diese Arbeit geeignet. Allerdings soll zu dem Zeitpunkt, zu dem die Analyse des Planungsumfeldes durchgeführt wird, lediglich eine grobe Einschätzung der Bedeutung der Unsicherheiten übergreifend für alle technischen Alternativen gemeinsam erfolgen. Aus diesem Grund ist eine Klassifizierung in A-Unsicherheiten, die unbedingt zu berücksichtigen sind, B-Unsicherheiten, die ggf. in einer zukünftigen Iteration genauer zu untersuchen sind, und C-Größen, die nachfolgend vernachlässigt werden können, ausreichend. Diese Einteilung entspricht der Einschätzung weiterer Autoren. So führen COPELAND & ANTIKAROV (2001, S. 236) an, dass der größte Teil der Unsicherheit eines Projektwertes meist auf die Schwankung von nur zwei bis drei Faktoren zurückzuführen ist. Auch HUNGENBERG (2002, S. 28) empfiehlt gemäß der 80:20-Regel eine Konzentration auf wenige Größen. Als alternative, im Vergleich zur Vorgehensweise von SUDHOFF weniger differenzierte Verfahren kommen deshalb auch ein paarweiser Vergleich oder Expertenschätzungen in Betracht.

Um das in Abbildung 24 skizzierte Schema zu vervollständigen, sind zwei Ansätze möglich. Bei einer Bottom-up-Vorgehensweise schätzt das Planungsteam auf der Basis des eigenen, z. T. impliziten Erfahrungswissens und unter Verwendung vorhandener historischer Daten eine Veränderung der Ausprägungen der Rezeptoren ab. Der Ansatz ist auswirkungsorientiert, d. h. mögliche zukünftige Realisierungen einzelner Merkmale werden beschrieben, ohne explizit die Gründe dafür aufzuzeigen. Diese Vorgehensweise eignet sich, wenn bereits vergleichbare Projekte durchgeführt worden sind und der Planungsumfang relativ gering ist.

Je umfangreicher die Planungsaufgabe und je weniger Wissen aus ähnlichen Projekten vorhanden ist, desto eher empfiehlt sich ein Top-down-Vorgehen. Dieses basiert auf der Szenarioanalyse, bei der verschiedene konsistente Zukunftsbilder erzeugt werden. Das Verfahren findet in seinen unterschiedlichen Varianten seit mehreren Jahren in vielen Bereichen Anwendung und ist in der Literatur umfangreich dokumentiert (z. B. SCHNAARS 1987, SCHOEMAKER 1995, GAUSEMEIER ET AL. 1996, MILLER & WALLER 2003). Auch in der Fabrikplanung wird es genutzt (HERNÁNDEZ 2003). Ein Vorteil der Szenariotechnik liegt darin, dass über die Analyse von bestimmten Schlüsselfaktoren und deren Effekten auf die Fabrik konkrete Wirkgefüge abgeleitet werden, die eine bestimmte Ausprägung eines Rezeptors erklären. Allerdings ist ein relativ hoher Aufwand erforderlich, um eine vollständige Untersuchung durchzuführen (HEGER 2007, S. 106).

Die Aufnahme des dynamischen Planungsumfeldes fördert das Verständnis des bestehenden Umfeldes. Das in Abbildung 24 illustrierte, übersichtliche Analyse-schemata zeigt qualitativ auf, welche Veränderungen im Hinblick auf die Führungsgrößen erwartet und wie deren Bedeutung für die Produktion vom Planungsteam eingeschätzt werden. Es ist im Sinne des grundlegenden Stufenmodells einer schrittweisen Detaillierung der Ausgangspunkt, um nachfolgend ausgewählte Unsicherheiten genauer zu untersuchen und zu modellieren (Abschnitt 6.4.3.1). Die in diesem Abschnitt beschriebene Aufnahme des dynamischen Planungsumfeldes ist zwar eine Aufgabe, die zu Beginn einer Bewertung auszuführen, die aber nie vollständig abgeschlossen ist. Sie bedarf im Verlaufe des Projektes bei weiterem Erkenntnisgewinn, insbesondere durch die nachfolgend beschriebene Kostenmodellierung, einer regelmäßigen Überprüfung und Aktualisierung.

6.3.3 Kostenprofile

6.3.3.1 Begriffsklärung

In den nachfolgenden Abschnitten wird ein Kostenmodell hergeleitet, das die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme, das in diesem Kapitel einleitend erläuterte Prinzip der schrittweisen Detaillierung sowie die Realoptionsbewertung unterstützt. Auf die Angabe konkreter Berechnungsvorschriften für einzelne Kostenpositionen wird bewusst verzichtet, da dies aufgrund der Vielfältigkeit möglicher Fabrikplanungsprojekte nicht zielführend ist. Das entwickelte Kostenmodell definiert hingegen einen Bezugsrahmen, innerhalb dessen für jedes Projekt spezifische Modelle abzuleiten sind. Diese individuellen Ausprägungen, die sich daraus ergeben und die sich für die zu vergleichenden Alternativen unterscheiden können, werden als (alternativenabhängige) *Kostenprofile* bezeichnet.

6.3.3.2 Anforderungen an ein Kostenmodell zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme

Ein Kostenmodell reduziert in Anlehnung an die Modelldefinition nach STACHOWIAK (1973) das unternehmerische Handeln in seinen Folgen auf bewertete Leistungs- bzw. auf die durch zeitliche Abgrenzung daraus folgenden Zahlungsströme (zum Kostenbegriff vgl. WÖHE & DÖRING 2002, S. 357 f.). Speziell

im Kontext einer wandlungsfähigen Produktion ergeben sich daraus zahlreiche Anforderungen. Neben den Grundregeln der Kostenrechnung und den in Kapitel 4 aufgeführten Randbedingungen sind in einem Kostenmodell weitere Charakteristika zu berücksichtigen, die sich aus dem Gesamtaufbau der Methode zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme ableiten.

Das stufenweise Vorgehen erfordert zunächst nur eine grobe Kalkulation einzelner Kostenbestandteile, die dann nach und nach zu verfeinern ist. Um das Aufwand-Nutzen-Verhältnis zu minimieren, ist ein entsprechend *skalierbares Kostenmodell* notwendig, dessen Umfang, Genauigkeit und damit Komplexität während des Bewertungsprojektes zunehmen. So ist eine Konzentration der Modellierung auf die entscheidungsrelevanten Kostenelemente möglich. Gleichzeitig kann so berücksichtigt werden, dass der Informationsstand im Zuge der Planung zunimmt.

Weiterhin muss das Kostenmodell einerseits *universellen* Charakter besitzen, andererseits *individuell* auszugestalten sein. Dieses Spannungsfeld folgt daraus, dass die Methode für verschiedene Planungsfälle z.B. mit Fokus auf unterschiedliche Systemebenen anwendbar sein soll und somit einen universellen Rahmen vorgeben muss. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die Charakteristika der Projekte in unterschiedlichen Unternehmen, möglicherweise in verschiedenen Branchen, durch eine individuelle Anpassung des Modells auch in der Kostenstruktur abgebildet werden.

Neben der *Skalierbarkeit*, der *Universalität* und der *Individualität* wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten zwei weitere Anforderungen abgeleitet: Die Orientierung am gesamten Lebenszyklus eines Produktionssystems erfordert die Unterscheidung einzelner *Phasen* (Abschnitt 2.3), und nur durch die Einbeziehung von *Unsicherheiten* in die Berechnung kann die Fähigkeit eines Systems zur Veränderung bewertet werden (Abschnitt 4.3). Nachfolgend wird ein Kostenmodell entwickelt, welches alle diese Randbedingungen berücksichtigt.

6.3.3.3 Entwicklung eines Kostenmodells zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme

Ein Kostenmodell entsteht durch das Zusammenwirken einer *Kostengliederungsstruktur* und ausgewählter geeigneter *Kostenelemente*. Beide Begriffe werden im Folgenden zunächst kurz erläutert. Anschließend ist dann beschrieben, wie beide

Bestandteile des Modells in der entwickelten Methode ausgestaltet sind, um die im vorangegangenen Abschnitt 6.3.3.2 definierten Anforderungen zu erfüllen.

Die *Kostengliederungsstruktur* (engl. *cost breakdown structure*) dient dazu, einzelne Kostenelemente nach verschiedenen Gliederungsgrundsätzen zu systematisieren. Sie stellt ein Hilfsmittel dar, um relevante Bestandteile der Lebenszykluskosten zu identifizieren und konsistent zu ordnen.

Durch die Gliederungsstruktur werden einzelne *Kostenelemente* definiert, die bei der Anwendung des Modells zu quantifizieren sind. Kostenelemente können selbst wieder ein eigenes Modell und damit Gliederungsstrukturen beinhalten (FABRYCKY & BLANCHARD 1991, S. 134) oder aber die Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen der Kostenentstehung und der Kostenhöhe aufzeigen. Diese mathematische Verknüpfung mehrerer Eingangsgrößen wird nachfolgend als *Kostenfunktion* bezeichnet.

Kostengliederungsstruktur

Die Kostengliederungsstruktur, welche die in Abschnitt 6.3.3.2 aufgezeigten Anforderungen erfüllt, ist an die in der DIN EN 60300-3-3 zur Bestimmung von Lebenszykluskosten entwickelte Systematik angelehnt. Die dort vorgenommene Einordnung der einzelnen zu prognostizierenden Kostenelemente anhand der Dimensionen *verursachendes Objekt*, *Entstehungszeitpunkt* und *Art der Kosten* wird in dieser Arbeit übernommen und auf die Fabrikplanung übertragen.

Die Aktivitäten in den Planungs- und Gestaltungsfeldern der Fabrikplanung verursachen die Kosten und bestimmen deshalb die *erste Dimension* der Kostengliederungsstruktur. Die Einteilung in *Personal und Organisation*, *Betriebsmittel* sowie *Material, Gebäude und Fläche* ist an die Ausführungen von WIENDAHL ET AL. (1996) angelehnt. In den vorangegangenen Abschnitten zeigte sich vielfach die Bedeutung des Produktes für ein Modell zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme. Die Verantwortung für dessen Gestaltung liegt zwar in erster Linie bei der Entwicklung und Konstruktion. Allerdings bestehen starke Bestrebungen, im Zuge eines Simultaneous Engineering Anforderungen aus der Produktion bei der Produktentwicklung zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wird als zusätzliches Gliederungselement das *Produkt* hinzugenommen, das die Marktleistung stärker berücksichtigt.

Der Lebenszyklus eines Produktionssystems unterteilt sich in die Planungs-, die Beschaffungs- und die Inbetriebnahmephase, den Betrieb sowie die Entsorgung (VDI 2884, S. 5, VDMA 34160, S. 3). Es wird davon ausgegangen, dass der Pla-

nungsaufwand für die zu untersuchenden Alternativen grundsätzlich vergleichbar ist. Eventuell anfallende spezielle Kosten werden nachfolgend den Anschaffungs- und Herstellungskosten¹⁵ zugerechnet, so dass das entwickelte Kostenmodell die Betrachtungen mit der Betriebsphase beginnt. Diese wird von den Lebenszyklen der gefertigten Produkte überlagert, so dass sie sich als u. U. mehrmalige Abfolge von *Anlauf*, *Normalbetrieb* und *Auslauf* ergibt. Eine damit verbundene Umstellungsplanung wird zur Vereinfachung nicht als eigener Zeitabschnitt interpretiert, sondern nur über anfallende Einmalkosten berücksichtigt. Abschließend erfolgen dann *Abbau und Entsorgung* des Produktionssystems. Diese Phasen definieren den Lebenslauf des Produktionssystems und spannen die *zweite Dimension* der Gliederungsstruktur auf.

Die *dritte Dimension* orientiert sich an der individuellen Art der Kostenerfassung und der vorhandenen Kostenrechnungssysteme im Unternehmen. Die Anlehnung an ein bestehendes Schema von Aufwandskonten, über welche die betrieblichen Kosten ermittelt werden, hat mehrere Vorzüge. Zunächst wird die Akzeptanz der Methode gesteigert, da sie als Ergänzung und nicht als Ersatz etablierter Systeme verstanden wird. Zudem erhöht sich die Vergleichbarkeit und durch die teilweise Nutzung von Vergangenheitsdaten auch die Belastbarkeit der Ergebnisse. Eine ggf. vorhandene detaillierte hierarchische Struktur der Konten erleichtert es auch, die für die Bewertung im individuellen Fall notwendigen Kostenbestandteile zu identifizieren. Nachteilig ist, dass aufgrund der unternehmensindividuellen Ausgestaltung entsprechender Systeme keine allgemeingültige Kostengliederungsstruktur erstellt werden kann.

Die folgenden Ausführungen legen deshalb beispielhaft den Industriekontenrahmen zugrunde (IKR 1987). Er stellt eine Empfehlung für produzierende Unternehmen dar und ist als Muster und Vorlage gedacht, um unternehmensindividuelle Systeme zu entwickeln. Nach diesem Kontenrahmen lassen sich die Kostenarten auf oberster Ebene zu *Personalkosten*, *Material- und Verbrauchskosten*, *Gebäudekosten*, *externen Leistungen*, *Gemeinkosten* und *sonstigen Kosten* aggregieren. Da die Abschreibungen als kalkulatorische Größe bei der Investitionsrechnung keine Berücksichtigung finden, werden sie für den bestehenden Anwendungszweck durch den Posten *Investitionen* ersetzt. Auf diese Weise bleibt der Zeitpunkt der Zahlungsentstehung ersichtlich.

¹⁵ Nach § 255 Abs.1 HGB gehören alle Kosten des Erwerbs und der Inbetriebnahme inkl. Nebenkosten zu den Anschaffungskosten.

Die oberste Ebene der Kostengliederungsstruktur ist in Abbildung 25 zusammengefasst und beispielhaft für ein Element aufgebrochen. Die dem Planungsobjekt Produkt zugeordneten Kosten sind feiner gegliedert, indem zunächst nur die Zeitdauer betrachtet wird, in der mit dem gewählten Produktionssystem das Produkt 3 gefertigt wird. Dieses besteht im Beispiel aus zwei Modulen, für deren Herstellung externe Leistungen in Form von Transport und Lohnfertigung benötigt werden. Ausgehend von der durch das Beispiel beschriebenen Detaillierungsstufe ist eine Verfeinerung der Kosten jederzeit durchführbar. So ließe sich bspw. der Transport in Abhängigkeit von dem Verkehrsmittel unterscheiden; die Lohnfertigung könnte einen extern durchgeführten Prozess wie Beschichten oder manuelles Verpacken und Kommissionieren des Endproduktes durch einen Dienstleister beinhalten.

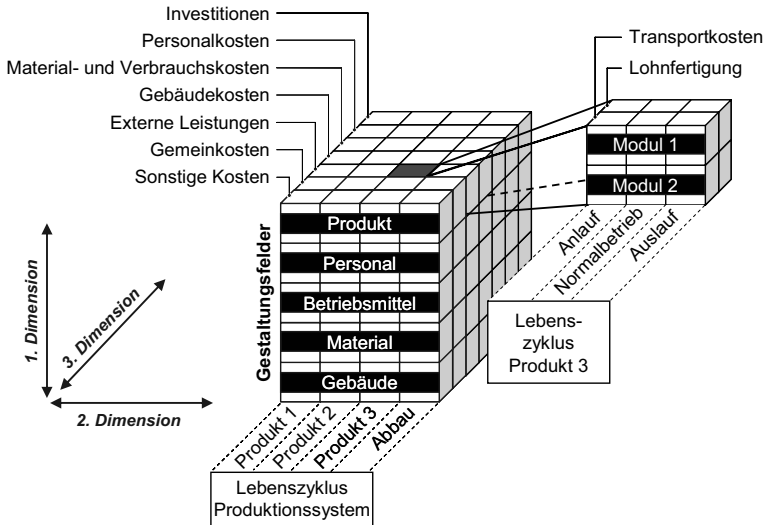


Abbildung 25: Kostengliederungsstruktur zur Bewertung von Produktionssystemen auf der obersten Ebene mit beispielhafter Detaillierung eines Kostenelementes (in Anlehnung an DIN EN 60300-3-3, S. 14)

Kostenfunktionen

Die einzelnen Würfel in der Kostengliederungsstruktur stellen Kostenelemente dar, die entweder eine genauere Gliederung aufweisen oder die eine Berechnungslogik in Form einer Kostenfunktion enthalten. Für unterschiedliche Anwendungsfälle existiert eine Vielzahl geeigneter Kostenfunktionen, deren voll-

ständige Wiedergabe im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend ist. Exemplarisch wird auf die bereits erwähnten Normen, Richtlinien und Standardwerke zur Lebenszykluskostenrechnung verwiesen, die umfassende Ausführungen zu Berechnungsvorschriften für verschiedenen Kostenkategorien enthalten (AIR 1939, DIN EN 60300-3-3, SAE M-110.2, VDI 2884, FABRYCKY & BLANCHARD 1991, DOHMS 2001, SCHIMMELPFENG 2002, VON BRIEL 2002).

Die aufgestellte Kostengliederungsstruktur ist ein Hilfsmittel, um die relevanten Bestandteile der Lebenszykluskosten zu identifizieren und konsistent zu ordnen. Demgegenüber beschreiben Kostenfunktionen eine mathematische Vorschrift, nach der eine Berechnung durchzuführen ist und die erst durch die Einordnung als ein Kostenelement der Gliederungsstruktur eine logische Bedeutung gewinnt. Dieser Zusammenhang wird in Kapitel 7 vertieft.

6.3.3.4 Auswahl von Kostenelementen

Durch die Auswahl der Kostenelemente und ihre Einordnung in die Gliederungsstruktur wird entschieden, welche Kosten zu berücksichtigen und wie sie zu verrechnen sind. Diese Festlegung ergibt sich aus dem Abgleich der Bewertungsanforderungen im Projekt, der Kostenrechnungssystematik des Unternehmens und dem aktuellen Planungsstand. Eine allgemeingültige Auswahl von Kostenelementen ist aufgrund der Heterogenität von Fabrikplanungsprojekten (SCHULTE 2002, KOLAKOWSKI ET AL. 2005, S. 214, MÜLLER 2007) nicht sinnvoll.

Wie bei der allgemeinen Aufnahme des Planungsumfeldes kann zwischen einer Bottom-up- und einer Top-down-Vorgehensweise unterschieden werden. Ausgehend von vergleichbaren Projekten in der Vergangenheit ist es zum einen möglich, existierende Kalkulationsschemata zu übertragen und anzupassen (bottom-up). Allerdings sind in den etablierten Rechenvorschriften die Flexibilitätsaspekte häufig nicht adäquat berücksichtigt (ZAEH ET AL. 2006, ZÄH ET AL. 2006). Top-down untersucht man dagegen ausgehend von dem bestehenden Umfeld sowie von einer technischen Produkt- und Prozessanalyse, welche Kostenelemente auszuwählen und wie sie zu verknüpfen sind, um die sich für die Alternativen evtl. unterscheidenden Auswirkungen eines dynamischen Umfeldes korrekt zu erfassen.

In der entwickelten Methode findet ein Gegenstromverfahren (vgl. SCHUH ET AL. 2007) Verwendung, in dem beide Aspekte berücksichtigt sind. Parallel zur Übernahme der Planungsdaten (Abschnitt 6.3.2.2) wird zunächst der eher erfah-

rungsgestützte Bottom-up-Ansatz verwendet, um bestehende Restriktionen und Besonderheiten der unternehmensspezifischen Kostenrechnung zu erkennen. Aus der Unsicherheitsanalyse (Abschnitt 6.3.2.3) und der Ableitung von Optionsprofilen (Abschnitt 6.3.4) ergibt sich eine analytische Betrachtung, die dann auf die Auswahl der Kostenelemente ausgedehnt wird.

Abschließend ist es erforderlich, für die festgelegten Kostenelemente die jeweiligen Kostenparameter alternativenabhängig (z.B. Platzbedarf zur Berechnung der Raumkosten) zu ermitteln. Das verdeutlicht nochmals, dass die Kostenprofile der zu vergleichenden Systeme nicht identisch sind. Es ist möglich, dass sich sowohl die Parameterausprägungen unterscheiden als auch dass bspw. in Abhängigkeit von den enthaltenen Realoptionen unterschiedliche Kostenelemente in die Berechnung einbezogen werden.

6.3.4 Optionsprofile

6.3.4.1 Begriffsklärung

Ziel des Abschnittes 6.3.4 ist es, die Herleitung von Optionsprofilen zu verdeutlichen. Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Ausführungen wird dieser Begriff kurz erläutert. Ein *Optionsprofil* beschreibt, welche konkreten Maßnahmen durchgeführt werden können, um eine technisch-organisatorische Alternative an veränderte Randbedingungen anzupassen. Es ist sowohl projekt- als auch alternativenspezifisch und deshalb vor jeder Bewertung neu zu erstellen.

6.3.4.2 Handlungsmöglichkeiten zur Veränderung der Produktion

Realoptionen stellen zukünftige Handlungsspielräume dar, operative Entscheidungen an veränderte Umweltbedingungen anzupassen (vgl. Definition 3 auf S. 38). Dieser abstrakte Begriff der Handlungsspielräume muss, um das Konzept der Realoptionen praktisch nutzen zu können, in seiner Bedeutung im Hinblick auf die Produktion und bezüglich möglicher Anpassungsmaßnahmen konkretisiert werden. In diesem Abschnitt erfolgt daher die Herleitung eines Kataloges genereller Handlungsmöglichkeiten, welche die Adaption von Fertigung und Montage an veränderte Umfeldbedingungen beschreiben. Aus dieser Sammlung sind dann in einem nachfolgenden Schritt (vgl. Abschnitt 6.3.4.3) Realoptionen zu extrahieren, indem die einzelnen Anpassungsmaßnahmen auf das Vorhanden-

sein der konstituierenden Merkmale Flexibilität, Unsicherheit und Irreversibilität untersucht werden.

Suchraum für Handlungsmöglichkeiten in der Produktion

Die Identifikation der Handlungsmöglichkeiten wird methodisch mit Hilfe eines Suchraumes vorgenommen, dessen Dimensionen *Gestaltungsfeld der Fabrik*, *Fabrikebene*, *Rezeptor der Produktion* und *Realoptionskategorie* sind.

Die Gestaltungsfelder umfassen Personal und Organisation, Betriebsmittel, Material sowie Gebäude und Fläche. Wie bereits in Abschnitt 6.3.3.3 erläutert wurde, bestimmt das Produkt den Charakter und die Ausprägung der Produktion in besonderem Maße und ist aus Sicht des Unternehmens ein entscheidendes Gestaltungsobjekt. Da jedoch die Verantwortung für die Produktentwicklung organisatorisch nicht in der Fabrikplanung zu sehen ist, wird dieses Gestaltungsfeld nicht in die Suche nach Handlungsmöglichkeiten einbezogen.

Die Ebenen einer Fabrik teilen sich nach HERNÁNDEZ (2003, S. 42 f.) und SUDHOFF (2007, S. 20) in Wertschöpfungsnetz, Fabrik- und Werksebene, Produktions- und Logistikbereich, Fertigungs-, Montage- und Logistiksystem sowie Arbeitsstation. Da die Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit auf einen einzelnen Standort beschränkt sind, wird die Ebene der Wertschöpfungsnetze nicht berücksichtigt.

In Abschnitt 2.1.4 konnten die Rezeptoren der Produktion, welche die extern gegebenen Führungsgrößen der Produktionssystemplanung beschreiben, identifiziert und in Abschnitt 6.3.2.3 weiter detailliert werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit bleibt der Suchraum in seiner Darstellung nachfolgend auf die obere Ebene der Rezeptoren beschränkt. Er beinhaltet dabei jedoch implizit die in Tabelle 7 auf S. 95 aufgeführten Unterpunkte.

Mit Wachstums-, Versicherungs- und Lernoptionen werden Realoptionen nach ihren unterschiedlichen ökonomischen Investitionsmotiven unterschieden (vgl. Abschnitt 2.2.4). Wachstums- bzw. Versicherungsoptionen ermöglichen es einem Unternehmen, ein bestehendes Projekt bei besonders guter bzw. schlechter Entwicklung an die veränderten Rahmenbedingungen anzupassen. Dementgegen beschreibt die Lernoption die Möglichkeit, bspw. durch Vorprojekte wie Marktstudien die Unsicherheit aufzulösen und erst dann zu investieren. Diese Arbeit fokussiert jedoch die Wahl zwischen verschiedenen Produktionssystemkonzepten, so dass hier die Entscheidung zur Durchführung einer Investition bereits getroffen wurde. Nachfolgend ist deshalb nur zwischen Wachstums- und Versiche-

rungsoptionen unterschieden. Die Abbildung 26 verdeutlicht den entwickelten Suchraum.

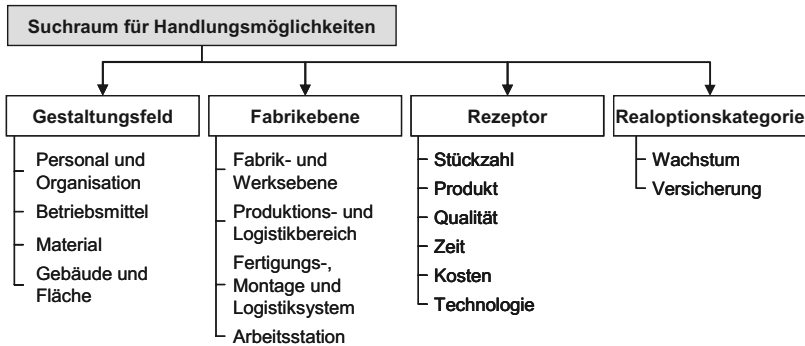


Abbildung 26: Suchraum zur Identifikation von Handlungsmöglichkeiten in der Produktion bei Veränderung des Umfeldes

Katalog der Handlungsmöglichkeiten in der Produktion

Der Katalog der Handlungsmöglichkeiten basiert auf bestehenden Ansätzen zur Unterstützung einer lebenszyklusorientierten Planung, die in das erarbeitete Schema zur Klassifikation (Abbildung 26) eingeordnet wurden (vgl. BREIT 1999, DOHMS 2001, DÜRRSCHMIDT 2001, SESTERHENN 2003, KRÜGER 2004). Darüber hinaus fanden aufbauend auf eigenen Projekterfahrungen sowie geführten Experteninterviews weitere Maßnahmen Eingang. Die prinzipielle Form des Kataloges ist in Abbildung 27 verdeutlicht, die einen Auszug aus dem Katalog der Handlungsmöglichkeiten für das Gestaltungsfeld Betriebsmittel zeigt. Eine vollständige Auflistung findet sich in Abschnitt 10.1. Grundsätzlich sind für jedes Gestaltungsfeld die Handlungsmöglichkeiten in einer eigenen Tabelle hinterlegt, die wiederum nach den Betrachtungsebenen unterteilt ist. Die dargestellte Zuordnung zwischen den einzelnen Maßnahmen und den Rezeptoren identifiziert mögliche Reaktionsstrategien in einem unsicheren Umfeld. Es ist die Frage zu klären, inwieweit sich eine Maßnahme prinzipiell dazu eignet, das Produktionssystem bei einer Veränderung des entsprechenden Rezeptors adäquat anzupassen. Zusätzlich ist jeweils angegeben, ob es sich um eine wachstumsorientierte oder eine versichernde Handlungsmöglichkeit handelt. Insgesamt konnten mit Hilfe des aufgestellten Suchraumes mehr als 100 generische Maßnahmen identifiziert werden, die mögliche Anpassungen des Produktionssystems an veränderte Randbedingungen beschreiben.

Ebene	Handlungsmöglichkeit	Erläuterung	Rezeptor						Opt.*	
			Stückzahl	Produkt	Qualität	Zeit	Kosten	Technologie	Wachstum	Versicherung
Arbeitsstation	<i>Kapazität</i>									
	Stilllegung	temporäre Stilllegung mit verbundener Kostenreduktion	●	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕		x
	Vermietung	(temporäre) Vermietung von Betriebsmitteln	●	⊖	⊖	⊕	⊕	●		x
	Verkauf	Verkauf von Betriebsmitteln	●	⊖	⊖	⊕	⊕	●		x
	Reaktivierung	Reaktivierung vorher temporär stillgelegter Betriebsmittel	●	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	x	
	Anmieten/Leasen	mieten oder leasen zusätzlicher Betriebsmittel	●	⊖	⊖	⊕	⊕	●	x	
	Kauf	Kauf neuer Betriebsmittel	●	⊖	⊖	⊕	⊕	●	x	
	<i>Automatisierungsgrad verändern</i>									
	Werkstückzu- und -abfuhr	Automatisierung der Bestückung	●	⊕	⊖	⊕	⊕	⊕	x	x
	Rüsten	Werkzeug- und Vorrichtungswchsel, spannen, positionieren	●	⊕	⊖	⊕	⊕	⊕	x	x
	automatisierte Prüfung	●	⊕	●	⊕	⊕	⊕	x	x	

* Realloptionskategorie

Abbildung 27: Auszug aus dem Katalog der Handlungsmöglichkeiten für das Gestaltungsfeld Betriebsmittel auf der Ebene Arbeitsstation

Die aufgeführten Maßnahmen zielen darauf ab, Veränderungsvorgänge im *Hinblick auf ihr Ergebnis* zu beschreiben. Dies ist notwendig, um die monetären Konsequenzen von Anpassungsmaßnahmen zu erfassen und so den wirtschaftlichen Nutzen quantifizieren zu können. Der Katalog unterscheidet sich durch seine ergebnisorientierte Formulierung von Ansätzen, die die Veränderungsfähigkeit von Fabrikobjekten anhand der Ausprägung spezieller Merkmale, die einen Rückschluss auf den notwendigen Anpassungsaufwand erlauben, bewerten (z.B. HERNÁNDEZ 2003, HEGER 2007). Solche auf die Veränderungskosten konzentrierten Vorgehensweisen erleichtern zwar, in der Optionssprache ausgedrückt, die Quantifizierung der Ausübungspreise. Die entsprechenden Ansätze leisten somit einen wesentlichen Beitrag zu der in der vorliegenden Arbeit verfolgten realloptionsbasierten Bewertung. Der Ausweis des Nutzens der Wandlungsfähigkeit wird in ihnen jedoch nicht fokussiert.

Der entwickelte Katalog erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern er stellt vielmehr die essenziellen Grundbausteine für die Bewertung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Produktion bereit, die bei Bedarf detailliert und ergänzt werden können. Eine allgemeingültige Spezifizierung und technische

Beschreibung ist ohne eine Einschränkung des Betrachtungsbereiches sowie der zu berücksichtigenden Technologien nicht möglich. Aus diesem Grund und wegen des Umfangs des Katalogs muss nachfolgend eine projektspezifische Auswahl relevanter Handlungsmöglichkeiten getroffen und eine Priorisierung durchgeführt werden.

6.3.4.3 Filterung von Scheinoptionen

Nicht alle im Katalog der Handlungsmöglichkeiten aufgeführten Anpassungsmaßnahmen (vgl. Abschnitt 6.3.4.2) sind tatsächlich technisch durchführbar bzw. erfordern eine detaillierte Bewertung. Damit aus einer möglichen Investition zur Veränderung der Produktion eine Realoption wird, muss sie einen gewissen Grad an *Irreversibilität* besitzen, signifikant mit *Unsicherheiten* des Umfeldes in Beziehung stehen und eine hinreichende *Flexibilität* aufweisen (LEITHNER & LIEBLER 2003, S. 225). Im Hinblick auf die Zielsetzung eines Alternativenvergleichs ist eine Handlungsmöglichkeit ferner nur dann zu berücksichtigen, wenn sie die Auswahl zwischen den unterschiedlichen Konzepten beeinflusst und somit *Entscheidungsrelevanz* besitzt.

Im Zuge der in den folgenden Abschnitten beschriebenen Arbeitsschritte werden die allgemein formulierten Handlungsmöglichkeiten auf die konkrete Projektsituation und die jeweiligen technisch-organisatorischen Alternativen bezogen. Durch die Überprüfung der konstituierenden Merkmale einer Option lassen sich *Scheinoptionen* identifizieren und die Anzahl möglicher Realoptionen deutlich reduzieren. Eine Scheinoption bezeichnet eine Handlungsmöglichkeit, durch welche die Produktion angepasst werden kann, die jedoch nicht die konstituierenden Merkmale einer Option besitzt. Das durch diese Überprüfung abgeleitete *Optionsprofil* bildet die Grundlage, um in einem nächsten Schritt die wichtigsten Realoptionen mit der größten wirtschaftlichen Auswirkung in die Bewertung der vorliegenden Systemalternativen einzubeziehen.

Irreversibilität

Als ein konstituierendes Element einer Option wird neben der Unsicherheit und Flexibilität die Irreversibilität genannt. Sie ist dann gegeben, wenn die Investitionsentscheidung eines Unternehmens nur zeitverzögert und durch Inkaufnahme zusätzlicher Kosten rückgängig gemacht werden kann.

Aus den Ausführungen in Abschnitt 2.2.2 geht hervor, dass Investitionen in der Produktion oft sehr firmen- oder branchenspezifisch sind, so dass eine erworbene

Anlage nur mit Verlust wieder verkauft werden kann. Einmalig anfallender Umstellungsaufwand, der auch eventuelle Produktionsunterbrechungen beinhaltet (CISEK 2005, S. 110 f.), kann ebenfalls nicht wiedergewonnen werden. Aus diesem Grund ist die Irreversibilität im Kontext dieser Arbeit immer gegeben, so dass zur Filterung von Scheinoptionen die Unsicherheit und Flexibilität maßgeblich sind (vgl. BURMANN 2002, S. 72, HUNGENBERG ET AL. 2005, S. 24).

Signifikanz der Unsicherheit

Die wirtschaftliche Attraktivität einer Optionsausübung hängt davon ab, wie sich der Preis des Underlying zukünftig entwickelt. Die Größe der diesbezüglich bestehenden Unsicherheit beeinflusst deshalb auch den Wert der Option. Dieser Zusammenhang wird als das erste konstituierende Element von Optionen, *die Unsicherheit*, bezeichnet (HOMMEL & PRITSCH 1999b, S. 18). Eine Anpassungsmaßnahme aus dem Katalog der Handlungsmöglichkeiten ist also nur dann eine potenzielle Realoption, wenn sie zu einem Unsicherheitsfaktor in Beziehung steht, dessen Veränderung die Zahlungsströme und damit den Wert der Produktionssystemalternative beeinflusst.

In einem ersten Schritt sind die im Katalog aufgeführten Maßnahmen mit dem aufgestellten Umfeldprofil abzugleichen. Eine Beurteilung der Signifikanz der unsicheren Einflussgrößen und damit eine Abschätzung ihres Einflusses auf den wirtschaftlichen Erfolg des zu bewertenden Vorhabens spiegelt sich bereits in der Einteilung in verschiedene Kategorien wider (vgl. Abschnitt 6.3.2.3).

Die A-Unsicherheiten sind somit der Ausgangspunkt zur Identifikation möglicher Realoptionen. Der durch die Unsicherheit angesprochene Rezeptor schränkt den Suchraum im Katalog der Handlungsmöglichkeiten ein. Für jede Maßnahme, für die eine Beziehung zum betrachteten Rezeptor aufgezeigt ist, muss überprüft werden, ob sie im konkreten Anwendungsfall prinzipiell eine sinnvolle Reaktion darstellt. Wenn das System nach Ausführen der Anpassungsmaßnahme die veränderten Anforderungen besser erfüllen kann, wird die individuelle Ausprägung dieser Handlungsmöglichkeit für den vorliegenden Anwendungsfall in Abhängigkeit der technisch-organisatorischen Alternativen genau beschrieben. Die nachfolgende Abbildung 28 zeigt das geschilderte Vorgehen in einer Übersicht.



Abbildung 28: Vorgehen zur Bestimmung von Maßnahmen aus dem Katalog der Handlungsmöglichkeiten, die das Kriterium einer Signifikanz der Unsicherheit erfüllen

Nach der geschilderten Überprüfung der Signifikanz der Unsicherheit liegen als Zwischenergebnis bereits projekt- und alternativenspezifisch konkretisierte Anpassungsmaßnahmen vor. Dies stellt i.d.R. schon eine deutliche Reduktion des ursprünglichen Katalogs dar. Jede der noch verbliebenen potenziellen Realloptionen wird anschließend auf die Signifikanz der Flexibilität sowie die Entscheidungsrelevanz untersucht und, sofern eines der Kriterien nicht erfüllt ist, von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

Signifikanz der Flexibilität

„Mit einer Option verbindet sich das Recht und nicht die Verpflichtung, eine bestimmte Transaktion auszuüben“ (HOMMEL & PRITSCH 1999b, S. 9). So beschreiben HOMMEL & PRITSCH die charakteristische Eigenschaft der Flexibilität, die eine Realloption besitzen muss. Eine Identifikation bestehender Verpflichtun-

gen ist aus diesem Grund eine Voraussetzung zum Erkennen von Scheinoptionen.

Eine wichtige Einschränkung möglicher Flexibilität folgt aus der Vertragsgestaltung mit Kunden oder Lieferanten des Unternehmens. Wenn in jedem zukünftigen Zustand nur unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit über eine Optionsausübung befunden werden kann, handelt es sich um eine *Typ-I-Option*, die volle Entscheidungsfreiheit bietet. Bei einer *Typ-II-Option* ist dagegen festgelegt, dass in definierten Zuständen unabhängig von der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit eine Ausübung erfolgen muss. Es handelt sich deshalb nicht um eine Realoption im engeren Sinn. Da jedoch eine große strukturelle Ähnlichkeit zu einer *Warteoption* oder einer Option der *Mehrstufigkeit* in Anlehnung an TRIGEORGIS (1996) besteht, wird nachfolgend dennoch eine Bezeichnung solcher Anpassungsmöglichkeiten als „Option“ beibehalten. Der konzeptionelle Unterschied lässt sich anhand eines Beispiels illustrieren. Oft besteht eine vertragliche Verpflichtung, jede innerhalb eines definierten Korridors abgerufene Stückzahl zu liefern. Ob erweitert wird, hängt in diesem Fall nur von der nachgefragten Menge ab (Typ-II). Bei voller Entscheidungsfreiheit (Typ-I) würde die Ausübung nur dann erfolgen, wenn der aus der zusätzlich verfügbaren Produktionskapazität resultierende Barwert den Ausübungspreis der Realoption übersteigt. Die aufgezeigte Differenzierung ist notwendig, da Typ-I- und Typ-II-Optionen unterschiedlich modelliert werden (vgl. Abschnitt 6.4.6.4).

Weitere Einschränkungen ergeben sich ggf. durch strategische Vorgaben der Unternehmensleitung, die einzelne Maßnahmen explizit verbieten, so dass diese keine Realoptionen darstellen. Möglich sind auch implizite Einschränkungen, die aus den mit der Option verbundenen Zahlungsströmen resultieren. Wirtschaftliche Flexibilität ist nur gegeben, wenn sich die Ausübung in einer bestimmten Situation in der Zukunft lohnt, in einer anderen jedoch nicht. Es ist deshalb zu untersuchen, ob die bisher ausgewählten Anpassungsmaßnahmen tatsächlich Veränderungen der Zahlungsströme bewirken. Werden primär qualitative Verbesserungen erreicht (z.B. Erhöhung der Transparenz in der Montage, intensivierte Kommunikation), liegt keine optionstypische Flexibilität vor.

Entscheidungsrelevanz

Ein letztes Merkmal, mit dessen Hilfe sich die Anzahl der für eine Bewertung in Frage kommenden Realoptionen reduzieren lässt, ist die Entscheidungsrelevanz. Sofern eine Anpassungsmaßnahme, die wie erläutert vor allem das Ergebnis eines Veränderungsprozesses beschreibt, von allen zu bewertenden technisch-

organisatorischen Alternativkonzepten auf die selbe Art umgesetzt werden kann, sind die Auswirkungen auf die Zahlungsströme identisch. Somit bleibt auch die Rangfolge der relativen Vorteilhaftigkeit unverändert, die Handlungsmöglichkeit ist folglich nicht entscheidungsrelevant und muss deshalb auch nicht modelliert werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass eine für mehrere Alternativen relevante Handlungsmöglichkeit k aus dem Katalog bei einer Bewertung aufgrund ihrer immer vorliegenden individuellen Ausprägung alternativenspezifisch zu modellieren ist, bspw. für A_1 und A_2 als $O_{1,k}$ bzw. $O_{2,k}$.

6.3.5 Zusammenfassung

Im Zuge der bewertungsorientierten Modellierung der Produktion werden drei sog. Profile erstellt, die das Bewertungsprojekt sowie die zu vergleichenden Systemkonzepte charakterisieren. Ihre Inhalte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das *Umfeldprofil* beschreibt die zu erfüllende Produktionsaufgabe sowie den Planungsinhalt und -umfang. Darüber hinaus stellt es die unsicheren Einflussgrößen U_i zunächst qualitativ dar und zeigt auf, welche Entwicklungen in der Zukunft eintreten können.
- In den *Kostenprofilen* ist für jede der vorliegenden technisch-organisatorischen Alternativen definiert, welche Kostenelemente über den Lebenszyklus des Produktionssystems hinweg berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus sind die Parameter für die verschiedenen Kostenfunktionen bestimmt.
- Für jede Alternative A_j liegt darüber hinaus ein eigenes *Optionsprofil* vor, das mögliche Anpassungsmaßnahmen $O_{j,k}$ aufzeigt, mit denen auf eine Veränderung der durch die Rezeptoren beschriebenen Vorgaben an die Produktion reagiert werden kann. Die Optionsprofile filtern die im Katalog der Handlungsmöglichkeiten aufgeführten Maßnahmen, bewerten sie somit qualitativ und konkretisieren sie im Hinblick auf den Anwendungsfall sowie die jeweilige technisch-organisatorische Alternative.

Die einzelnen Profile sind kein statisches Ergebnis einer einmaligen Modellierung, sondern sie unterliegen einer kontinuierlichen Veränderung. Entsprechend werden im folgenden Abschnitt 6.4, in dem die Schritte des Bewertungsprozesses näher erläutert sind, einzelne Aspekte der vorangegangenen Abschnitte erneut aufgegriffen und vertiefend dargestellt.

6.4 Bewertung

6.4.1 Vorgehensschritte

Die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme besteht aus einer Reihe aufeinander aufbauender Vorgehensschritte, die nachfolgend kurz erläutert sind.

Der Prozess beginnt mit einer sog. Basisbewertung bei erwarteter Zukunft und starrer Planung. Anhand einer reduzierten Betrachtung, die keine Unsicherheiten und Entscheidungen abbildet, lassen sich die Alternativen ermitteln, die im weiteren Verlauf der Berechnungen vernachlässigt werden können (Abschnitt 6.4.2). Für die verbleibenden Systeme erfolgt dann in Abschnitt 6.4.3 eine Dynamisierung der Analyse. Dazu werden die Veränderungen des Umfeldes modelliert und die Leistungsfähigkeit der einzelnen zu untersuchenden Systeme in diesem bewertet. Eventuell existierende Realoptionen, welche die einzelnen Alternativen beinhalten, bleiben dabei zunächst noch unberücksichtigt.

Viele Autoren merken an, dass der Realoptionsbewertung eine hohe Komplexität innewohnt (z. B. LANDNER & PINCHES 1998, S. 557, BAECKER & HOMMEL 2004, S. 28, HEGER 2007, S. 47). Ein praktischer Einsatz dieses Verfahrens erfordert deshalb die Definition eines effizienten und effektiven Bewertungsvorgehens. Es ist somit naheliegend, in einem sequenziellen Prozess zunächst die Realoptionen zu berücksichtigen, deren Einfluss auf die Entscheidungsfindung am größten ist. Die bis dato erfolgte Beurteilung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit passiver Systeme in einem dynamischen Umfeld bildet die Basis, um entsprechend dieser Zielsetzung in Abschnitt 6.4.4 das ökonomische Potenzial der einzelnen Realoptionen abzuschätzen. Als Ergebnis liegt eine Reihenfolge vor, nach der die Optionen in die Bewertung, die in Abschnitt 6.4.6 erklärt ist, einzubeziehen sind. Um den in Kapitel 5 als geeignet identifizierten Baumansatz einsetzen zu können, ist ferner eine angepasste Modellierung der Unsicherheiten erforderlich, auf die in Abschnitt 6.4.5 eingegangen wird. Abbildung 29 veranschaulicht das geschilderte Vorgehen.

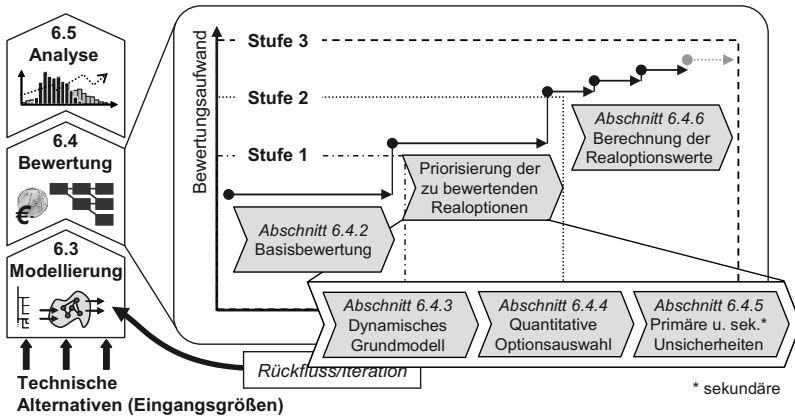


Abbildung 29: Vorgehensschritte zur Bewertung der zu vergleichenden Alternativen unter Einbeziehung des Wertes identifizierter Realoptionen

6.4.2 Basisbewertung bei erwarteter Zukunft und starrer Planung

Die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme beginnt mit einer starren Bewertung bei quasi-sicherer Zukunft (vgl. Abbildung 22 auf S. 88). Dazu findet aufgrund der hohen Verbreitung in der Praxis (vgl. PIKE 1988, PETRY & SPROW 1993) und der Einfachheit die Kapitalwertmethode (vgl. Abschnitt 2.2.1) Verwendung. Nachfolgend sind die Besonderheiten erklärt, die sich aus der Einbettung dieses Verfahrens in das entwickelte Bewertungsverfahren ergeben.

Bei einer *quasi-sicheren Zukunft* werden die Bewertungsverfahren so angewendet, als läge eine deterministische Entwicklung vor. Im vorliegenden Fall erfolgt eine Reduktion der stochastischen Eingangsgrößen auf ihren Erwartungswert, um die unsichere Zukunft abzubilden. Alternativ ist es möglich, vom Planungsteam ermittelte Schätzwerte zu verwenden, die durch die implizite Berücksichtigung individueller Zukunftserwartungen bis zu einem gewissen Grad ebenfalls die bestehende Unsicherheit reflektieren¹⁶. Diese (reduzierte) Entwicklung wird nachfolgend als *Basiszenario* z_0 bezeichnet (10):

¹⁶ In diesem Fall wird bei diskreten Merkmalen anstelle des Mittelwertes der Median, der eine Stichprobe in zwei gleich wahrscheinliche Hälften teilt, oder auch der Modalwert, der den häufigsten Wert benennt, genutzt (vgl. HARTUNG ET AL. 1995, S. 32 ff.).

$$z_0 = (E(U_1), \dots, E(U_T)) \quad (10)$$

$E(U_t)$	zum Zeitpunkt t erwartete Ausprägung der Zukunft, die in Form eines Zufallsvektors U_t beschrieben ist
n	Anzahl der Merkmale, deren Ausprägung einen Umweltzustand definiert
U_t	Zufallsvektor, der die Ausprägung der Umwelt zum Zeitpunkt t anhand von n Merkmalen beschreibt; $U_t = (U_{t,1}, \dots, U_{t,n})^{17}$
$U_{t,i}$	das Umfeld beschreibender Einflussfaktor i zum Zeitpunkt t als Zufallsvariable
$U(t)$	stochastischer Prozess, der die Zukunftsentwicklung für die Dauer T als Folge von Zufallsvariablen U_t beschreibt; $U(t) = (U_1, U_2, \dots, U_T)$
z_0	Basisszenario als eine Realisation der Zufallsvariablen Z
Z	Beschreibung der Umfeldentwicklung als stochastischer Prozess $Z = U(t)$

Bewertet wird die Systemkonfiguration, welche die prognostizierten Anforderungen im Basisszenario z_0 technisch bewältigen kann und sich dabei am wirtschaftlichsten verhält. Zur Verdeutlichung dient das folgende Beispiel: Gegeben sei eine Zukunftsentwicklung für drei Perioden, die lediglich durch die zu montierende Menge mit $z_0 = (100, 200, 300)$ bestimmt ist. Eine Person erbringt eine Montageleistung von 100 Stück, an einer Station können maximal zwei Menschen arbeiten. Die technisch-wirtschaftlich optimale und zu bewertende Konfiguration ist entsprechend für $t=1$ ein Mitarbeiter an einer Station, für $t=2$ sind es zwei Mitarbeiter an einer Station und für $t=3$ drei Mitarbeiter an zwei Stationen.

Da die Zukunft als quasi-sicher angenommen wird, lässt sich eine optimale Konfiguration bereits zum Zeitpunkt der Planung bestimmen. Die Herleitung solcher Systeme ist in der Literatur beschrieben und deshalb in der vorliegenden Arbeit nicht vertieft (z.B. KETTNER ET AL. 1984, SPUR 1994, EVERSHEIM & SCHUH 1996, FELIX 1998, GRUNDIG 2006). Ebenso verhält es sich mit der Auswahl zu berücksichtigender Kostenpositionen, die umfassend dokumentiert ist (z.B. DIN EN 60300-3-3, VDI 2693-1, VDI 2693-2, VDI 2884, VDI 6025, VON DER OSTENSACKEN 1999, VON BRIEL 2002).

¹⁷ Die Darstellung von Zufallsvektoren ohne *Vektorpfeil* ist an die in der Stochastik gebräuchliche Notation angelehnt (HARTUNG ET AL. 1995, S. 104).

Damit das für die Basisbewertung aufgestellte Kalkulationsmodell im Sinne einer schrittweisen Detaillierung auch für die weiteren Phasen der Bewertung Verwendung finden kann, müssen folgende Kriterien eingehalten werden:

- Berücksichtigung unsicherer Größen als Eingangsparameter: Bei der Modellierung ist darauf zu achten, dass der funktionale Zusammenhang zwischen den im Umfeldprofil aufgeführten Einflussfaktoren und einzelnen Kostenarten nicht implizit, sondern explizit formelhaft in einem parametrischen Modell ausgedrückt wird. Es ist dazu notwendig, die Auswirkungen der Unsicherheiten auf die Leistung des Produktionssystems sowie die entstehenden Kosten analytisch zu erfassen. Die Grundlagen dafür werden bereits bei der Herleitung des Umfeldprofils sowie der Kosten- und Optionsprofile ermittelt.
- Abbildung von Ineffizienzen, insbesondere von Kapazitäts- und Teilepuffern: Bei Abweichungen der unsicheren Einflussgrößen von ihrem prognostizierten Wert ändert sich in der Praxis die Effizienz des Produktionssystems. Diese Veränderung ist ebenfalls abzubilden. Dazu hilft es, die Einteilung von Verschwendung in Anlehnung an die Prinzipien einer „Schlanken Produktion“ zu nutzen und sie zu einzelnen Unsicherheitsfaktoren in Beziehung zu setzen. Bei Verschwendung im obigen Sinn handelt es sich um Überproduktion, unnötige Bewegung, Warten (d.h. Überkapazität von Mensch oder Maschine), Transport, überflüssige oder doppelte Bearbeitung, Lagerbestand und Nacharbeit (vgl. z.B. SHINGO 1989, MONDEN 1998). Insbesondere sind unausgelastete Kapazitäten sowie Teilepuffer zu berücksichtigen, ebenso wie eine falsche Proportionalisierung von Kosten, bspw. durch undifferenzierte Maschinenstundensätze, zu vermeiden ist.
- Prozessorientierte Kalkulation: Die Auswirkungen von Veränderungen am untersuchten Fabrikobjekt auf die vor- und nachgelagerten sowie die unterstützenden Prozesse, die durch die unsicheren Einflussgrößen hervorgerufen werden, sind zu berücksichtigen. Eine automatisierte Anlage, die aufgrund langer Rüstzeiten eine losweise Produktion erfordert, wird bspw. anders in ein Gesamtsystem integriert als ein manueller Arbeitsplatz.

Die Einhaltung der genannten Kriterien für die Basisbewertung ist nicht zwingend erforderlich, da in ihr die Unsicherheiten auf einen Erwartungswert reduziert sind. Sowohl die Auswahl der Kostenpositionen als auch die empfohlene technische Modellierung können prinzipiell auch in den folgenden Phasen angepasst werden. Allerdings lässt sich durch ein vorausschauendes Vorgehen, das

bereits zum Zeitpunkt der starren Basisbewertung die später folgende Dynamisierung berücksichtigt, etwaiger Doppelaufwand bei der Modellierung verringern.

Für jedes der alternativen Konzepte A_j liegt als Ergebnis der beschriebenen Bewertung ein statischer Kapitalwert vor, anhand dessen eine erste Investitionspräferenz abgeleitet werden kann. Die Alternative A^* besitzt bei der angenommenen statischen Zukunft z_0 die höchste Wirtschaftlichkeit. Es ist nach dem im Folgenden dargestellten und in Abbildung 30-(a) visualisierten Prozess zu entscheiden, ob ein weiterer Bewertungsschritt notwendig ist und welche Alternativen dabei zu berücksichtigen sind.

Hierfür wird zunächst die Rangfolge der Wirtschaftlichkeit, basierend auf dem zuvor ermittelten Kapitalwert, mit der Rangfolge der Wandlungsfähigkeit verglichen. Alle Alternativen, die weniger wandlungsfähig sind und gleichzeitig eine geringere Wirtschaftlichkeit aufweisen als ein anderes System, müssen nicht weiter betrachtet werden. Im Beispiel in Abbildung 30-(b) betrifft dies die Alternativen A_2 und A_5 .

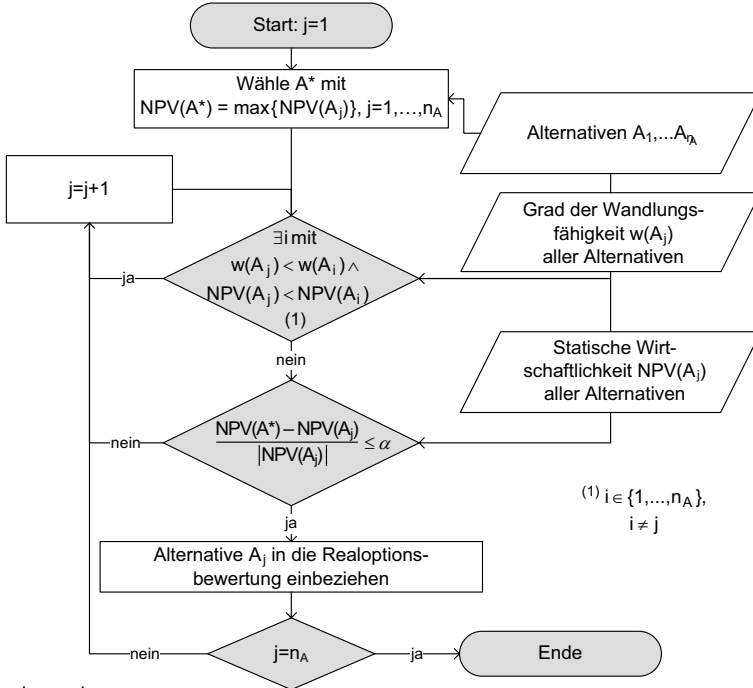
Auch durch die Berücksichtigung von Realloptionen bei der Berechnung wird der Projektwert nicht beliebig erhöht. Für eine Realloptionsbewertung sind deshalb nur die Alternativen geeignet, bei denen der Wertabstand zum aktuellen Referenzprojekt A^* einen Anteil α am eigenen Kapitalwert nicht übersteigt:

$$\frac{NPV(A^*) - NPV(A_j)}{|NPV(A_j)|} \leq \alpha \quad (11)$$

A^*	Referenzalternative mit dem höchsten statischen Kapitalwert
A_j	untersuchte Alternative
α	subjektiver Grenzwert für die zulässige relative Abweichung der Wirtschaftlichkeit von A_j gegenüber der von A^* (bezogen auf A_j), oberhalb dessen für A_j keine Realloptionsbewertung erfolgt

Das Studium der Literatur zeigt, dass einzelne Realloptionen den Projektwert bis zu 40% erhöhen können (vgl. KULATILAKA & TRIGEORGIS 1994, BENGTTSSON & OLHAGER 2002, AMICO ET AL. 2003a, SCHÄFER & SOCHOR 2005, WANG 2005, SUDHOFF 2007). Da für mehrere Optionen keine Wertadditivität vorliegt (TRIGEORGIS 1996, S. 227 ff.), wird α deshalb als Richtwert auf 0,4 festgelegt, ist aber ggf. subjektiv anzupassen. Im Beispiel in Abbildung 30-(b) überschreitet Alternative A_5 diese Grenze. Nur wenn beide Kriterien erfüllt sind, ist es sinnvoll, A_j im weiteren Verlauf in die Optionsbewertung einzubeziehen.

(a) Entscheidungsprozess



Legende

- A_j : Alternative j , $j=1, \dots, n_A$ α : subjektiver Grenzwert für die zulässige relative Abweichung der Wirtschaftlichkeit von A_j gegenüber der von A^* (bezogen auf A_j), oberhalb dessen für A_j keine Realoptionsbewertung erfolgt
 n_A : Anzahl der Alternativen
 $w(A_j)$: Grad der Wandlungsfähigkeit von A_j

(b) Beispiel

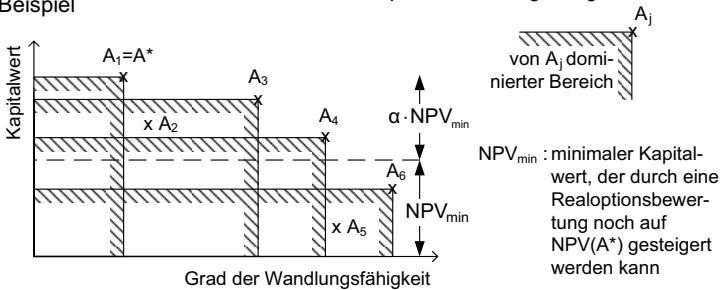


Abbildung 30: Entscheidungsprozess zur Auswahl der in eine Realoptionsbewertung einzubeziehenden Konzepte mit illustrierendem Beispiel

Anzumerken ist, dass produktionstechnische Investitionsentscheidungen oft nur auf der Basis der Investitionsausgaben und der Betriebskosten getroffen werden, da sich eine Bestimmung von Erlösen in vielen Fällen schwierig gestaltet. Stimmt die Grenze des betrachteten Systems mit der organisatorischen Grenze eines Profit Centers überein, sind die (Verrechnungs-)Preise der erzeugten Güter bekannt. In den anderen Fällen ist theoretisch der Anteil zu bestimmen, den einzelne Wertschöpfungsschritte am Produktpreis haben. Praktisch ist dies jedoch kaum umsetzbar, so dass lediglich ein Kapitalwert der Kosten (*Net Present Cost*) berechnet wird (WEMHÖNER 2006, S. 138). Eine Entscheidung über die absolute Vorteilhaftigkeit des Investitionsvorhabens ist auf der Basis dieses Kriteriums zwar nicht möglich. Es eignet sich jedoch zum Vergleich von Alternativen, sofern die grundsätzliche Entscheidung zur Durchführung einer Investition strategisch vorgegeben ist.

Die beschriebene Basisbewertung stellt die heute gängige Praxis in Unternehmen dar (PETRY & SPROW 1993). Ohne eine Erweiterung um die dynamische Entwicklung des Umfeldes und die Möglichkeiten der Anpassung würde die Alternative mit dem höchsten (positiven) Kapitalwert A^* zur Realisierung vorgeschlagen werden.

6.4.3 Dynamisches Grundmodell

6.4.3.1 Quantitative Beschreibung von Unsicherheiten

Die in Abschnitt 6.4.2 beschriebene statische Basisbewertung berücksichtigt zwar die Entwicklung von Einflussgrößen über die Zeit, sieht diese aber als sicher an. Um auch die darüber hinaus gehenden dynamischen Veränderungen des Umfeldes einzubeziehen, muss eine quantitative Abbildung der zukünftigen unsicheren Anforderungen (Führungsgrößen) erfolgen. In diesem Abschnitt wird deshalb beschrieben, wie die im Zuge der Umfeldanalyse (Abschnitt 6.3.2) durchgeführten qualitativen Untersuchungen zu erweitern sind.

Die in der vorliegenden Arbeit berücksichtigten Unsicherheiten werden nachfolgend in verschiedene, durch drei formale Kriterien bestimmte Klassen eingeteilt. Zunächst ist zwischen einzelnen *stochastischen Ereignissen* und Entwicklungen einer Zufallsgröße über einen Zeitraum hinweg, sog. *stochastischen Prozessen*, zu differenzieren. Ein Beispiel für die zweite Ausprägung sind sich kontinuierlich verändernde Materialeinkaufspreise; eine mögliche Produkteinführung in

einem Zeitpunkt t oder die Länge eines Produktlebenszyklus sind hingegen nach dem Begriffsverständnis der Wahrscheinlichkeitstheorie einzelne stochastische Ereignisse. Darüber hinaus kann der Zustandsraum der Unsicherheit in *stetiger* (z.B. die Materialeinkaufspreise) oder *diskreter* Form (z.B. die Länge des Produktlebenszyklus als ganzzahliges Vielfaches einer Saison) vorliegen. Anhand eines dritten Kriteriums, das nur für stochastische Ereignisse mit diskretem Wertebereich relevant ist, wird unterschieden, ob die Ausprägung einer Zufallsvariablen X Auswirkungen auf die Ausprägung einer Zufallsvariablen Y besitzt. Ein Beispiel hierfür ist die unsichere Einführung einer Produktänderung, die nur nach einer erfolgten Technologieanpassung erfolgen kann. Die beschriebene Einteilung ist in Abbildung 31 visualisiert.

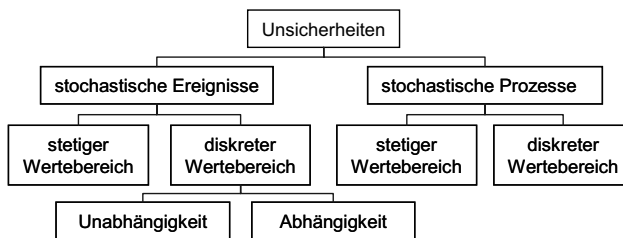


Abbildung 31: Einteilung von Unsicherheiten

In diesem Abschnitt sind zunächst mehrere für die vorliegende Arbeit bedeutende stochastische Prozesse charakterisiert, ihre Modellierung erklärt sowie ihre Einsatzmöglichkeiten erläutert. Anschließend erfolgt analog eine Darstellung stochastischer Ereignisse, ehe kurz auf die Ermittlung der erforderlichen Parameter eingegangen wird.

Stochastische Prozesse

Die Entwicklung einer unsicheren Größe über einen längeren Zeitraum hinweg wird als *stochastischer Prozess* $X(t)$ beschrieben, welcher die endliche Realisation einer Folge von Zufallsvariablen X_t ($t=0,1,\dots,T$) über den Zeitraum T bezeichnet (HARTUNG ET AL. 1995, S. 678). Die X_t sind *unabhängig* voneinander, wenn die Ereignisse der ersten $n-1$ Perioden keinen Einfluss auf das Ergebnis der n -ten Periode $t=n$ haben. Liegt ein solcher Prozess vor, sind für jede Periode die (stetigen oder diskreten) Wahrscheinlichkeitsverteilungen auszuwählen und die zugehörigen Parameter zu bestimmen. Als Beispiel kann die durchschnittliche Auftragslosgröße genannt werden. Die Modellierung entsprechender Prozesse entspricht der von stochastischen Ereignissen.

Häufiger sind in der Praxis allerdings *abhängige Prozesse* zu beobachten. Eine wichtige Rolle nimmt dabei die Markov¹⁸-Eigenschaft erster Ordnung ein. Sie charakterisiert Prozesse, bei denen die Entwicklung der Zukunft zwar von dem Zustand der Gegenwart, nicht aber von der Entwicklung davor abhängig ist (DIXIT & PINDYCK 1994, S. 62 f.). Formal lässt sich dies durch (12) ausdrücken:

$$P(X_{t+1} = x_{t+1} \mid X_t = x_t, X_{t-1} = x_{t-1}, \dots, X_0 = x_0) = \quad (12)$$

$$P(X_{t+1} = x_{t+1} \mid X_t = x_t)$$

- $P(A|B)$ Wahrscheinlichkeit von A unter der Bedingung B
 X_t beliebige Zufallsvariable zum Zeitpunkt t ; X folgt einem stochastischen Prozess
 x_t Realisierung der Zufallsvariable x_t

Der wichtigste Prozess mit dieser Eigenschaft ist der sog. *generalisierte Wiener-Prozess*, der auch als *Brownsche Bewegung* (engl. *Brownian Motion (BM)*) bezeichnet wird. Er beschreibt Vorgänge, bei denen sich ein Wert ausgehend von der aktuellen Realisierung über die Zeit um eine Drift μ sowie einen zufälligen, standardnormalverteilten Fehler ε_t verändert (DIXIT & PINDYCK 1994, S. 65, LUENBERGER 1998, S. 305 ff.):

$$dX_t = \mu dt + \sigma dz \quad \text{mit} \quad (13)$$

$$dz = \varepsilon_t \sqrt{dt}$$

- ε_t Zufälliger, standardnormalverteilter Fehler, $\varepsilon_t \sim N(0;1)$
 μ Änderungsrate (Drift), entspricht dem mittleren Zuwachs pro Periode
 σ Volatilität des Prozesses

Dabei sind μ und σ nicht notwendigerweise konstant, sondern über die Zeit veränderlich. Mit diesem additiven Modell können jedoch insbesondere Preisentwicklungen nicht realistisch nachgebildet werden, da nach (13) auch negative Werte möglich sind. Bei einem multiplikativen Prozess

$$dX_t = \mu X_t dt + \sigma X_t dz \quad \text{mit} \quad (14)$$

$$X_t = X_0 e^{\nu t + \sigma dz}, \quad \nu = \mu - \frac{\sigma^2}{2}, \quad dz = \varepsilon_t \sqrt{dt}$$

- ν Änderungsrate (Drift) der Zuwachsrate
 X_0 Startwert des Prozesses

¹⁸ Als alternative Schreibweise des Namens sind neben *Markov* auch *Markow* und *Markoff* verbreitet.

tritt dieser Fall nicht ein (LUENBERGER 1998, S. 310). Man nimmt dabei an, dass die *prozentuale Zuwachsrates* $\gamma = \nu + \sigma dz$ sich wie bei einer Brownschen Bewegung verhält, d.h. es handelt sich um eine normalverteilte Zufallsvariable mit Drift¹⁹. Dieser Prozess ist als *Geometrisch Brownsche Bewegung* (engl. *Geometric Brownian Motion (GBM)*) bekannt.

Wenn der stochastische Prozess $U(t)$ einer BM (bzw. einer GBM) folgt, lässt sich auf der Basis von (13) (bzw. (14)) ausgehend von einem gegebenen Startwert u_0 in der Gegenwart die zukünftige Entwicklung einer konkreten Unsicherheit für kleine Δt mit (15) (bzw. mit (16)) näherungsweise berechnen:

$$u_{t+1} = u_t + \left(\mu \Delta t + \sigma \varepsilon_t \sqrt{\Delta t} \right) \quad \text{bzw.} \quad (15)$$

$$u_{t+1} = u_t e^{\nu \Delta t + \sigma \varepsilon_t \sqrt{\Delta t}} \quad (16)$$

Wenn die Unsicherheit hingegen nur diskrete Werte annehmen kann, ist eine Abbildung des Prozesses mit Hilfe einer BM oder GBM nicht möglich. In diesem Fall eignet sich eine Modellierung als sog. *Random Walk* (DIXIT & PINDYCK 1994, S. 60 ff):

$$x_{t+1} = x_t + \varepsilon_t \Delta x \quad (17)$$

ε_t Zufallsvariable einer Auf- oder Abwärtsbewegung mit $p(\varepsilon_t=1)=q(\varepsilon_t=-1)=0,5$

Δx Veränderungshöhe („Schrittweite“)

Bei diesem Prozess verändert sich das Merkmal von einer Periode zur nächsten um $\pm \Delta x$. Eine mögliche Drift lässt sich durch eine Veränderung der Wahrscheinlichkeiten für die Aufwärts- bzw. Abwärtsbewegung bzw. durch verschiedene Schrittweiten berücksichtigen, da gilt:

$$E(x_{t+1} - x_t) = p(\varepsilon_t = 1)\Delta x + q(\varepsilon_t = -1)\Delta x, \quad p = (1 - q) \quad (18)$$

Die drei beschriebenen Prozesse sind in Abbildung 32 illustriert.

¹⁹ Da es sich bei (14) um einen zeitstetigen Prozess handelt, liegt ein kontinuierlicher Wachstumsprozess vor. Teilt man diesen in n Perioden, so lässt sich der Wachstumsfaktor als $(1+r/n)^n = e^r$ für $m \rightarrow \infty$ schreiben (LUENBERGER 1998, S. 14 ff.). Daraus folgt, dass $S_t = S_0 e^{rt}$ gilt, wobei r in diesem Fall allgemein eine Zuwachsrates ist. Somit ergibt sich $r = \ln(S_t/S_0)$.

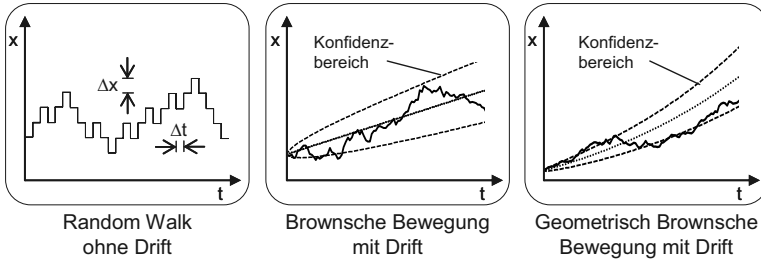


Abbildung 32: Darstellung von als Random Walk, Brownsche Bewegung mit Drift und Geometrisch Brownsche Bewegung mit Drift modellierten stochastischen Prozessen $X(t)$

Sowohl die Brownsche Bewegung als auch der Random Walk, die für $\Delta t \rightarrow 0$ konvergieren, besitzen Eigenschaften, die eine adäquate Abbildung realer Vorgänge erlauben. Zum einen nimmt die Unsicherheit mit der Zeit zu, d. h. die Schätzungen werden ungenauer. Dies ist in Abbildung 32 an den größer werdenden Konfidenzbereichen zu erkennen. Zum anderen ist die Annahme eines zufälligen normalverteilten Fehlers in vielen Fällen realistisch. Sie ist nach dem zentralen Grenzwertsatz der Stochastik und seinen Erweiterungen dann gerechtfertigt, wenn eine Vielzahl von (unkorrelierten) Einflüssen wirksam ist. Das ist ein Grund dafür, dass vor allem solche Entwicklungen mit den beschriebenen stochastischen Prozessen modelliert werden, die auf Märkten zu beobachten sind, denn hier ist durch die Vielzahl an Akteuren die Normalverteilungsannahme sinnvoll. Entsprechend finden sich in der Literatur zahlreiche Beispiele, in denen Preisentwicklungen für Rohstoffe, Baugruppen, Endprodukte bzw. Mieten oder Löhne mit Hilfe von GBMs modelliert werden (vgl. auch VDI 6025, S. 10 f.). Ähnliches gilt für Zinsen, Währungskurse, erwartete EBITs, aggregierte Kosten und insbesondere auch Werte der Marktnachfrage (vgl. auch KRÜGER 2004, S. 31 f.). Auch wenn multiplikative Ansätze generell häufiger Verwendung finden (COPELAND & ANTIKAROV 2001, S. 122), muss zwischen den erläuterten Modellierungsarten stets individuell entschieden werden.

Stochastische Ereignisse

In vielen Fällen verändern sich die Merkmale, die das unsichere Umfeld kennzeichnen, nicht kontinuierlich. Sie beschreiben hingegen singuläre Ereignisse oder die Ausprägung von Parametern, die das Projekt als Ganzes charakterisieren. Singuläre *stochastische Ereignisse* besitzen eine definierte Eintrittswahrscheinlichkeit p . Als Beispiel bereits genannt wurde eine mögliche Produktein-

führung zum Zeitpunkt t . Ist die Merkmalsausprägung u_i einer Zufallsvariablen U_i ungewiss, wird dies über eine geeignete (stetige oder diskrete) Wahrscheinlichkeitsverteilung berücksichtigt (Abbildung 33). Auf diese Weise würde die schon erwähnte Länge des Lebenszyklus abgebildet werden. Die charakteristischen Eigenschaften, die typischen Einsatzgebiete und die zur Modellierung benötigten Parameter ausgewählter Verteilungen sind in Abschnitt 10.2.1 beschrieben.

Wesentliches Merkmal *unabhängiger stochastischer Ereignisse* ist, dass ihr Verhalten keinen Einfluss auf andere Unsicherheiten hat. Im Gegensatz dazu beeinflusst bei *abhängigen Ereignissen* die realisierte Ausprägung eines Faktors die Wahrscheinlichkeitsverteilung eines anderen. Bspw. ermöglicht erst ein erfolgreiches Vorentwicklungsprojekt (Ereignis 1) die Weiterführung einer Technologie zur Serienreife (Ereignis 2). Solche verketteten Ereignisse können leicht graphisch modelliert werden. Wie bei dem Entscheidungsbaumverfahren (vgl. Abschnitt 2.2.1) stellen Knoten Zeitpunkte und Zustände dar, in denen unterschiedliche Entwicklungen eintreten können, während Kanten die erfolgte (zufällige) Realisierung symbolisieren (Abbildung 33). In dieser Arbeit werden die Untersuchungen auf solche Situationen beschränkt, in denen binäre Entwicklungen vorliegen („entweder A oder B“), die sich in gleichmäßig-periodischen Abständen darstellen lassen. Diese Annahme schränkt die Allgemeingültigkeit der weiteren Betrachtung nicht ein, sie vereinfacht aber die späteren Berechnungen. Insbesondere die Umrechnung der Diskontierungsfaktoren auf unterschiedliche Periodenlängen wird so vermieden.

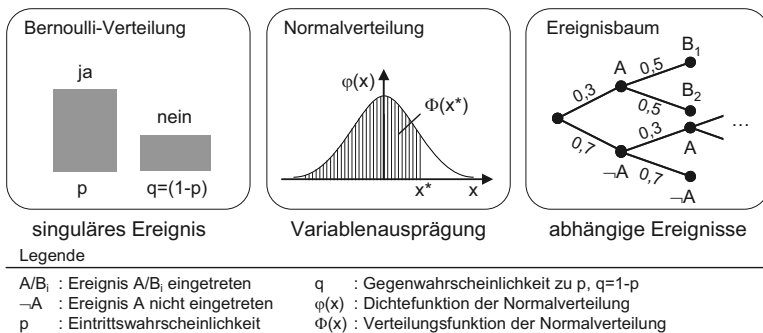


Abbildung 33: Modellierung stochastischer Ereignisse mit diskretem und stetigem Wertebereich für eine Zufallsvariable X sowie Abbildung abhängiger Ereignisse in Ereignisbäumen

Ermittlung der Parameter

Die Bestimmung der erforderlichen Eingangsgrößen erfolgt analog der in Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Vorgehensweise. Sofern historische Daten vorliegen, lassen sich unter Verwendung von Methoden der Statistik Verteilungen und Parameter berechnen. In vielen Fällen stehen jedoch nur die Erfahrungen des Managements zur Verfügung, so dass das Planungsteam Schätzungen abgeben muss. Wie diese zur Bestimmung der Parameter verwendet werden können, ist in Abschnitt 10.2.2 erläutert. Je neuer und umfangreicher das Projekt ist, desto sinnvoller ist es grundsätzlich, gezielte Umfeld- und Marktanalysen durchzuführen.

Eine generelle Aussage, wie welche Unsicherheit modelliert werden muss, kann zusammenfassend nicht getroffen werden. In der Literatur wird darauf verwiesen, dass das Verhalten einer Zufallsgröße stets genau zu analysieren und dann mit den Eigenschaften einer Verteilung abzugleichen ist (MUN 2002, S. 116). Die Erläuterungen in diesem Abschnitt verdeutlichen die Charakteristika wichtiger stochastischer Prozesse und Ereignisse. Dadurch wird die Auswahl eines geeigneten Modellierungsansatzes im individuellen Fall unterstützt.

6.4.3.2 Leistungsgrenzen der Alternativen ohne Realoptionen

Bisher wurde die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der verschiedenen Alternativen im Basisszenario z_0 ermittelt. Große Bedeutung für die nachfolgenden Schritte der Bewertung besitzt darüber hinaus die Information, wie sich die jeweilige wirtschaftliche Leistung des Projektes bei Abweichungen von z_0 verändert, sofern keine Anpassungsmaßnahmen durchgeführt werden. Zu ermitteln ist das dynamische wirtschaftliche Verhalten der technisch-organisatorischen Alternativen bei Beibehaltung einer statischen Systemkonfiguration, in der keine Realoptionen vorliegen. Dies geschieht zusätzlich zu den in Abschnitt 6.4.2 aufgeführten Modellierungsansätzen mit Hilfe von Strafkosten, die anfallen, sobald einzelne Unsicherheiten einen bestimmten Grenzwert überschreiten.

Die Strafkosten quantifizieren, wie groß die wirtschaftlichen Folgen der Unsicherheit sind. Sie gehen über die bereits abgebildeten Zusammenhänge wie Beschäftigungseffekte in Folge geringer Auslastung (Abschnitt 6.4.2) hinaus und umfassen z. B.

- entgangenen Umsatz, bspw. in Folge zu geringer Produktionskapazität,

- Vertrags- und Konventionalstrafen, bspw. aufgrund unzureichender Lieferqualität oder
- Aufwand für Sondermaßnahmen, bspw. für Fremdvergabe von Produktionsschritten bei fehlendem Know-how.

Solche Kosten entstehen, wenn die *absoluten Leistungsgrenzen* eines Systems überschritten sind. Bspw. kann nur eine definierte Stückzahl pro Zeiteinheit hergestellt werden oder Produkte lassen sich nur bis zu einer bestimmten Masse mit der geplanten Fördertechnik transportieren. Dagegen verändert sich die Kostenstruktur bereits früher nach Überschreiten einer *relativen Leistungsgrenze*. Ist bspw. die Auftragsdurchlaufzeit (DLZ) zzgl. der Wiederbeschaffungszeit (WBZ) kleiner als die geforderte Kundenreaktionszeit (KRZ), kann ohne Lagerhaltung vollständig auftragsbezogen produziert werden. Sobald sich das Verhältnis aus WBZ, DLZ und KRZ verändert, ist ab einer bestimmten Grenze ohne Fertig- oder Rohteilbestände keine termingerechte Auftragsabwicklung mehr möglich, so dass sich in der Folge die Kostenstruktur verändert. Denkbar sind auch erhöhter Handhabungs- und Transportaufwand in Folge eines suboptimalen Layouts.

Für die einzelnen Unsicherheiten sind somit die absoluten und relativen Leistungsgrenzen zu ermitteln sowie in Abhängigkeit davon die entstehenden fixen oder variablen Strafkosten zu modellieren. Dabei ist darauf zu achten, einzelne Effekte nicht doppelt zu erfassen. Sofern bspw. die positiven Cash Flows auf Basis der *absetzbaren* Stückzahl ermittelt werden, müssen bei nicht ausreichender Kapazität Strafkosten addiert werden. Liegt den positiven Zahlungsströmen aber die tatsächlich *produzierte* Menge zugrunde, sind keine Strafkosten anzusetzen.

Die Modellierung von Strafkosten erweitert die in Abschnitt 6.4.2 erläuterte Basisbewertung. Dadurch wird es nachfolgend möglich, auf Basis der Auswirkungen, die eine Veränderung der einzelnen unsicheren Einflussgrößen auf die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Alternativen hat, die Bedeutung verschiedener Realloptionen zu beurteilen (Abschnitt 6.4.4). Die aufgezeigte Erweiterung ist darüber hinaus notwendig, um in Abschnitt 6.4.6 die zusätzlichen durch die Ausübung einer Realloption entstehenden Zahlungsströme abgrenzen zu können.

6.4.4 Quantitative Optionsauswahl und -priorisierung

6.4.4.1 Allgemeines

Durch die qualitative Optionsauswahl, die in Abschnitt 6.3.4 beschrieben wurde, ist die Menge potenzieller Realoptionen bereits deutlich eingeschränkt. In den meisten Fällen ist es jedoch aufgrund der hohen Komplexität nicht möglich und auch nicht sinnvoll, alle der nach diesem Schritt verbliebenen Handlungsmöglichkeiten in die Bewertung einzubeziehen. Es ist deshalb notwendig, sie nach ihrem Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Alternative zu sortieren.

Dieser Einfluss bestimmt sich aus dem Anpassungsbedarf und dem Anpassungspotenzial. Der Anpassungsbedarf hängt davon ab, wie sehr die Veränderung einzelner Faktoren in der Zukunft die Wirtschaftlichkeit einer Alternative A_j beeinflusst. Je stärker sich eine Alternative bei Schwankungen in dem definierten unsicheren Umfeld (vgl. Abschnitt 6.4.3.1) von ihrem derzeitigen optimalen Betriebspunkt entfernt, desto größer ist die Notwendigkeit, diesen Betriebspunkt zu verändern. In Abschnitt 6.4.4.3 wird erläutert, wie sich dieser nachfolgend als *äußeres Potenzial einer Optionsausübung* bezeichnete Anpassungsbedarf abschätzen lässt. Dagegen ist das *innere Potenzial einer Optionsausübung* ein Maß dafür, wie groß die durch die Ausübung einer Realoption erreichbaren Veränderungen der Kosten- oder Erlösstruktur einer Alternative sind (Abschnitt 6.4.4.3). Beide Größen werden in Abschnitt 6.4.4.4 zu einer integrierten Kennzahl zusammengeführt, um so die Verbindung zwischen Anpassungsbedarf und Anpassungspotenzial für jede der vorausgewählten Realoptionen herzustellen.

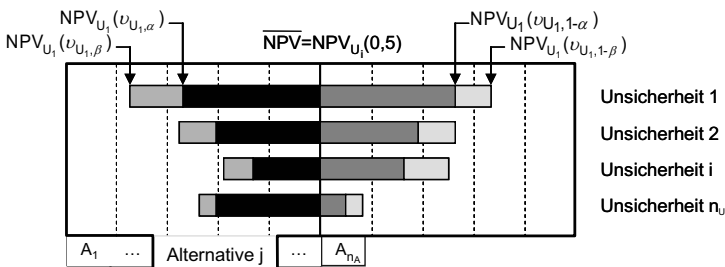
6.4.4.2 Äußeres Potenzial einer Optionsausübung

Bereits die in Abschnitt 6.3.2.3 erläuterte Erstellung des Umfeldprofils beinhaltet eine Untersuchung des äußeren Potenzials einer Optionsausübung. Sie ist jedoch rein qualitativer Natur und übergreifend auf alle zu vergleichenden Alternativen bezogen. An dieser Stelle ist eine präzisere Analyse erforderlich, weshalb nachfolgend eine Vorgehensweise vorgestellt wird, die eine *quantitative* sowie *alternativenspezifische* Beurteilung des äußeren Potenzials ermöglicht. Die hierbei eingesetzte Methode ist die Sensitivitätsanalyse.

Eine Sensitivitätsanalyse ist „(...) *the study of how uncertainty in the output of a model (numerical or otherwise) can be apportioned to different sources of uncer-*

tainty in the model input“ (SALTELLI ET AL. 2004, S. 45). Im einfachen Fall, der sog. lokalen Untersuchung, wird der Einfluss η_i eines beliebigen Faktors F_i auf bspw. den Kapitalwert durch die partielle Ableitung $\eta_i = \delta NPV / \delta F_i$ bestimmt. Solch eine Vorgehensweise ist jedoch nicht geeignet, wenn die Einflussgrößen als Zufallsvariablen vorliegen. In dieser Konstellation ist sowohl die Stärke der Unsicherheit (Varianz der Einflussgröße) als auch die Sensitivität der Ergebnis- auf Veränderungen der Einflussgröße zu berücksichtigen (MISHRA 2004). Aus diesem Grund werden für die Eingangsgrößen entsprechend ihrer zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeitsverteilung definierte Werte (z.B. 10%- und 90%-Quantil) angenommen und der isolierte Einfluss einer entsprechenden Variation der Eingangsgröße auf den Ergebniswert untersucht. Im weiteren Verlauf der Arbeit sind die Zusammenhänge stets mit Hilfe der vier Quantile zu den Niveaus α , β , $1-\alpha$ und $1-\beta$ illustriert.

Die Abweichungen vom erwarteten Kapitalwert (Mittelwert), die sich für die unterschiedlichen Quantilsniveaus ergeben, lassen sich für die einzelnen Unsicherheiten U_i bezogen jeweils auf eine Alternative A_j in Form eines sog. Tornado-Diagramms visualisieren. Ein Beispiel ist in Abbildung 34 gezeigt.



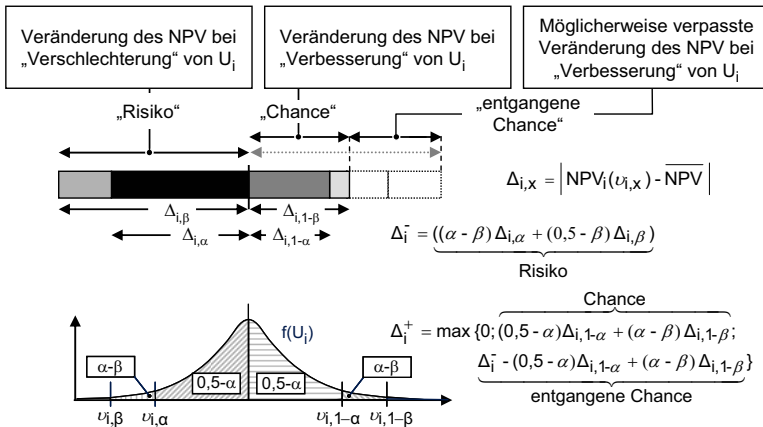
Legende

A_j : Alternative j	$NPV_{U_i}(v_{U_i,\alpha})$: Wert des NPV, wenn c.p. Unsicherheit U_i das Quantil v zum Niveau α annimmt
n_A : Anzahl der Alternativen	$\alpha, \beta, 1-\alpha, 1-\beta$: Quantilsniveaus
n_U : Anzahl der Unsicherheiten	NPV : NPV wenn alle Unsicherheiten ihren Erwartungswert annehmen
$v_{U_i,\alpha}$: Quantil der Unsicherheit i zum Niveau α	

Abbildung 34: Tornado-Diagramm zur Visualisierung des Einflusses von Unsicherheiten

Bei einer idealen Kostenstruktur müsste sich die Zielgröße Kapitalwert bei einer symmetrischen Variation der Unsicherheiten jeweils gleich stark erhöhen bzw. verringern. Wenn die negative Abweichung in der Realität größer ist, bedeutet dies, dass das System ungünstigen Entwicklungen überproportional ausgesetzt ist

bzw. dass an vorteilhaften Veränderungen nicht vollständig partizipiert werden kann. Ist hingegen die positive Abweichung größer als die negative, liegt eine für das Unternehmen günstige Situation vor: Gegen schlechte Entwicklungen ist es abgesichert und von günstigen kann es überdurchschnittlich profitieren. Aus dieser Überlegung lassen sich zwei unterschiedliche Bestandteile des äußeren Potenzials einer Optionsausübung ableiten. Die ermittelte und mit ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit gewichtete Höhe der *negativen Abweichung* vom erwarteten Kapitalwert verdeutlicht das *Risiko*, das durch die Veränderung einer Unsicherheit bezogen auf die Alternative A_j besteht. Die *Chance* zeigt entsprechend die Verbesserung auf sowie ob und ggf. wie stark die jeweils betrachtete Alternative unterproportional an einer positiven Veränderung des Umfelds partizipiert. Die Ermittlung beider Größen ist für eine Unsicherheit und eine Alternative in Abbildung 35 illustriert.



Legende

- $NPV_i(u_{i,\alpha})$: Wert des NPV, wenn c.p. Unsicherheit i das Quantil u zum Niveau α annimmt
- $\Delta_{i,x}$: Abweichung des NPV vom Mittelwert bei Veränderung der Unsicherheit U_i auf ihr Quantil x
- Δ_i^- : gesamte, gewichtete negative Abweichung des NPV bei ungünstiger Entwicklung von U_i
- Δ_i^+ : gesamte, gewichtete positive Abweichung („Chance“) oder zusätzlich mögliche Abweichung („entgangene Chance“) des NPV bei günstiger Entwicklung von U_i
- $\alpha, 1-\alpha, \beta, 1-\beta$: Quantilsniveaus
- $u_{i,\alpha}$: Quantil der Unsicherheit i zum Niveau α
- \overline{NPV} : erwarteter Kapitalwert (Mittelwert)
- $f(U_i)$: Dichtefunktion der Unsicherheit U_i

Abbildung 35: Darstellung der Berechnung des äußeren Potenzials einer Optionsausübung mit den Bestandteilen „Risiko“ und „Chance“

Die Abweichungen vom erwarteten Kapitalwert \overline{NPV} werden für unterschiedliche Quantile der untersuchten Unsicherheit ermittelt. Für eine Zusammenfassung zu einem Wert sind die berechneten Ergebnisse unter Berücksichtigung der Eintretenswahrscheinlichkeit zu gewichten. Wie sich die Gewichtungsfaktoren aus den Quantilsniveaus ergeben, ist im unteren Teil von Abbildung 35 verdeutlicht. Sofern eine Veränderung der Zufallsgröße U_i nur in eine Richtung auftritt, kann einer der beiden Bestandteile des äußeren Potentials, entweder „Chance“ oder „Risiko“, nicht erhoben werden. Dieser bekommt dann den Wert 0 zugewiesen.

Durch die beschriebene Vorgehensweise lässt sich für jede der zu vergleichenden technischen Alternativen unabhängig voneinander ermitteln, wie groß der Einfluss der einzelnen Unsicherheiten auf den Wert des jeweiligen Konzeptes ist. In einem nächsten Schritt muss untersucht werden, wie stark sich durch einzelne Realoptionen das ermittelte äußere Potenzial einer Optionsausübung, hervorgerufen durch Veränderungen des Umfeldes, beeinflussen lässt.

6.4.4.3 Inneres Potenzial einer Optionsausübung

Im Gegensatz zum äußeren Potenzial einer Optionsausübung, das sich durch eine Variation des Umfeldes bei einer konstanten Struktur des Produktionssystems ergibt (vgl. Abschnitt 6.4.4.2), verdeutlicht das *innere Potenzial einer Optionsausübung*, welche Verbesserung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit durch Anpassungen der jeweiligen Alternative erzielt werden kann.

Der Wert einer Realoption hängt davon ab, wie hoch der Ausübungspreis X (Aufwand) ist und wie stark eine Veränderung der Produktionsstruktur die Kosten- bzw. Erlöspositionen beeinflusst (Nutzen). Letztere lassen sich in die variablen, leistungsmengenabhängigen und die fixen, leistungsmengenunabhängigen Bestandteile unterscheiden. Prinzipiell ist es möglich, insbesondere die Ausübungspreise und die durch Anpassungen hervorgerufenen Veränderungen in den fixen Größen für alle der noch zur Auswahl stehenden Realoptionen zu bestimmen. Allerdings hat eine solch detaillierte Betrachtung einen hohen Aufwand zur Folge, was der Forderung nach einem effizienten Bewertungsprozess widerspricht. Vor allem jedoch gestaltet sich eine exakte Bestimmung der absoluten Höhe der *leistungsmengenabhängigen* Kosten- bzw. Erlösveränderungen schwierig, da die Leistungsmenge (z.B. produzierte Stückzahl, Anzahl Transporte, etc.) selbst oft unsicher ist. Aus diesen Gründen ist es zielführend, nicht ein absolutes, sondern ein relatives inneres Potenzial in Form einer Rangfolge der Realoptionen zu bestimmen.

Zu diesem Zweck werden die drei das innere Potenzial bestimmenden Faktoren (Ausübungspreis, Veränderung der variablen und fixen Kosten- und Erlöspositionen) zunächst unabhängig voneinander beurteilt und die Realoptionen in Bezug auf sie jeweils in eine Rangfolge gebracht. Dies kann, insbesondere bei einer großen Anzahl zur Auswahl stehender Optionen, durch die Methode des paarweisen Vergleichs unterstützt werden. Das relative innere Potenzial ergibt sich dann aus der Summe der drei Rangzahlen:

$$rg_I(O_{j,k}) = rg(\text{rg}_X(O_{j,k}) + \text{rg}_{\Delta\text{Fix}}(O_{j,k}) + \text{rg}_{\Delta\text{Var}}(O_{j,k})) \quad (19)$$

$rg(x_i)$	Rang von x_i in x_1, \dots, x_n
$O_{j,k}$	Realoption k aus dem Katalog der Handlungsmöglichkeiten, bezogen auf A_j
$rg_I(O_{j,k})$	Rang der Realoption k (bezogen auf A_j) im Hinblick auf ihr inneres Potenzial
$rg_X(O_{j,k})$	Rang der Realoption k (bezogen auf A_j) im Hinblick auf ihren Ausübungspreis
$rg_{\Delta\text{Fix}}(O_{j,k})$	Rang der Realoption k im Hinblick auf die Höhe der Veränderung der leistungsmengenunabhängigen Kosten- oder Erlösstruktur bei Ausübung von $O_{j,k}$
$rg_{\Delta\text{Var}}(O_{j,k})$	Rang der Realoption k im Hinblick auf die Höhe der Veränderung der leistungsmengenabhängigen Kosten- oder Erlösstruktur bei Ausübung von $O_{j,k}$

Da kleine Werte eine niedrige Rangzahl erhalten (vgl. HARTUNG ET AL. 1995, S. 79), besitzt die Realoption mit der höchsten Rangzahl das größte innere Potenzial. Aus (19) ist ersichtlich, dass diese Größe alternativenübergreifend ermittelt wird. Folglich existiert in Bezug auf das innere Potenzial, im Gegensatz zum alternativenspezifisch ermittelten äußeren Potenzial, nur eine Rangliste.

6.4.4.4 Priorität der einzelnen Realoptionen

Nach der Ermittlung des äußeren und inneren Potenzials einer Optionsausübung ist bekannt, in welchem Ausmaß die verschiedenen technisch-organisatorischen Alternativen von der Variation einzelner Unsicherheiten betroffen sind bzw. welche Handlungsmöglichkeiten die Kosten- und Erlösstruktur am stärksten beeinflussen können. Die Betrachtungen sind jedoch bisher sequenziell und isoliert erfolgt. Um in einer Bewertung schrittweise die Realoptionen berücksichtigen zu können, welche den größten Einfluss auf die Auswahlentscheidung haben, muss eine Verbindung zwischen Anpassungspotenzial und Anpassungsbedarf hergestellt werden.

Das Ziel besteht somit darin, eine alternativenübergreifende *gemeinsame* Rangliste der zur Auswahl stehenden Realoptionen zu erstellen. Dazu sind zwei Schritte notwendig. Zunächst wird der Rang der einzelnen Handlungsmöglichkeiten mit der Bedeutung der Unsicherheit, deren Auswirkungen auf das Produktionssystem durch die Option begegnet wird, gewichtet. Auf der Basis dieses Ergebnisses ist dann erneut eine Rangfolge der Realoptionen zu bilden. Als Eingangsgrößen liegen vor:

- das äußere Potenzial einer Optionsausübung jeweils für die verschiedenen Alternativen und Unsicherheiten, ermittelt durch die Auswirkung der als relevant erachteten Unsicherheiten (Bewertung mit A, vgl. Abschnitt 6.3.2.3) auf die einzelnen technisch-organisatorischen Systemkonzepte und
- das innere Potenzial der Optionen, das übergreifend für alle Alternativen gemeinsam bestimmt wurde.

Zunächst muss zugeordnet werden, welches äußere Potenzial einer Optionsausübung mit dem inneren Potenzial einer spezifischen Realoption korrespondiert. Vorhandene Versicherungsoptionen ermöglichen es, die Auswirkungen einer wirtschaftlich ungünstigen Entwicklung einer speziellen Unsicherheit U_i zu mindern. Sie tragen durch eine potenzielle Ausübung zur Minderung des Risikos $\Delta_f(A_j)$ der Alternative A_j bei. Dementgegen sprechen Wachstumsoptionen den Bestandteil Chance $\Delta_f^+(A_j)$ des äußeren Potenzials an.

In Anlehnung an die Methode der FMEA soll eine Kombination der beiden Größen zu einem Kriterium $\pi_{j,k}$ (Gesamtpotenzial der auf A_j wirkenden Realoption $O_{j,k}$) durch Multiplikation erfolgen. Dazu ist es jedoch erforderlich, das äußere Potenzial ebenfalls in eine Rangskala zu transformieren. Die beschriebenen Schritte sind in Abbildung 36 graphisch verdeutlicht.

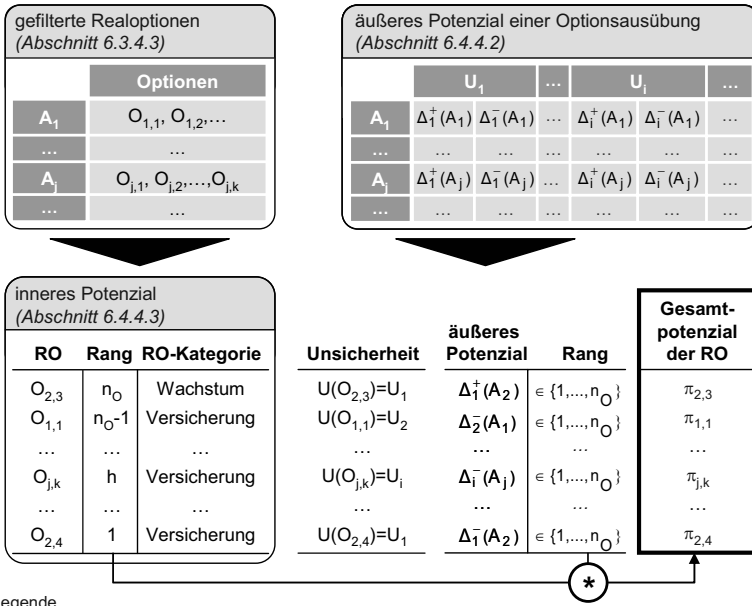


Abbildung 36: Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials von Realloptionen aus ihrem inneren sowie dem jeweils korrespondierenden äußeren Potenzial der Alternativen

Formal berechnet sich π_{j,k} aus (20):

$$\pi_{j,k} = \begin{cases} \text{rg}_I(O_{j,k}) \cdot \text{rg}(\Delta_i^-(A_j)), & \text{falls } O_{j,k} \text{ Versicherungsoption} \\ \text{rg}_I(O_{j,k}) \cdot \text{rg}(\Delta_i^+(A_j)), & \text{falls } O_{j,k} \text{ Wachstumsoption} \end{cases} \quad (20)$$

mit $U(O_{j,k}) = U_i$

- rg_I(O_{j,k}) Rang der Realloption O_{j,k} im Hinblick auf ihr inneres Potenzial
- π_{j,k} Gesamtpotenzial einer Realloption k, die sich auf A_j bezieht
- Δ_i⁽⁺⁾(A_j) erwartete Änderung des Kapitalwertes von A_j bei Veränderung der Unsicherheit U_i, Anteil „Risiko“ („Chance“)

Je größer π_{j,k} ist, desto größere wirtschaftliche Bedeutung besitzt die Realloption O_{j,k} und desto früher sollte sie bei einer Bewertung berücksichtigt werden. Die

Addition aller $\pi_{j,k}$ einer Alternative A_j ergibt einen Näherungswert für deren Gesamtpotenzial $\Pi(A_j)$. Theoretisch müsste somit das Maximum der $\Pi(A_j)$ dem Potenzial $\Pi(A_{j^*})$ der wandlungsfähigsten Alternative A_{j^*} entsprechen. Anhand dieser Beziehung ist es möglich, zum Abschluss der Realoptionsauswahl und -priorisierung die Konsistenz des Ergebnisses mit den theoretischen Grundlagen zu überprüfen und eventuelle Fehler im Zuge einer Iteration zu beheben.

6.4.5 Auswahl und Modellierung primärer und sekundärer Unsicherheiten

6.4.5.1 Allgemeines

In Abschnitt 5.4 wurde gezeigt, dass für die Problemstellung dieser Arbeit die Verwendung eines Bewertungsverfahrens zielführend ist, das auf der Modellierung der Unsicherheit mit Hilfe von Bäumen bzw. Gittern aufbaut. Solche Baumdarstellungen sind intuitiv zugänglich und flexibel, können aber nur eine begrenzte Anzahl von Unsicherheiten abbilden. Es ist deshalb notwendig, die *Auswahl der Unsicherheiten* sowie den *Aufbau eines Baumes* näher zu beschreiben. Entsprechend werden in den Abschnitten 6.4.5.2 bis 6.4.5.5 die folgenden Fragen beantwortet:

1. Welche Unsicherheiten werden in einem Baum modelliert (nachfolgend als *primäre Unsicherheiten* bezeichnet) und welche sind sog. *sekundäre Unsicherheiten* (Abschnitte 6.4.5.2 und 6.4.5.3, vgl. zu dieser Unterscheidung auch ZAEH ET AL. 2005a)?
2. Welche grundlegende Form hat der Baum (Abschnitt 6.4.5.3)?
3. Wie sind die wichtigsten Parameter zu bestimmen, durch welche die Gestalt des Baumes festgelegt ist (Abschnitt 6.4.5.5)?

6.4.5.2 Anforderungen an eine primäre Unsicherheit

In der Regel wird das Umfeld der Produktion durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die sich in der Zukunft unterschiedlich entwickeln können. Eine gleichwertige Abbildung aller dieser Größen erhöht den Modellierungsaufwand erheblich. Die Unterscheidung in *primäre* und *sekundäre Unsicherheiten* ermöglicht es dagegen, die vorteilhafte Darstellung der Unsicherheit in Form eine

Baumes zu nutzen und gleichzeitig die Komplexität zu beschränken (ZAEH ET AL. 2005a, SUDHOFF 2007, S. 117 ff.). Nachfolgend ist kurz aufgezeigt, welche Eigenschaften eine Einflussgröße besitzen muss, um als primär eingestuft werden zu können.

Eine Modellierung von Unsicherheiten in Form eines Baumes erlaubt es, einen Informationsgewinn über die Zeit abzubilden. Zudem ist es möglich, einzelne, diskrete Entscheidungssituationen explizit und nicht in Form einer Blackbox darzustellen²⁰, so dass die Transparenz der Umweltentwicklung gefördert wird (vgl. SUDHOFF 2007, S. 59). Beide Sachverhalte sind in der nachfolgenden Abbildung 37 verdeutlicht.

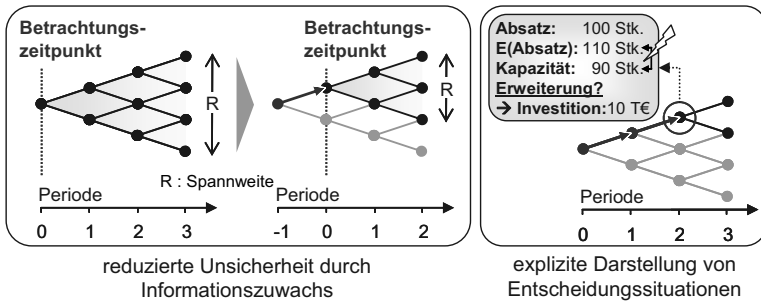


Abbildung 37: Modellierung von Informationszuwachs und explizite Darstellung einer Entscheidungssituation in einem Baum am Beispiel der Stückzahlentwicklung als primäre Unsicherheit

Es kommen also nur die Unsicherheiten als primär in Frage, aufgrund deren Ausprägung Entscheidungen getroffen werden. Das bedeutet, dass sich als relevant eingestufte und priorisierte Realloptionen (Abschnitt 6.4.4.4) auf sie beziehen und es sich gleichzeitig um Unsicherheiten handelt, die entweder eine Entwicklung über die Zeit (stochastischer Prozess) oder eine Reihe verketteter Ereignisse beschreiben. Für alle Projektunsicherheiten U_i , die diese Bedingungen erfüllen, sind die Potenziale der sich auf sie beziehenden Typ-I-Optionen zu $\Pi(U_i)$ zu addieren und eine Rangfolge zu bilden. Nicht berücksichtigt wird das Potenzial von Typ-II-Optionen sowie von Handlungsmöglichkeiten, die sich auf eine bereits von der Betrachtung ausgeschlossene Alternative beziehen.

²⁰ Die explizite Darstellung diskreter Entscheidungssituationen erleichtert auch die Umsetzung in einem unterstützenden EDV-Werkzeug, vgl. dazu Kapitel 7.

6.4.5.3 Bestimmung der grundlegenden Form des Baumes und Auswahl der primären Unsicherheit

Prinzipiell lassen sich in einem Baum mehrere Unsicherheiten kombiniert darstellen, wodurch jedoch dessen Übersichtlichkeit abnimmt und die Komplexität steigt. Eine quadranomiale Form, die zwei Größen zusammenfasst (Abbildung 38), kann sinnvoll sein, wenn die Differenz zwischen den beiden größten $\Pi(U_i)$ sehr gering ist. Nachfolgend wird aufgrund der größeren Übersichtlichkeit von einem binomialen Baum ausgegangen. Diese Beschränkung hat keinerlei konzeptionelle Auswirkungen und schränkt die Allgemeingültigkeit nicht ein²¹. Somit wird als primäre Unsicherheit i^* diejenige ausgewählt, für die $\max \{\Pi(U_i)\} = \Pi(U_{i^*})$ gilt. In der Praxis wird häufig die Stückzahlentwicklung (Gesamtmenge, Variantenaufteilung etc.) diese Größe sein, da sie „(...) *Hauptauslösegrund für Anpassungsmaßnahmen*“ ist (REINHART & DÜRRSCHMIDT 1998, S. 135, SESTERHENN 2003, S. 69, AGGTELEKY 1981, S. 27)²².

Weiterhin gilt es zu entscheiden, ob ein nicht-rekombinierender oder ein rekombinierender Baum (COPELAND & ANTIKAROV 2001, S. 121, WANG 2005, S. 148) gewählt werden soll. Letzterer hat eine deutlich geringere Komplexität zur Folge, da in ihm die in Abbildung 38 aufgeführte Bedingung erfüllt ist und deshalb die Anzahl der Knoten mit der Zeit weniger stark zunimmt.

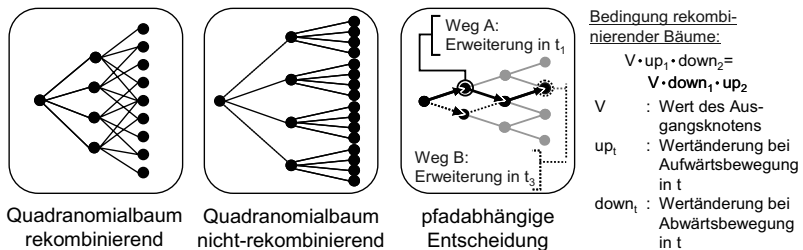


Abbildung 38: Vergleichende Darstellung von quadranomalen rekombinierenden und nicht-rekombinierenden Bäumen sowie Illustration von Pfadabhängigkeit

²¹ Erläuterungen dazu finden sich z.B. bei COPELAND & ANTIKAROV (2001, S. 279 ff.).

²² Zur Modellierung von Stückzahlentwicklungen sei exemplarisch auf EGGERT (2003) verwiesen.

Es ist allerdings nicht möglich, ausgehend von einem bestimmten Zustand (Knoten) eindeutig die Entwicklung (Pfad) zu bestimmen, welche zu diesem Zustand geführt hat. *Pfadabhängige Entscheidungen*, bei denen bspw. über eine Systemerweiterung bei Erreichen einer definierten Stückzahlgrenze entschieden wird, lassen sich deshalb nur mit nicht-rekombinierenden Bäumen abbilden. Abbildung 38 zeigt diese Zusammenhänge. Die Entscheidung, wie zu modellieren ist, hängt somit von der als primär gewählten Unsicherheit und den mit ihr verknüpften Entscheidungen ab.

6.4.5.4 Baumparameter

Bei der Abbildung der Unsicherheiten in einen Baum muss darauf geachtet werden, dass deren charakteristische Größen bzw. die ihrer Verteilungsfunktionen erhalten bleiben. Entscheidend für die Modellierung ist ferner, welche Informationen der Anwender kennt bzw. verfügbar hat. Es lassen sich Grundsätze formulieren, aus denen für den Einzelfall konkrete Modellierungen abgeleitet werden können:

- Der Erwartungswert und die Standardabweichung der Stichprobe, die durch die Auswahl diskreter Knoten im Baum gebildet wird, sollten in jeder Periode mit dem theoretischen bzw. geschätzten Erwartungswert übereinstimmen.
- Durch Erhöhung der Knotenanzahl zu einem Zeitpunkt, d.h. durch eine Vergrößerung von Δt und somit eine größere Anzahl an Schritten pro Periode, wird die tatsächliche Verteilung der Werte bei gleich bleibendem Erwartungswert und Standardabweichung angenähert.

Handelt es sich bei der primären Unsicherheit um eine verkettete Folge isolierter Ereignisse, ist dies zwingend mit Hilfe eines nicht-rekombinierenden Baumes zu modellieren. Dessen Aufbau ist intuitiv zugänglich, da für jeden Knoten ausgehend vom Vorgänger eine Eintrittswahrscheinlichkeit und die Ausprägung bestimmt werden muss (siehe Abbildung 33 auf S. 123). Falls aus anderen Gründen ein nicht-rekombinierender Baum erforderlich ist (z.B. bei sich ändernder Unschärfe, vgl. COPELAND & ANTIKAROV 2001, S. 342), lässt er sich auf eine Folge rekombinierender Bäume zurückführen, so dass nachfolgend nur diese näher betrachtet werden.

Die Standardvorgehensweisen bei der Konstruktion von Bäumen stellen „vorwärts-gerichtete“ Ansätze dar. Dabei werden aus einem Anfangswert (Ausgangs-

knoten) bei gegebener Drift und Schwankung die zukünftigen Realisierungen, d.h. die nachfolgenden Knoten, abgeleitet. Bei einer „rückwärtsgerichteten“ Vorgehensweise schätzt man die denkbaren Extremwerte der Zukunft und ermittelt daraus mit dem in Abschnitt 10.2.2 erläuterten Vorgehen die Baumparameter.

Ausgehend von (15) ergibt sich für eine *additive Entwicklung (BM)* die folgende Gleichung (21). Die Parameter sind dabei so gewählt, dass die drei genannten Grundsätze eingehalten werden (DIXIT & PINDYCK 1994, S. 68 f.).

$$u_{t+1} = \begin{cases} u_t + \Delta y + \frac{\mu_t}{\Delta t} & , \text{ falls Aufwärtsbewegung} \\ u_t - \Delta y + \frac{\mu_t}{\Delta t} & , \text{ falls Abwärtsbewegung} \end{cases} \quad (21)$$

mit

$$\Delta y = \sigma \sqrt{\Delta t},$$

$$\Delta t = \frac{\text{Periodenlänge}}{\text{Anzahl Schritte/Periode}}$$

- Δy Baumparameter, der den durch die stochastische Schwankung hervorgerufenen Abstand zwischen zwei Knoten bestimmt („Schrittweite“). In einem rekombinierenden Baum ist Δy über die gesamte Zeit konstant.
- Δt Zeiteinheit, in die die betrachtete Periodenlänge in einem Baum unterteilt wird. Die Kürze von Δt ist ein Maß für die Genauigkeit der Abbildung im Baum.

Diese Art von Baummodellierung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Schwankung mit der Zeit absolut größer wird, als Folge eines konstant gewählten Δy relativ jedoch abnimmt. Da für $\Delta t \rightarrow 0$ die Verteilung der Werte in jeder Periode je nach Wahl von p bzw. q gegen eine symmetrische oder verzerrte Normalverteilung konvergiert (COPELAND & ANTIKAROV 2001, S. 124), ist es ferner nicht möglich, asymmetrische Situationen abzubilden, in denen die maximale positive (negative) Abweichung vom Mittelwert größer ist als die negative (positive). Ein großer Vorzug eines additiven Prozesses ist, dass auch bei einer Veränderung der Drift μ_t über die Zeit dennoch ein rekombinierender Baum erhalten bleibt. Es lassen sich so insbesondere Lebenszyklusverläufe flexibel und übersichtlich abbilden.

Prinzipiell ist dies auch mit einem *multiplikativen Prozess* möglich. Allerdings ist in diesem Fall die Darstellung im Baum visuell weniger intuitiv, da zur Anpassung der Drift μ_t eine Veränderung der Wahrscheinlichkeiten p und $q=1-p$ notwendig ist und die Anordnung der Knoten im Baum unverändert bleibt (LUENBERGER 1998, S. 314 f.). In diesem Prozess können die Werte nicht nega-

tiv werden, so dass er sich insbesondere zur Modellierung von Preisen eignet. Durch die Multiplikation mit einem Parameter *up* bzw. *down*, der durch die Stärke der Unsicherheit bestimmt ist, bleibt die relative Schwankung über die Zeit konstant.

Als Folge der Diskretisierung im Baum erfolgt vor allem in den ersten Schritten eine ungenaue Modellierung. Da der gesamte Wertebereich nur durch zwei einzelne Knoten repräsentiert wird, sind bei der beschriebenen Vorgehensweise die Extremwerte nicht berücksichtigt. Alternative Konstruktionsverfahren wie das von SUDHOFF (2007) vorgeschlagene, das jedoch nicht die formulierten Grundsätze zur Bestimmung der Baumparameter erfüllt, gewichten hingegen die minimale und maximale Ausprägung zu stark. Deshalb wird empfohlen, ein variables Δt zu verwenden. So kann durch kleine Zeitschritte zu Beginn die Genauigkeit erhöht und durch deren Vergrößerung in späteren Perioden die Komplexität der Modellierung dennoch begrenzt werden. Andererseits ist es nicht zielführend, einen sehr kleinen Wertebereich durch eine hohe Anzahl von Knoten abzubilden. SUDHOFF (2007, S. 124) weist deshalb darauf hin, dass ggf. eine Verkürzung des Baumes sinnvoll ist, indem mehrere Perioden zusammengefasst werden.

6.4.5.5 Modellierung sekundärer Unsicherheiten

In einem Baum repräsentiert jeder Knoten genau eine spezielle Entwicklung des Umfeldes. Wenn mehrere voneinander unabhängige Unsicherheiten in einem multinomialen Baum abgebildet werden sollen, wächst aufgrund der Kombinatorik die Komplexität stark an. Deshalb ist es notwendig, zwischen *primären* und *sekundären* Unsicherheiten zu differenzieren (vgl. ZAEH ET AL. 2005a, ZAEH ET AL. 2005d, ZAEH ET AL. 2006, SUDHOFF 2007). Unsicherheiten werden als sekundär eingestuft, wenn sich im Hinblick auf sie im Laufe der Zeit keine zusätzlichen, die Unsicherheit reduzierenden Informationen gewinnen lassen, wenn auf ihre Veränderung nicht mit einer Anpassung des Produktionssystems reagiert werden kann oder wenn ihre Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit verglichen mit der von anderen Einflussgrößen geringer ist. Somit sind alle isolierten Ereignisse und Variablenausprägungen (vgl. Abschnitt 6.4.3.1) immer sekundär. Im Gegensatz zu den primären Unsicherheiten, von denen die Fähigkeit einer aktiven Veränderung durch das Management angesprochen wird, zeigen die sekundären auf, wie sich ein passives System in einem schwankenden Umfeld verhält.

Eine Methode, mit der sich Unsicherheiten sehr flexibel modellieren lassen, ist die Monte-Carlo-Simulation. Bei diesem Verfahren wird in einer *Ziehung* für alle

definierten Zufallsgrößen entsprechend zugrunde liegender Verteilungsfunktionen *gleichzeitig jeweils eine Ausprägung* ermittelt. Gemeinsam mit der (konstanten) Ausprägung der primären Unsicherheit bildet eine Ziehung k die Realisierung z_k der Umfeldentwicklung Z ab. Bei häufiger Wiederholung des Vorganges nähern sich die *empirischen* relativen Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Größen den definierten *theoretischen* Verteilungen aller $U_{t,i}$ an. Da für jedes z_k auch der Kapitalwert der Alternativen berechnet wird, ergibt sich in Konsequenz auch für die Wirtschaftlichkeit eine Häufigkeitsverteilung, die dem Risikoprofil einer Alternative entspricht (vgl. Abbildung 39).

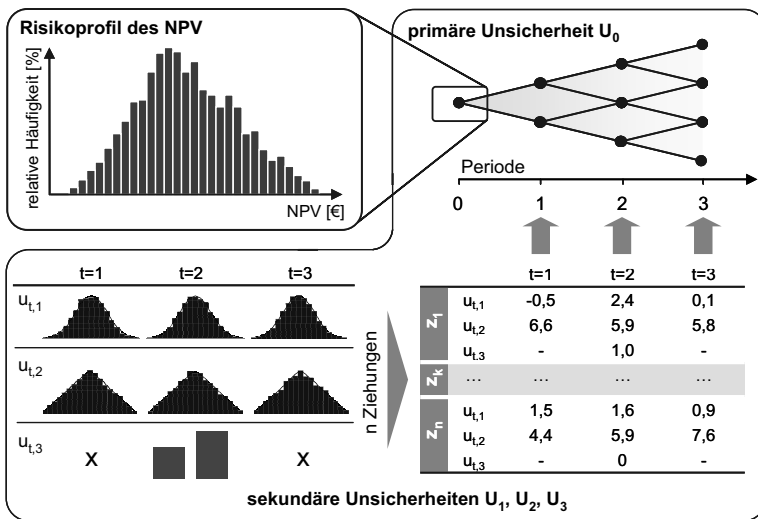


Abbildung 39: Anwendung der Monte-Carlo-Simulation in Kombination mit einem binomialen Baum zur Ableitung eines Risikoprofils

Isolierte Ereignisse können durch Verteilungen, die in modernen Software-Programmen wie Crystal Ball® der Firma Decisioneering standardmäßig hinterlegt sind, beschrieben werden. Ebenso einfach gestaltet sich die Abbildung der in (15) und (16) formal definierten Prozesse (siehe S. 121), indem die Ausprägung der $N(0;1)$ -verteilten Zufallsgröße ε_i simuliert wird. Zulässig ist auch eine Verallgemeinerung, bei der die Drift $\mu(t)$ und Schwankung $\sigma(t)$ über die Zeit nicht konstant bleiben (vgl. SUDHOFF 2007, S. 120 ff.).

6.4.5.6 Zwischenfazit

Die Unterscheidung in primäre und sekundäre Unsicherheiten erlaubt es, die Vorteile einer Baumdarstellung zu nutzen und gleichzeitig die Komplexität signifikant zu reduzieren. In diesem Abschnitt wurde gezeigt, wie ausgehend von einer Bewertung des Potenzials der Realloptionen die primäre(n) Unsicherheit(en) zu bestimmen ist (sind), wie die Parameter eines Baumes gewählt werden müssen und wie sich sekundäre Unsicherheiten über eine Monte-Carlo-Simulation berücksichtigen lassen. Auf dieser Grundlage ist es möglich, nachfolgend die konkrete Berechnung von Optionswerten zu erläutern.

6.4.6 Berechnung des Optionswertes

6.4.6.1 Allgemeines

Es wurde bereits dargelegt, dass zu Beginn der Untersuchungen für jede der zu vergleichenden technischen Alternativen eine Basisbewertung bei quasi-sicherer Zukunft und starrer Planung nach dem herkömmlichen Kapitalwertverfahren vorzunehmen ist (Abschnitt 6.4.1). Danach sind für jede Periode die entstehenden Kosten und Erlöse *für den erwarteten Umweltzustand* bekannt, so dass auch für jede Periode ein *eindeutiger Zahlungsstrom* besteht. Diese Betrachtungen sind für eine Realloptionsbewertung auszuweiten, so dass ein Übergang von einer starren auf eine dynamische Untersuchung erfolgt.

Die in der Literatur beschriebenen Verfahren zur Realloptionsbewertung ermitteln dazu den gegenwärtigen Wert eines Projektes und prognostizieren dann dessen zukünftigen Verlauf. Es wird also nur *einmal* ermittelt, wie sich die Zahlungsströme zusammensetzen, und dann ein stochastischer Prozess für den Werteverlauf angenommen. Auf produktionstechnische Fragestellungen ist diese Vorgehensweise in der Regel nicht übertragbar, da sich so die Zusammenhänge zwischen der Veränderung des Umfelds und der technischen Leistungsfähigkeit nur unzureichend berücksichtigen lassen. Die Herausforderung besteht darin, die zukünftigen Zahlungsströme in Abhängigkeit von einer unsicheren Umwelt und der bestehenden Systemkonfiguration zu ermitteln. Dazu werden die Veränderungen der wichtigsten Einflussfaktoren als stochastische Prozesse modelliert und in Abhängigkeit davon die entstehenden Aufwände und Erlöse bestimmt. Die Form der Wertentwicklung des untersuchten Projektes resultiert dann aus der Kosten- und Leitungsbetrachtung des technischen Konzeptes, ist also ein *Ergebnis der*

Bewertung und keine zugrunde liegende Annahme. Über die *Ausübung einer Realloption* wird dabei nur auf Basis ihres jeweiligen *Wertbeitrages* entschieden, so dass auch für die einzelnen Optionen ein (isolierter) Werteverlauf zu bestimmen ist.

Als wichtiges Prinzip der Optionsbewertung wurde in Abschnitt 5.2 die Anpassung des Kalkulationszinses an die individuelle Risikostruktur genannt. Bei dem MAD-Ansatz nach COPELAND & ANTIKAROV ist dazu ein Basisprojekt als Underlying notwendig, das keine Anpassungsfähigkeit besitzt und von dem angenommen wird, dass es mit den herkömmlichen Bewertungsverfahren korrekt bewertet ist.

Aus den dargestellten Zusammenhängen lassen sich mehrere Tätigkeiten ableiten, die für eine Realoptionsbewertung erforderlich sind und die in den nachfolgenden Abschnitten genauer erläutert werden:

1. Ermittlung der *Zahlungsströme* für die verschiedenen technisch-organisatorischen Alternativen und die bestehenden Realoptionen (Abschnitt 6.4.6.2)
2. Identifikation und Definition eines *Underlying* bzw. Basisprojektes (Abschnitt 6.4.6.3)
3. Ermittlung des *Werteverlaufes* von Alternativen und Realoptionen, die Untersuchung der *Optionsausübung* und schließlich die Konsolidierung in einer *integrierten Bewertung* (Abschnitt 6.4.6.4)

Die Abfolge dieser Schritte ist in Abbildung 40 visualisiert. Die Bestimmung der Zahlungsströme für die Alternativen ohne enthaltene Realoptionen sowie die Abgrenzung des Basisobjektes erfolgt einmalig zu Beginn des Vorgehens. Anschließend wird für jeden Bewertungszyklus zunächst diejenige Typ-I-Option zur Untersuchung ausgewählt, welche *bezogen auf die primäre Unsicherheit* den größten Rang besitzt und die noch nicht in die Bewertung einbezogen ist. Anschließend sind für diese Realoption die resultierenden Zahlungsströme zu ermitteln²³, ehe dann die eigentliche technisch-mathematische Bewertung erfolgt.

²³ Dieser Schritt ist abweichend von der Reihenfolge im Bewertungsprozess bereits in Abschnitt 6.4.6.2 erläutert, da kein konzeptioneller Unterschied zu der Ermittlung von Zahlungsströmen der Alternativen ohne Realoptionen besteht.

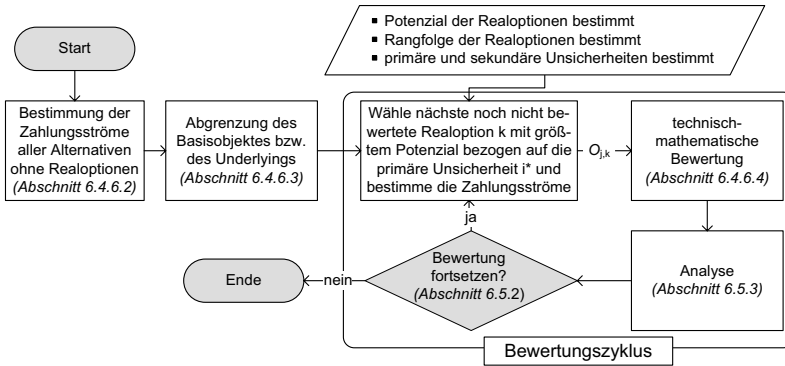
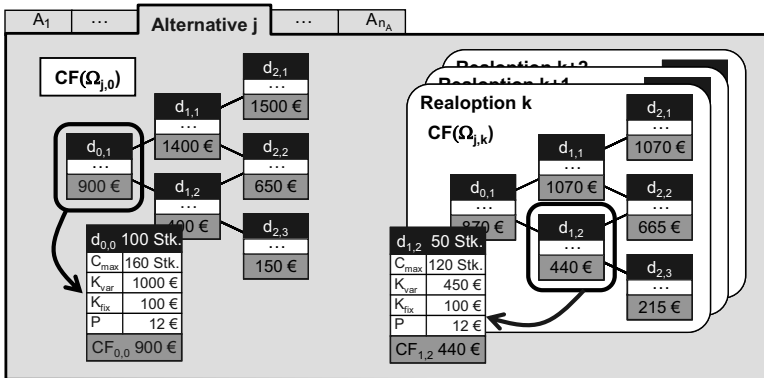


Abbildung 40: Iterativer Prozess der Realoptionsbewertung

6.4.6.2 Bestimmung der Zahlungsströme

Im Zuge der Basisbewertung wurde bereits ermittelt, welche Aufwands- und Erlöspositionen für die Berechnung relevant sind. Aufbauend auf der Baumdarstellung der primären Unsicherheit kann deren Quantifizierung nicht nur für den Erwartungswert der Perioden, sondern für jeden Knoten erfolgen (Abbildung 41). Zu beachten ist, dass es sich um eine an Zahlungsströmen orientierte Rechnung handelt und deshalb kalkulatorische Größen, insbesondere Abschreibungen und Kosten für gebundenes Kapital wie Bestände²⁴, nicht einbezogen werden. Die Berechnungen sind zunächst für alle technischen Alternativen A_j in ihrer Grundkonfiguration, welche die optimale Bewältigung des Basisszenarios z_0 ermöglicht, vorzunehmen.

²⁴ An Stelle von Bestandskosten gehen die Zahlungen aus der *Erhöhung* oder *Verringerung* der Bestände in die Rechnung ein.



Legende

- A_j : Alternative j
 P : Verkaufspreis
 C_{max} : max. Kapazität
 K_{var} : variable Kosten
 n_A : Anzahl der Alternativen
 K_{fix} : fixe Kosten
 $CF_{t,h}$: Zahlungsstrom zum Zeitpunkt t in Knoten h
 $d_{t,h}$: Nachfrage zum Zeitpunkt t in Knoten h (primäre Unsicherheit)
 $\Omega_{j,k}$: Betriebsmodus von Alternative j mit ausgelöster Realoption k

Abbildung 41: Berechnung der Zahlungsströme in Abhängigkeit von den diskreten Zuständen der primären Unsicherheit für die zu vergleichenden technischen Alternativen und deren alternative Betriebsmodi

Die Realoptionen $O_{j,k}$ stellen die Möglichkeiten dar, bei Bedarf ein Produktionssystem zu verändern und von $\Omega_{j,0}$, dem Betriebsmodus der Alternative A_j ohne Option, in $\Omega_{j,k}$ den Betriebsmodus der Alternative A_j nach Ausübung von $O_{j,k}$ zu wechseln. In $\Omega_{j,0}$ sind bereits die jeweiligen sich auf A_j beziehenden Typ-II-Optionen eingeschlossen, bei denen über eine Ausübung nicht auf der Basis des generierten wirtschaftlichen Nutzen entschieden wird. Um dagegen beurteilen zu können, zu welchem Zeitpunkt ein Vorteil aus einem Wechsel in den durch eine Typ-I-Option geschaffenen Betriebsmodus möglicherweise resultiert und wie hoch dieser ggf. ist, sind für $\Omega_{j,k}$ der zu bewertenden Realoption die Zahlungsströme gesondert zu bestimmen. Sofern eine solche Aufstellung manuell erfolgt, kann der dazu benötigte Aufwand schnell sehr groß werden. Allerdings lässt er sich durch eine Unterstützung mit geeigneten EDV-Systemen stark reduzieren (vgl. Kapitel 7).

Der abschließende Arbeitsschritt besteht in der Quantifizierung der Zahlungen, die durch die Ausübung der Realoptionen, d. h. einen Wechsel des Betriebsmodus und die damit verbundenen Anpassungsmaßnahmen, entstehen. In vielen Fällen besteht dabei kein Zusammenhang mit dem unsicheren Umfeld, so dass ein einzelner statischer, über die Zeit konstanter Ausübungspreis bestimmt wer-

den kann. Sollte eine Abhängigkeit von der Ausprägung der primären Unsicherheit gegeben sein, muss eine Berechnung ebenfalls für jeden Knoten im Baum vorgenommen werden. Für die Ermittlung der Wechselkosten selbst werden in der Literatur zahlreiche Vorgehensweisen beschrieben (z.B. CISEK 2005, SESTERHENN 2003, VON BRIEL 2002).

6.4.6.3 Abgrenzung eines Basisobjektes

COPELAND & ANTIKAROV (2001) legen in ihrer Arbeit dar, dass als Underlying zur Duplikation der Zahlungsströme eines Projektes *mit Handlungsmöglichkeiten*, d.h. mit enthaltenen Realoptionen, die Zahlungsströme *desselben Projektes ohne Handlungsmöglichkeiten*, nachfolgend als *Basisobjekt* bezeichnet, verwendet werden können. Sie begründen dies damit, dass ein solches Projekt mit den herkömmlichen Verfahren korrekt bewertbar ist, da ohne inhärente Realoptionen keine asymmetrischen Auszahlungsprofile auftreten, die eine Anpassung des Diskontierungszinses erforderlich machen. Vor allem aber argumentieren sie, dass ein Projekt mit Flexibilität und ein Projekt ohne Flexibilität perfekt miteinander korreliert sind. Diese Erkenntnis ist essenziell, da grundsätzlich aus dem *Werteverlauf* eines Projektes *nicht auf die Entwicklung der Umwelt geschlossen* werden kann. Eine perfekte Korrelation ist die Voraussetzung, um eine Duplikation nur bei Kenntnis des Werteverlaufes durchführen zu können.

Die Abgrenzung des Basisobjektes für die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Methode baut auf diesen Überlegungen auf. Durch den Ansatz, den Projektwert $PV_{t,h}^d$ für *jeden Umweltzustand* ausgehend von den anfallenden Zahlungen zu ermitteln, ist immer sichergestellt, dass sich die Zahlungsströme unterschiedlicher Alternativen, die sich an derselben Stelle im Baum befinden, auf denselben Zustand beziehen. Eine perfekte Korrelation der *Wertentwicklung* ist somit für die Duplikation nicht mehr erforderlich. Ohne eine Optionsbewertung würde man die Konfiguration A^* zur Realisierung auswählen und sie als korrekt bewertet ansehen. Entsprechend ist genau dieses A^* als Referenz zu interpretieren, zu der die anderen Alternativen relativ beurteilt werden müssen. A^* bildet somit das zu verwendende Basisobjekt.

Dieses Basisobjekt wurde bisher nur für eine quasi-sichere Zukunft z_0 bewertet, d.h. mit zu jedem Zeitpunkt genau einer Ausprägung des Umfeldes. Es soll jedoch als Referenz für alle z_i dienen, so dass die Betrachtung für A^* auf eine dynamische Entwicklung mit mehreren alternativen Zuständen auszuweiten ist. Da-

bei muss für das Basisobjekt jedoch die Inflexibilität von A^* sowie die Charakteristik einer starren Planung erhalten bleiben²⁵.

Zunächst ist deshalb zu untersuchen, ob mit A^* die möglichen Zustände der dynamischen Zukunft zu jedem Zeitpunkt t erreicht werden können (vgl. dazu auch die Abschnitte 6.3.4.3 und 6.4.3.2). Ist dies nicht der Fall, bestehen mehrere Möglichkeiten:

1. Es wird eine Investition bestimmt, um zum Zeitpunkt t in einen solchen Betriebsmodus zu wechseln, mit dem die Einhaltung der vertraglich definierten Leistung möglich ist.
2. Es werden für jeden Knoten unterschiedliche Vertragsstrafen ermittelt, falls in ihm eine Anforderung nicht erfüllt werden kann.
3. Sollte mit der Alternative A^* nur ein sehr geringer Teil der möglichen Entwicklungen bewältigt werden können, ist ggf. ein anderes Basisobjekt zu wählen, das eine größere Basisflexibilität besitzt.

Da für das Basisobjekt die Charakteristik einer starren Planung erhalten bleiben soll, muss in allen Zuständen einer Periode das System im selben vorgegebenen Betriebsmodus arbeiten. Die resultierenden Zahlungsströme werden anschließend in einen Wertebaum überführt. Dabei geht man analog zum Entscheidungsbaumverfahren rekursiv vor (vgl. Abschnitt 2.2.1). Ausgehend von den Knoten der letzten Periode T , in denen die Werte $PV_{T,h}$ den Zahlungsströmen $CF_{T,h}$ entsprechen, lassen sich die $PV_{t,h}^d$ bestimmen, indem die ihnen nachfolgenden $PV_{t+1,h}^d$ bzw. $PV_{t+1,h+1}^d$ jeweils mit ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit p bzw. q gewichtet und mit der Renditeforderung i diskontiert werden.

Mit der Bestimmung und Abgrenzung des Basisobjektes ist die letzte Voraussetzung erfüllt, um die eigentliche mathematische Realloptionsbewertung durchführen zu können. Diese wird im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

²⁵ Diese Inflexibilität bedeutet nicht, dass A^* in der Realität unveränderbar ist und absolut keine Wandlungsfähigkeit besitzt. Es wird vielmehr ein Referenzverhalten festgehalten. Wenn A^* auch durch Realloptionen verändert werden kann, ist dies als eigene Alternative zu modellieren.

6.4.6.4 Berücksichtigung von Realloptionen und Bestimmung des erweiterten Kapitalwertes

Nach der Auswahl der zu bewertenden Realloptionen (Abschnitt 6.4.4), der Bestimmung der Zahlungsströme (Abschnitt 6.4.6.2) und der Abgrenzung des Basisobjektes (Underlying) (Abschnitt 6.4.6.3) wird in diesem Abschnitt darauf eingegangen, wie ein sog. *erweiterter Kapitalwert* für die verschiedenen technischen Alternativen bestimmt wird, der den Wert der vorhandenen Realloptionen berücksichtigt. Als Eingangsinformationen sind der Wertebaum des Basisobjektes, die Zahlungsstrombäume der verschiedenen Betriebsmodi sowie die Ausübungspreise für die einzelnen Realloptionen bekannt.

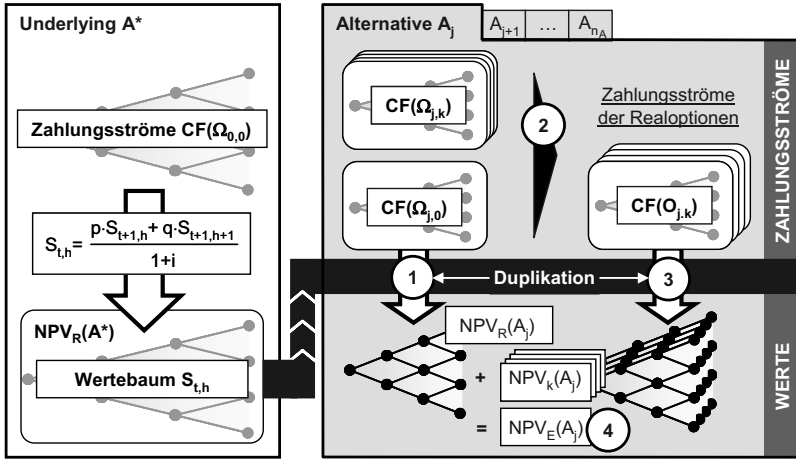
Das grundlegende (technisch-mathematische) Vorgehen einer Realloptionsbewertung besteht aus folgenden Schritten: Bestimmung der Wertentwicklung der optionsfreien technischen Alternative $A_j \neq A^*$ durch Duplikation (1), Ableitung der Zahlungsströme der Realloption k aus dem Betriebsmodus $\Omega_{j,k}$ (2), Berechnung des Optionswertes NPV_k (3) und schließlich Ermittlung des erweiterten Kapitalwertes NPV_E der Alternative A_j (4). Dieser Prozess ist mit seinen vier Einzelschritten in der Abbildung 42 aufgezeigt und wird nachfolgend erläutert.

Für die Herleitung aller Berechnungsvorschriften in diesem Abschnitt gilt im Folgenden die Annahme, dass das Recht der Ausübung zu Beginn jeder Periode besteht.

Wert des Betriebsmodus $\Omega_{j,0}$ ohne Realloptionen

Bereits die Berechnung der Wertentwicklung der technischen Alternativen A_j ohne Berücksichtigung von Realloptionen erfordert die Verwendung des Duplikationsansatzes, da sich die Zahlungen von A_j im Betriebsmodus $\Omega_{j,0}$ und damit das Risiko von denen des Basisobjektes A^* unterscheiden. Entsprechend ist der Kalkulationszins implizit anzupassen, indem in Anlehnung an die Gleichungen (4) und (8) auf S. 76 der Gegenwartswert zweier zukünftiger Zahlungen für jeden Knoten im Baum mit

$$\begin{aligned} m_{t,h} S_{t+1}^+ + (1 + r_f) B_{t,h} &= V_{t+1}^+ \\ m_{t,h} S_{t+1}^- + (1 + r_f) B_{t,h} &= V_{t+1}^- \end{aligned} \tag{22}$$



Legende

- A^* : Basisobjekt (Referenzalternative)
- $NPV_R(A_j)$: statischer Kapitalwert von A_j bei Risiko (ohne Realoptionen)
- $NPV_K(A_j)$: Kapitalwert der Realoption $O_{j,k}$
- $NPV_E(A_j)$: erweiterter Kapitalwert von A_j
- p, q : Wahrscheinlichkeit für Aufwärts- bzw. Abwärtsentwicklung
- n_A : Anzahl der Alternativen
- $S_{t,h}$: Wert des Underlying zum Zeitpunkt t in Knoten h
- $CF(\Omega_{j,k})$: Zahlungsstrom zum Zeitpunkt t in Knoten h im Betriebsmodus $\Omega_{j,k}$
- $CF(O_{j,k})$: Differenzzahlungsstrom zwischen $CF(\Omega_{j,k})$ und $CF(\Omega_{j,0})$, Zahlungsreihe der Realoption $O_{j,k}$
- $\Omega_{j,k(0)}$: Betriebsmodus von Alternative j mit ausgelöster Realoption k (ohne Realoption)
- i : Kalkulationszinssatz (Renditevorgabe)
- h : Knoten, in jeder Periode jeweils von oben gezählt

Abbildung 42: Berechnung des erweiterten Kapitalwertes der Alternative j durch Berücksichtigung des Wertes vorhandener Realoptionen und Duplikation der Zahlungsströme

$$\Rightarrow m_{t,h} = \frac{V_{t+1}^+ - V_{t+1}^-}{S_{t+1}^+ - S_{t+1}^-} \quad (23)$$

$$\Rightarrow B_{t,h} = \frac{V_{t+1}^- - m_{t,h} S_{t+1}^-}{1 + r_f} \quad (24)$$

- $B_{t,h}$ Wert einer risikolosen Anleihe zum Zeitpunkt t in Zustand h
- r_f risikoloser Zins
- $m_{t,h}$ Anteil des Basisobjektes am Duplikationsportfolio zum Zeitpunkt t in Zustand/Knoten h
- $S_{t+1}^{+/-}$ Nachfolgeknoten von $S_{t,h}$, $S_{t+1}^+ = S_{t+1,h}$ und $S_{t+1}^- = S_{t+1,h+1}$ (Underlying)
- $V_{t+1}^{+/-}$ Nachfolgeknoten von $V_{t,h}$, $V_{t+1}^+ = V_{t+1,h}$ und $V_{t+1}^- = V_{t+1,h+1}$

berechnet wird.

Als Ergebnis ergibt sich der Barwert zu

$$duPV_{t,h} = V_{t,h} = m_{t,h} S_{t,h} + B_{t,h}. \quad (25)$$

$duPV$ durch Duplikation ermittelter Barwert des Projektes (übrige Notation siehe oben)²⁶

Differenzzahlungsreihe der ausgeübten Realloption

Anschließend ist die Zahlungsreihe der bisher noch nicht bewerteten Realloption, die das höchste Potenzial bezogen auf die primäre Usicherheit besitzt (vgl. Abbildung 40 auf S. 142), als Differenzzahlungsreihe zu ermitteln. Ziel ist es, die aus einem Wechsel des Betriebsmodus resultierenden *zusätzlichen* oder *niedrigeren* Zahlungen zu ermitteln. Für die erste zu bewertende Realloption ergeben sich die gesuchten Zahlungsströme aus

$$CF_{t,h}(O_{j,k}) = CF_{t,h}(\Omega_{j,k}) - CF_{t,h}(\Omega_{j,0}). \quad (26)$$

Bei den folgende Optionen ist zu berücksichtigen, dass durch die Auslösung von $O_{j,k}$ ggf. ein neuer Betriebsmodus als Kombination aus $\Omega_{j,0}$ und $\Omega_{j,k}$ geschaffen wurde. Die Differenzzahlungsreihe für $O_{j,l}$ bestimmt sich deshalb zu

$$CF_{t,h}(O_{j,l}) = CF_{t,h}(\Omega_{j,l}) - CF_{t,h}(\Omega_{j,0} | O_{j,k}). \quad (27)$$

$CF_{t,h}(\Omega_{j,0} | O_{j,k})$ Zahlungsreihe des durch die Ausübung der Option $O_{j,k}$ verbesserten Betriebsmodus $\Omega_{j,0}$

Dieses Prinzip ist auch in Abbildung 43 verdeutlicht. Aus den Zahlungsströmen lassen sich dann ebenfalls unter Verwendung der Duplikation die $duPV_{t,h}^{ex}(O_{j,k})$ und damit der Wert einer seit dem Zeitpunkt $t=0$ ausgelösten Realloption $O_{j,k}$ bestimmen.

Wie bei der Ermittlung der Differenzzahlungsreihe ist auch bei der Bestimmung der Ausübungspreise $X_{t,h}$ auf die Reihenfolge zu achten, nach der die einzelnen Realloptionen bewertet werden. Beispielsweise kann sich der für eine Layoutanpassung erforderliche Umstellungsaufwand abhängig von der Anzahl vorhandener Arbeitsplätze entwickeln und somit in Beziehung zu eventuell vorher ausgelösten Skalierungsoptionen stehen.

²⁶ Anmerkung zur Notation: Mit PV wird immer ein korrekt ermittelter Barwert bezeichnet, der ggf. durch Duplikation errechnet wurde. Die Notation $duPV$ hebt lediglich zum besseren Verständnis hervor, dass der entsprechende Barwert auf einer Duplikation beruht.

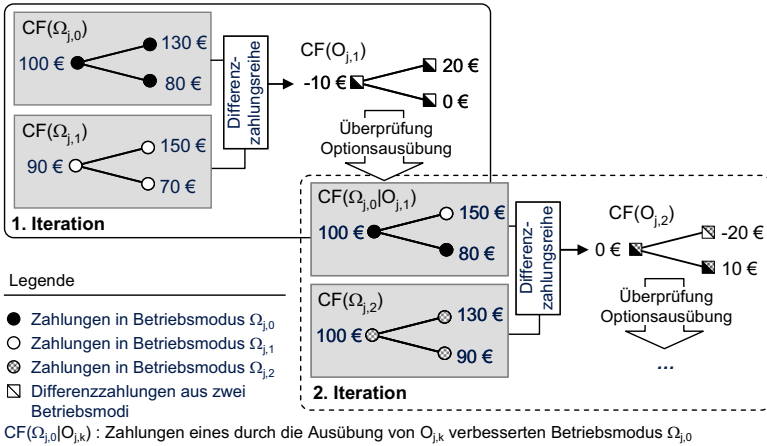


Abbildung 43: Bestimmung der Differenzzahlungsreihe einer Reoption

Untersuchung der Optionsausübung und Wert der Reoption

Bisher wurde weder das typische Optionsrecht noch der bestehende Ausübungspreis berücksichtigt. Für *Typ-I-Optionen* ist in jedem Zeitpunkt t zu entscheiden, ob der durch die Ausübung der Reoption mögliche Zusatznutzen $duPV_{t,h}^{ex}(O_{j,k})$ den Ausübungspreis $X_{t,h}$ übersteigt. Entsprechend der Grundsätze der dynamischen Programmierung wird rekursiv vorgegangen. Der Wert einer Optionsausübung in $t=T$, also im letzten Knoten des Baumes, bestimmt sich ohne Duplikation, da zu dem Zeitpunkt T in den einzelnen Zuständen keine Unsicherheit mehr besteht:

$$PV_{T,h}^d(O_{j,k}) = \begin{cases} \max \{ CF_{T,h}(O_{j,k}) - X_{t,h}; 0 \} & , \text{ falls } T_P = T \quad [1] \\ \max \{ PV_{T,h}^{ex}(O_{j,k}) + CF_{T,h}(O_{j,k}) - X_{t,h}; 0 \} & , \text{ falls } T_P > T \quad [2] \end{cases} \quad (28)$$

$PV_{T,h}^d(O_{j,k})$ Barwert der Reoption $O_{j,k}$ der Alternative A_j zum Zeitpunkt T im Knoten h einschließlich der Zahlungen in T (d)

$PV_{T,h}^{ex}(O_{j,k})$ Barwert der ausgeübten (*ex*) Reoption $O_{j,k}$ der Alternative A_j zum Zeitpunkt T im Knoten h ohne die Zahlungen aus T

$PV_{T,h}(O_{j,k})$ Barwert einer Fortführung des Projektes ohne Ausübung der Reoption $O_{j,k}$ in T zum Zeitpunkt T in Knoten h

T_P Dauer des Projektes (in Perioden)

T Zeitraum, der in Form eines Baumes modelliert ist (in Perioden)

$X_{t,h}$ Ausübungspreis der Reoption zum Zeitpunkt t im Knoten h

Ist der Betrachtungszeitraum T_P mit der Länge T des Baumes identisch, wird der Wert eines Wechsels des Betriebsmodus direkt aus den entsprechenden Zahlungsströmen $CF_{T,h}(O_{j,k})$ bestimmt (Zeile [1] in Gleichung (28)). Es ist jedoch auch denkbar, dass das Projekt ab dem Zeitpunkt $t=T$ semi-deterministisch²⁷ fortgeführt wird (Abbildung 44). In diesem Fall muss der *Fortführungswert* bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden (Zeile [2] in Gleichung (28)). Die Zahlungen, die während der semi-deterministischen Phase entstehen, sind mit der Renditevorgabe i zu diskontieren. In der Zeit zwischen T_P und T hat sich zwar die Schwankung des im Baum modellierten Underlying aufgelöst, so dass keine Duplikation erforderlich ist, doch ist das Umfeld aufgrund der bestehenden sekundären Unsicherheiten nicht risikolos.

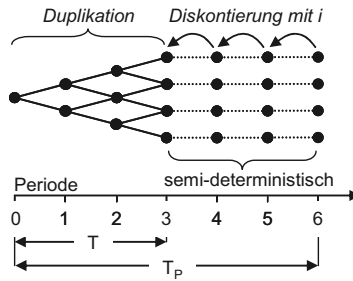


Abbildung 44: Verkürzte Baumdarstellung mit einer semi-deterministischen Fortführung des unsicheren Umfeldes

Dagegen wird für alle Knoten mit $0 \leq t < T$ der Wert mit Hilfe der Duplikation ermittelt und es gilt:

$$duPV_{t,h}^d(O_{j,k}) = \max \left\{ \underbrace{duPV_{t,h}^{ex}(O_{j,k}) + CF_{t,h}(O_{j,k}) - X}_{\text{Option ausüben}}; \underbrace{duPV_{t,h}(O_{j,k})}_{\text{warten}} \right\} \quad (29)$$

²⁷ Ein Projekt wird semi-deterministisch fortgeführt, wenn sich ein Großteil der Unsicherheit in den ersten Perioden des Betrachtungszeitraumes auflöst (vgl. auch SUDHOFF 2007, S. 167). Diese Situation ist zu unterscheiden von der in Abschnitt 6.4.5 empfohlenen Verkürzung des Baumes, bei der insbesondere gegen Ende des Betrachtungszeitraumes die Zeitschritte Δt vergrößert werden, um die Komplexität zu verringern. Es wird nachfolgend davon ausgegangen, dass eine Ausübung von Realoptionen zum Zeitpunkt t für $T < t \leq T_P$ nicht möglich ist.

Für die Gleichungen (28) und (29) wurde angenommen, dass die Umstellung in der Produktion unendlich schnell durchgeführt wird. Sei nun T_X die Zeit, die zwischen der Entscheidung zur Systemveränderung (Optionsausübung) und der Realisierung vergeht (*time lag*), dann folgt mit $\tau=T_X/\Delta t$:

$$duPV_{t,h}^d(O_{j,k}) = \max \left\{ \underbrace{\Phi_{t,h}^\tau - X_{t,h}}_{\text{Option ausüben}} ; \underbrace{duPV_{t,h}(O_{j,k})}_{\text{warten}} \right\} \quad \text{mit} \quad (30)$$

$$\Phi_{t,h}^\tau = \begin{cases} \varphi(duPV_{t+1,h}^{d,ex}(O_{j,k}), duPV_{t+1,h+1}^{d,ex}(O_{j,k})) & , \text{ falls } \tau = 1 \wedge t < T-1 & [1] \\ \varphi(PV_{t+1,h}^{d,ex}(O_{j,k}), PV_{t+1,h+1}^{d,ex}(O_{j,k})) & , \text{ falls } \tau = 1 \wedge t = T-1 & [2] \\ PV_{t,h}^{t+\tau} & , \text{ falls } T \leq t \leq T_P & [3] \\ \varphi(\Phi_{t+1,h}^{\tau-1}, \Phi_{t+1,h+1}^{\tau-1}) & , \text{ sonst} & [4] \end{cases} \quad (31)$$

- $PV_{t,h}^i$ Barwert aller nachfolgenden Zahlungen im Zeitpunkt i , abgezinst auf den Zeitpunkt t in Knoten h
- $\varphi(V^+, V)$ diskontiert den Wert von V^+ und V mit Hilfe einer Duplikation
- $duPV_{t,h}^{d,ex}(O_{j,k})$ mit Hilfe einer Duplikation errechneter Barwert der ausgeübten (*ex*) Realoption $O_{j,k}$ der Alternative A_j zum Zeitpunkt t im Knoten h inkl. der Zahlungen aus t (d)

Wenn die Umsetzung einer Anpassungsmaßnahme nicht unendlich schnell erfolgt, wird durch eine Optionsausübung in t der Gegenwart der ab $t+T_X$ nachfolgenden Zahlungen gekauft. Durch den rekursiven Aufruf der Funktion Φ in Gleichung (31)-[4] ist eine korrekte Duplikation über mehrere Zeitstufen hinweg sichergestellt. Die Bedingungen (31)-[1] und (31)-[2] sind analog zu (28)-[1] und (28)-[2] zu interpretieren, während (31)-[3] die Wertermittlung im semi-deterministischen Bereich beschreibt. Dies ist in Abbildung 45 verdeutlicht.

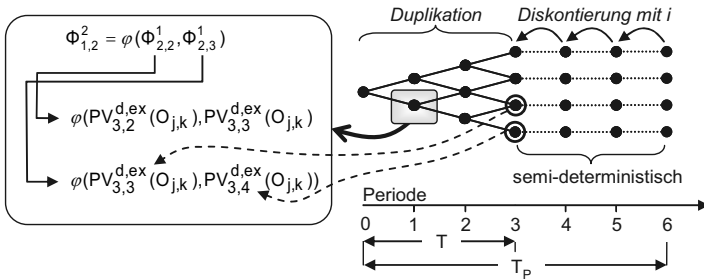


Abbildung 45: Verdeutlichung der Optimierungsbedingung für die Ausübung von Optionen bei einem time lag von $T_X = \tau = 2$

Typ-II-Optionen werden aufgrund der fehlenden Entscheidungsfreiheit nicht gesondert analog zu Typ-I-Optionen bewertet, sondern sind bereits im Betriebsmodus $\Omega_{j,0}$ modelliert (vgl. Abschnitt 6.4.6.2). Der richtige Auslösezeitpunkt lässt sich entsprechend nicht mit einer Maximumfunktion, sondern durch *Wenn-Dann-Bedingungen* ermitteln, da eine Umstellung allein durch das Erreichen eines definierten Zustandes erzwungen wird.

Mit der in diesem Abschnitt beschriebenen Vorgehensweise ist es möglich, isolierte voneinander unabhängige Optionen²⁸ zu bewerten. Allerdings existieren auch sog. *compound options*, die erst durch die Ausübung einer bestimmten Option $O_{j,k}$ geschaffen werden. Um den Wert dieser *Optionen auf Optionen* zu bestimmen, sind einige der erläuterten Gleichungen anzupassen. Die für eine Bewertung solcher zusammengesetzter Realloptionen erforderlichen Ergänzungen lassen sich in die beschriebene Vorgehensweise prinzipiell integrieren. Dies wird aber in dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt.

Erweiterter Kapitalwert der Alternative

Der erweiterte Kapitalwert einer Alternative ergibt sich schließlich aus der Summe des Kapitalwertes bei Risiko (Betriebsmodus $\Omega_{j,0}$) und der Wertbeiträge der Realloptionen, die sich auf A_j beziehen:

$$NPV_E(A_j) = NPV_R(A_j) + \sum_k NPV_k(A_j) \quad \forall k \text{ mit } O_k \in \Theta(A_j) \quad (32)$$

$NPV_R(A_j)$ statischer Kapitalwert von A_j bei Risiko ohne Berücksichtigung in A_j enthaltener Realloptionen

$NPV_k(A_j)$ zusätzlicher durch die Realloption $O_{j,k}$ generierter Kapitalwert der Alternative A_j

$NPV_E(A_j)$ erweiterter Kapitalwert der Alternative A_j , der den Wert enthaltener Realloptionen berücksichtigt

$\Theta(A_j)$ Menge aller Realloptionen, die A_j verändern. $O_k \in \Theta(A_j) \Leftrightarrow \exists \Omega_{j,k}$

Bei den einzelnen $NPV_k(A_j)$ handelt es sich nicht um den Wert der jeweiligen Realloption. Diese Größe basiert auf den Differenzzahlungsströmen, die wiederum von der Reihenfolge abhängen, nach der die einzelnen Handlungsmöglichkeiten in die Berechnung integriert werden. $NPV_k(A_j)$ quantifiziert somit den Beitrag einer Realloption k zum Wert der Alternative j in Abhängigkeit der bereits berücksichtigten Optionen.

²⁸ Diese Optionen werden auch als *plain vanilla options* bezeichnet (HOMMEL & PRITSCH 1999b, S. 17).

Wie in Abschnitt 6.4.5 erläutert und in Abbildung 39 auf S. 139 gezeigt, werden die dargestellten Berechnungen zur Bestimmung des Realoptionswertes nicht nur einmal durchgeführt, sondern für jede Ziehung der Monte-Carlo-Simulation wiederholt. Als Konsequenz liegt nicht ein einzelner $NPV_E(A_i)$ vor, sondern eine empirische Häufigkeitsverteilung, die sich aus den n Ziehungen der Simulation ergibt. Die sekundären Unsicherheiten, die so berücksichtigt werden, haben vor allem Auswirkungen auf den Kapitalwert bei Risiko. Es ist aber auch möglich, dass ihre Ausprägung die Optionsausübung und somit die Bedeutung der Realoptionen beeinflusst.

Mit der dargestellten Vorgehensweise lässt sich der Wertbeitrag der identifizierten relevanten Realoptionen für die einzelnen Alternativen bestimmen. Im Vergleich zu einer einfachen Kapitalwertrechnung erfordert sie, bedingt vor allem durch die Duplikation, einen deutlich größeren Rechenaufwand. Eine effiziente Anwendung der Realoptionsbewertung ist somit nur bei Einsatz einer unterstützenden Software möglich, durch die ein Großteil der anfallenden Aufgaben automatisiert bearbeitet wird. Ein solches Werkzeug ist in Kapitel 7 vorgestellt.

Für eine zielgerichtete, effiziente Bewertung ist eine iterative Verfeinerung der erläuterten Berechnungen (siehe (32)) notwendig. Die Entscheidung, wie oft der beschriebene Bewertungsvorgang erfolgt, ist Gegenstand der Ergebnisanalyse, deren Ausgestaltung in den nächsten Abschnitten erläutert wird.

6.5 Analyse

6.5.1 Allgemeines

Die Analyse als Bestandteil jedes Bewertungszyklus (vgl. Abbildung 40 auf S. 142) umfasst mehrere Aufgaben, die in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben sind. Zunächst ist jeweils darüber zu entscheiden, ob der iterative Bewertungsprozess fortgeführt und durch die Berücksichtigung einer weiteren Option verfeinert werden soll (Abschnitt 6.5.2). Da die dynamischen Berechnungen mit Hilfe einer Simulation erfolgen, liegt als Ergebnis nicht nur ein einzelner Wert vor, so dass eine Aufbereitung notwendig ist. Welche Darstellungsformen im Kontext der entwickelten Methode zum Einsatz kommen können, ist in Abschnitt 6.5.3 aufgezeigt. Abschließend werden in Abschnitt 6.5.4 über den reinen Alternativenvergleich hinaus weitere typische Entscheidungsfälle diskutiert, für die die in dieser Arbeit entwickelte Methode ebenfalls eine Unterstützung bietet.

6.5.2 Entscheidung über eine Fortführung der Bewertung

Der beschriebene Bewertungsprozess verläuft iterativ und hat eine schrittweise Verfeinerung der Analyse zum Ziel. Um dabei die Effizienz und Effektivität des Vorgehens sicherzustellen, ist nach jeder Berechnung eines Optionswertes (vgl. Abbildung 40 auf S. 142) zu entscheiden, ob ein weiterer Bewertungszyklus durchlaufen werden soll.

Jede Realoption $O_{j,k}$ bezieht sich nur auf eine Alternative A_j , so dass nach einem Bewertungszyklus nur deren erweiterter Kapitalwert $NPV_E(A_j)$ differiert. Es wird nun überprüft, ob diese Veränderung eine Auswirkung auf die Reihenfolge der verschiedenen Systemkonzepte im Hinblick auf deren errechnete Wirtschaftlichkeit hat. In Abhängigkeit davon beginnt ein Entscheidungsprozess, der in Abbildung 46 aufgezeigt ist.

In diesem Prozess wird die durch die bewertete Realoption $O_{j,k}$ angesprochene Alternative A_j nacheinander paarweise mit allen anderen Konzepten verglichen. Besitzt A_j nach dem Zyklus einen höheren Kapitalwert und gleichzeitig eine größere Wandlungsfähigkeit als A_i , ist die Wirtschaftlichkeit der Anpassungsfähigkeit gezeigt (vgl. Abschnitt 6.4.2). Wenn die Alternative A_j ein größeres Gesamtpotenzial $\Pi_{Ver}(A_j)$ im Hinblick auf die verbliebenen, noch nicht in die Bewertung einbezogenen Realoptionen besitzt als Alternative A_i ($\Pi_{Ver}(A_i)$), ist die Alternative A_j in der gegebenen Umfeldentwicklung A_i wirtschaftlich überlegen. Die relative Vorteilhaftigkeit verändert sich auch nicht bei Berücksichtigung zusätzlicher Realoptionen, so dass A_j deshalb bei der weiteren Analyse nicht mehr berücksichtigt und der nächste paarweise Vergleich durchgeführt wird. Wenn hingegen die wandlungsfähigere Alternative A_j noch keinen höheren Kapitalwert als A_i besitzt, folgt eine Überprüfung, ob sich dies möglicherweise in einem nächsten Zyklus ändern kann: Nur wenn entsprechend das verbliebene Gesamtpotenzial $\Pi_{Ver}(A_j)$ größer als ist $\Pi_{Ver}(A_i)$, sollte A_j weiterhin bewertet werden.

Wenn bis auf eine Alternativen alle weiteren von der Bewertung ausgeschlossen sind oder bereits sämtliche Realoptionen Berücksichtigung gefunden haben, wird kein neuer Zyklus begonnen. Es folgt dann die Aufbereitung der Berechnungsergebnisse (Abschnitt 6.5.3) und anschließend die endgültige Auswahl zwischen den verschiedenen Alternativen (Abschnitt 6.5.4). Falls nach Berücksichtigung der für die primäre Unsicherheit i^* relevanten Realoptionen keine Entscheidung getroffen werden kann, ist ein anderes i^* zu wählen oder in einem quadranomialen Model eine weitere primäre Unsicherheit hinzuzufügen.

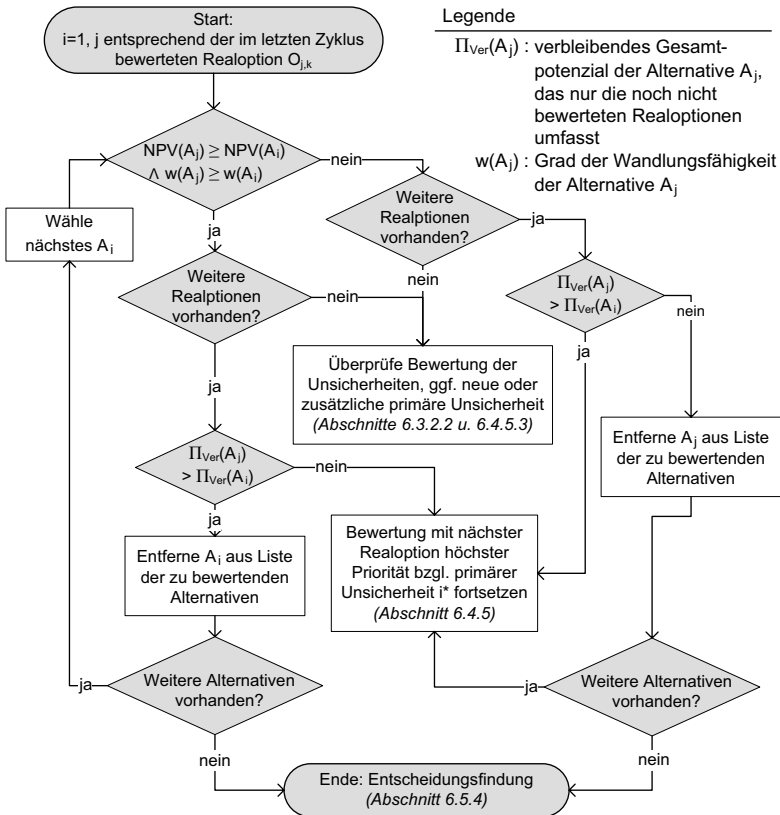


Abbildung 46: Prozess zur Entscheidung über die Fortführung der Bewertung

6.5.3 Ergebnisdarstellung

Eine zentrale Eigenschaft der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Modellierung und Bewertung ist die Abbildung der Unsicherheiten im unternehmerischen Umfeld in Form von Verteilungsfunktionen. Die in Abschnitt 6.4.5 erläuterte Trennung in *primäre* und *sekundäre Unsicherheiten* sowie die Verwendung einer *Monte-Carlo-Simulation* führen dazu, dass auch die errechneten Ergebnisse in Form einer (empirischen) Verteilung vorliegen. Diese lässt sich mit Methoden der deskriptiven Statistik (vgl. HARTUNG ET AL. 1995, BOL 1998) beschreiben und analysieren.

Für die Realloptionsbewertung wird ein erweiterter Kapitalwert NPV_E berechnet, der sich als Summe aus dem $NPV_R(A_j)$ einer Alternative j im Betriebsmodus $\Omega_{j,0}$ und den jeweiligen Wertbeiträgen der Realloptionen $NPV_k(A_j)$ ergibt. Sowohl dieser NPV_E als auch dessen einzelne Bestandteile lassen sich in Form von Histogrammen visualisieren und für verschiedene Alternativen vergleichen (Abbildung 47). Wichtige Kennzahlen, die aus den empirischen Daten gewonnen werden können, sind der Erwartungswert sowie definierte Quantile der Verteilung des NPV_E .

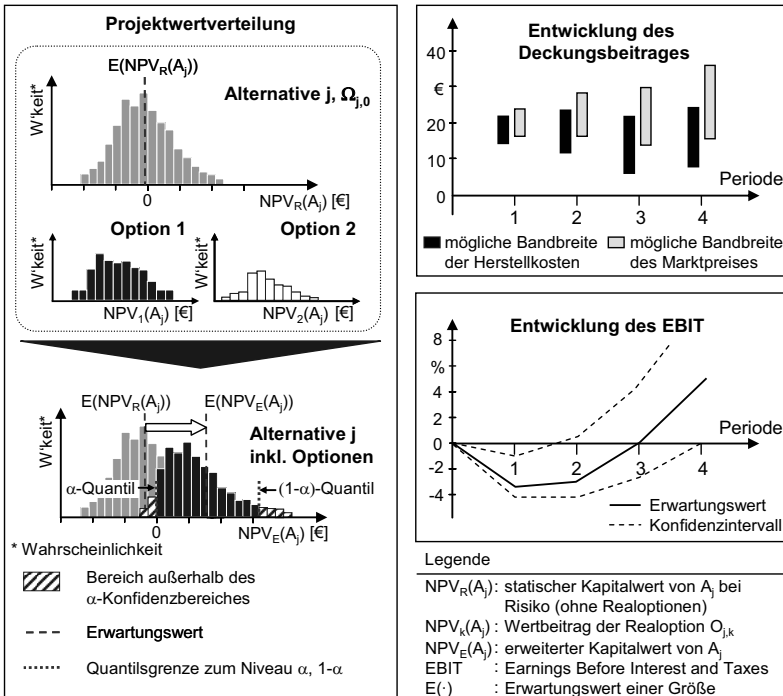


Abbildung 47: Mögliche Visualisierung des Ergebnisses der Berechnungen in Form einer Projektwertverteilung, einer Deckungsbeitrags- und einer EBIT-Entwicklung

In vielen Unternehmen sind jedoch neben dem Kapitalwert weitere Entscheidungskriterien gebräuchlich. Um die Akzeptanz der vorgestellten Methode zu erhöhen, kann deshalb eine Überführung des berechneten NPV_E in andere Größen sinnvoll sein. Dazu sind in den meisten Fällen eine zeitliche und eine inhaltliche

Abgrenzung erforderlich. Inhaltliche Abgrenzungen ergeben sich direkt aus den Berechnungsvorschriften für die jeweilige Kennzahl; bspw. sind bei kostenorientierten Ansätzen wie dem EBIT-Kriterium periodisierte Abschreibungen an Stelle der Investitionszahlungen zu berücksichtigen, die bei zahlungsorientierten Verfahren Verwendung finden. Zeitliche Abgrenzungen sind notwendig, wenn die *Entwicklung* eines Kriteriums verdeutlicht werden soll, bspw. die realisierbaren Herstellkosten eines Produktes. Als Folge der Trennung von primären und sekundären Unsicherheiten müssen dann die Verteilungen des zu untersuchenden Kriteriums *in jedem Knoten einer Periode* erfasst und in einer *gemeinsamen Periode* konsolidiert werden²⁹. In Abbildung 47 sind neben der Visualisierung des Kapitalwertes in Form eines Histogramms mit der EBIT-Entwicklung und einem Preis-Kosten-Diagramm zwei weitere gebräuchliche Darstellungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Welche der illustrierten Auswertungen sinnvoll ist, hängt nicht nur wie erwähnt von den verwendeten Unternehmensstandards ab, sondern steht auch im Zusammenhang mit der konkreten Entscheidungssituation. Im nachfolgenden Abschnitt wird deshalb auf verschiedene Entscheidungsfälle eingegangen.

6.5.4 Entscheidungsfindung

In Abschnitt 1.2 ist als Zielsetzung dieser Arbeit formuliert, einen monetären Vergleich unterschiedlich wandlungsfähiger technischer Alternativen zu ermöglichen. Nachfolgend wird zunächst erläutert, anhand welcher Entscheidungskriterien dieser Vergleich durchzuführen ist und welche weiterführenden Entscheidungsfälle im Rahmen eines Projektes zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme häufig auftreten.

Ein reiner *Vergleich* von zwei sich gegenseitig ausschließenden Investitionsprojekten, wie er nach der Aufgabenstellung dieser Arbeit durchgeführt werden muss, gehört bei einer statischen Betrachtung zu den einfachsten Entscheidungsfällen. Unter der Annahme einer angestrebten Gewinnmaximierung ist die Alternative zu wählen, die den höchsten Kapitalwert besitzt.

²⁹ Der Ausweis einer periodenorientierten Verteilung ist auch für den NPV_E denkbar, so dass der *Value-at-Risk (VaR)* bzw. ein *Value-at-Chance (VaC)* (WEMHÖNER 2006, S. 140 f.) berechnet werden kann. Der VaR (VaC) ist die Höhe der negativen (positiven) *Abweichung* vom *erwarteten Wert* innerhalb einer *definierten Zeitspanne*, die mit einer *statistischen Sicherheit* von α nicht überschritten wird (WILKENS & VÖLKER 2001, S. 415 f.).

Allerdings bleibt bei der Anwendung dieses Entscheidungskriteriums die Höhe des Risikos unberücksichtigt. Generell sollte bei einem größeren Risiko auch ein höherer erwarteter Wertzuwachs (Rendite auf das investierte Kapital) möglich sein (BREALEY & MYERS 2000, S. 17 ff.). Welche genaue Rendite-Risiko-Kombination zu wählen ist, kann allerdings nicht allgemeingültig beantwortet werden. Hierzu sind verschiedene betriebswirtschaftliche Theorien entwickelt worden (vgl. z.B. LUENBERGER 1998, WÖHE & DÖRING 2002, S. 127 ff.). Indem durch die in dieser Arbeit vorgestellte Vorgehensweise das Risiko quantifiziert und das Systemverhalten in unterschiedlichen Situationen bestimmt wird, kann eine Auswahlentscheidung auf der Basis einer dieser Theorien erfolgen. Zu berücksichtigen ist in allen Fällen die individuelle bzw. die im Unternehmen festgelegte *Risikopräferenz*.

In der Praxis sind nicht nur die Entwicklungen der Einflussfaktoren unsicher, sondern auch die über diese Unsicherheit getroffenen Annahmen. Es ist deshalb zielführend, nicht nur eine Simulation durchzuführen, sondern diese mehrfach mit unterschiedlichen Parametern für die einzelnen Verteilungen zu wiederholen. Dabei geht es vor allem um eine Veränderung der Varianz, d.h. der Prognoseunsicherheit, da diese direkt den Wert der Realoptionen beeinflusst: Eine größere Schwankung erhöht den Wert der Anpassungsfähigkeit, während er bei geringerer Unsicherheit sinkt (LESLIE & MICHAELS 1997, S. 9, HUNGENBERG ET AL. 2005, S. 9). Auf diese Weise ist nicht nur eine Abschätzung der Sensitivitäten möglich. Es lässt sich vielmehr auch die Frage beantworten, in welchen Situationen bzw. ab welchem *Grenzzenario* im Hinblick auf die bestehende Unsicherheit sich der Grad der Wandlungsfähigkeit einer bestimmten Alternative lohnen würde.

Ein bedeutender Parameter von Realoptionen, der in die Analyse einbezogen werden muss, ist der Ausübungspreis X . Er stellt eine wichtige Kenngröße dar, welche die technische Gestaltung des bewerteten Systems in einer monetären Größe zusammenfasst. Es ist naheliegend, die bereits erläuterte Variation der Eingangsparameter auch auf X auszudehnen. Auf diese Weise lassen sich Hinweise auf eine Optimierung der *Systemgestaltung* gewinnen. Um Aussagen über den isolierten Wert einzelner Handlungsmöglichkeiten zu erhalten, ist eine Veränderung der Bewertungsreihenfolge erforderlich. Es ist auch denkbar, eine Realoption zunächst nur im Hinblick auf ihre Auswirkungen bei Ausübung zu modellieren und den eigentlichen Prozess der Umstellung als technische Blackbox zu betrachten. So kann ermittelt werden, wie viel die Leistung einer Realoption wert ist und daraus der maximal zulässige Ausübungspreis X abgeleitet bzw. die

mögliche initiale Zusatzinvestition in ein entsprechend wandlungsfähigeres System abgeschätzt werden.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die beschriebenen Entscheidungsfälle meist nicht isoliert, sondern in Kombination auftreten. Es ist dabei wichtig, nicht nur die im Zuge des Bewertungsprozesses gewonnenen Erkenntnisse zum wirtschaftlichen Verhalten der unterschiedlichen technischen Systemalternativen und zu möglichen zukünftigen Entwicklungen zu berücksichtigen, sondern auch vielfältige strategische Überlegungen in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. In letzter Konsequenz ist es auch das Wesen unternehmerischer Entscheidungen, dass diese immer von einer zum Teil subjektiven Einschätzung der zukünftigen Entwicklung geprägt bleiben.

6.6 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde eine Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme unter Verwendung der Realloptionsbewertung entwickelt. Eines ihrer wesentlichen Merkmale ist die schrittweise Verfeinerung der Analyse von einer starren Planung bei quasi-sicherer Zukunft über vereinfachte dynamische Betrachtungen bis zur Einbeziehung ausgewählter Realloptionen in die Kalkulation.

In Abschnitt 6.3 wurde zunächst der Aufbau eines bewertungsorientierten Modells der Produktion erläutert. Dieses besteht aus einem Umfeldprofil, das an das Rezeptormodell einer wandlungsfähigen Produktion angelehnt ist, sowie aus einem lebenszyklusorientierten Kostenmodell. Weitere wesentliche Bestandteile sind darüber hinaus die jeweiligen Optionsprofile für die zu bewertenden technischen Alternativen.

In den Optionsprofilen sind die Handlungsmöglichkeiten, die die Produktionssystemplanung bei Veränderungen des Unternehmensumfeldes besitzt, zunächst qualitativ beschrieben und bewertet. In Abschnitt 6.4 wurden dann die Vorgehensweisen zu einer weitergehenden quantitativen Betrachtung erläutert. Aufbauend auf einer Basisbewertung bei quasi-sicherer Zukunft und starrer Planung, einer quantitativen Beschreibung bestehender Unsicherheiten sowie einfachen Modellen, die das Verhalten der verschiedenen technischen Alternativen in diesem unsicheren Umfeld abbilden, wird dabei das wirtschaftliche Potenzial der einzelnen Realloptionen abgeschätzt. Dies dient dazu, eine Reihenfolge aufzustellen, nach der die bestehenden Anpassungsmöglichkeiten in die quantitative Ana-

lyse einzubeziehen sind. Die Ausführungen in Abschnitt 6.4.6 behandelten schließlich die eigentliche, technisch-mathematische Realloptionsbewertung, an deren Ende die Wirtschaftlichkeit der Systemalternativen in Form eines erweiterten Kapitalwertes quantifiziert ist.

Die erweiterte Analyse dieser und weiterer Größen war Gegenstand der Ausführungen in Abschnitt 6.5. Neben der Erläuterung möglicher Darstellungs- und Auswertungsformen erfolgte eine Herleitung von Kriterien, mit deren Hilfe sich ein Abbruchzeitpunkt des iterativen Bewertungsprozesses, in dem nach und nach durch die Hinzunahme weiterer Realloptionen die Komplexität und die Genauigkeit zunehmen, bestimmen lässt. Darüber hinaus wurden mit dem Alternativenvergleich, der Ableitung von Grenzszenarios sowie der Systemgestaltung drei Entscheidungsfälle aufgezeigt, in denen ein unterstützender Einsatz des entwickelten Bewertungsverfahrens sinnvoll sein kann.

Es bleibt festzuhalten, dass es sich bei der entwickelten Methode um eine an die Realloptionstheorie *angelehnte* Vorgehensweise handelt. Da nicht von einem definierten stochastischen Prozess ausgegangen wird, nach dem sich der *Wert des Underlying* entwickelt, weicht das Verfahren von den üblichen Ansätzen ab. Indem die Zahlungen und damit auch der Wert der verschiedenen Alternativen aus den explizit beschriebenen Umweltzuständen abgeleitet werden, lassen sich Entscheidungen zur Anpassung der jeweiligen Systemkonfiguration treffen. Gleichzeitig handelt es sich durch die Diskretisierung der Betrachtung um ein heuristisches Vorgehen, mit dem kein exakter Wert der technischen Alternativen bestimmt werden kann. Dennoch ist der ermittelte erweiterte Kapitalwert genauer als herkömmliche Größen und ermöglicht somit bessere Entscheidungen.

7 Umsetzung der Methode

7.1 Allgemeines

Ziel dieses Kapitels ist es, die Umsetzung der Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme zu illustrieren sowie deren Nutzen und Praxistauglichkeit zu reflektieren. Um den Aufwand für die dargestellte Kostenberechnung sowie die Realoptionsbewertung zu reduzieren, wurde gemeinsam mit der Siemens AG ein unterstützendes Softwarewerkzeug entwickelt, das in Abschnitt 7.2 vorgestellt ist. Das in Abschnitt 7.3 beschriebene industrielle Anwendungsbeispiel ist mit diesem Werkzeug modelliert worden und dient dazu, das in den vorangegangenen Kapiteln aufgezeigte Vorgehen zu verdeutlichen. Anhand der gewonnenen Erfahrungen soll die Methode abschließend im Hinblick auf die in Kapitel 4 aufgestellten Anforderungen validiert werden (Abschnitt 7.4).

7.2 Softwarewerkzeug PlantCalc[®]

7.2.1 Allgemeines

In den vorangegangenen Kapiteln wurde betont, dass der Aufwand für eine Realoptionsbewertung deutlich höher ist als für die statischen Standardrechnungen. Das resultiert zunächst aus einem erhöhten Informationsbedarf durch die Berücksichtigung einer dynamischen Entwicklung des Unternehmensumfeldes. Darüber hinaus steigt der Aufwand durch zusätzlich notwendige Rechenoperationen. Erschwert wird die Anwendung der vorgestellten Methode ferner durch die bestehenden Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Vorgehensschritten und die Vielzahl an zu berücksichtigender und zu verarbeitender Information. Während sich der erhöhte Datenbedarf aus einer genaueren Problembetrachtung ergibt und sich deshalb der Ermittlungsaufwand nur schwer reduzieren lässt, kann in den beiden anderen Fällen sinnvolle Unterstützung durch eine adäquate Software gegeben werden: Durch eine Automatisierung der Berechnungen lässt sich die Komplexität der Bewertungsaufgabe ebenso wie durch eine übersichtliche Strukturierung und Visualisierung verringern.

Um die Umsetzung der entwickelten Methode zu fördern, wurde in Zusammenarbeit mit der Siemens AG, Bereich Corporate Technology - Production Processes, Abteilung Production Networks & Factory Planning (CT PP3) das Pro-

gramm PLANTCALC[®] realisiert, das die lebenszyklusorientierte Bewertung von Fabrikplanungsprojekten bei Unsicherheit unterstützt und die Realloptionsbewertung integriert. Da dieses Werkzeug bereits in mehreren Projekten zum Einsatz gekommen ist, sind in ihm nicht nur die in dieser Arbeit abgeleiteten methodischen Anforderungen berücksichtigt, sondern es wurde auch den Erfordernissen der praktischen Anwendung Rechnung getragen (vgl. auch ZAEH ET AL. 2006, ZÄH ET AL. 2006, REINHART ET AL. 2007).

In PLANTCALC[®] wird das in der Methode verfolgte Vorgehen aufgegriffen, eine komplexe Bewertungsaufgabe in ihre einzelnen Bestandteile zu zerlegen und zur Lösung von Teilaufgaben standardisierte Bewertungsmodule zu verwenden. Durch die Konfiguration eines Bewertungsprojektes aus mehreren solcher Module kann für unterschiedliche Planungsprojekte jeweils flexibel eine individuelle Kalkulation aufgebaut werden, ohne dabei die Berechnungslogik immer wieder neu zu entwickeln. Ziel des Programms ist neben der Förderung der Wiederverwendbarkeit auch, eine Wissensbasis zu schaffen, die sich durch Verbesserung bestehender und durch Hinzunahme neuer, spezialisierter Module dynamisch an veränderte Anforderungen anpasst.

In den folgenden Abschnitten wird PLANTCALC[®] näher erläutert. Das Programm selbst unterstützt vor allem die *konkrete Berechnung* von Kosten und Kapitalwerten, indem eine Reihe von Kalkulations- und Analysemodulen vordefiniert, in einer logischen Struktur geordnet und in Form einer Modulbibliothek bereitgestellt wird (Abschnitte 7.2.2). Darüber hinaus sind Hilfsmittel zur *Konfiguration und Verwaltung von Bewertungsprojekten* in das Programm integriert (Abschnitt 7.2.3).

7.2.2 Modulbibliothek

Die standardisierten Bewertungsmodule, aus denen ein Bewertungsprojekt konfiguriert wird, sind in einer Modulbibliothek hinterlegt. Diese dient als Informationsspeicher, der die einzelnen Module systematisiert und einen Rahmen für den Datenaustausch zwischen den Modulen definiert.

Ein Modul umfasst Daten und eine Berechnungslogik, die dasselbe Detaillierungsniveau besitzen und die sich auf eine abgegrenzte Teilaufgabe der Bewertung beziehen, bspw. die Berechnung variabler Lohnkosten. Technisch sind die Module in Microsoft EXCEL[®] (nachfolgend EXCEL[®]) und Microsoft VISUAL BASIC[®] umgesetzt und bestehen jeweils aus einer oder mehrerer Dateien. Für die

Monte-Carlo-Simulation findet das Produkt Crystal Ball® der Firma Decisioneering Verwendung und ist in die Berechnungsvorschriften bzw. den Programmcode integriert. Im Folgenden wird zunächst auf die *Modulstruktur* und anschließend auf den *Datenaustausch* eingegangen.

Modulstruktur

Die entwickelten Module lassen sich verschiedenen Modulklassen zuordnen (Abbildung 48). In der *Grundstruktur* sind Module mit Basisfunktionen aufgeführt, die bspw. die Berechnungsvorschriften für den Kapitalwert beinhalten. Eine gesonderte Stellung nehmen die sog. *Planungsaufgaben* ein, die die Gestaltungsfelder der Fabrikplanung widerspiegeln (vgl. Abbildung 25 auf S. 101). Sie enthalten übergreifende Information zu den geplanten Objekten; für das Gestaltungsfeld „Produkt“ sind dies bspw. Arbeitspläne und Stücklisten sowie für „Personal“ die Aufstellung verschiedener Entgeltgruppen. Die Planungsaufgaben werden ferner genutzt, um die anfallenden Kosten zu sammeln und zu strukturieren. Sie bilden damit die Schnittstelle zwischen der Grundstruktur und der Kosten-, Investitions- und Ertragsrechnung.

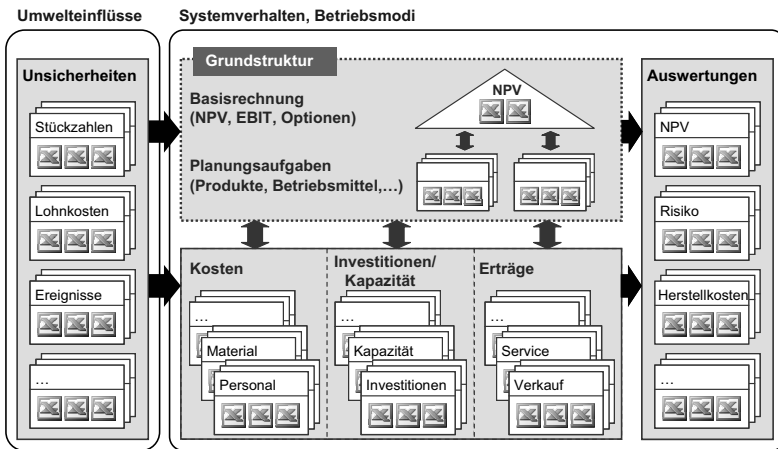


Abbildung 48: Modulklassen in der PLANTCALC®-Bibliothek (ZAEH et al. 2006, S. 703)

Die Einteilung der *Kostenmodule* basiert auf der in Abschnitt 6.3.3.3 aufgezeigten Systematik, um den Aufbau eines entsprechenden Kostenmodells zu erleichtern. Ausgehend von den obersten Kategorien Personalkosten, Material- und Ver-

brauchskosten, Gebäudekosten, externe Leistungen, Gemeinkosten und sonstige Kosten erfolgt eine schrittweise Verfeinerung der Berechnungslogik. Dabei liegt der Grundsatz einer iterativen, zielgerichteten Verfeinerung der Kalkulation zugrunde. Auf oberster Ebene sind zunächst nur Gliederungsfunktionen mit der Möglichkeit zur manuellen Eingabe vorhanden, die etwaige Ergebnisse von Berechnungen aus untergeordneten Modulen, die speziellere Berechnungsvorschriften beinhalten, konsolidieren. Im Gegensatz zu dieser hierarchischen Abhängigkeit können Module auf derselben Ebene alternativ verwendet werden. Ein Auszug aus einer beispielhaften Gliederungsstruktur ist in Abbildung 49 dargestellt.

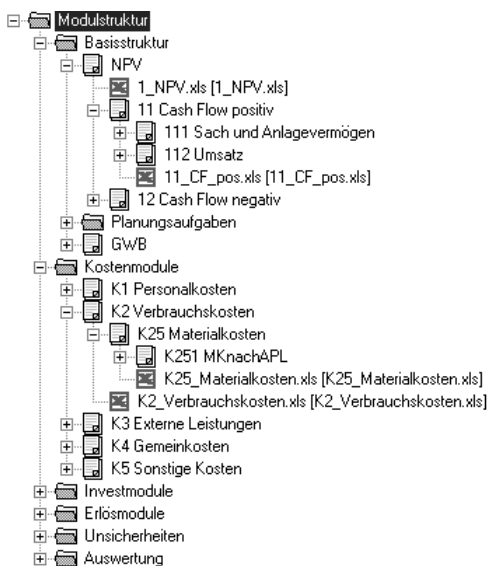


Abbildung 49: Auszug aus einer beispielhaften Kostengliederungsstruktur in der Modulbibliothek von PLANTCALC®

Die Module der *Kapazitäts-*, der *Investitions-* und der *Ertragsrechnung* sind grundsätzlich nach denselben Prinzipien wie die der *Kostenrechnung* strukturiert, beinhalten aber entsprechend andere inhaltliche Schwerpunkte. Gleiches gilt für die *Auswertungsmodule*, die keine Berechnungen enthalten, sondern vor allem Informationen graphisch aufbereiten. Zur Modellierung von Schwankungen der Führungsgrößen der Produktion schließlich dienen die *Unsicherheitsmodule*.

Eine besondere Rolle nimmt das Modul zur Ermittlung des erweiterten Kapitalwertes ein. In ihm sind die Regeln definiert, auf deren Basis über die Ausübung

einer Realloption entschieden wird. Ein wesentliches hierfür benötigtes Element sind die Differenzzahlungsströme der einzelnen Handlungsmöglichkeiten, deren Berechnung ebenfalls in diesem Modul erfolgt. Um sie zu bestimmen, ist es erforderlich, in jedem Knoten des modellierten Baumes die unterschiedlichen Betriebsmodi unter Berücksichtigung bereits erfolgter Optionsausübungen individuell zu kombinieren. Als Hilfsmittel dazu dient ein sog. *Optionscockpit*, in dem der Werteverlauf der berücksichtigten Handlungsmöglichkeiten über die Zeit visualisiert sowie der in jedem Knoten gewählte Betriebsmodus aufgezeigt sind. Weitere Entwicklungen wie eine vereinfachte Einbeziehung der Duplikation oder das automatische Hinzufügen einer neuen Realloption und des durch sie geschaffenen Betriebsmodus ergänzen die beschriebene Funktionalität.

Datenaustausch

Aus den bisherigen Ausführungen wird ersichtlich, dass die einzelnen Module zueinander flexibel in Beziehung stehen können. Das erfordert eine Standardisierung des Datenaustausches bzw. eine Systematik, um die in EXCEL® erforderlichen Verknüpfungen leicht definieren zu können. Dazu tragen besonders definierte Bereiche sowie die hierarchische Ordnung der Modulstruktur bei.

Durch die Festlegung eines *Datenaustauschbereiches* in einem gesonderten Tabellenblatt können die verschiedenen Module bildlich gesprochen übereinander gelegt werden. Im Austauschbereich ist immer ein Baum aufgebaut, in dem ein Knoten durch eine definierte, konstante Anzahl von Zellen gebildet wird. Dieses Prinzip ist in der folgenden Abbildung 50 verdeutlicht.

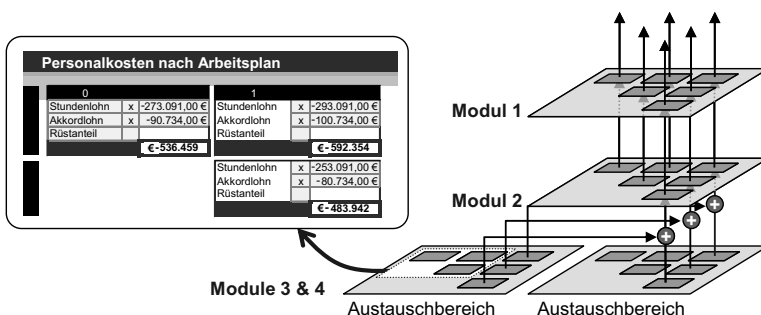


Abbildung 50: Prinzipdarstellung des Datenaustausches zwischen den Modulen von PLANTCALC®

Die Modulbibliothek verändert sich dynamisch. Die Erfahrungen aus den durchgeführten Bewertungsprojekten zeigen, dass eine Vielzahl der Aufgaben mit den bereits vorhandenen Modulen gelöst werden können. Allerdings erfordern individuelle Besonderheiten meist die Erweiterung einiger bestehender oder auch die Erstellung neuer Module. So wächst die Wissensbasis über die Zeit mit der Anzahl der unter Verwendung von PLANTCALC[®] durchgeführten Projekte.

7.2.3 Modul- und Projektverwaltung

Die Dekomposition der komplexen Bewertung von Produktionssystemen in Teilaufgaben und der Aufbau einer Modulbibliothek als Wissensspeicher führen zu einer Vielzahl an Modulen, die in der Modulstruktur, aber auch in Projekten verwaltet werden müssen. Als zweiter Bestandteil von PLANTCALC[®] hat die Modul- und Projektverwaltung die Aufgabe, den Nutzer bei der Konfiguration von Bewertungsprojekten zu unterstützen und die Module organisiert bereitzustellen.

In der *Modulverwaltung* wird definiert, welche Module verfügbar sind, aus welchen Dateien sie bestehen und wie sie logisch in die definierte Struktur eingeordnet sind. Ebenfalls angegeben sind Meta-Informationen wie der Ersteller eines Moduls, das Datum der letzten Änderung etc. Durch die Modulverwaltung ist die logische Struktur von der physischen Dateiorganisation getrennt, indem jedem Modul eine frei definierbare Anzahl an Dateien zugewiesen sowie für diese ein beliebiger Speicherort gewählt werden kann.

Die *Projektverwaltung* dient der Konfiguration von Bewertungsprojekten und nutzt dafür die in der Modulverwaltung definierten Strukturen. Als spezielle Sicht auf die Modulbibliothek dienen *Planungsvorlagen*. Sie sind eine Form des Wissensspeichers, indem sie aus der Gesamtheit aller Module eine für bestimmte Bewertungsaufgaben sinnvolle Teilmenge selektieren. Der Benutzer wählt aus der Vorlage die Module, die in einem konkreten Projekt benötigt werden. Daraus ergibt sich eine *Projektsicht*, in der wiederum festzulegen ist, auf welche technische Alternative sich das einzelne Modul bezieht. Möglich sind auch globale Größen, die für alle der zu vergleichenden Systeme identisch sind, bspw. die Entwicklung einzelner Unsicherheiten. Diese Zuordnung ist in der *Alternativensicht* visualisiert. Abbildung 51 fasst die beschriebene Aufteilung zusammen.

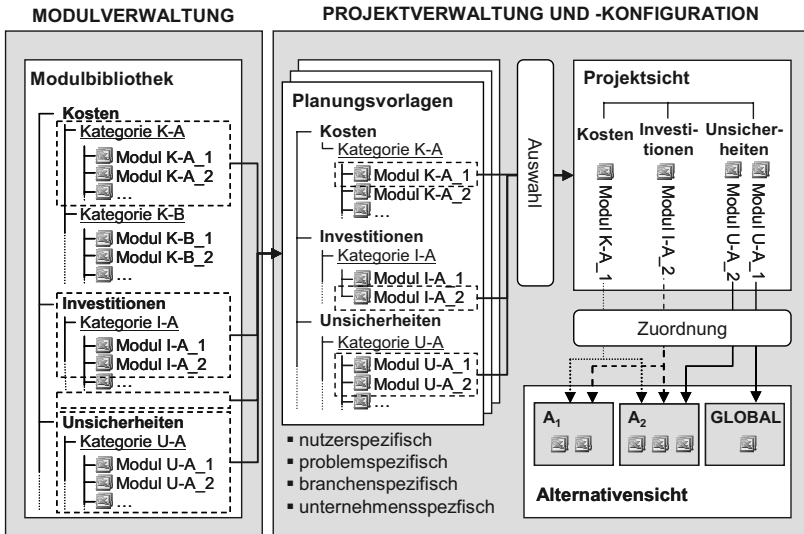


Abbildung 51: Vorgehen bei der Konfiguration eines Projektes (in Anlehnung an REINHART ET AL. 2007)

Das Programm PLANTCALC[®] stellt darüber hinaus weitere Werkzeuge bereit, die einzelne Vorgänge des operativen Prozesses der Bewertung wie die Dateneingabe, die Erfassung des Projektstatus etc. unterstützen. Insgesamt hilft die Projektverwaltung, wie gefordert die Konfiguration der Bewertungsaufgabe zu strukturieren, zu visualisieren und so die Komplexität zu verringern.

7.3 Anwendungsbeispiel

7.3.1 Beschreibung des Anwendungsbeispiels

Das Beispiel, das zur Illustration der entwickelten Methode dienen soll, ist an eine Fallstudie angelehnt, die im Rahmen der Arbeiten im Forschungsfeld „Wandlungsfähige Produktion“ am *iwb* durchgeführt wurde (vgl. ZÄH ET AL. 2004, ZAEH ET AL. 2005c). Darüber hinaus sind zur besseren Verdeutlichung der Vorgehensweise einzelne Aspekte aus zwei weiteren industriellen Anwendungen eingeflossen, in denen Teile der Methode bei einem Hersteller von Produkten der Energietechnik bzw. bei einem Zulieferer mechatronischer Bauteile für Nutzfahrzeuge Anwendung fanden.

In der Fallstudie wurde bei einem Nutzfahrzeughersteller ein Montagesystem zur Ausstattung von Fahrerhausdächern untersucht. Wegen der für die einzelnen Kabinen sehr unterschiedlichen Arbeitsumfänge erfolgt deren Ausrüstung entkoppelt vom Takt des Hauptbandes in einem eigenen Bereich mit parallelen Arbeitsbühnen. Die Zusammenführung von montiertem Dach und Fahrerhaus erfolgt n Takte später an einer speziellen Station, so dass für die Tätigkeiten ein genau definierter maximaler Zeitraum $n \times t_{\text{takt}}$ zur Verfügung steht. Nachdem das Abheben vom Fahrerhaus und die Bereitstellung in der Montage an einem Übergabepunkt erfolgt ist, müssen die Dächer dort gepuffert und in freier Reihenfolge zu den Arbeitsbühnen gefördert werden. Nach erfolgter Ausstattung sind ein erneuter Transport sowie eine Zwischenpufferung notwendig, bevor das komplettierte Dach wieder an entsprechender Position in die „Perlenkette“, d.h. in die geplante und fixierte Auftragsreihenfolge, des Hauptbandes eingefügt wird.

Um die Wandlungsfähigkeit des Gesamtsystems zu erhöhen, wurden im Zuge der Fallstudie mehrere alternative technische Konzepte für die Fördertechnik entwickelt, die sich in Bezug auf ihre Anpassungsfähigkeit an veränderte Randbedingungen unterscheiden. Die Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methode ist nachfolgend beispielhaft für die Auswahlentscheidung zwischen einem wandlungsträgen Gurtband mit Laufkatze (Alternative A_1) und einem wandlungsfähigen System aus einzelnen Transportwägen (Alternative A_2) illustriert und in PLANTCALC[®] (Abschnitt 7.2) umgesetzt. Eine genauere Beschreibung der beiden alternativen technischen Konzepte erfolgt im nächsten Abschnitt 7.3.2, in dem die Entwicklung des bewertungsorientierten Modells der Produktion, bestehend aus Umfeld-, Kosten- und Optionsprofil, erläutert ist. Die einzelnen Schritte des Bewertungsprozesses sind in Abschnitt 7.3.3 verdeutlicht.

7.3.2 Bewertungsorientiertes Modell der Produktion

Generelle Annahmen

Der Betrachtungshorizont in diesem Beispiel beträgt fünf Jahre. Zur Analyse wurde er in fünf diskrete Zeitpunkte unterteilt ($t=1, 2, \dots, 5$; $\Delta t = 1$ Jahr). Das Unternehmen hat die Kapitalkosten entsprechend seiner Finanzierungsstruktur, der herrschenden Zinsniveaus an den Märkten sowie des allgemeinen Branchenrisikos ermittelt und daraus entsprechend eine Renditevorgabe formuliert. Für dieses Beispiel betrage der entsprechende Diskontierungsfaktor $i=7,5\%$ und der risikolose Zins $r_f=4\%$. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit soll nur über die nächsten fünf Jahre erfolgen, in denen keine neue Baureihe eingeführt wird.

Umfeldprofil

Mit Hilfe der in Tabelle 7 auf Seite 94 aufgeführten Detaillierung der Rezeptoren der Produktion konnten die relevanten unsicheren Einflussgrößen im Unternehmensumfeld identifiziert und systematisiert werden.

Vor allem im Hinblick auf die genaue *Stückzahlentwicklung* besteht Unkenntnis: Betrachtet werden muss hier vor allem die maximale Produktionsmenge einer Periode und deren generelle Aufteilung auf die zwei Grundvarianten. Auftragsabhängige Unsicherheiten bestehen im Fallbeispiel nicht, da durch eine entsprechende Steuerung der „Perlenkette“ und deren Fixierung eine gewisse Gleichmäßigkeit garantiert werden kann. Hinsichtlich des Rezeptors *Produkt* besteht Unsicherheit darüber, ob sich die Schwankungsbreite des Ausstattungsumfangs und damit der Montagezeiten verändert, was eine Auswirkung auf die Anzahl der benötigten Pufferplätze hat. Zusätzlich wird überlegt, eine neue Ausstattungsvariante anzubieten, die für den Abtransport von den Montagebühnen spezielle Aufnahmen erfordert. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die grundsätzliche Werkstückgestaltung bis zur Ablösung der aktuellen Baureihe bestehen bleibt.

Ebenso verhält es sich mit den Anforderungen aus dem Rezeptor *Qualität*: Es werden bereits Dächer aus Stahl und aus Kunststoff verbaut, eine Umstellung ist nicht angedacht. Die Anforderungen an die Lieferqualität bleiben bestehen und die erforderlichen Toleranzen sind auf die Prozesse ausgelegt, die am Hauptband installiert sind und die sich bis zur Ablösung der Baureihe nicht verändern werden. Bezüglich des Rezeptors *Zeit* besteht ebenfalls keine Unsicherheit: A-Teile werden JiS angeliefert, die Einhaltung entsprechender Zeitfenster ist vertraglich abgesichert. Durch die Kopplung an das getaktete Hauptmontageband ist darüber hinaus die Reaktionszeit, die der Kunde (im vorliegenden Fall die Station zur Montage von Fahrgestell und Dach) fordert, ebenso wie die Länge der Bestellvorausschau deterministisch.

Unsicherheit besteht jedoch im Hinblick auf die Entwicklung der *Kosten* für einige Leistungsfaktoren. So ist die Lohnsteigerung ungewiss und wie die Energiekosten Schwankungen unterworfen. Es sei für das Fallbeispiel darüber hinaus angenommen, dass Wartung, Reinigung und Reparatur der Anlagen von einem externen Dienstleister vorgenommen werden und eine Abrechnung nach dem tatsächlich anfallenden Aufwand erfolgt. Die identifizierten Unsicherheiten sind zusammenfassend in Abbildung 52 aufgeführt und entsprechend ihrer Bedeutung für den betrachteten Prozess des Förderns und Pufferns bewertet.

			Strukturbrüche Dynamik	Ereignisse	Unschärfe	Bedeutung	
S	U ₁	maximale Menge einer Periode	X			X	A
		Aufteilung der Gesamtmenge auf zwei Grundvarianten	X			X	B
P		Anzahl der durchschnittlich verbauten Teile (Ausstattungsumfang), d.h. durchschnittliche Montagezeit				X	C
	U ₂	Schwankung des Ausstattungsumfangs				X	A
	U ₃	Einführung einer neuen Ausstattungsvariante		X	▪ zusätzliche Ausstattungsvariante, neue Aufnahmen erforderlich		A
K	U ₄	Lohnentwicklung (Montage- und Logistikpersonal)	X			X	A
		Energiekosten	X			X	B
		Marktpreis für externe Dienstleistungen				X	C
	U ₅	Arbeitsumfang von Wartung und Instandhaltung (externer Dienstleister)				X	A

Legende

S : Stückzahl P : Produkt K : Kosten A : große Bedeutung B : mittlere Bedeutung C : geringe Bedeutung

Abbildung 52: Qualitatives Umfeldprofil des dargestellten Fallbeispiels

Kostenmodell

Das Kostenmodell ist zur verbesserten Illustration der Realoptionsbewertung bewusst einfach gehalten und in Tabelle 8 zusammengefasst. Es wird davon ausgegangen, dass ein externer Dienstleister für das Handling der Dächer 15 € pro Stück verlangen würde. Dieser Betrag bildet einen (fiktiven) Deckungsbeitrag, der durch den Transport eines Daches erzielt werden kann. Die Produktion erfolgt einschichtig, woraus sich auf Basis der aktuellen Transport- und Handlingszeiten eine *Kapazität* von 4.000 Stück pro Jahr und Transportwagen sowie von 20.000 Stück pro Jahr für die Kombination aus Gurtband und Laufkatze ergibt.

Die wesentliche Kostenposition bei beiden Alternativen sind die *Personalkosten*. Für die Bedienung des Gurtbandes und der Laufkatze ist ein eigener Mitarbeiter erforderlich, so dass dessen Lohn unabhängig von der transportierten Menge als Fixkosten anfällt. Bei den Transportwagen sei für die erforderlichen Tätigkeiten ein manueller Zeitaufwand in Höhe von insgesamt 12,2 Minuten pro Dach angenommen (fixieren auf Handwagen, einzelne Vormontageumfänge durchführen,

Position	Gurtband	Handwagen
fiktiver Deckungsbeitrag	15 €/Stk.	15 €/Stk.
maximale Kapazität	20.000 Stk./Jahr	4.000 Stk./(Jahr * Wagen)
Personalkosten	220 AT * 8 Std. * 28 €/Stunde = 49.280 €/Jahr (fix)	12,2 min/Stk. * 28/60 €/min = 5,69 €/Stk. (variabel)
fixe Betriebskosten	<u>Betriebsstoffe</u> 5.000 € (inkl. Energie) <u>Reinigung</u> 26 * 30 € = 780 € <u>Wartung</u> 13 * 150 € = 1.950 € <u>Reparaturen</u> 4 * 2.000 € = 10.000 €	<u>Wartung u. Reparatur</u> 10.000 €/Wagen (pauschal)
Investitionen	270.000 €	55.000 €/Wagen

AT: Arbeitstage

Tabelle 8: Wichtige Positionen des Kostenmodells im Fallbeispiel

Fahrt zur und Umladen auf die Montagebühne, erneutes Umladen nach Vollen- dung der Dachausstattung und Transport zu den Pufferplätzen). Den Berechnun- gen liegt ein Lohn von 28 € pro Stunde zugrunde, so dass sich bei 220 Arbeitsta- gen und einer 40-Stunden-Woche für das Gurtband Personalkosten von 49.280 € pro Jahr bzw. für die Transportwagen von 5,69 € pro Dach ergeben.

Zusätzliche *fixe Betriebskosten* fallen pro Transportwagen für Wartungs- und Reparaturarbeiten an, die pauschal auf 10.000 € geschätzt sind. Bei dem Gurt- band werden 5.000 € p.a. für Betriebsstoffe (inkl. Energie) gezahlt. Zusätzlich besteht ein Vertrag mit einem Dienstleister, der Reinigung, Wartung und Repara- tur der Anlage übernimmt. Alle zwei Wochen sind 30 € für Reinigung, alle vier Wochen 150 € für Wartung und ca. vier Mal pro Jahr 2.000 € für Reparaturen erforderlich (zusammen 10.730 € pro Periode). Insgesamt summieren sich die Fixkosten (inkl. Personal) für das Gurtband in $t=0$ auf 65.010 € p.a.

Die erforderlichen *Investitionen* zur Anschaffung von A_1 (Gurtband) belaufen sich auf 270.000 €, während für einen sondergefertigten Transportwagen (A_2) mit Aufnahmen für die verschiedenen Dachvarianten 55.000 € zu zahlen sind, je- weils inkl. sämtlicher Anschaffungsneben- und Inbetriebnahmekosten.

Optionsprofil

Die Optionsprofile für die beiden Alternativen A_1 und A_2 werden mit Hilfe des entwickelten Katalogs der Handlungsmöglichkeiten abgeleitet. Entsprechend der betrachteten Systemebene ist die Analyse auf Anpassungsmaßnahmen auf Arbeitsstationsebene sowie auf die Ebene des Fertigungs-, Montage- und Logistiksystems fokussiert. Aufgrund der identifizierten Randbedingungen ergeben sich keine Handlungsmöglichkeiten aus den Gestaltungsfeldern Gebäude und Fläche sowie Material. Die übrigen potenziellen Realoptionen sind in Tabelle 9 aufgeführt und kurz erläutert. Als weitere Information sind dort auch bereits Scheinoptionen anhand der Kriterien Flexibilität und Entscheidungsrelevanz gefiltert sowie der Typ der Realoption identifiziert. Ferner ist angegeben, auf welche Alternative sich die Maßnahme jeweils bezieht und welche Unsicherheit primär angesprochen wird.

	Beschreibung	Wirkung	Typ	Flex	ER	Bez
1	Insourcing von Funktionsbereichen [A ₁]	Übernahme der Reinigungs-, Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten für die automatische Fördertechnik [U ₅]	I	✓	✓	O _{1,1}
2	Montage- und Verkettungsprinzip ändern [A ₁]	Einführung einer getakteten Linienfertigung, Gurtband zur Verkettung der Stationen [U ₂]	I	✓	✓	O _{1,2}
3	Montage- und Verkettungsprinzip ändern [A ₂]	Nutzung der Transportwagen als Montagebühnen, die über Schleppförderer o.Ä. bewegt werden [U ₂]	I	✓	✓	O _{2,1}
4	Übernahme der Tätigkeiten anderer Betriebsmittel [A ₁ , A ₂]	weitere Vormontagen, Verpackungen, Sicherungsmaßnahmen während der Pufferung [U ₂]	I	X	X	
5	Verlagerung des Betriebsmittels in andere Bereiche [A ₂]	Nutzung der Transportwagen für andere Transporte (entspricht „Verkauf“), siehe Nr. 10 [U ₁]	I	✓	✓	O _{2,2}
6	Erweiterung der Anzahl bedienter Stationen [A ₁]	durch Verlängerung der Förderstrecke und Ausweitung der Kranbahn [U ₁]	I	✓	✓	O _{1,3}
7	Erweiterung der Anzahl bedienter Stationen [A ₂]	durch verlängerte Transportwege möglich, z.B. bei zusätzlichen Pufferplätzen [U ₁ , U ₂]	I	✓	✓	O _{2,3}
8	Verringerung der Anzahl bedienter Stationen [A ₁]	Nutzung nur eines Teils des Puffers und der Kranbahn [U ₁]	I	X	✓	
9	Verringerung der Anzahl bedienter Stationen [A ₂]	Durch verkürzte Transportwege bei Layoutveränderung möglich, z.B. weniger Montagebühnen [U ₁]	I	✓	✓	O _{2,3}
10	Verkauf von Betriebsmitteln [A ₂]	Verkauf einzelner Wagen, Nutzung in anderen Bereichen, siehe Nr. 5 [U ₁]	I	✓	✓	O _{2,2}
11	Kauf von Betriebsmitteln [A ₂]	Kauf weiterer Handwagen zur Ausweitung der Kapazität [U ₁]	II	✓	✓	O _{2,4}
12	Kauf von Betriebsmitteln [A ₂]	Kauf eines Gurtbandes mit Verkauf der Transportwagen, Umstellung auf Gurtbandmodus [U ₁ , U ₄]	I	✓	✓	O _{2,5}
13	Kauf von Betriebsmitteln [A ₁]	Kauf einer zusätzlichen Laufkatze [U ₁]	II	✓	✓	O _{1,4}
14	Werkstückzufuhr automatisieren [A ₂]	Teilautomatisierung des Handling an den Übergabestationen zum Hauptmontageband [U ₁ , U ₄]	I	✓	✓	O _{2,6}
15	Integration Prüftechnik [A ₂]	Transportwagen mit spezieller „mobiler“ Prüftechnik [U ₃]	I	✓	X	
16	Integration Hilfsprozesse [A ₁ , A ₂]	Integration von Vormontagen während der Pufferzeit, siehe Nr. 2 [U ₂]	I	X	X	
17	Umrüstung [A ₁ , A ₂]	Veränderung der Aufnahme bei Einführung einer neuen Ausstattungsvariante [U ₃]	II	✓	✓	O _{1,5} O _{2,7}

Flex: Flexibilität

ER: Entscheidungsrelevanz

Bez: Bezeichnung

Tabelle 9: Identifizierte Handlungsmöglichkeiten und Filterung von Scheinoptionen für die Alternativen A₁ und A₂ des Anwendungsbeispiels

7.3.3 Bewertung

7.3.3.1 Basisbewertung

Der Basisbewertung liegt das erwartete Basisszenario z_0 zugrunde, das in Tabelle 10 aufgezeigt ist. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Stückzahl nur in den ersten zwei Jahren verändert und danach auf einem konstanten Niveau verbleibt. Das Lohnniveau wachse mit einer Steigerungsrate von 2% pro Jahr. Die übrigen Größen besitzen keine kontinuierliche Entwicklung über die Zeit (Dynamik). Trotz erwarteter Absatzsteigerung bleiben die Gesamtstückzahlen während der Projektlaufzeit unter der Kapazitätsgrenze des Gurtbandes, so dass keine Anpassung der Konfiguration von A_1 notwendig wird. Damit die Alternative A_2 das Basisszenario z_0 bewältigen kann, sind drei Wagen erforderlich. Wie bei A_1 bleibt während der betrachteten fünf Jahre diese Konfiguration unverändert.

Nr.	Beschreibung	Startwert	Dynamik	Werte in $t_1; t_2; t_3; t_4; t_5$
U ₁	Stückzahl gesamt	10.000 Stk.	+1.000 Stk. p.a.	11.000; 12.000; 12.000; 12.000; 12.000
U ₂	Schwankung des Ausstattungsumfangs	12%		12%; 12%; 12%; 12%; 12%
U ₃	Einführung einer neuen Ausstattungsvariante	nein		
U ₄	Lohnentwicklung	1	+ 2 % p.a.	1,02; 1,04; 1,06; 1,08; 1,105
U ₅	Fehleranzahl, Reparaturhäufigkeit	5		5; 5; 5; 5; 5

Tabelle 10: Beschreibung des Basisszenario z_0 für das Anwendungsbeispiel

Die beiden Kapitalwerte errechnen sich zu $NPV(A_1)=254.501$ € bzw. zu $NPV(A_2)=203.663$ €. Damit ist A_1 die Referenzalternative A^* . Da für den Grad der Wandlungsfähigkeit $w(A_2)>w(A_1)$ gilt und zudem die Differenz zwischen dem Wert von A_1 und $A_2 \sim 25\% < \alpha=0,4$ beträgt (bezogen auf A_2), werden beide Alternativen in die nachfolgende dynamische Bewertung eingeschlossen. Zu analysieren ist somit, ob sich durch die Berücksichtigung von Realloptionen die Vorteilhaftigkeit der wandlungsfähigeren Alternative A_2 belegen lässt.

7.3.3.2 Dynamisches Grundmodell

In einem nächsten Schritt wird das dynamische Grundmodell aufgestellt. Die Stückzahlentwicklung ist als additiver Prozess abgebildet, der eine Schwan-

kungsbreite σ von 20% p.a. besitzt. Bei Überschreiten der absoluten Leistungsgrenzen kann ein entsprechend geringerer (fiktiver) Deckungsbeitrag generiert werden, so dass keine Strafkosten zu modellieren sind. Die Lohnsteigerung verlaufe prozentual und ist entsprechend als GBM abgebildet. Die Schwankungsbreite σ wird zu 1,5% p.a. angenommen. Darin enthalten sind auch mögliche Veränderungen der Lohnnebenkosten. Die Anzahl der Reparaturen, die durch den externen Dienstleister am Gurtband bzw. der Laufkatze durchzuführen sind, ist poissonverteilt mit Mittelwert $\lambda=5$ (vgl. DIN 53804). Hinsichtlich beider Größen existieren keine abzubildenden Leistungsgrenzen.

Bei einer Zunahme der Schwankung der Montagezeit sinkt dagegen für Alternative A_2 die Kapazität eines Transportwagens (relative Leistungsgrenze), da mit wachsender Schwankung die Anzahl der maximal benötigten Pufferplätze zunimmt. Entsprechend sind dann auch mehr Transportwagen erforderlich. Es wird angenommen, dass sich die Varianz in der Ausstattung in jedem Jahr isoliert betrachtet die nächsten drei Jahre maximal um ein Viertel (gleichverteilt) erhöht.

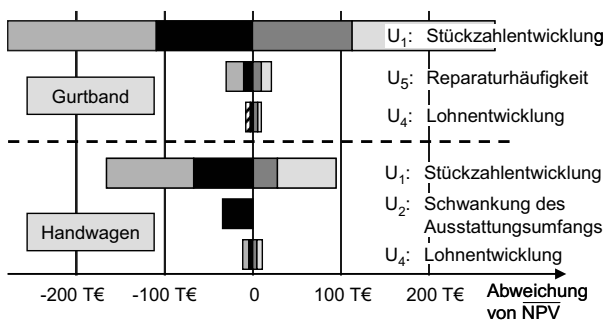
Bei der Einführung einer neuen Ausstattungsvariante, die ab dem ersten Jahr möglich ist (Wahrscheinlichkeit $p=10\%$), werden veränderte Aufnahmen erforderlich, was Investitionen in Höhe von 30.000 € (Laufkatze) bzw. je 5.000 € pro vorhandenem Transportwagen erfordert. Die Modellierung erfolgt als Verkettung binomialer Ereignisse, aus der sich eine Eintretenswahrscheinlichkeit von insgesamt 46,9 % für die Neueinführung ermitteln lässt.

7.3.3.3 Quantitative Optionsauswahl und Auswahl primärer und sekundärer Unsicherheiten

Auf der Basis des dynamischen Grundmodells, in dem die Modellierung der Unsicherheiten sowie die Leistungsgrenzen der Alternativen in Bezug auf die einzelnen Einflussfaktoren abgebildet sind, lässt sich das *äußere Potenzial* einer Optionsausübung ermitteln. Das Ergebnis der Berechnungen bei Verwendung der 10%-, 30%-, 70%- und 90%-Quantile ist in Abbildung 53 mit Hilfe eines Tornado-Diagramms visualisiert³⁰ sowie die ermittelten $\Delta_i^+(A_j)$ bzw. $\Delta_i^-(A_j)$ in einer

³⁰ Da sich für die zur Modellierung gewählte Bernoulliverteilung nicht die für die Auswertung gewählten Quantile (10%, 30%, 70%, 90%) ermitteln lassen, werden für die Unsicherheit U_3 „Einführung einer neuen Ausstattungsvariante“ die möglichen Abweichungen von der Ergebnisgröße Kapitalwert direkt mit ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit gewichtet. Eine zu den anderen Veränderungen gleichwertige Darstellung im Tornado-Diagramm ist deshalb nicht möglich.

Tabelle aufgeführt. Deutlich wird der große Einfluss einer möglichen Stückzahl-
schwankung auf den Wert der jeweiligen Alternative. Zu erkennen ist ferner,
dass sich eine Verschlechterung und eine Verbesserung der Ausprägung dieses
Unsicherheitsfaktors in Bezug auf A_1 jeweils gleich stark auswirken. Dagegen
profitiert das System „Transportwagen“ in der untersuchten Konfiguration unter-
proportional von einer positiven Entwicklung. Die nur zu einer Seite auftretende
Variation des Kapitalwertes bei einer Veränderung von U_2 resultiert daraus, dass
sich die Schwankung des Ausstattungsumfangs gemäß der getroffenen Annah-
men nur erhöhen kann und somit keine „Chance“ existiert.



äußeres Potenzial einer Optionsausübung	Alternative 1		Alternative 2	
	Δ_i^-	Δ_i^+	Δ_i^-	Δ_i^+
Stückzahlentwicklung [U_1]	77.600	77.600	46.259	23.844
Schwankung Ausstattungsumfang [U_2]	0	0	16.183	0
Neue Ausstattungsvariante [U_3]	12.083	0	6.841	
Lohnentwicklung [U_4]	2.251	2.167	2.985	3.101
Reparaturhäufigkeit [U_5]	8.073	6.055	0	0

Legende

Δ_i^{\pm} : gewichtete positive (negative) Abweichung vom erwarteten T€ : Tausend Euro
Kapitalwert NPV bei Variation von U_i

Abbildung 53: Für das Anwendungsbeispiel alternativenspezifisch ermitteltes
äußeres Potenzial einer Optionsausübung für U_1 bis U_5

Die Bewertung des inneren Potenzials erfolgt mit Hilfe eines paarweisen Ver-
gleichs. Abbildung 54 zeigt das bereits aggregierte Ergebnis bezüglich der ge-
genübergestellten potentiellen Veränderungen von fixen und variablen Kosten,
die sich durch eine Ausübung der jeweiligen Realloption ergeben können, sowie
der jeweiligen Ausübungspreise. Typ-II-Optionen werden dabei nicht berück-
sichtigt (vgl. Abschnitt 6.4.4.3). Aus der Gewichtung der ermittelten inneren

Potenziale mit den zugehörigen äußeren Potenzialen lässt sich eine Rangliste der Realoptionen im Hinblick auf ihre angenommene wirtschaftliche Bedeutung erstellen. Im vorliegenden Fall sind zunächst die Option über den Verkauf einzelner Transportwagen, dann die Umstellungsoption (von Transportwagen auf Gurtband) und anschließend die mögliche Teilautomatisierung des Handling in die Bewertung einzubeziehen.

RO	$rg_i(O_{j,k})$	RO-Kategorie	Unsicherheit	$rg(\Delta^{+(-)}(A_j))$	Gesamtpotenzial	Rang der RO
O _{2,2}	8	Versicherung	U ₁	8	64	8
O _{2,5}	7	Wachstum	U ₁	7	49	7
O _{2,6}	6	Versicherung	U ₄	4	24	6
O _{2,1}	5	Wachstum	U ₂	2	10	3
O _{1,2}	3,5	Wachstum	U ₂	2	7	2
O _{1,1}	3,5	Versicherung	U ₅	5	17,5	5
O _{2,3}	2	Versicherung	U ₂	6	12	4
O _{1,3}	1	Versicherung	U ₂	2	2	1

Legende

$rg_i(O_{j,k})$: Rang der Realoption k im Hinblick auf ihr inneres Potenzial
 $rg(\Delta^{+(-)}(A_j))$: Rang der Unsicherheit bezüglich des äußeren Potenzials
 „Chance“ (+) bzw. „Risiko“ (-)

RO : Realoption

Abbildung 54: Gewichtung des inneren Potenzial der Realoptionen mit dem äußeren Potenzial der Optionsausübung und Ableitung einer Rangfolge der Realoptionen für das Anwendungsbeispiel

Als primäre Unsicherheit kommen aufgrund der geforderten Entwicklung über die Zeit (Informationsgewinnung) die Stückzahl- und die Lohnentwicklung sowie die Einführung einer neuen Ausstattungsvarianten in Betracht. Auf der Basis des jeweiligen Potenzials $\Pi(U_i)$ wird in diesem Beispiel die Stückzahlentwicklung gewählt und nachfolgend in einem binomialen Baum abgebildet, der ab $t=3$ semi-deterministisch verläuft (vgl. auch Abbildung 55 auf S. 179). Die weiteren Einflussgrößen sind mit den im vorigen Abschnitt 7.3.3.2 erläuterten Parametern als Unsicherheiten in PLANTCALC[®] bzw. einer Monte-Carlo-Simulation hinterlegt.

7.3.3.4 Realoptionsbewertung

Nach der Ermittlung ihres jeweiligen Potenzials sind die einzelnen Realoptionen schrittweise in die Bewertung einzubeziehen. Im Folgenden wird einheitlich von

einem Time lag von $T_X=0$ ausgegangen. Den mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation ermittelten Werten liegen stets 10.000 Ziehungen zugrunde.

Als erstes wird $O_{2,2}$ untersucht. Diese Realoption beinhaltet die Möglichkeit, einen oder mehrere der Transportwagen zu verkaufen, sofern dessen bzw. deren Kapazität aufgrund einer sinkenden Stückzahl nicht mehr erforderlich ist. Da es sich um einen Put handelt, resultiert in diesem Fall ein positiver Ausübungspreis. Es wird angenommen, dass eine Veräußerung für 75% der Anschaffungsinvestition möglich ist. Der Betriebsmodus $\Omega_{2,2}$ ist modelliert, indem die jeweils optimale Transportkapazität bestimmt und in Abhängigkeit davon die resultierenden Kosten abgeleitet werden. Im Gegensatz dazu bildet $\Omega_{2,0}$ lediglich die Erweiterung um zusätzliche Transportwagen ab (Typ-II-Option $O_{2,4}$). Aus der Differenz der Zahlungsströme $CF(\Omega_{2,2})-CF(\Omega_{2,0})$ ergibt sich $CF(O_{2,2})$ und daraus mit Hilfe der Duplikation der Verlauf der $duPV_{t,h}^{\text{ex}}(O_{2,2})$. Ausgelöst wird die Realoption im Knoten (2,3), an dem über zwei Perioden eine ungünstige Stückzahlentwicklung eingetreten ist. Der in einem Simulationslauf ermittelte Erwartungswert von $NPV_2(A_2)$ beträgt 24.944 €. Da somit die Wirtschaftlichkeit von A_2 noch nicht nachgewiesen ist, gleichzeitig aber die verbliebenen Realoptionen für A_2 ein größeres Potenzial besitzen als die von A_1 , wird die Bewertung fortgesetzt (vgl. Iteration 1 in Tabelle 11).

Die Abbildung der zweiten Realoption $O_{2,5}$ verläuft analog. Der Ausübungspreis $X_{t,h}$ berechnet sich hier aus den erforderlichen Anschaffungskosten für die Kombination aus Gurtband und Laufkatze und einmaligen Umbaukosten in Höhe von 10.000 € abzüglich der Erlöse, die sich durch den Verkauf der zum Zeitpunkt der Auslösung vorhandenen Transportwagen erzielen lassen (75% der Anschaffungsinvestition). Der Betriebsmodus $\Omega_{2,5}$ ist mit dem der Alternative A_1 identisch. Wie in Abschnitt 6.4.6.4 erläutert wurde, ergeben sich die Zahlungsströme der zweiten bewerteten Realoption als Differenz zu dem in der ersten Iteration ermittelten optimierten Betriebsmodus als Kombination aus $\Omega_{2,0}$ und $\Omega_{2,2}$. Abbildung 55 zeigt die entstehenden Zahlungsströme sowie die resultierenden Barwerte für eine Ziehung der Monte-Carlo-Simulation und verdeutlicht die Situation der Auslösung. Unabhängig von der Realisierung der sekundären Unsicherheiten erfolgt diese immer in Knoten (3,1) und in ca. 8% der Fälle auch in Knoten (3,2), wenn eine sehr günstige Kostenentwicklung z. B. im Hinblick auf die Reparaturhäufigkeit des automatisierten Systems eingetreten ist.

wiesen ist. Im konkreten Fall resultiert dies daraus, dass eine Umstellung von den Transportwagen auf das Gurtband zwei Unsicherheiten anspricht: Es handelt sich bei $O_{2,5}$ um eine Wachstumsoption bei zunehmender Stückzahl und gleichzeitig um eine Versicherungsoption bei steigendem Lohnniveau. Für die Ermittlung von $\pi_{2,5}$ wird jedoch nur eine der beiden Optionalitäten berücksichtigt, was zu einer Unterschätzung des Potenzials führt.

Das in Abschnitt 7.3.3.1 formulierte Ziel, durch die Berücksichtigung von Realoptionen die Vorteilhaftigkeit der wandlungsfähigeren Alternative A_2 zu belegen, konnte im gewählten Anwendungsbeispiel erreicht werden. Eine abschließende Investitionsempfehlung lässt sich erst nach Analyse der Risikostruktur des Projektes aussprechen. Die verwendete Software PLANTCALC[®] sowie die Monte-Carlo-Simulation Crystal Ball[®] beinhalten entsprechende Funktionen, um geeignete Auswertungen bspw. in Form von Histogrammen zu erstellen. Diese können auch genutzt werden, um den Einfluss der getroffenen Annahmen auf das Ergebnis gezielt zu untersuchen. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel streut der Kapitalwert von A_2 weniger stark um seinen Mittelwert als der von A_1 . Somit ist der minimal erzielte Kapitalwert $NPV_{min}(A_2)$ größer als $NPV_{min}(A_1)$. Allerdings lassen sich mit A_1 im günstigen Fall höhere Gewinne erwirtschaften, da der $NPV_{max}(A_1)$ größer als der $NPV_{max}(A_2)$ ist. Eine generelle Handlungsempfehlung kann deshalb nicht ausgesprochen werden, sondern die Entscheidung für eine der Alternativen ist entsprechend der Risikopräferenz des Unternehmens zu treffen.

In diesem und den vorangegangenen Abschnitten wurde die Anwendung der einzelnen Schritte der entwickelten Methode anhand eines Beispiels erläutert. Darauf aufbauend kann im Folgenden eine Bewertung des Vorgehens im Hinblick auf die in Kapitel 4 aufgestellten Anforderungen erfolgen.

7.4 Bewertung des Vorgehens

In diesem Abschnitt soll zusammenfassend beurteilt werden, inwieweit die entwickelte Methode sowie das darauf aufbauend konzeptionierte Softwaretool PLANTCALC[®] die gestellten Anforderungen erfüllen (vgl. Kapitel 4). Dazu dienen vor allem die Erkenntnisse aus dem erläuterten Anwendungsbeispiel, es werden aber auch Erfahrungen aus weiteren durchgeführten Bewertungen berücksichtigt (vgl. ZÄH ET AL. 2006, REINHART ET AL. 2007).

Nachfolgend wird die Leistungsfähigkeit der Methode anhand des Anforderungskatalogs (vgl. Abbildung 18 auf S. 72) kritisch reflektiert. In Abbildung 56 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung dann graphisch zusammengefasst.

Allgemeine Anforderungen

Die Methode wurde gezielt entwickelt, um mehrere technisch-organisatorische Alternativen a priori zu vergleichen. Mit einer Investitionsrechnung unter Unsicherheit werden die Besonderheiten einer ungewissen Zukunft einbezogen und durch den Zeitwert von Zahlungsströmen (Diskontierung) berücksichtigt. Der für die Realloptionsbewertung gewählte MAD-Ansatz ist speziell für einen Alternativenvergleich geeignet, da er verschiedene Projekte relativ zueinander beurteilt. Die an das *Bewertungsziel* gestellten Anforderungen werden somit erfüllt.

Die geforderte Anwendbarkeit der Methode auf *Bewertungsobjekte* von der Arbeitsstation bis zur Fabrikebene spiegelt sich im aufgestellten Katalog der Handlungsmöglichkeiten wider. Dieser schließt lediglich Anpassungsmaßnahmen im Produktionsnetz nicht mit ein. Das hierarchische Gliderungsschema des Kostenmodells ist ebenfalls für unterschiedliche Abstraktionsebenen geeignet.

Durch die Beschränkung auf eine quantitativ-monetäre Bewertung ist der gestellten Anforderung an das zu verwendende *Bewertungskriterium* entsprochen. Allerdings ergeben sich daraus Limitationen hinsichtlich der *Bewertungsdimension*. Qualitative Aspekte sind nicht berücksichtigt, was die geforderte ganzheitliche und integrierte Bewertung erschwert. Andererseits ist es durch die Auslegung der Methode auf eine rein monetäre Betrachtung möglich, verschiedene gestalterische Aspekte (z.B. Mobilität, Modularität, etc.) bei entsprechender Interpretation ihrer jeweiligen monetären Auswirkungen in der Analyse zu berücksichtigen.

Anforderungen an die Bewertungsmethode

Mit der Realloptionsbewertung findet in dieser Arbeit ein *Bewertungsverfahren* Verwendung, das die gestellten Anforderungen grundsätzlich erfüllt. Es wird empfohlen, um den monetären Wert von Projekten zu bestimmen, welche Handlungsmöglichkeiten bei einer unsicheren Entwicklung der Zukunft beinhalten und die dem Management eine aktive Modifikation getroffener Entscheidungen erlauben. In Bezug auf die vorliegende Aufgabenstellung entspricht dies den Charakteristika wandlungsfähiger Produktionssysteme.

Die Anforderungen an eine *Modellierung des Unternehmensumfeldes* können mit der entwickelten Methode nicht vollständig erfüllt werden. Zwar wurden vielfäl-

tige Möglichkeiten aufgezeigt, um unsichere Entwicklungen formal korrekt zu beschreiben. Die schwierige Prognose der erforderlichen Parameter wird jedoch nicht vereinfacht. Lediglich die Untersuchung alternativer Annahmen ist durch das Softwarewerkzeug PLANTCALC® erleichtert. Als geeigneter Ansatz zur Abbildung einer zeitabhängigen Unsicherheit, die sich im Verlauf eines Projektes reduziert, werden in der entwickelten Methode Bäume eingesetzt. Für eine praktische Anwendung ist dieses Vorgehen aufgrund einer schnell wachsenden Komplexität jedoch auf die gleichzeitige Modellierung von ein bis zwei unsicheren Einflussgrößen beschränkt.



Abbildung 56: Beurteilung der Leistungsfähigkeit der entwickelten Bewertungsmethode

Gefordert ist in Kapitel 4 auch, die Methode im Hinblick auf die *praktische Anwendung* zu entwickeln. Ein wichtiges Kriterium hierfür ist die *Übertragbarkeit*, die durch den aufgestellten Katalog der Handlungsmöglichkeiten gefördert wird. Als Folge der notwendigen projekt- und alternativenspezifischen Konkretisierung der generischen Anpassungsmaßnahmen wird einerseits eine zu starke Fokussierung auf einen Anwendungsfall vermieden, andererseits ein allgemeingültiger Vorgehensrahmen aufgespannt. Einen wichtigen Beitrag zur erforderlichen Mo-

deltransparenz leistet die Trennung in primäre und sekundäre Unsicherheiten, die eine gezielte Analyse der ermittelten Einflussgrößen sowie die Modifikation einzelner Schwankungsparameter unterstützt. Förderlich für ein Verständnis des Vorgehens ist ferner die Konfiguration einer Bewertungsaufgabe aus einzelnen Bewertungsmodulen. Einzelne Berechnungsschritte lassen sich so einfach nachvollziehen und ggf. anpassen. Kritisch muss angemerkt werden, dass die Komplexität durch diesen Modulansatz und die daraus resultierenden zahlreichen Verknüpfungen zwischen einzelnen Elementen bei großen Projekten wiederum zunimmt. Zielführend scheint es, zukünftig die Granularität der Modularisierung bei Bedarf anzupassen.

Das aufgezeigte Konzept fördert auch die *Erweiterbarkeit* der Methode. Das entwickelte Kostenmodell sowie die Gestaltung der technischen Schnittstelle (vgl. Abschnitt 7.2.2) erleichtern es, zusätzliche Module zu erstellen, durch Verknüpfungen neue Zusammenhänge herzustellen und auch bereits existierende Berechnungen einzubinden. Die technische *Integrationsfähigkeit* ist durch die Verwendung von Standardsoftware weitestgehend gewährleistet. Insgesamt lassen sich jedoch sowohl die Erweiterbarkeit als auch die Integrationsfähigkeit durch eine Weiterentwicklung der Software PLANTCALC[®] weiter erhöhen.

Der wesentliche *Nutzen* der Methode liegt darin, dass durch eine differenzierte Betrachtung vorhandener Handlungsmöglichkeiten in der Produktion und den Ausweis eines entsprechenden wirtschaftlichen Vorteils der Einsatz wandlungsfähiger Produktionssysteme gefördert und so die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen gesteigert werden kann. Das aufgezeigte Vorgehen bildet somit ein wichtiges Element im Entscheidungsprozess, der jedoch gerade bei vielschichtigen strategischen Fragen unbedingt um weitere, qualitative Bewertungsverfahren zu ergänzen ist. Dabei fokussiert das *options thinking* die bestehenden Unsicherheiten im Unternehmensumfeld und rückt damit den Aspekt der Anpassungsfähigkeit mehr als bisher ins Zentrum der Fabrikplanung. Ein Einsatz der Methode kann deshalb auch über die Bestimmung eines quantitativen Optionswertes hinaus die Entscheidungsfindung unterstützen.

Dennoch muss auch der für die Bewertung erforderliche *Aufwand* bei einer Beurteilung der Leistungsfähigkeit der entwickelten Methode einbezogen werden. Es besteht kein Zweifel, dass dieser höher ist als für eine vergleichbare Kapitalwertrechnung, so dass das Vorgehen erst für mittlere Projektvolumina angewandt werden sollte. Auch der Nutzen des Softwarewerkzeuges PLANTCALC[®] zeigt sich vor allem nach einer einmaligen individuellen Anpassung der Modulbibliothek

an die spezifischen Anforderungen eines Unternehmens. Es ist somit primär für einen Einsatz in Planungsabteilungen geeignet, die mehrmals im Jahr Fabrikplanungsprojekte bewerten.

8 Zusammenfassung und Ausblick

„*Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik*“ – mit dieser Überschrift eines Beitrages von WIENDAHL (2002) lässt sich die Herausforderung bei der Planung wettbewerbsfähiger Produktionsstätten in Deutschland treffend zusammenfassen. Zwar sind Prognosen über Absatzmengen, nachgefragte Produktvarianten, technologische Entwicklungen oder Einkaufspreise für Materialien nicht erst in den letzten zwanzig Jahren unsicher geworden. Doch durch die Intensivierung des globalen Wettbewerbs hat die Marktdynamik zugenommen und die Vorhersage von Entwicklungen gestaltet sich auch aufgrund der starken Vernetzung zunehmend schwierig. Die Anpassungsfähigkeit von Fabriken an wechselnde Rahmenbedingungen ist gerade in Deutschland, wo ein konkurrenzfähiger Produktpreis aufgrund des vergleichsweise hohen Lohnniveaus in vielen Fällen nur durch Nutzung kapitalintensiver Produktionseinrichtungen erzielt werden kann, von besonderer Bedeutung.

Allerdings darf die Wandlungsfähigkeit sich nicht von einem Paradigma in der Fabrikplanung zu einem Dogma entwickeln, das unkritisch bei der Gestaltung der Produktionseinrichtungen verfolgt wird. Über allem steht das „*Primat der Wirtschaftlichkeit*“ (WESTKÄMPER 2002a), das auch von wandlungsfähigen Systemen einzuhalten ist. Entsprechend besitzen, neben technischen Konzepten zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit, Bewertungsmethoden eine große Bedeutung, die eine Bestimmung des richtigen Maßes an Wandlungsfähigkeit erlauben und es den Unternehmen ermöglichen, von der Veränderungsfähigkeit ihres Produktionssystems in Zukunft zu profitieren, gleichzeitig aber auch Überwindungsfähigkeit zu vermeiden. Etablierte Investitionsrechenverfahren wie die Kapitalwertmethode greifen hinsichtlich dieser Anforderung zu kurz, da sie von einer statischen und einschätzbaren Zukunft und einer starren Planung ausgehen.

Die Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems kann als ein Bündel von Realloptionen angesehen und mit aus der Finanztheorie entlehnten Verfahren bewertet werden. Gleichzeitig sind jedoch Aspekte der Fabrikplanung sowie der Lebenszyklusbewertung einzubeziehen, um der Problemstellung gerecht zu werden. Ein Bewertungsansatz, der diese drei Domänen verbindet, existierte bisher nicht. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode schließt diese Lücke. Sie basiert auf der Realloptionstheorie und ermöglicht es, den für wandlungsfähige Systeme wichtigen *Informationsgewinn* im Verlauf eines Projektes abzubilden und die davon abhängigen *Entscheidungen* in die Bewertung zu integrieren.

Das aufgezeigte *Stufenmodell* zielt darauf ab, die Komplexität und Genauigkeit der Bewertung schrittweise zu erhöhen und den Bewertungsprozess selbst flexibel zu gestalten. Durch diesen Ansatz ist es möglich, die entwickelte Methode in einem breiten Spektrum von Bewertungsszenarios, in weiten Teilen unabhängig von der Branche, dem Betrachtungsumfang und dem Bewertungsobjekt, anzuwenden. Grundlage dafür ist ein skalierbares, stufenübergreifendes und bewertungsorientiertes Modell der Produktion, das speziell die *Unsicherheiten* fokussiert und ein hierarchisches, lebenszyklusorientiertes *Kostenmodell* definiert. Durch das Aufstellen von *Optionsprofilen* und die entwickelte Vorgehensweise zur *Priorisierung der Optionen* wird die Anwendung der Realoptionstheorie im Rahmen einer Fabrikplanung strukturiert.

Die eigentliche *Realoptionsbewertung* nutzt einen *lattice-Ansatz* und ermittelt den Wert einer Handlungsmöglichkeit nicht in Bezug zum Kapitalmarkt, sondern zu einer Referenzalternative (*Marktverzichtsannahme*). Schrittweise werden die wirtschaftlich bedeutendsten Anpassungsmaßnahmen modelliert und in die Bewertung integriert, bis entweder die Vorteilhaftigkeit der wandlungsfähigeren Alternative monetär aufgezeigt werden kann oder auf der Basis der verbliebenen Realoptionen nicht mehr von einer entscheidungsrelevanten Veränderung der erweiterten Kapitalwerte auszugehen ist.

Häufig wird die Verwendung der Realoptionsbewertung kritisch beurteilt. Viele der Argumente, die gegen dieses Verfahren sprechen, werden jedoch durch die entwickelte Methode entkräftet. Insbesondere zeigt sich in der Integration in das Softwarewerkzeug PLANTCALC® die Praxistauglichkeit des Ansatzes. Durch die *Relativbewertung* der verschiedenen technischen Alternativen zueinander liegt der Nutzen der entwickelten Methode weniger in einer verfeinerten Bestimmung eines korrekten *Kalkulationszinses*, sondern vielmehr in der Verankerung des *Options Thinking* im Fabrikplanungsprozess. Die stärkere Fokussierung auf bestehende Unsicherheiten und die strukturierte Suche nach wirtschaftlich sinnvollen Anpassungsmöglichkeiten leisten einen Beitrag zur Gestaltung wettbewerbsfähiger Produktionssysteme. Zudem hilft die für eine Anwendung der Methode notwendige Explizierung und Formalisierung des technischen und wirtschaftlichen Verhaltens der untersuchten Produktionskonzepte in verschiedenen Situationen, insgesamt ein größeres Systemverständnis zu erlangen.

Die Anwendung in der Praxis zeigte das Potenzial des dargestellten Ansatzes zur Bewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme. Gleichzeitig wurde zusätzlicher Handlungsbedarf deutlich. Die entwickelte Methode kann einerseits Grund-

lage zukünftiger Arbeiten sein, zum anderen treten durch sie bestehende Forschungslücken deutlicher hervor.

So bleiben die Betrachtungen in dieser Arbeit auf einfache Realloptionen beschränkt, die nicht interagieren oder aufeinander aufbauen. Die Einbindung solcher komplexerer *compound* oder *rainbow options* ist sowohl eine methodische Herausforderung als auch im Hinblick auf eine technische Integration in Softwarewerkzeuge wie PLANTCALC[®] aufwändig. Es ist anzunehmen, dass hierfür zusätzliche Optimierungsalgorithmen eingesetzt werden müssen bzw. dass Spezialsoftware erforderlich ist. Überdies fanden entsprechend des Betrachtungsfokus der vorliegenden Arbeit bisher keine Realloptionen auf der Ebene von Produktionsnetzen Berücksichtigung.

Weiterer Handlungsbedarf besteht bei der Ableitung von Kostenmodellen. In der Literatur sind zwar für unterschiedlichste Anwendungsfälle mögliche Berechnungen beschrieben. Häufig handelt es sich dabei um Vollkostenansätze, die einen umfassenden Ausweis der entstehenden Kosten zum Ziel haben. Sinnvoll erscheint jedoch ein Vorgehen, das sich gezielt an den vorhandenen Flexibilität und Anpassungsfähigkeiten ausrichtet. Es sollte ferner angestrebt werden, die für die Initialplanung durchgeführte Modellierung auch in späteren Phasen der Planung und des Betriebs zu nutzen. Das Ziel muss es sein, einen deutlich verlängerten Lebenszyklus der erstellten Bewertungsmodelle zu definieren.

Ein weiterer Ansatzpunkt für zukünftige Forschungsarbeiten liegt in der Integration der Methode in frühere Phasen der Systementwicklung. In dieser Arbeit wurde davon ausgegangen, dass die zu vergleichenden Alternativen bereits bekannt sind. Es kann jedoch sinnvoll sein, den Aspekt der Unsicherheit des Umfeldes und der technisch-organisatorischen Anpassungsfähigkeit bereits vorher stärker zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit ist hier die Integration der entwickelten Ansätze in die Werkzeuge der Digitalen Fabrik (vgl. RUDOLF 2007, S. 30 ff.).

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode leistet einen Beitrag, zukünftig einen verbesserten Nachweis der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme zu erbringen. Die Investition in anpassungsfähige Anlagen und Fabriken verringert nicht nur das Risiko für Unternehmen, sondern ermöglicht es ihnen auch, auf der Basis von Innovationen, Schnelligkeit und hoher Qualität ihre Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen.



9 Literaturverzeichnis

Auflösung von DOIs (Digital Object Identifier): <<http://nbn-resolving.de/>>

ABELE ET AL. 2006a

Abele, E.; Dervisopoulos, M.; Kreis, M.: Beeinflussbarkeit von Lebenszykluskosten durch Wissensaustausch. *wt Werkstattstechnik - online* 96 (2006) 7/8, S. 447-454.

ABELE ET AL. 2006b

Abele, E.; Liebeck, T.; Wörn, A.: Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems. *Annals of the CIRP* 55 (2006) 1, S. 433-436.

ABELE ET AL. 2007

Abele, E.; Liebeck, T.; Wörn, A.: Flexibilität im Investitionsentscheidungsprozess. *wt Werkstattstechnik - online* 97 (2007) 1/2, S. 85-89.

ADNER & LEVINTHAL 2004

Adner, R.; Levinthal, D. A.: What is not a Real Option: Considering boundaries for the application of Real Options to business strategy. *Academy of Management Review* 1 (2004) 29, S. 74-85.

AGGTELEKY 1981

Aggteleky, B.: *Fabrikplanung: Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung*, Bd. 1. Grundlagen, Zielplanung, Vorarbeiten. München: Hanser 1981.
ISBN: 3-446-12565-5.

AGGTELEKY 1990

Aggteleky, B.: *Fabrikplanung: Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung*, Bd. 2. Betriebsanalyse und Feasibility-Studie. 2. Aufl. München: Hanser 1990.
ISBN: 3-446-15800-6.

AIR 1939

AIR 1939: Aircraft engine life cycle costs. Warrendale: Society of Automotive Engineers 1986. (Aerospace information report).

ALDERS 2006

Alders, K.: Gestaltung optimaler Variantenvielfalt – ein ganzheitlicher Ansatz des Variantenmanagements. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): *Produktionsmanagement – Herausforderung Variantenmanagement*. München: Utz 2006, S. 4.1- 4.15. ISBN: 978-3-89675-082-2. (*iwb* Seminarberichte 82).

ALEXOPOULOS ET AL. 2005

Alexopoulos, K.; Bürkner, S.; Milionis, I.; Chryssolouris, G.: DESYMA – An integrated method to aid the design and the evaluation of reconfigurable manufacturing systems. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): *1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005)*. München, 22.-23. September 2005. München: Utz 2005, S. 467-475. ISBN: 3-8316-0540-8.

ALKAS 2002

Alkas, H.: Die Neue Investitionstheorie der Realloptionen und ihre Auswirkungen auf die Regulierung im Telekommunikationssektor. *wik Diskussionsbeiträge* Nr. 234, *wik Wissenschaftliches Institut für Kommunikationsdienste*, Bad Honnef (2002).

ALVAREZ 1999

Alvarez, L. H. R.: Optimal exit and valuation under demand uncertainty: A real options approach. *European Journal of Operational Research* 114 (1999) 2, S. 320-329. <DOI:10.1016/S0377-2217(98)00259-8>.

AMICO ET AL. 2003a

Amico, M.; Asl, F.; Pasek, Z.; Perrone, G.: Real Options: an Application to RMS Investment Evaluation. CIRP 2nd International Conference on Reconfigurable Manufacturing. Ann Arbor (MI) / USA, 20.-21. August 2003. (CD-ROM)

AMICO ET AL. 2003b

Amico, M.; Pasek, Z. J.; Asl, F. M.; Perrone, G.: A new methodology to evaluate the real options of an investment using binomial trees and monte carlo simulation. 2003 Winter Simulation Conference. Monterey (CA) / USA, 7.-10. Dezember 2003. <www.informs-sim.org/wsc03papers/043.pdf> - 04.05.2006.

AMRAM & KULATILAKA 1999

Amram, M.; Kulatilaka, N.: Disciplined Decisions: aligning strategy with the financial markets. *Harvard Business Review* 77 (1999) 1/2, S. 95-104.

ANDRESEN & GRONAU 2004

Andresen, K.; Gronau, N.: Der Faktor Wandlungsfähigkeit bei der Planung neuer Fabriken. *Industrie Management* 20 (2004) 4, S. 60-61.

BAECKER & HOMMEL 2004

Baecker, P.; Hommel, U.: 25 Years Real Options Approach to Investment Valuation: Review and Assessment. In: Dangl, T. et al. (Hrsg.): *Real Options*. Wiesbaden: Gabler 2004, S. 1-54. ISBN: 3-409-03443-9. (Zeitschrift für Betriebswirtschaft (Jg. 74) Erg.-Heft 3).

BAECKER ET AL. 2003

Baecker, P. N.; Hommel, U.; Lehmann, H.: Marktorientierte Investitionsrechnung bei Unsicherheit, Flexibilität und Irreversibilität – Eine Systematik der Bewertungsverfahren. In: Hommel, U. et al. (Hrsg.): *Reale Optionen*. Berlin: Springer 2003, S. 15-36. ISBN: 3-540-01981-2.

BARRINGER & WEBER 1996

Barringer, P. H.; Weber, D. P.: Life Cycle Cost Tutorial. Fifth International Conference on Process Plant Reliability. Houston (TX) / USA, 2.-4. Oktober 1996. <<http://www.barringer1.com/pdf/lcctutorial.pdf>> - 25.05.2006.

BARRINGER 2003

Barringer, P. H.: A Life Cycle Cost Summary. International Conference of Maintenance Societies (ICOMS). Perth / Australien, 20.-23. Mai 2003. <<http://www.barringer1.com/pdf/LifeCycleCostSummary.pdf>> - 05.05.2006.

BAUMEISTER 2003

Baumeister, M.: *Fabrikplanung im turbulenten Umfeld*. Diss. Universität Karlsruhe (TH) (2003). (Forschungsberichte wbk 115).

BAUMGARTEN ET AL. 2003

Baumgarten, H.; Sommer-Dittrich, T.; Friese, M.: Einsatz von Realoptionen zur effizienten Simulation wandlungsfähiger industrieller Strukturen.
In: Schulze, T. et al. (Hrsg.): SimVis 2003, Simulation und Visualisierung. Magdeburg, 6.-7. März 2003. Erlangen: SCS-European Publishing House 2003, S. 21-34.
ISBN: 3-936150-23-0.

BCG 2004

Strüven, P.; Spettmann, R. A. (Hrsg.): Produktionsstandort Deutschland – quo vadis? Studie The Boston Consulting Group, München (2004).

BEACH ET AL. 2000

Beach, R.; Muhlemann, A. P.; Price, D. H. R.; Paterson, A.; Sharp, J. A.: A review of manufacturing flexibility. *European Journal of Operational Research* 122 (2000) 1, S. 41-57.
<DOI:10.1016/S0377-2217(99)00062-4>.

BENAROCH 2002

Benaroch, M.: Managing Information Technology Investment Risk. *Journal of Management Information Systems* 19 (2002) 2, S. 43-84.

BENGTSSON 2001

Bengtsson, J.: Manufacturing flexibility and real options: A review. *International Journal of Production Economics* 74 (2001) 1-3, S. 213-224.
<DOI:10.1016/S0925-5273(01)00128-1>.

BENGTSSON & OLHAGER 2002

Bengtsson, J.; Olhager, J.: Valuation of product-mix flexibility using Real Options. *International Journal of Production Economics* 78 (2002) 1, S. 13-28.
<DOI:10.1016/S0925-5273(01)00143-8>.

BERGHOLZ 2005

Bergholz, M. A.: Objektorientierte Fabrikplanung. Diss. RWTH Aachen (2005).
<URN:nbn:de:hbz:82-opus-13242>.

BEUERMANN 1996

Beuermann, G.: Produktionsfaktoren. In: Kern, W. et al. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft (HWProd). 2. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1996, S. 1494-1506. ISBN: 3-7910-8044-X. (Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre 7).

BLACK & SCHOLES 1973

Black, F.; Scholes, M.: The Pricing of Options and Corporate Liabilities. *Journal of Political Economy* 81 (1973) 3, S. 637-654.

BLANCHARD & FABRYCKY 2006

Blanchard, B. S.; Fabrycky, W. J.: *Systems Engineering and Analysis*. 4. Aufl. Upper Saddle River: Prentice Hall 2006. ISBN: 0-13-186977-9. (Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering).

BLECKER & GRAF 2004

Blecker, T.; Graf, G.: Changeability in operations: a critical strategic resource for european manufacturing? An Enterprise Odyssey: Building Competitive Advantage, 2nd International Odyssey Conference. Zagreb / Kroatien, 17.-19. Juni 2004, S. 904-917.

<http://www.manufacturing.de/download/zagreb_change.pdf> - 03.08.2005.

BOL 1998

Bol, G.: Deskriptive Statistik.

4. Aufl. München: Oldenbourg 1998. ISBN: 3-486-24784-0.

BOLLEN 1999

Bollen, N. P. B.: Real Options and Product Life Cycles.

Management Science 45 (1999) 5, S. 670-684.

BORISON 2003

Borison, A.: Real Options Analysis: Where are the Emperor's Clothes? Real Options – Theory Meets Practice, Seventh Annual Real Options Conference. Washington, DC / USA, 10.-12. Juli 2003.

<<http://www.realoptions.org/papers2003/borison.doc>> - 20.02.2004.

BRÄUTIGAM ET AL. 2003

Bräutigam, J.; Esche, C.; Mehler-Bicher, A.: Uncertainty as a key value driver of real options. Real Options – Theory Meets Practice, Seventh Annual Real Options Conference. Washington, DC / USA, 10.-12. Juli 2003.

<<http://www.realoptions.org/papers2003/BraeutigamUncertainty.pdf>> - 26.03.2006.

BREALEY & MYERS 2000

Brealey, R. A.; Myers, S. C.: Principles of corporate finance. 6. Aufl. Boston:

McGraw-Hill 2000. ISBN: 0-07-290999-4. (Irwin/McGraw-Hill series in finance).

BREIT 1999

Breit, S.: Methodik zur umsetzungsorientierten Gestaltung von Umstrukturierungsprojekten in der Produktion. Diss. RWTH Aachen (1999). Aachen: Shaker 1999.

ISBN: 3-8265-6279-8. (Berichte aus der Produktionstechnik 16/99).

BRENNAN & SCHWARTZ 1985

Brennan, M. J.; Schwartz, E. S.: Evaluating Natural Resource Investments.

Journal of Business 58 (1985) 3, S. 135-157.

BROCKHAUS 1991

Brockhaus-Enzyklopädie: Modell.

19. Aufl. Mannheim: F. A. Brockhaus 1991. ISBN: 3-7653-1114-6.

BÜRKNER ET AL. 2005

Bürkner, S.; Roscher, J.; Schmitt, M.; Friese, M.: Methods for flexibility evaluation in the automotive industry. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). München, 22.-23. September 2005. München: Utz 2005, S. 446-451. ISBN: 3-8316-0540-8.

BURMANN 2002

Burmann, C.: Strategische Flexibilität und Strategiewechsel als Determinanten des Unternehmenswertes. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2002. ISBN: 3-8244-9082-X. (Neue betriebswirtschaftliche Forschung 292).

CARLSSON 1989

Carlsson, B.: Flexibility and the Theory of the Firm. *International Journal of Industrial Organization* 7 (1989) 2, S. 179-203. <DOI:10.1016/0167-7187(89)90018-0>.

CHAKRAVARTHY 1997

Chakravarty, B.: A New Strategy Framework for Coping with Turbulence. *Sloan Management Review* 38 (1997) 2, S. 69-82.

CISEK ET AL. 2002

Cisek, R.; Habicht, C.; Neise, P.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. *ZWF* 97 (2002) 9, S. 441-445.

CISEK 2005

Cisek, R.: Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen. Diss. Technische Universität München (2005). München: Utz 2005. ISBN: 3-8316-0475-4. (Forschungsberichte *iwb* 191).

COPELAND & WESTON 1992

Copeland, T. E.; Weston, J. F.: *Financial theory and corporate policy*. 3. Aufl. Reading: Addison-Wesley 1992.

COPELAND & KEENAN 1998

Copeland, T. E.; Keenan, P. T.: How much is flexibility worth? *The McKinsey Quarterly* (1998) 2, S. 38-49.

COPELAND ET AL. 2000

Copeland, T. E.; Koller, T.; Murrin, J.: *Valuation – Measuring and Managing the Value of Companies*. 3. Aufl. New York: Wiley 2000. ISBN: 0-471-36190-9.

COPELAND & ANTIKAROV 2001

Copeland, T. E.; Antikarov, V.: *Real Options*. New York: Texere 2001. ISBN: 1-58799-028-8.

CORSTEN 1994

Corsten, H.: Gestaltungsbereiche des Produktionsmanagement. In: Corsten, H. (Hrsg.): *Handbuch Produktionsmanagement*. Wiesbaden: Gabler 1994, S. 5-22. ISBN: 3-409-19959-4.

COURTNEY 2001

Courtney, H.: *20/20 foresight: crafting strategy in an uncertain world*. Boston: Harvard Business School Press 2001. ISBN: 1-57851-266-2.

DANGL & KOPEL 2003

Dangl, T.; Kopel, M. O.: Die Bedeutung vollständiger Märkte für die Anwendung des Realoptionsansatzes. In: Hommel, U. et al. (Hrsg.): *Reale Optionen*. Berlin: Springer 2003, S. 37-62. ISBN: 3-540-01981-2.

DAS & ELANGO 1995

Das, T. K.; Elango, B.: Managing Strategic Flexibility: Key to Effective Performance. Journal of General Management 20 (1995) 3, S. 60-75.

DASHCHENKO 2006

Dashchenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-29391-0.

DE NEUFVILLE 2001

de Neufville, R.: Real Options: Dealing with uncertainty in systems planning and design. 5. International Conference on Technology, policy and innovation. Delft / Niederlande, 29. Juni 2001.
<<http://msl1.mit.edu/mib/dsp/curricula.mit.edu/~dsplan/Docs/Papers/delftjune01.pdf>>
- 09.07.2006.

DE NEUFVILLE 2002

de Neufville, R.: Architecting / Designing Engineering Systems Using Real Options. Working Paper ESD-WP-2003-01.09, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge (MA) / USA (2002).
<<http://esd.mit.edu/WPS/ESD Internal Symposium Docs/ESD-WP-2003-01.09-ESD Internal Symposium.pdf>> - 03.02.2005.

DENKENA ET AL. 2007

Denkena, B.; Harms, A.; Jacobsen, J.; Möhring, H.-C.; Jungk, A.; Noske, H.: Lebenszyklus-orientierte Werkzeugmaschinenentwicklung. wt Werkstattstechnik - online 97 (2007) 7/8, S. 441-446.

DERVISOPOULOS ET AL. 2006

Dervisopoulos, M.; Schatka, A.; Torney, M.; Wawerla, M.: Life Cycle Costing im Maschinen- und Anlagenbau. Industrie Management 22 (2006) 6, S. 55-58.

DE TONI & TONCHIA 1998

De Toni, A.; Tonchia, S.: Manufacturing flexibility: a literature review. International Journal of Production Research 36 (1998) 6, S. 1587-1617.
<DOI:10.1080/002075498193183>.

DIN 53804

DIN 53804, Teil 2: Statistische Auswertungen – Zählbare (diskrete) Merkmale. Berlin: Beuth 1985.

DIN EN 60300-3-3

DIN EN 60300-3-3: Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden Lebenszykluskosten. Berlin: Beuth 2005.

DIXIT & PINDYCK 1994

Dixit, A. K.; Pindyck, R. S.: Investment under uncertainty. Princeton: Princeton University Press 1994. ISBN: 0-691-03410-9.

DOHMS 2001

Dohms, R.: Methodik zur Bewertung und Gestaltung wandlungsfähiger, dezentraler Produktionssysteme. Diss. RWTH Aachen (2001). Aachen: Shaker 2001. ISBN: 3-8265-8597-6. (Berichte aus der Produktionstechnik 11/2001).

DOMSCHKE & SCHOLL 2003

Domschke, W.; Scholl, A.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht.
2. Aufl. Berlin: Springer 2003. ISBN: 3-540-43993-5. (Springer Lehrbuch).

DOVE 2001

Dove, R.: Agile Production: Design Principles for Highly Adaptable Systems.
In: Zandin, K. B. (Hrsg.): Maynard's Industrial Engineering Handbook. 5. Aufl. New York: McGraw-Hill 2001, S. 9.3-9.26. ISBN: 0-07-041102-6. (McGraw-Hill Standard Handbooks).

DRABOW 2006

Drabow, G.: Modulare Gestaltung und ganzheitliche Bewertung wandlungsfähiger Fertigungssysteme. Diss. Universität Hannover (2006). Garbsen: PZH 2006.
ISBN: 3-9399026-13-1. (Berichte aus dem IFW 5/2006).

DREHER 2005

Dreher, C. (Hrsg.): Manufacturing Visions Policy Summary and Recommendations. ManVis Report No. 6, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe (2005).
<URN:nbn:de:0011-n-455450>.

D'SOUZA & WILLIAMS 2000

D'Souza, D. E.; Williams, F. P.: Toward a taxonomy of manufacturing flexibility dimensions. *Journal of Operations Management* 18 (2000) 5, S. 577-593.
<DOI:10.1016/S0272-6963(00)00036-X>.

DU ET AL. 2006

Du, J.; Jiao, Y.-Y.; Jiao, J.: A real-option approach to flexibility planning in reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 28 (2006) 11-12, S. 1202-1210.
<DOI:10.1007/s00170-0904-2418-7>.

DÜRRSCHMIDT 2001

Dürschmidt, S.: Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme. Diss. Technische Universität München (2001). München: Utz 2001.
ISBN: 3-8316-0023-6. (Forschungsberichte *iwb* 152).

EGGERT 2003

Eggert, W.: Nachfragemodellierung und -prognose zur Unterstützung der langfristigen Absatzplanung am Beispiel der deutschen Automobilindustrie. Diss. Universität Karlsruhe (TH) (2003).
<<http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/vvv/2003/wiwi/11/11.pdf>> - 29.11.2006.

EHRLENSPIEL ET AL. 2003

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung.
4. Aufl. Berlin: Springer 2003. ISBN: 3-540-44214-6. (VDI-Buch).

ELMARAGHY 2006

ElMaraghy, H. A.: Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 17 (2006) 4, S. 261-276. <DOI:10.1007/s10696-006-9028-7>.

EMBLEMSVÅG 2003

Emblemsvåg, J.: Life-cycle costing: using activity-based costing and Monte Carlo methods to manage future costs and risk. Hoboken: Wiley 2003. ISBN: 0-471-35885-1.

EVERSHEIM 1989

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik Bd. 4 – Fertigung und Montage. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989. ISBN: 3-18-400841-X. (Studium und Praxis).

EVERSHEIM 1996

Eversheim, W.: Produktionstechnik und -verfahren. In: Kern, W. et al. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft (HWProd). 2. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1996, S. 1534-1544. ISBN: 3-7910-8044-X. (Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre 7).

EVERSHEIM & SCHUH 1996

Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996. ISBN: 3-540-59360-8 (Betriebshütte Teil 2).

EVERSHEIM ET AL. 1996

Eversheim, W.; Spur, G.; Pollack, A.; Merz, P.: Produktionstechnologie – Einführung. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 11.1-11.15. ISBN: 3-540-59360-8. (Betriebshütte Teil 2).

EWERT & WAGENHOFER 2000

Ewert, R.; Wagenhofer, A.: Interne Unternehmensrechnung. 3. Aufl. Berlin: Springer 2000. ISBN: 3-540-66702-4. (Springer-Lehrbuch).

FABRYCKY & BLANCHARD 1991

Fabrycky, W. J.; Blanchard, B. S.: Life-cycle cost and economic analysis. Englewood Cliffs: Prentice Hall 1991. ISBN: 0-13-538323-4. (Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering).

FELIX 1998

Felix, H.: Unternehmens- und Fabrikplanung. München: Hanser 1998. ISBN: 3-446-19252-2. (REFA-Fachbuch Betriebsorganisation).

FLEISCHER & WAWERLA 2006

Fleischer, J.; Wawerla, M.: Berechnung von Lebenszykluskostenverteilungen. *wt Werkstattstechnik - online* 96 (2006) 10, S. 772-777.

FLEISCHER ET AL. 2006a

Fleischer, J.; Weismann, U.; Niggeschmidt, S.: Calculation and optimisation model for costs and effects of availability relevant service elements. In: Dufflou, J. R. et al. (Hrsg.): LCE 2006 - Towards a closed loop economy, 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Bd 2. Leuven / NL, 31.05.-02.06.2006. Leuven / Belgien: Katholieke Universiteit Leuven 2006a, S. 675-680.

FLEISCHER ET AL. 2006b

Fleischer, J.; Weismann, U.; Schmalzried, S.; Schopp, M.: Maschinenüberwachung unter Life-Cycle-Aspekten. wt Werkstattstechnik - online 96 (2006) 7/8, S. 435-440.

FLEISCHER ET AL. 2007

Fleischer, J.; Rühl, J.; Niggeschmidt, S.; Ladenburger, R.: Leistungskalkulation hybrider Produkte. wt Werkstattstechnik - online 97 (2007) 7/8, S. 526-532.

FÖRSTER 1999

Förster, T.: Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsbereichen für die variantenreiche Serienfertigung. Diss. Universität Magdeburg (1999).

FRANKE & HAX 1999

Franke, G.; Hax, H.: Finanzwirtschaft des Unternehmens und Kapitalmarkt. 4. Aufl. Berlin: Springer 1999. ISBN: 3-540-65443-7.

FRIEDL 2002

Friedl, G.: Sequential Investment and Time to Build. Schmalenbach Business Review 54 (2002) 1, S. 58-79.

FRIESE ET AL. 2004

Friese, M.; Bürkner, S.; Roscher, J.: Gestaltungskonzepte für Fabrikparks aus OEM-Sicht. In: Witte, K.-W. et al. (Hrsg.): Neue Konzepte für wandlungsfähige Fabriken und Fabrikparks. Aachen: Shaker 2004, S. 85-118. ISBN: 3-8322-3423-3.

FRIESE ET AL. 2005

Friese, M.; Bihlmaier, R.; Bürkner, S.: Planning of Flexible Production Networks in the Automotive Industry. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). München, 22.-23. September 2005. München: Utz 2005, S. 343-346. ISBN: 3-8316-0540-8.

GAGSCH 2002

Gagsch, B.: Wandlungsfähigkeit von Unternehmen: Konzept für ein kontextgerechtes Management des Wandels. Diss. Universität Stuttgart (2002). Frankfurt: Lang 2002. ISBN: 3-631-39569-8. (Schriften zur Unternehmensführung 64).

GAMBA 2003

Gamba, A.: Real Options: a Monte Carlo approach. Working Paper WP 2002/3, University of Calgary, Faculty of Management (2003).
<<http://ssrn.com/abstract=302613>> - 30.12.2006.

GAUSEMEIER ET AL. 1996

Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: Szenario-Management: Planen und Führen mit Szenarien. 2. Aufl. München: Hanser 1996. ISBN: 3-446-18721-9.

GESKE & JOHNSON 1984

Geske, R.; Johnson, H. E.: The American Put Option Valued Analytically. The Journal of Finance 39 (1984) 5, S. 1511-1424.

GHANDFOROUSH ET AL. 1985

Ghandforoush, P.; Huang, P. Y.; Taylor, B. W.: A multi-criteria decision model for the selection of a computerized manufacturing control system. International Journal of Production Research 23 (1985) 1, S. 117-128.

GOLDMAN ET AL. 1996

Goldman, S. L.; Nagel, R. N.; Preiss, K.; Warnecke, H.-J.: Agil im Wettbewerb. Berlin: Springer 1996. ISBN: 3-540-60644-0.

GRUNDIG 2006

Grundig, C.-G.: Fabrikplanung: Planungssystematik – Methoden – Anwendungen. 2. Aufl. München: Hanser 2006. ISBN: 3-446-40642-5.

HARTMANN 1995

Hartmann, M.: Merkmale zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen für die mehrstufige Serienfertigung bei turbulenten Aufgaben. Diss. Universität Magdeburg (1995).

HARTUNG ET AL. 1995

Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.-H.: Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 10. Aufl. München: Oldenbourg 1995. ISBN: 3-486-23387-4.

HEGER 2007

Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Diss. Universität Hannover (2006). Garbsen: PZH 2007. ISBN: 978-3-939026-43-3. (Berichte aus dem IFA 01/2007).

HEINECKER 2006

Heinecker, M.: Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme. Diss. Technische Universität München (2006). München: 2006. ISBN: 3-8316-0620-X.

<http://www.fml.mw.tum.de/PDF/Diss_Markus_Heinecker_Web.pdf> - 13.05.2007.

HEISEL & MARTIN 2004

Heisel, U.; Martin, M.: Rekonfigurierbare Bearbeitungssysteme. wt Werkstattstechnik - online 94 (2004) 10, S. 517-520.

HERNÁNDEZ 2003

Hernández, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Diss. Universität Hannover (2002). Düsseldorf: VDI-Verlag 2003. ISBN: 3-18-314916-8. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16 Nr. 149).

HILDEBRAND ET AL. 2004

Hildebrand, T.; Günther, U.; Mäding, K.; Müller, E.: Die Fabrik als Produkt: neue Leitbilder für die Fabrikplanung. *wt Werkstatttechnik - online* 94 (2004) 7/8, S. 355-362.

HILDEBRAND 2005

Hildebrand, T.: Theoretische Grundlagen der bausteinbasierten, technischen Gestaltung von wandlungsfähigen Fabrikstrukturen nach dem PLUG+PRODUCE Prinzip. Diss. Technische Universität Chemnitz (2005). (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme 45).

HILL & CHAMBERS 1991

Hill, T.; Chambers, S.: Flexibility – A Manufacturing Conundrum. *International Journal of Operations and Production Management* 11 (1991) 2, S. 5-13. <DOI:10.1108/EUM0000000001266>.

HO ET AL. 1997

Ho, T. S.; Stapleton, R. C.; Subrahmanyam, M. G.: The Valuation of American Options with Stochastic Interest Rates: A Generalization of the Geske-Johnson Technique. *The Journal of Finance* 52 (1997) 2, S. 827-840.

HOMMEL & PRITSCH 1999a

Hommel, U.; Pritsch, G.: Marktorientierte Investitionsbewertung mit dem Realoptionsansatz: Ein Implementierungsleitfaden für die Praxis. *Finanzmarkt und Portfolio Management* 13 (1999) 2, S. 121-144.

HOMMEL & PRITSCH 1999b

Hommel, U.; Pritsch, G.: Investitionsbewertung und Unternehmensführung mit dem Realoptionsansatz. In: Achleitner, A.-K. et al. (Hrsg.): *Handbuch Corporate Finance*. Köln: Deutscher Wirtschaftsdienst 1999, S. 1-65 (Ergänzungslieferung Sept. 99).

HULL 2006

Hull, J. C.: *Optionen, Futures und andere Derivate*. 6. Aufl. München: Pearson Studium 2006. ISBN: 3-8273-7142-2.

HUNGENBERG 2002

Hungenberg, H.: *Problemlösung und Kommunikation*. 2. Aufl. München: Oldenbourg 2002. ISBN: 3-486-25988-1.

HUNGENBERG ET AL. 2005

Hungenberg, H.; Wulf, T.; Stellmaszek, F.: Einsatzfelder und Operationalisierung der Realoptionstheorie. Working Paper 05-01, Institut für Unternehmensplanung (IUP), Gießen (2005). <[http://www.iup-online.de/download/IUP AP 05-01 Einsatz von Realoptionen.pdf](http://www.iup-online.de/download/IUP_AP_05-01_Einsatz_von_Realoptionen.pdf)> - 23.04.2006.

HYUN & AHN 1992

Hyun, J. H.; Ahn, B. H.: A unifying framework for manufacturing flexibility. *Manufacturing Review* 5 (1992) 4, S. 251-259.

IKR 1987

Bohl, W. T. (verantw. Red.): Neue Kontenrahmen nach dem Bilanzrichtlinien-Gesetz: Industriekontenrahmen IKR; DATEV-Kontenrahmen SKR 04. Freiburg: Haufe 1987. ISBN: 3-448-01682-9.

JORDAN & GRAVES 1995

Jordan, W. C.; Graves, S. C.: Principles on the Benefits of Manufacturing Process Flexibility. *Management Science* 41 (1995) 4, S. 577-594.

KALLIGEROS 2004

Kalligeros, K.: Using real options for engineering systems design: framework, applicability and limitations. *Engineering Systems Symposium*. Cambridge (MA) / USA, 29.-31. März 2004.

<<http://esd.mit.edu/symposium/pdfs/papers/kalligeros.pdf>> - 06.02.2005.

KALLIGEROS 2006

Kalligeros, K.: Platforms and real options in large-scale engineering systems. Diss. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston (2006).

<<http://hdl.handle.net/1721.1/34620>>.

KALMBACH ET AL. 2003

Kalmbach, P.; Franke, R.; Knottenbauer, K.; Krämer, H.; Schaefer, H.: Die Bedeutung einer wettbewerbsfähigen Industrie für die Entwicklung des Dienstleistungssektors. Institut für Konjunktur- und Strukturforschung (IKSF), Universität Bremen (2003).

<<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/C-D/die-bedeutung-einer-wettbewerbsfaehigen-industrie-fuer-die-entwicklung-des-dienstleistungssektors.property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>> - 28.05.2007.

KAMRAD & ORD 2004

Kamrad, B.; Ord, K.: Market and Process Uncertainty in Operations. *Real Options – Theory Meets Practice*, 8th Annual International Conference. Montréal / Kanada, 17.-19. Juni 2004.

<http://www.realoptions.org/papers2004/KamradMARKET_PROCESS.pdf> - 04.03.2006.

KETTNER ET AL. 1984

Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München: Hanser 1984. ISBN: 3-446-13825-0.

KILKA 1995

Kilka, M.: Realoptionen. Frankfurt: Knapp 1995.

ISBN: 3-7819-0570-5. (Schriftenreihe der SGZ-Bank 10).

KINKEL 2005

Kinkel, S.: Anforderungen an die Fertigungstechnik von morgen. *Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung (PI-Mitteilung) Nr. 37*, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe (2005).

<URN:nbn:de:0011-n-336337>.

KIRCHNER ET AL. 2003

Kirchner, S.; Winkler, R.; Westkämper, E.: Unternehmensstudie zur Wandlungsfähigkeit von Unternehmen. *wt Werkstatttechnik - online* 4 (2003), S. 245-260.

KLEINER 2007

Kleiner, M. (Hrsg.): Untersuchung zur Aktualisierung der Forschungsfelder für das Rahmenkonzept "Forschung für die Produktion von morgen". Abschlussbericht zum BMBF-Projekt, Universität Dortmund (2007).
<http://www.produnktionsforschung.de/fzk/groups/pft/documents/internetdokument/id_057787.pdf> - 20.05.2007.

KLIMKE 2002

Klimke, W.: Fabrikbauprojekte: Erfahrungen und Erkenntnisse aus einem Rückblick. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): *Fabrikplanung 2002*. Garching, 20. Juni 2002. München: Utz 2002, S. 2.1-2.15. ISBN: 3-89675-063-1 (*iwb* Seminarberichte 63).

KOGUT & KULATILAKA 1994

Kogut, B.; Kulatilaka, N.: Operating Flexibility, Global Manufacturing and the Option Value of a Multinational Network. *Management Science* 40 (1994) 1, S. 123-139.

KOLAKOWSKI ET AL. 2005

Kolakowski, M.; Reh, D.; Sallaba, G.: Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung (EWR), Ganzheitliche Bewertung von Varianten und Ergebnissen in der Fabrikplanung. *wt Werkstatttechnik - online* 4 (2005) 95, S. 210-215.

KOREN ET AL. 1999

Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G.; Van Bruseel, H.: Reconfigurable Manufacturing Systems. *Annals of the CIRP* 48 (1999) 2, S. 527-540.

KROLLE & OßWALD 2003

Krolle, S.; Oßwald, U.: Real Option Valuation™: Synthese von Strategie und Wert. In: Hommel, U. et al. (Hrsg.): *Reale Optionen*. Berlin: Springer 2003, S. 175-198. ISBN: 3-540-01981-2.

KRÜGER 2004

Krüger, A.: Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme. Diss. Technische Universität München (2004). München: Utz 2004. ISBN: 3-8316-0371-5. (Forschungsberichte *iwb* 186).

KULATILAKA & TRIGEORGIS 1994

Kulatilaka, N.; Trigeorgis, L.: The General Flexibility to Switch: Real Options Revisited. *The International Journal of Finance* 6 (1994) 2, S. 778-798.

KULATILAKA & PEROTTI 1998

Kulatilaka, N.; Perotti, E. C.: Strategic Growth Options. *Management Science* 44 (1998) 8, S. 1021-1031.

LANDNER & PINCHES 1998

Landner, D. M.; Pinches, G. E.: Challenges to the Practical Implementation of Modeling and Valuing Real Options. *The Quarterly Review of Economics and Finance* 38 (1998) Special Issue, S. 537-567.
<DOI:10.1016/S1062-9769(99)80089-1>.

LEITHNER & LIEBLER 2003

Leithner, S.; Liebler, H.: Die Bedeutung von Realoptionen im M&A-Geschäft. In: Hommel, U. et al. (Hrsg.): *Reale Optionen*. Berlin: Springer 2003, S. 219-241. ISBN: 3-540-01981-2.

LESLIE & MICHAELS 1997

Leslie, K. J.; Michaels, M. P.: The real power of real options. *The McKinsey Quarterly* (1997) 3, S. 4-22.

LONGSTAFF & SCHWARTZ 2001

Longstaff, F. A.; Schwartz, E. S.: Valuing Real Options by Simulation: A Simple Least-Squares Approach. *The Review of Financial Studies* 14 (2001) 1, S. 113-147.

LUEHRMAN 1998a

Luehrman, T. A.: Investment Opportunities as Real Options: Getting Started on the Numbers. *Harvard Business Review* 76 (1998) 4, S. 51-67.

LUEHRMAN 1998b

Luehrman, T. A.: Strategy as a Portfolio of Real Options. *Harvard Business Review* 76 (1998) 5, S. 89-99.

LUENBERGER 1998

Luenberger, D. G.: *Investment Science*. New York: Oxford University Press 1998. ISBN: 0-19-510809-4.

MANUFUTURE 2006

Manufuture: Strategic Research Agenda. Report of the High-Level Group, Brüssel (2006).

MARGRABE 1978

Margrabe, W.: The value of an option to exchange one asset for another. *The Journal of Finance* 33 (1978) 1, S. 177-186.

MAUER & OTT 1995

Mauer, D. C.; Ott, S.: Investment under Uncertainty: The Case of Replacement Investment Decisions. *Journal of Financial and Quantitative Analysis* 30 (1995) 4, S. 581-605.

MAYER 2001

Mayer, A.: *Strategische Flexibilität*. Diss. Universität Gießen (2001). Gießen: Ferber 2001. ISBN: 3-932917-24-3. (Schriftenreihe des Instituts für Unternehmensplanung 35).

MCGRATH 1997

McGrath, R. G.: A real options logic for initiating technology positioning investments. *Academy of Management Review* 22 (1997) 4, S. 974-996.

MCGRATH ET AL. 2004

McGrath, R. G.; Ferrier, W. J.; Mendelow, A. L.: Real Options as engines of choice and heterogeneity. *Academy of Management Review* 29 (2004) 1, S. 86-101.

MEHRABI ET AL. 2002

Mehrabi, M. G.; Ulsoy, G.; Koren, Y.; Heytler, P.: Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing* 13 (2002) 2, S. 135-146. <DOI:10.1023/A:1014536330551>.

MEIER & HANENKAMP 2003

Meier, H.; Hanenkamp, N.: Monitoringsysteme zur adaptiven Fabrikplanung. *wt Werkstattstechnik - online* 93 (2003) 4, S. 271-274.

MEIßNER 1956

Meißner, F.: *Fabrikplanung*.
Wien: Hippolyt 1956. (Schriftenreihe Fabrikwirtschaft 3).

MILBERG 2000

Milberg, J.: Unternehmenspolitik im Wandel. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): ... nur der Wandel bleibt. Wege jenseits der Flexibilität. *Münchener Kolloquium 2000*. München: Utz 2000, S. 311-331. ISBN: 3-89675-923-X.

MILLER & WALLER 2003

Miller, K. D.; Waller, H. G.: Scenarios, Real Options and Integrated Risk Management. *Long Range Planning* 36 (2003) 1, S. 93-107.
<DOI:10.1016/S0024-6301(02)00205-4>.

MILLER & PARK 2002

Miller, L. T.; Park, C. S.: Decision Making Under Uncertainty – Real Options to the Rescue? *The Engineering Economist* 47 (2002) 2, S. 105-150.

MISHRA 2004

Mishra, S.: Sensitivity Analysis with Correlated Inputs – An Environmental Risk Assessment Example. 2004 Crystal Ball User Conference. Denver (CO) / USA, 17.-18. Juni 2004.
<<http://www.decisioneering.com/cbuc/2004/papers/CBUC04-Mishra.pdf>> - 30.03.2007.

MONDEN 1998

Monden, Y.: *Toyota production system*.
3. Aufl. Norcross: Engineering & Management Press 1998. ISBN: 0-89806-180-6.

MÜLLER 2003

Müller, J.: Bewertung von Markteintrittsoptionen unter Berücksichtigung des Wettbewerbs. In: Hommel, U. et al. (Hrsg.): *Reale Optionen*. Berlin: Springer 2003, S. 257-282. ISBN: 3-540-01981-2.

MÜLLER 2007

Müller, S.: Elementiert und mit System – Innovative Konzepte für spezielle Lösungen. *Fabrikplanung* schnell, sicher, effizient, 7. Deutsche Fachkonferenz *Fabrikplanung*. Esslingen, 22.-23. Mai 2007.

MUN 2002

Mun, J.: Real Options Analysis: Tools and Techniques for Valuing Strategic Investments and Decisions. Hoboken: Wiley 2002. ISBN: 0-471-25696-X. (Wiley finance series).

MÜSSIG 2005

Müssig, B.: Wandlung bewertbar machen – Fabrikplanung bei der Siemens AG. Fabriken für den globalen Wettbewerb, 6. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung. Ludwigsburg, 8.-9. November 2005.

MYERS 1977

Myers, S. C.: Determinants of corporate borrowing. *Journal of Financial Economics* 5 (1977) 2, S. 147-175. <DOI:10.1016/0304-405X(77)90015-0>.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL 1998

National Research Council (Hrsg.): Visionary manufacturing challenges for 2020. Washington, DC / USA: National Academy Press 1998. ISBN: 0-309-06182-2.

NEELY & DE NEUFVILLE 2001

Neely, J. E.; de Neufville, R.: Hybrid Real Options valuation of risky product development projects. *International Journal of Technology, Policy and Management* 1 (2001) 1, S. 29-46. <DOI:10.1504/IJTPM.2001.001743>.

NEMBHARD ET AL. 2001

Nembhard, H. B.; Shi, L.; Aktan, M.: A Real Options Design for Product Outsourcing. In: Peters, B. A. (Hrsg.): Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. New York: ACM 2001, S. 548-552. ISBN: 0-7803-7307-3.

NEMBHARD ET AL. 2005

Nembhard, H. B.; Shi, L.; Aktan, M.: A real-options-based analysis for supply chain decisions. *IIE Transactions* 37 (2005) 10, S. 945-956. <DOI:10.1080/07408170591008073>.

NESGES 2005

Nesges, D.: Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen. Diss. Universität Karlsruhe (TH) (2005). (Forschungsberichte wbk Institut für Produktionstechnik 131).

NIEMANN & WESTKÄMPER 2006

Niemann, J.; Westkämper, E.: Life Cycle Controlling von Produktionssystemen. *wt Werkstattstechnik - online* 96 (2006) 7-8, S. 460-466.

NIPPA & PETZOLD 2000

Nippa, M.; Petzold, K.: Ökonomische Erklärungs- und Gestaltungsbeiträge des Realoptionen-Ansatzes. *Freiberg Working Papers* 1/2000, Technische Universität Bergakademie Freiberg (2000). <http://www.wiwi.tu-freiberg.de/up/download/publikationen/ap_01_2000.pdf> - 20.03.2006.

NOTTBECK 2004

Nottbeck, B.: Fabrik der Zukunft – Eine Herausforderung für den Standort Deutschland. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Marktnahe Produktion individualisierter Produkte, Industriekolloquium zum Sonderforschungsbereich 582. Garching, 29. April 2004. München: Utz 2004, S. 6.1-6.11. ISBN: 3-8316-0378-2.

NYHUIS ET AL. 2005

Nyhuis, P.; Kolakowski, M.; Heger, C. L.: Evaluation of Factory Transformability. CIRP 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing Systems. Ann Arbor (MI) / USA, 10.-12. Mai 2005. (CD-ROM)

PESKE 2002

Peske, T.: Eignung des Realloptionsansatzes für die Unternehmensführung. Diss. Universität Mannheim (2001). Köln: Eul 2002. ISBN: 3-89012-941-2. (Planung, Organisation und Unternehmensführung 81).

PETRY & SPROW 1993

Petry, G. H.; Sprow, J.: The theory and practice of finance in the 1990s. The Quarterly Review of Economics and Finance 33 (1993) 4, S. 359-381. <DOI:10.1016/1062-9769(93)90004-4>.

PIKE 1988

Pike, R. H.: An Empirical Study of the Adoption of Sophisticated Capital Budgeting Practices and Decision-Making Effectiveness. Accounting and Business Research 18 (1988) 72, S. 341-351.

PINDYCK 1991

Pindyck, R. S.: Irreversibility, Uncertainty, and Investment. Journal of Economic Literature 29 (1991) 3, S. 1110-1148.

PRITSCH 2000

Pritsch, G.: Realloptionen als Controllinginstrument: das Beispiel pharmazeutischer Forschung und Entwicklung. Diss. Wissenschaftliche Hochschule für Unternehmensführung (WHU), Koblenz (2000). Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2000. ISBN: 3-8244-7235-X. (Gabler Edition Wissenschaft: Unternehmensführung & Controlling).

PSCHYREMBEL 1998

Hildebrand, H. (Red.-Leitung): Pschyrembel Klinisches Wörterbuch. 258. Aufl. Berlin: de Gruyter 1998. ISBN: 3-11-014824-2.

RAMESH & DEVADASAN 2007

Ramesh, G.; Devadasan, S. R.: Literature review on the agile manufacturing criteria. Journal of Manufacturing Technology Management 18 (2007) 2, S. 182-201. <DOI:10.1108/17410380710722890>.

REINHART & DÜRRSCHMIDT 1998

Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.: Montagesysteme für langfristige Stückzahl-schwankungen. ZWF 93 (1998) 4, S. 135-138.

REINHART ET AL. 1999

Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Hirschberg, A.; Selke, C.: Reaktionsfähigkeit für Unternehmen. Eine Antwort auf turbulente Märkte. ZWF 94 (1999) 1-2, S. 21-24.

REINHART 2000

Reinhart, G.: Im Denken und Handeln wandeln. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Nur der Wandel bleibt. Wege jenseits der Flexibilität. Münchener Kolloquium 2000. München: Utz 2000, S. 17-40. ISBN: 3-89675-923-X.

REINHART ET AL. 2002

Reinhart, G.; Berlak, J.; Effert, C.; Selke, C.: Wandlungsfähige Fabrikgestaltung. ZWF 97 (2002) 1-2, S. 18-23.

REINHART & CISEK 2003

Reinhart, G.; Cisek, R.: Mit Mobilität zur wandlungsfähigen Produktion. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin: Springer 2003, S. 75-88. ISBN: 3-540-00594-3.

REINHART ET AL. 2006

Reinhart, G.; von Bredow, M.; Neise, P.; Sudhoff, W.: Produzieren in globalen Netzwerken. In: Hoffmann, H. et al. (Hrsg.): 8. Münchener Kolloquium. Zukunft Voraus – Denken für den Standort Deutschland. München, 09.-10. März 2006. München: Utz 2006, S. 175-192. ISBN: 3-8316-0575-0.

REINHART ET AL. 2007

Reinhart, G.; Krebs, P.; Rimpau, C.; Czechowski, D.: Flexibilitätsbewertung in der Praxis. wt Werkstatttechnik - online 97 (2007) 4, S. 211-217.

REITHOFER ET AL. 2002

Reithofer, N.; Bergholz, M.; Eversheim, W.; Gather, M.; Kerner, S.; Lange-Stalinski, T.; Lanza, M.; Laufenberg, L.; Reinfelder, A.; Schreiber, W.; Sulser, H. P.: Die Fabrik von morgen: vernetzt und wandlungsfähig! In: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachener Perspektiven, 24. AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium. Aachen, 6.-7. Juni 2002. Aachen: Shaker 2002, S. 73-96. ISBN: 3-8265-9858-X.

RIGAMONTI ET AL. 2005

Rigamonti, M.; Tolio, T.; Tomasella, M.; Valente, A.: Production requirements definition in a dynamic environment. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). München, 22.-23. September 2005. München: Utz 2005, S. 99-106. ISBN: 3-8316-0540-8.

ROPOHL 1999

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie. 2. Aufl. München: Hanser 1999. ISBN: 3-446-19606-4.

RUDOLF 2007

Rudolf, H.: Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie. Diss. Technische Universität München (2006). München: Utz 2007. ISBN: 3-8316-0697-8. (Forschungsberichte *iwb* 204).

SAE M-110.2

SAE M-110.2(2. Auflage): Reliability and Maintainability Guideline for Manufacturing Machinery and Equipment. Warrendale: Society of Automotive Engineers 1999.

SALIGER 2003

Saliger, E.: Betriebswirtschaftliche Entscheidungstheorie.
5. Aufl. München: Oldenbourg 2003. ISBN: 3-486-27468-6.

SALTELLI ET AL. 2004

Saltelli, A.; Tarantola, S.; Campolongo, F.; Ratto, M.: Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models. Chichester / UK: Wiley 2004.
ISBN: 0-470-87093-1.

SANCHEZ 1993

Sanchez, R.: Strategic Flexibility, Firm Organization and Managerial Work in Dynamic Markets: A strategic-options perspective.
Advances in Strategic Management (1993) 9, S. 251-291.

SCHÄFER & SOCHOR 2005

Schäfer, H.; Sochor, M.: Der Wert von Wandlungsfähigkeit durch Wechselmöglichkeit – eine fallgestützte Analyse mittels des Realloptionsansatzes.
In: Foschiani, S. et al. (Hrsg.): Strategisches Wertschöpfungsmanagement in dynamischer Umwelt. Frankfurt a. M.: Lang 2005, S. 491-520. ISBN: 3-631-53532-5.

SCHAUERHUBER 1998

Schauerhuber, M.: Produktionswirtschaftliche Flexibilität: eine Konstruktion pekuniärer, kontextbezogener und interagierender Flexibilitätsmaße. Diss. Wirtschaftsuniversität Wien (1998). Wien: Service-Fachverlag 1998. ISBN: 3-85428-387-3. (Forschungsergebnisse der Wirtschaftsuniversität Wien).

SCHENK & WIRTH 2004

Schenk, M.; Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Berlin: Springer 2004. ISBN: 3-540-20423-7.

SCHILLING-PRAETZEL ET AL. 2002

Schilling-Praetzel, M.; Reinhart, G.; Cisek, R.: ProMotion – Steigerung der Wandlungsfähigkeit durch mobile Produktionssysteme. In: Bey, I. (Hrsg.): Karlsruher Arbeitsgespräche 2002 – Forschung für die Produktion von morgen. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe 2002, S. 336-345.

SCHIMMELPFENG 2002

Schimmelpfeng, K.: Lebenszyklusorientiertes Produktionssystemcontrolling. Wiebaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2002. ISBN: 3-8244-9088-9. (Neue Betriebswirtschaftliche Forschung 295).

SCHMIDT 2007

Schmidt, J.: Wandlungsfähige Fabriken für das Airline Catering.
wt Werkstattstechnik - online 97 (2007) 4, S. 232-238.

SCHMIGALLA 1995

Schmigalla, H.: Fabrikplanung. Begriffe und Zusammenhänge. München:
Hanser 1995. ISBN: 3-446-18572-0. (REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation).

SCHNAARS 1987

Schnaars, S. P.: How to develop and use scenarios. Long Range Planning 20
(1987) 1, S. 105-114.
<DOI:10.1016/0024-6301(87)90038-0>.

SCHNEEWEIß 1992

Schneeweiß, C.: Planung / 2 – Konzepte der Prozeß- und Modellgestaltung.
Berlin: Springer 1992. ISBN: 3-540-55175-1. (Springer Lehrbuch).

SCHOEMAKER 1995

Schoemaker, P. J. H.: Scenario Planning: A Tool for Strategic Thinking.
Sloan Management Review 36 (1995) 2, S. 25-40.

SCHUH ET AL. 2004a

Schuh, G.; Gulden, A.; Wemhöner, N.; Kampker, A.: Bewertung der Flexibilität von
Produktionssystemen. wt Werkstattstechnik - online 94 (2004) 6, S. 299-304.

SCHUH ET AL. 2004b

Schuh, G.; Harre, J.; Gottschalk, S.; Kampker, A.: Design für Changeability (DFC).
wt Werkstattstechnik - online 94 (2004) 4, S. 100-106.

SCHUH ET AL. 2004c

Schuh, G.; Wemhöner, N.; Kampker, A.: Lebenszyklusbewertung flexibler Produkti-
onssysteme. wt Werkstattstechnik - online 94 (2004) 4, S. 116-120.

SCHUH ET AL. 2005

Schuh, G.; Wemhöner, N.; Friedrich, C.: Lifecycle oriented evaluation of automotive
body shop flexibility. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on
Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). Garching,
22.-23. September 2005. München: Utz 2005, S. 433-439. ISBN: 3-8316-0540-8.

SCHUH ET AL. 2007

Schuh, G.; Gottschalk, S.; Lösch, F.; Wesch, C.: Fabrikplanung im Gegenstromver-
fahren. wt Werkstattstechnik - online 97 (2007) 4, S. 195-199.

SCHUH & KLOTZBACH 2007

Schuh, G.; Klotzbach, C.: Lebenszykluskostenbasierte Servicemodelle.
wt Werkstattstechnik - online 97 (2007) 7/8, S. 550-554.

SCHULMERICH 2003

Schulmerich, M.: Einsatz und Pricing von Realloptionen.
In: Hommel, U. et al. (Hrsg.): Reale Optionen. Berlin: Springer 2003, S. 63-96.
ISBN: 3-540-01981-2.

SCHULTE 2002

Schulte, H.: Fabrikplanung und Wandlungsfähigkeit – Gedanken und Empfehlungen für Planer und Betreiber. In: Westkämper, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2002, S. 99-120. ISBN: 3-8167-6128-3.

SESTERHENN 2003

Sesterhenn, M.: Bewertungssystematik zur Gestaltung struktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme. Diss. RWTH Aachen (2002). Aachen: Shaker 2003. ISBN: 3-8322-1066-0. (Berichte aus der Produktionstechnik 1/2003).

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: Flexibility in Manufacturing: A Survey. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 2 (1990) 4, S. 289-328.
<DOI:10.1007/BF00186471>.

SHEWCHUK & MOODIE 1998

Shewchuk, J. P.; Moodie, C. L.: Definition and Classification of Manufacturing Flexibility Types and Measures. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 10 (1998) 4, S. 325-349.
<DOI:10.1023/A:1008062220281>.

SHI & DANIELS 2003

Shi, D.; Daniels, R. L.: A survey of manufacturing flexibility: Implications for e-business flexibility. IBM Systems Journal 42 (2003) 3, S. 414-427.
<<http://researchweb.watson.ibm.com/journal/sj/423/shi.pdf>> - 28.08.2006.

SHINGO 1989

Shingo, S.: A study of the Toyota production system from an industrial engineering viewpoint. 1. überarb. Aufl. Portland: Productivity Press 1989. ISBN: 0-915299-17-8.

SICK 2005

Sick, G.: Some Important Issues Involving Real Options. University of Calgary / Università di Verona (2005).
<<http://ssrn.com/abstract=645581>> - 30.12.2006. (Zur Veröffentlichung angenommen in Multinational Finance Journal)

SLACK 1983

Slack, N.: Flexibility as a Manufacturing Objective. International Journal of Operations and Production Management 3 (1983) 3, S. 4-13.

SMITH & NAU 1995

Smith, J. E.; Nau, R. F.: Valuing Risky Projects: Option Pricing Theory and Decision Analysis. Management Science 41 (1995) 5, S. 795-816.

SMITH & MCCARDLE 1999

Smith, J. E.; McCardle, K. F.: Options in the Real World: Lessons Learned in Evaluating Oil and Gas Investments. Operations Research 47 (1999) 2, S. 198-218.

SPATH & BAUMEISTER 2001

Spath, D.; Baumeister, M.: Ist Flexibilität genug? ZWF 96 (2001) 5, S. 235-241.

SPATH ET AL. 2002

Spath, D.; Baumeister, M.; Rasch, D.: Wandlungsfähigkeit und Planung von Fabriken. ZWF 97 (2002) 1-2, S. 28-31.

SPATH & SCHOLTZ 2007

Spath, D.; Scholtz, O.: Wandlungsfähigkeit für eine wirtschaftliche Montage in Deutschland. Industrie Management 23 (2007) 2, S. 61-64.

SPUR 1994

Spur, G. (Hrsg.): Fabrikbetrieb. München: Hanser 1994. ISBN: 3-446-17714-0 (Handbuch der Fertigungstechnik 6).

STACHOWIAK 1973

Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer 1973. ISBN: 3-211-81106-0.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2006

Statistisches Bundesamt: Datenreport 2006. Zahlen und Fakten über die Bundesrepublik Deutschland. Statistisches Bundesamt, Bonn (2006).
<<https://www-ec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspath=struktur,vollanzeige.csp&ID=1018705>> - 06.10.2007.

SUDHOFF 2007

Sudhoff, W.: Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion. Diss. Technische Universität München (2007).

TERSCHÜREN & RIECKS 2007

Terschüren, K.-H.; Riecks, D.: Die nachhaltige Fabrik – ein Zukunftsmodell. Fabrikplanung schnell, sicher, effizient, 7. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung. Esslingen, 22.-23. Mai 2007.

THOMMEN & ACHLEITNER 2005

Thommen, J.-P.; Achleitner, A.-K.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden: Gabler 2005. ISBN: 3-409-43016-4.

THUESSEN & FABRYCKY 2001

Thuessen, G. J.; Fabrycky, W. J.: Engineering Economy. 9. Aufl. Upper Saddle River: Prentice Hall 2001. ISBN: 0-13-028128-X. (Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering).

TRIANANTIS & BORISON 2001

Triantis, A.; Borison, A.: Real Options: State of the Practice. Journal of Applied Corporate Finance 14 (2001) 2, S. 8-24.
<DOI:10.1111/j.1745-6622.2001.tb00327.x>.

TRIGEORGIS 1996

Trigeorgis, L.: Real Options – Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation. Cambridge: MIT Press 1996. ISBN: 0-262-20102-X.

TRIGEORGIS 2002

Trigeorgis, L.: Real Options and investment under uncertainty. NBB Working Paper 22, Belgische Nationalbank, Brüssel (2002).
<<http://www.nbb.be/doc/ts/publications/WP/WP22En.pdf>> - 29.12.2006.

UPTON 1994

Upton, D. M.: The Management of Manufacturing Flexibility. California Management Review 36 (1994) 2, S. 72-89.

URBANI & AVAI 2005

Urbani, A.; Avai, A.: Changeability as a key for lifecycle oriented investment evaluation. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). Garching, 22.-23. September 2005. München: Utz 2005, S. 459-466. ISBN: 3-8316-0540-8.

URBANI & BECCARIS 2005

Urbani, A.; Beccaris, M.: Life Cycle Cost technique for investment evaluation: Application to an automotive plant. CIRP 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing Systems. Ann Arbor (MI) / USA, 10.-12. Mai 2005. (CD-ROM)

URBANI 2006

Urbani, A.: Life Cycle Cost Calculation for Manufacturing Systems by Means of Reconfigurability Analysis. In: Dashchenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories. Berlin: Springer 2006, S. 643-658. ISBN: 978-3-540-29391-0.

VDI 2693-1

VDI 2693-1, Blatt 1: Investitionsrechnung bei Materialflußplanungen mit Hilfe statischer und dynamischer Rechenverfahren. Berlin: Beuth 1996.

VDI 2693-2

VDI 2693-2, Blatt 2: Investitionsrechnung bei Materialflußplanungen mit Hilfe statischer und dynamischer Rechenverfahren – Formblatt. Berlin: Beuth 1996.

VDI 2884

VDI 2884: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). Berlin: Beuth 2005.

VDI 6025

VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. Berlin: Beuth 1996.

VDMA 34160

VDMA 34160: Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen. Berlin: Beuth 2006.

VIELHABER 2004

Vielhaber, W.: Planung und Gestaltung wandlungsfähiger Satellitenfabriken und Fabrikparks. In: Witte, K.-W. et al. (Hrsg.): Neue Konzepte für wandlungsfähige Fabriken und Fabrikparks. Aachen: Shaker 2004, S. 19-48. ISBN: 3-8322-3423-3.

VOLLERT 2003

Vollert, A.: A stochastic control framework for real options in strategic valuation. Diss. Universität Karlsruhe (TH) (2003). Boston: Birkhäuser 2003. ISBN: 0-8176-4258-7.

VOLLRATH 2003

Vollrath, R.: Die Berücksichtigung von Handlungsflexibilität bei Investitionsentscheidungen. In: Hommel, U. et al. (Hrsg.): Reale Optionen. Berlin: Springer 2003, S. 341-373. ISBN: 3-540-01981-2.

VON BRIEL 2002

von Briel, R.: Ein skalierbares Modell zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Anpassungsinvestitionen in ergebnisverantwortlichen Fertigungssystemen. Diss. Universität Stuttgart (2002). Heimsheim: Jost-Jetter 2002. ISBN: 3-931-388-81-6. (IPA-IAO-Forschung und Praxis 352).

VON DER OSTEN-SACKEN 1999

von der Osten-Sacken, D.: Lebenslauforientierte, ganzheitliche Erfolgsrechnung für Werkzeugmaschinen. Diss. Universität Stuttgart (1999). Heimsheim: Jost-Jetter 1999. ISBN: 3-931-388-12-3. (IPA-IAO-Forschung und Praxis 299).

WANG & DE NEUFVILLE 2004

Wang, T.; de Neufville, R.: Building Real Options into Physical Systems with Stochastic Mixed-Integer Programming. Real Options – Theory Meets Practice, 8th Annual International Conference. Montréal, 17.-19. Juni 2004.
<http://www.realoptions.org/papers2004/de_Neufville.pdf> - 06.02.2005.

WANG 2005

Wang, T.: Real Options "in" Projects and Systems Design – Identification of Options and Solution for Path Dependency. Diss. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston (2005). <<http://hdl.handle.net/1721.1/31167>>.

WEMHÖNER 2006

Wemhöner, N.: Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau. Diss. RWTH Aachen (2005). Aachen: Shaker 2006. ISBN: 3-8322-5111-1. (Berichte aus der Produktionstechnik 12/2006).
<URN:nbn:de:hbz:82-opus-14963>.

WESTKÄMPER 1999

Westkämper, E.: Die Wandlungsfähigkeit von Unternehmen.
wt Werkstattstechnik 89 (1999) 4, S. 131-140.

WESTKÄMPER ET AL. 2000

Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen: Ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld. wt Werkstattstechnik online 1/2 (2000) 90, S. 22-26.

WESTKÄMPER 2002a

Westkämper, E.: Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Fabriken.
4. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung. Stuttgart, 06.-07. November 2002.

WESTKÄMPER 2002b

Westkämper, E.: Wandlungsfähigkeit: Herausforderungen und Lösungen im turbulenten Wettbewerb. In: Westkämper, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2002, S. 17-46. ISBN: 3-8167-6128-3.

WESTKÄMPER 2005

Westkämper, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion. SFB 476 Ergebnisbericht 2003-2005, Universität Stuttgart (2005).

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Digital Manufacturing in the global Era. 3rd CIRP sponsored Conference on Digital Enterprise Technology. Setúbal/Portugal, 18.-20. September 2006. (CD-ROM)

WIENDAHL ET AL. 1996

Wiendahl, H.-P.; Ahrens, V.; Burmeister, M.; Möller, J.; Stritzke, H.: Grundlagen der Fabrikplanung. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 9.1-9.117. ISBN: 3-540-59360-8. (Betriebshütte Teil 2).

WIENDAHL & HERNÁNDEZ 2000

Wiendahl, H.-P.; Hernández, R.: Wandlungsfähigkeit – neues Zielfeld der Fabrikplanung. *Industrie Management* 16 (2000) 5, S. 37-41.

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. *Werkstattstechnik - online* 92 (2002) 4, S. 122-127.

WIENDAHL & HEGER 2003

Wiendahl, H.-P.; Heger, C. L.: Justifying Changeability – A Methodical Approach to Achieving Cost Effectiveness. CIRP 2nd International Conference on Reconfigurable Manufacturing. Ann Arbor (MI) / USA, 20.-21. August 2003. (CD-ROM)

WIENDAHL ET AL. 2005

Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F. (Hrsg.): Planung modularer Fabriken. München: Hanser 2005. ISBN: 3-446-40045-1.

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Kolakowski, M.: Changeable Manufacturing: Classification, Design, Operation. *Annals of the CIRP* 56 (2007) 2.

WILKENS & VÖLKER 2001

Wilkens, M.; Völker, J.: Value-at-Risk – Eine anwendungsorientierte Darstellung zentraler Methoden und Techniken des modernen Risikomanagements. In: Götze, U. et al. (Hrsg.): Risikomanagement. Heidelberg: Physica 2001, S. 413-442. ISBN: 3-7908-1415-6.

WÖHE & DÖRING 2002

Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 21. Aufl. München: Vahlen 2002. ISBN: 3-8006-2865-1. (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

WOODWARD 1997

Woodward, D. G.: Life cycle costing – theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management* 15 (1997) 6, S. 335-344.
<DOI:10.1016/S0263-7863(96)00089-0>.

WTO 2006

World Trade Organization (Hrsg.): WTO 2006: International Trade Statistics 2006.
<http://www.wto.org/english/res_e/statis_e/statis_e.htm> - 28.05.2007.

ZAEH ET AL. 2004

Zaeh, M. F.; Sudhoff, W.; Moeller, N.; Aull, F.: Evaluation of mobile production scenarios based on the Real Option Approach. *Vernetzt planen und produzieren (VPP) 2004*. Chemnitz, 27.-28. September 2004, S. 300-305. (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme - Sonderheft 8).

ZAEH ET AL. 2005a

Zaeh, M. F.; Moeller, N.; Sudhoff, W.: A framework for the valuation of Changeable Manufacturing Systems. *CIRP 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing Systems*. Ann Arbor (MI) / USA, 10.-12. Mai 2005. (CD-ROM)

ZAEH ET AL. 2005b

Zaeh, M. F.; Moeller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): *1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005)*. München, 22.-23. September 2005. München: Utz 2005, S. 3-10. ISBN: 3-8316-0540-8.

ZAEH ET AL. 2005c

Zaeh, M. F.; Mueller, N.; Rimpau, C.: A Holistic Framework for Enhancing the Changeability of Production Systems. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): *1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005)*. München, 22.-23. September 2005. München: Utz 2005, S. 77-84. ISBN: 3-8316-0540-8.

ZAEH ET AL. 2005d

Zaeh, M. F.; Sudhoff, W.; Moeller, N.: Quantitative Modeling of Mobile Production Scenarios. *38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*. Florianopolis/Brasilien, 16.-18. Mai 2005. (CD-ROM)

ZAEH ET AL. 2006

Zaeh, M. F.; Moeller, N.; Muessig, B.; Rimpau, C.: Life cycle oriented valuation of manufacturing flexibility. In: Dufloy, J. R. et al. (Hrsg.): *LCE 2006 – Towards a closed loop economy*, *13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Bd 2. Leuven, 31.05.-02.06.2006. Leuven / Belgien: Katholieke Universiteit Leuven 2006, S. 699-704. ISBN: 90-5682-712-X

ZÄH ET AL. 2003a

Zäh, M. F.; Cisek, R.; Sudhoff, W.; Redelstab, P.: Mit Mobilität zu mehr Strukturvariabilität. *wt Werkstattstechnik - online* 93 (2003) 4, S. 327-331.

ZÄH ET AL. 2003b

Zäh, M. F.; Sudhoff, W.; Rosenberger, H.: Bewertung mobiler Produktionsszenarien mit Hilfe des Realoptionsansatzes. *ZWF* 98 (2003) 12, S. 646-652.

ZÄH ET AL. 2004

Zäh, M. F.; Müller, N.; Prasch, M.; Sudhoff, W.: Methodik zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. ZWF 99 (2004) 4, S. 173-177.

ZÄH ET AL. 2006

Zäh, M. F.; von Bredow, M.; Möller, N.; Müssig, B.: Methoden zur Bewertung von Flexibilität in der Produktion. Industrie Management 22 (2006) 4, S. 29-32.

ZAHN & SCHMID 1996

Zahn, E.; Schmid, U.: Produktionswirtschaft I: Grundlagen und operatives Produktmanagement. Stuttgart: Lucius und Lucius 1996. ISBN: 3-8252-8126-4. (UTB für Wissenschaft 8126).

ZANGEMEISTER 1973

Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Diss. Technische Universität Berlin (1970). 3. Aufl. München: Wittmann 1973.

ZÄPFEL 1989

Zäpfel, G.: Strategisches Produktions-Management. Berlin: de Gruyter 1989. ISBN: 3-11-012015-1. (De-Gruyter-Lehrbuch).



10 Anhang

10.1 Handlungsmöglichkeiten zur Anpassung der Produktion

10.1.1 Personal und Organisation

Legende:

- Handlungsmöglichkeit relevant bei Veränderung von ...
- ⊕ Handlungsmöglichkeit z.T. relevant bei Veränderung von ...
- ⊖ Handlungsmöglichkeit wenig relevant bei Veränderung von ...

Ebene	Handlungsmöglichkeit	Erläuterung	Rezeptor						Opt.	
			Stückzahl	Produkt	Qualität	Zeit	Kosten	Technologie	Wachstum	Versicherung
Fabrik und Werk	<i>Kapazitätsangebot</i>									
	Kurzarbeit		●	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕		x
	Überstunden		●	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	x	
	Neueinstellung Festangestellte		●	⊕	⊕	⊕	⊖	⊖	x	
	Neueinstellung Zeitarbeiter		●	⊕	⊕	⊕	⊕	⊖	x	
	Freisetzen Festangestellte		●	⊕	⊕	⊕	⊖	⊖		x
	Freisetzen Zeitarbeiter		●	⊕	⊕	⊕	⊖	⊖		x
Produktions- und Logistikbereich	<i>Kapazitätsangebot</i>									
	Anzahl Schichten erhöhen		●	⊕	⊕	⊖	⊕	⊕	x	
	Anzahl Schichten verringern		●	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕		x
	Reallokation von Mitarbeitern	Einsatz der Mitarbeiter mit gleicher Tätigkeit in anderem Bereich	●	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	x	x
	<i>Kapazitätsbedarf</i>									
	Outsourcing der Spitzenlast	Vergabe von Aufträgen in andere Produktionsbereiche	●	⊕	⊕	●	⊕	⊕	x	
	Insourcing bei Unterlast	Übernahme von Aufträgen aus anderen Produktionsbereichen	●	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕		x
	<i>Aufbau- und Ablauforganisation</i>									
	Insourcing von Funktionsbereichen	Übernahme bisher externer Aufgaben, z.B. Instandhaltung, Wareneingang, etc.	⊕	⊕	●	⊖	⊖	⊕	x	x
	Outsourcing von Funktionsbereichen	Fremdvergabe einzelner Funktionen, bspw. Instandhaltung, Wareneingang, etc.	⊕	⊕	●	⊖	⊖	⊕	x	x
	Organisationsbereich auflösen	auflösen / zusammenlegen von Bereichen, bspw. zwei Segmenten	⊕	⊕	⊕	⊖	⊕	⊖		x
	Organisationsbereich schaffen	Schaffung eines neuen organisatorischen Bereichs, bspw. eines Segmentes	⊕	●	⊖	●	⊕	⊖	x	
Organisationsbereich teilen	Aufteilung eines Bereiches in zwei oder mehrere Bereiche	⊕	⊕	⊕	●	⊕	⊖	x		
Umstellung übergeordnetes Steuerungskonzept	Veränderung der Prinzipien der Auftragssteuerung, andere IT-Systeme	⊕	⊕	⊕	●	⊕	⊖	x	x	

Legende:
 ● Handlungsmöglichkeit relevant bei Veränderung von ...
 ⊕ Handlungsmöglichkeit z.T. relevant bei Veränderung von ...
 ⊖ Handlungsmöglichkeit wenig relevant bei Veränderung von ...

Ebene	Handlungsmöglichkeit	Erläuterung	Rezeptor						Opt.	
			Stückzahl	Produkt	Qualität	Zeit	Kosten	Technologie	Wachstum	Versicherung
Fertigungs-, Montage- und Logistiksystem	<i>Kapazitätsangebot</i>									
	Mitarbeiterinsatz im Bereich erhöhen	z.B. bei Montage im U-Layout, Vergrößerung bestehender Teams oder neue Teams	●	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕	x	
	Mitarbeiterinsatz im Bereich verringern	z.B. bei Montage im U-Layout, Verkleinerung bestehender Teams oder weniger Teams	●	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕		x
	Zuordnung der Teams verändern	Aufgaben von Teams verändern	●	⊖	⊕	⊖	⊕	⊖	x	x
	Reallokation von Mitarbeitern	Neuzuordnung einzelner Mitarbeiter (z.B. in andere Teams)	●	⊖	⊖	⊖	⊕	⊖	x	x
	<i>Aufbau- und Ablauforganisation</i>									
	Outsourcing von Prozessschritten	Fremdvergabe einzelner Schritte im Herstellungsprozess	⊖	⊖	●	●	●	●	x	x
	Insourcing von Prozessschritten	Übernahme zusätzlicher Schritte im Herstellungsprozess	⊖	⊖	●	●	●	●	x	x
	Umstellung der Fertigungs- und Montagesteuerung	z.B. Änderung von Prioritätsregeln und Losgrößen	⊖	⊕	⊖	●	⊖	⊖	x	x
	<i>Fertigungs- und Montageorganisation</i>									
Fertigungsprinzip ändern		●	●	⊕	⊖	⊕	⊖	x	x	
Montageprinzip ändern		●	●	⊕	⊖	⊕	⊖	x	x	
Verkettungsprinzip ändern		●	●	⊖	⊖	⊕	⊖	x	x	
Arbeitsstation	Nutzung anderer Betriebsmittel	Mitarbeiter kann/darf für die gleiche Tätigkeit andere Betriebsmittel nutzen	●	●	●	⊕	⊕	⊕	x	
	Übernahme der Tätigkeiten anderer Betriebsmittel	Mitarbeiter kann an seinem Arbeitsplatz Tätigkeiten anderer Stationen übernehmen	●	●	●	⊕	⊕	⊕		x

Tabelle 12: Handlungsmöglichkeiten bezüglich Personal und Organisation

10.1.2 Betriebsmittel

Legende:

- Handlungsmöglichkeit relevant bei Veränderung von ...
- ⊕ Handlungsmöglichkeit z.T. relevant bei Veränderung von ...
- ⊖ Handlungsmöglichkeit wenig relevant bei Veränderung von ...

Ebene	Handlungsmöglichkeit	Erläuterung	Rezeptor						Opt.	
			Stückzahl	Produkt	Qualität	Zeit	Kosten	Technologie	Wachstum	Versicherung
Fabrik u. Werk										
PLB*	Nutzung und damit Verlagerung von Betriebsmitteln in andere Bereiche	Integration in andere, nicht betrachtete Wertschöpfungsketten des Unternehmens	●	⊕	⊕	⊕	⊖	⊖		x
	gemeinsame Nutzung von Betriebsmitteln mit anderen Bereichen	gemeinsame Nutzung als zentrale Betriebsmittel (zu Beginn oder im Verlauf der Lebensdauer)	●	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	x	x
	Betreibermodell nutzen		⊕	⊕	●	⊕	●	⊕		x
Fertigungs-, Montage- und Logistiksystem	Verlagerung im Bereich	Verlagerung von Betriebsmitteln zur Optimierung des Layouts	●	⊕	⊕	⊖	⊕	⊖	x	x
	<i>Verkettung</i>									
	Kapazität erhöhen	Erhöhung der Transportleistung (Geschwindigkeit, zusätzliche Transportmittel)	●	⊕	⊕	⊖	⊕	⊕	x	
	Kapazität verringern	kostenwirksame Verringerung der Transportleistung (z.B. Verkauf von Transportmitteln)	●	⊕	⊕	⊖	⊕	⊕		x
	<i>Automatisierungsgrad verändern (erhöhen und verringern)</i>									
	Verkettungs- und Logistikeinrichtungen	automatisierte Transportsysteme, z.B. Gurtband vs. manuell	●	⊕	⊖	●	⊕	⊕	x	x
	Lagereinrichtungen	z.B. Hochregallager vs. Blocklager	●	●	⊕	●	⊕	⊕	x	x
	<i>Integration</i>									
	Erweiterung der Anzahl bedienter Stationen	Ausweitung automatisierter Transportsysteme, Anschluss zusätzlicher Stationen	⊕	●	⊕	⊕	⊕	●	x	
	Einschränkung der Anzahl bedienter Stationen	Reduktion / Rückbau automatisierter Transportsysteme	⊕	●	⊕	⊕	⊕	●		x
	<i>Umrüsten (Auf- und Abrüsten)</i>									
	Transportmittel	Anpassung an veränderte Anforderungen bez. Größe, Traglast, Schutz und Fixierung des Produktes, Stapelhöhe, Transportlosgröße, Integration in andere Systeme, etc.	⊕	●	⊕	⊕	⊕	⊖	x	x
	Transporthilfsmittel, Werkstückträger		⊕	●	⊖	⊕	⊕	⊖	x	x
Lagereinrichtungen		⊕	●	⊕	⊕	⊖	⊕	x	x	
Lagermittel		⊕	●	⊕	⊕	⊖	⊕	x	x	
Lagerbediengeräte		⊕	●	⊕	⊕	⊖	⊕	x	x	

Legende:
 ● Handlungsmöglichkeit relevant bei Veränderung von ...
 ⊕ Handlungsmöglichkeit z.T. relevant bei Veränderung von ...
 ⊖ Handlungsmöglichkeit wenig relevant bei Veränderung von ...

Ebene	Handlungsmöglichkeit	Erläuterung	Rezeptor						Opt.		
			Stückzahl	Produkt	Qualität	Zeit	Kosten	Technologie	Wachstum	Versicherung	
Arbeitsstation	<i>Kapazität</i>										
	Stilllegung	temporäre Stilllegung mit verbundener Kostenreduktion	●	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕			x
	Vermietung	(temporäre) Vermietung von Betriebsmitteln	●	⊖	⊖	⊖	⊕	●			x
	Verkauf	Verkauf von Betriebsmitteln	●	⊖	⊖	⊖	⊕	●			x
	Reaktivierung	Reaktivierung vorher temporär stillgelegter Betriebsmittel	●	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕		x	
	Anmieten / Leasen	mieten oder leasen zusätzlicher Betriebsmittel	●	⊖	⊖	⊖	⊕	●		x	
	Kauf	Kauf neuer Betriebsmittel	●	⊖	⊖	⊖	⊕	●		x	
	<i>Automatisierungsgrad verändern (erhöhen und verringern)</i>										
	Werkstückzu- und -abfuhr	Automatisierung der Bestückung	●	⊕	⊖	⊕	●	⊕		x	x
	Rüsten	Werkzeug- und Vorrichtungswechsel, Spannen, Positionieren	●	⊕	⊖	⊕	●	⊕		x	x
	Messen und prüfen	automatisierte Prüfung	●	⊕	●	⊕	●	⊕		x	x
	<i>(Des-)Integration</i>										
	Bearbeitungsschritte	(Des-)Integration von Fertigungs-/Montagetechnologien in eine Maschine oder den Arbeitsplatz	●	●	⊖	⊕	⊖	⊕		x	x
	Mess- und Prüfprozesse	(Des-)Integration von Mess- und/oder Prüfprozessen in eine Maschine oder den Arbeitsplatz	●	⊖	●	⊕	⊖	⊕		x	x
	Hilfsprozesse	(Des-)Integration von Hilfsprozessen (z.B. Verpackung) in eine Maschine oder den Arbeitsplatz	●	⊕	⊖	⊕	●	⊕		x	x
	<i>Umrüsten (Auf- und Abrüsten)</i>										
	Bearbeitungssystem	Anpassung an veränderte Anforderungen bez. Größe und Geometrie, Traglast, Schutz und Fixierung des Produktes, Oberflächenbeschaffenheit und Material, etc.	⊖	●	⊖	⊕	⊕	●		x	x
	Werkzeuge / Vorrichtungen		⊖	●	⊖	⊕	⊕	●		x	x
	Mess- und Prüftechnik		⊖	●	●	⊕	⊕	⊖		x	x
	Speichertechnik		⊖	●	⊖	⊕	⊕	⊕		x	x
	Handhabungstechnik		⊖	●	⊖	⊕	⊕	⊕		x	x

* Produktions- und Logistikbereich

Tabelle 13: Handlungsmöglichkeiten bezüglich der Betriebsmittel

10.1.3 Material

Legende:

- Handlungsmöglichkeit relevant bei Veränderung von ...
- ⊕ Handlungsmöglichkeit z.T. relevant bei Veränderung von ...
- ⊖ Handlungsmöglichkeit wenig relevant bei Veränderung von ...

Ebene	Handlungsmöglichkeit	Erläuterung	Rezeptor						Opt.		
			Stückzahl	Produkt	Qualität	Zeit	Kosten	Technologie	Wachstum	Versicherung	
Fabrik und Werk	Lieferantenanbindung	generelles Anlieferungskonzept (Verkehrsmittel, Ort der Anlieferung am Werk oder Logistikzentrum, Häufigkeit, etc.)	●	●	⊕	⊖	⊕	⊕	x	x	
	Distributionsanbindung	generelles Distributionskonzept (Verkehrsmittel, Ort der Auslieferung am Werk oder Logistikzentrum, Häufigkeit, etc.)	●	●	⊕	⊖	⊕	⊕	x	x	
Produktions- u. Logistikbereich	<i>Beschaffungsstrategien</i>										
	Wechsel zwischen Single- und Multisourcing	Wechsel zwischen Single- und Multisourcing	⊕	⊕	⊕	⊖	●	⊕	x	x	
	Lieferantenwechsel	Wechsel des Lieferanten	⊕	●	●	●	●	⊕	x	x	
	Materialwechsel	Austausch durch gleichwertige Materialien	⊕	⊕	●	⊖	●	⊕	x	x	
Fertigungs-, Montage- und Logistiksystem	<i>Versorgung</i>										
	Wechsel der Dispositionsstrategie	z.B. verbrauchsgesteuert, JIT, JiS	⊕	●	⊕	●	⊕	⊕	x	x	
	Veränderung der Anlieferung	Zentral- vs. Direktbelieferung	●	●	⊕	⊖	⊕	⊕	x	x	
	Änderung der generellen Bereitstellungsstrategie	z.B. zentrale Vorkommisionierung, arbeitsplatznahe Handlager, etc.	●	●	⊖	⊕	⊕	⊕	x	x	
	<i>Aufbau- und Ablauforganisation</i>										
	Veränderung der Aufgaben zwischen Lieferant und Kunde	z.B. Bestandsführung, Qualitätsprüfung, Bereitstellung	⊕	⊕	⊖	●	⊖	●	x	x	
Umstellung auf Pull-Steuerung	Auftragssteuerung ausgehend vom Endprodukt	●	⊕	⊕	●	⊕	⊕	x			
	Umstellung auf Push-Steuerung	Auftragssteuerung auf Basis von Bedarfsprognosen	●	⊖	⊕	●	⊖	⊕		x	
Arbeitsstation	<i>Anliefer- und Abholungscharakteristik</i>										
	Änderung des Anlieferzustands	z.B. Menge, Gebindegröße, Behälterart	●	●	⊖	⊕	⊕	⊕	x	x	
	Veränderung der Organisation der Materialbereitstellung	bereitstellende Person, Anlieferungsfrequenz, Anlieferzeiten	⊕	⊕	⊕	⊖	●	⊕	x	x	
	Änderung des Abholungs Zustands	Menge, Gebindegröße, Behälterart bezogen auf das Produkt, aber auch auf Entsorgung, Behälterkreisläufe	●	●	⊖	⊕	⊕	⊕	x	x	
	Veränderung der Organisation der Materialabholung	bereitstellende Person, Ablieferungsfrequenz, Lieferzeiten	⊕	⊕	⊕	⊖	●	⊕	x	x	

Tabelle 14: Handlungsmöglichkeiten bezüglich Material

10.1.4 Gebäude und Fläche

Legende:

- Handlungsmöglichkeit relevant bei Veränderung von ...
- ⊕ Handlungsmöglichkeit z.T. relevant bei Veränderung von ...
- ⊖ Handlungsmöglichkeit wenig relevant bei Veränderung von ...

Ebene	Handlungsmöglichkeit	Erläuterung	Rezeptor						Opt.		
			Stückzahl	Produkt	Qualität	Zeit	Kosten	Technologie	Wachstum	Versicherung	
Ebene Fabrik	<i>Flächenangebot</i>										
	Grundstück kaufen	bestehendes Grundstück erweitern	●	⊖	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	x	
	Gebäude kaufen	neues Gebäude kaufen	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕	⊖	⊖	x	
	Gebäude bauen	neues Gebäude bauen oder bestehendes erweitern	⊖	⊖	⊕	⊖	⊕	⊖	⊖	x	
	(Teil eines) Gebäude(s) mieten	zusätzliches Gebäude mieten	⊖	⊖	⊕	⊕	⊕	⊖	⊖	x	
	Grundstück (teilweise) verkaufen	bestehendes Grundstück verkleinern	●	⊕	⊕	⊕	⊖	⊕			x
	Grundstück (teilweise) vermieten	bestehendes Grundstück verkleinern	●	⊕	⊕	⊕	⊖	⊕			x
	Gebäude verkaufen	Gebäude(teil) verkaufen	⊖	⊖	⊕	⊕	⊖	⊖			x
	Gebäude (teilweise) vermieten	Gebäude(teil) vermieten	⊖	⊖	⊕	⊕	⊖	⊖			x
	<i>Flächennutzung / Umwidmung</i>										
	Anbindung an Infrastruktur verändern	Art, Größe und Lage der Anbindung an öffentliche Infrastruktur ändern, z.B. Lkw-Zufahrt, Wassertank- und -entsorgung, etc.	●	●	⊕	⊖	⊕	⊕		x	x
Produktions- zu Logistikflächen	auf Gebäudeebene, z.B. Produktions- zu Lagerhallen, etc.	⊕	⊖	⊕	●	⊕	⊕		x	x	
Logistik- zu Produktionsflächen	auf Gebäudeebene, z.B. Lager- zu Montageflächen, etc.	⊕	⊖	⊕	●	⊕	⊕		x	x	
Produktions- zu Produktionsfläche anderer Anforderung	Umwidmung von Produktionsgebäuden für eine Produktion mit anderen Anforderungen, z.B. Fertigung zu Montage, Werkzeugbau zu Fertigung, etc.	⊕	●	⊖	⊕	⊕	●		x	x	
sonstige Flächen	auf Gebäudeebene, z.B. zentrale Dienste wie Feuerwerk, Kundenzentrum, etc.	●	⊖	⊕	⊕	⊕	⊖		x	x	
Produktions- und Logistikbereich	<i>Flächenangebot</i>										
	Fläche ausweiten	Nutzung von Flächen in anderen Bereichen (Produktion, Logistik, Sozialräume, Büros, etc.)	●	●	⊖	⊕	⊕	●		x	
	vorhandene Fläche belegen/reactivieren	Expansionsfläche im eigenen Bereich (Produktion, Logistik, Sozialräume, Büros, etc.)	●	⊖	⊖	⊕	⊕	⊖		x	
Fläche einschränken	kostenwirksame Verringerung der Produktions- oder Logistikfläche	●	⊖	⊖	⊕	⊕	⊖			x	

Legende:

- Handlungsmöglichkeit relevant bei Veränderung von ...
- ⊕ Handlungsmöglichkeit z.T. relevant bei Veränderung von ...
- ⊖ Handlungsmöglichkeit wenig relevant bei Veränderung von ...

Ebene	Handlungsmöglichkeit	Erläuterung	Rezeptor						Opt.	
			Stückzahl	Produkt	Qualität	Zeit	Kosten	Technologie	Wachstum	Versicherung
Produktions- und Logistikbereich	<i>Flächennutzung / Umwidmung</i>									
	Produktions- zu Bürofläche	innerhalb eines Gebäudes oder Bereichs	●	⊕	⊖	⊕	⊕	⊕		x
	Büro- zu Produktionsfläche	innerhalb eines Gebäudes	●	⊕	⊖	⊕	⊕	⊕	x	
	Produktions- zu Logistikfläche	innerhalb eines Gebäudes	⊖	⊕	⊖	●	⊖	⊕	x	
	Logistik- zu Produktionsfläche	innerhalb eines Gebäudes	⊖	⊕	⊖	●	⊖	⊕		x
	Produktions- zu Produktionsfläche anderer Anforderung	Nutzung als Produktionsfläche für Bereiche mit anderen Anforderungen, z.B. Fundamentierung, Belüftung, Zuwegung, etc.	⊖	●	⊖	⊕	⊕	●	x	x
	Anbindung Material verändern	Art und Lage der logistischen An- und Ablieferpunkte	⊖	●	⊖	⊕	⊕		x	x
FMS*	<i>Flächennutzung / Umwidmung</i>									
	Produktions- zu Logistikfläche	im Fertigungs- und Montagebereiche (produktionsnahe, dezentrale Lager)	⊖	⊖	⊖	●	⊖	⊕	x	
	Logistik- zu Produktionsfläche	im Fertigungs- und Montagebereiche (produktionsnahe, dezentrale Lager)	⊖	⊖	⊖	●	⊖	⊕		x
	Produktions- zu Produktionsfläche anderer Anforderung	Nutzung als Produktionsfläche für Bereiche mit anderen Anforderungen, z.B. Fundamentierung, Belüftung, Zuwegung, etc.	⊖	●	⊖	⊕	⊕	●	x	x
	Anbindung Medienversorgung verändern	andere Medien, anderer Ort der Anbindung oder Veränderung der benötigten Menge	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕	●	x	x
Arbeitsstation										

* Fertigungs-, Montage- und Logistiksystem

Tabelle 15: Handlungsmöglichkeiten bezüglich Gebäude und Fläche

10.2 Stochastische Prozesse

10.2.1 Relevante Verteilungsfunktionen

Die nachfolgenden Beschreibungen sind zu großen Teilen MUN (2002) entnommen. Die aufgeführten Verteilungsfunktionen werden dort als „*most commonly used distributions*“ bezeichnet (MUN 2002, S. 117). Für weitergehende Ausführungen sei auf Standardwerke der Statistik wie HARTUNG ET AL. (1995) verwiesen.

Gleichverteilung

Alle Werte zwischen dem Minimum und dem Maximum sind gleich wahrscheinlich.

Beschreibung:

- Das Minimum a ist bekannt bzw. wird angegeben.
- Das Maximum b ist bekannt bzw. wird angegeben.
- Es handelt sich um eine stetige Verteilung (x nimmt stetige Werte an).
- Alle Werte dazwischen treten mit derselben Wahrscheinlichkeit auf.

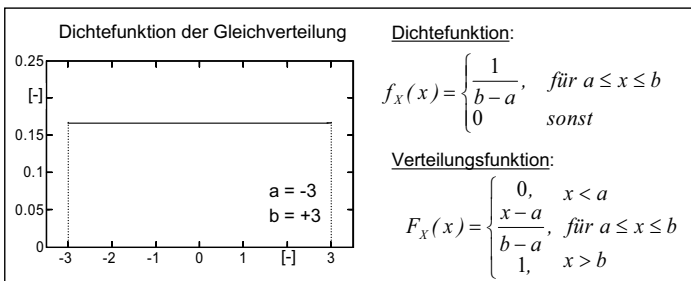


Abbildung 57: Dichtefunktion der Gleichverteilung

Normalverteilung

Die Normalverteilung ist die wichtigste Verteilung, da sie eine Reihe natürlicher Phänomene sehr gut beschreibt. Eine wichtige theoretische Fundierung für die Anwendung der Normalverteilung ist der zentrale Grenzwertsatz, nach dem die

Summe identisch verteilter Zufallsvariablen normalverteilt ist (HARTUNG ET AL. 1995, S. 122).

Beschreibung:

- Ein Wert der Verteilung ist am wahrscheinlichsten (der Mittelwert).
- Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Realisierung der Zufallsvariable oberhalb oder unterhalb des Mittelwertes eintritt, ist gleich hoch (Symmetrie).
- Es handelt sich um eine stetige Verteilung (x nimmt stetige Werte an).
- Die Zufallsvariable liegt mit größerer Wahrscheinlichkeit nah am Mittelwert als weit davon entfernt.

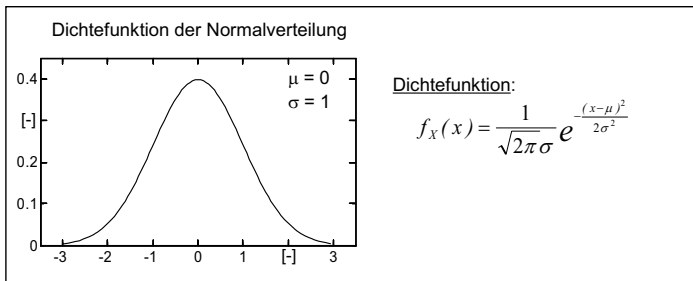


Abbildung 58: Dichtefunktion der Normalverteilung

Dreiecksverteilung

Die Dreiecksverteilung beschreibt eine Situation, in der das Minimum, das Maximum und der wahrscheinlichste Wert des Eintretens bekannt sind.

Beschreibung:

- Das Minimum a ist bekannt bzw. wird angegeben.
- Das Maximum b ist bekannt bzw. wird angegeben.
- Es handelt sich um eine stetige Verteilung (x nimmt stetige Werte an).
- Der wahrscheinlichste Wert (Modalwert H) fällt zwischen das Minimum und das Maximum. Eine Symmetrie (vgl. Normalverteilung) muss nicht zwingend vorliegen, allerdings sind Realisierungen in der Nähe vom Mittelwert wahrscheinlicher als nah am Minimum oder Maximum. Insbesondere

dere die Summe zweier gleichverteilter Zufallsvariablen ergibt eine symmetrische Dreiecksverteilung.

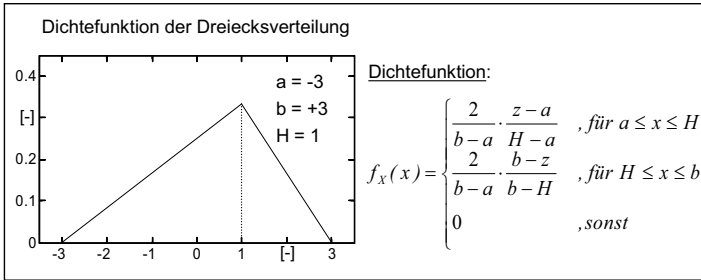


Abbildung 59: Dichtefunktion der Dreiecksverteilung

Binomialverteilung

Die Binomialverteilung beschreibt die Häufigkeit, in der ein bestimmtes Ereignis in einer festen Anzahl von Wiederholungen bzw. Versuchen eintritt, z.B. beim Werfen einer Münze.

Beschreibung:

- Für jeden Versuch sind zwei Ergebnisse möglich.
- Die Versuche sind unabhängig voneinander.
- Es handelt sich um eine diskrete Verteilung.
- Die Eintrittswahrscheinlichkeiten p und $q=1-p$ bleiben über alle Versuche hinweg konstant.

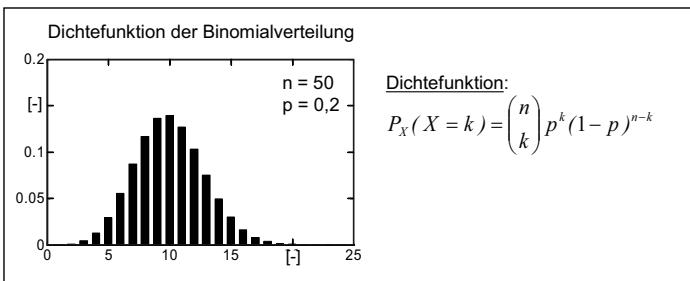


Abbildung 60: Dichtefunktion der Binomialverteilung

Poissonverteilung

Die Poissonverteilung beschreibt die Anzahl an Ereignissen in einem definierten Zeitintervall, z.B. die Anzahl von Telefonanrufen pro Minute oder die Anzahl von Isolationsfehlern bei Kupferdraht. Die Eintretenswahrscheinlichkeit des einzelnen Ereignisses ist gering, es sind sog. seltene Ereignisse.

Beschreibung:

- Die theoretisch mögliche Auftretensanzahl in einem Zeitintervall ist unbegrenzt.
- Das Auftreten einzelner Ereignisse ist unabhängig voneinander. Die Anzahl in einem Zeitintervall beeinflusst nicht die Anzahl in anderen Intervallen.
- Die durchschnittliche Anzahl bleibt über die einzelnen (gleich langen) Intervalle gleich groß.

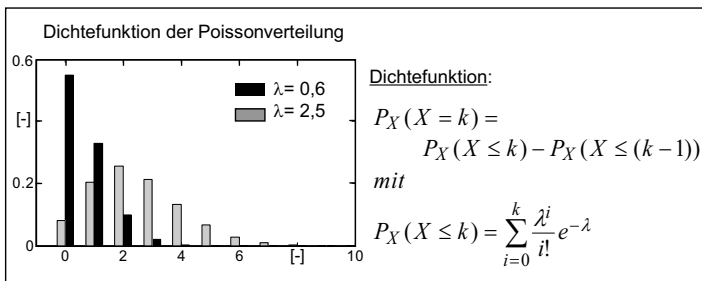


Abbildung 61: Dichtefunktion der Poissonverteilung

Lognormalverteilung

Die Lognormalverteilung wird oft genutzt, wenn eine positive Schiefe vorliegt. Die Werte sind nach unten durch Null beschränkt, können aber theoretisch unendlich groß sein.

Beschreibung:

- Die Zufallsvariable kann theoretisch unendlich große Werte annehmen, aber nicht unter Null fallen.
- Die Zufallsvariable ist rechtsschief, d.h. Werte kleiner als der Mittelwert sind häufiger zu beobachten als Werte größer als der Mittelwert.

- Der natürliche Logarithmus der Zufallsvariable ergibt eine Normalverteilung.

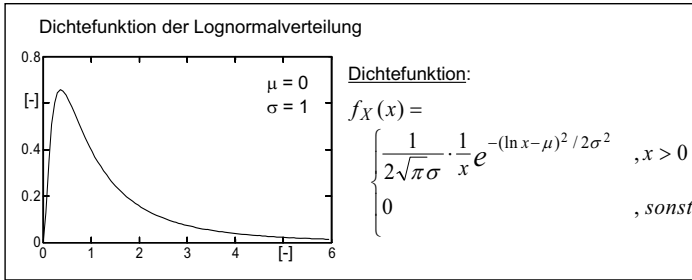


Abbildung 62: Dichtefunktion der Lognormalverteilung

10.2.2 Bestimmung von Konfidenzintervallen

Während der Erwartungswert als Parameter intuitiv verständlich ist, stellt die Volatilität bzw. Schwankung einer Unsicherheit eine schwer fassbare Größe dar. Einfacher ist es, nach der maximalen bzw. minimalen für möglich gehaltenen Ausprägung zu einem Zeitpunkt zu fragen. Diese Spannweite wird dann als *Konfidenzintervall* zu einem Niveau α (meistens 95%) angenommen, aus dem sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Verteilung der Schwankungsparameter ableiten lässt. Für die BM und die GBM ergeben sich beispielsweise:

$$\sigma = \frac{u_T^{\max} - u_0 - \sum_{t=1}^T \mu_t}{2\sqrt{T}}, \quad T = n\Delta t \tag{33}$$

$$\sigma = \frac{\ln\left(\frac{u_T^{\max}}{u_0}\right) - \sum_{t=1}^n v_t}{2\sqrt{T}}, \quad T = n\Delta t \tag{34}$$

- u_T^{\max} Schätzwert für die obere Grenze der Unsicherheit
- μ_t Drift der Unsicherheit zum Zeitpunkt t
- v_t Drift der Veränderungsrate der Unsicherheit zum Zeitpunkt t

Für den Random Walk ergibt sich das Konfidenzniveau aus der Kombination aus Schrittzahl (betrachteter Zeitraum), Wahrscheinlichkeit und Drift. Es gilt:

$$E(U_T) = np \tag{35}$$

$$u_T^{\max} = k \cdot \Delta x^+ \quad (36)$$

$$P(U_T \leq k) \stackrel{!}{\geq} \alpha \wedge P(U_T \leq k-1) \stackrel{!}{<} \alpha \quad (37)$$

$$U_T \sim \mathbf{B}(n, p) \quad (38)$$

- n Anzahl der Schritte bis T
 $\mathbf{B}(n, p)$ Binomialverteilung bei n -maliger Durchführung eines Experimentes mit Erfolgswahrscheinlichkeit p

Da $E(U_T)$ und k in (35) und (36) durch die Schätzungen festgelegt sind, müssen n und p gerade so aufeinander abgestimmt werden, dass (37) erfüllt und u_T^{\max} das Quantil zum Konfidenzniveau α ist. U_T folgt dabei der Binomialverteilung (38), die den Ausgang einer Folge von gleichartigen Versuchen mit jeweils zwei möglichen Ergebnissen ($\Delta x = \Delta x^+$ oder $\Delta x = \Delta x^-$) beschreibt. Für weitergehende Ausführungen dazu sowie zur Ermittlung der Parameter der einfachen Verteilungen wird auf Standardwerke der Statistik (z.B. HARTUNG ET AL. 1995) verwiesen.

10.3 Übersetzungen englischer Zitate

Abschnitt	Original	deutsche Übersetzung
1.1	„(...) <i>one has to conclude that the successful adoption of real option valuation critically depends on the use of simple, albeit inaccurate, techniques to gain the acceptance of top management</i> “ (BAECKER & HOMMEL 2004, S. 28)	(...) es ist zu folgern, dass die erfolgreiche Einführung der Realloptionsbewertung von der Nutzung einfacher, wenn auch ungenauer Methoden abhängt, mit denen sich die Akzeptanz durch das Top-Management erlangen lässt.
2.3	„ <i>For capital expenditures above \$10.000 - \$25.000 it is wise to consider the use of LCC</i> “ (BARRINGER 2003, S. 2).	Bei Investitionen über \$10.000 - \$25.000 ist es sinnvoll, die Lebenszykluskostenrechnung (LCC) zu verwenden.
2.3	„(...) <i>products (or systems) that are open. An open system is a system that evolves over time and changes with its environment</i> “ (EMBLEMSVÄG 2003, S. 24).	(...) offene Produkte (oder Systeme). Ein offenes System ist ein System, das sich über die Zeit entwickelt und dass sich mit seiner Umgebung verändert.
6.4.4.2	„(...) <i>the study of how uncertainty in the output of a model (numerical or otherwise) can be apportioned to different sources of uncertainty in the model input</i> “ (SALTELLI ET AL. 2004, S. 45)	(...) die Untersuchung, wie die Unsicherheit des Modellergebnisses (zahlenmäßig oder anderweitig) auf unterschiedliche unsichere Eingangsgrößen des Modells aufgeteilt werden kann.

Tabelle 16: Deutsche Übersetzung der in der Arbeit verwendeten englischen Zitate

10.4 Genannte Firmen

DaimlerChrysler Forschungszentrum

Wilhelm-Runge-Straße 11
89013 Ulm
<<http://www.daimlerchrysler.de>>

Decisioneering, Inc.

1515 Arapahoe St., Suite 1300
Denver, CO 80202
USA
<<http://www.decisioneering.com>>

Decisioneering Europe GmbH

Platz der Einheit 1
60327 Frankfurt
<<https://decisioneering.de>>

Microsoft Corporation

1 Microsoft Way
Redmond, WA 98052
USA
<<http://www.microsoft.com>>

Microsoft Deutschland GmbH

Konrad-Zuse-Straße 1
85716 Unterschleißheim
<<https://www.microsoft.de>>

Siemens AG

Wittelsbacherplatz 2
80333 München
<<http://www.siemens.de>>

10.5 Genutzte Softwareprodukte

Crystal Ball[®] 7.2.1

Monte-Carlo-Simulation
Decisioneering, Inc.

Microsoft Excel[®] 2002

Tabellenkalkulation
Microsoft Corporation

Microsoft Visual Basic[®] for Applications 6.0

Programmiersprache
Microsoft Corporation

PLANTCALC[®]

Software zur Bewertung in der Fabrikplanung
Siemens AG

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, J.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Grohe, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wiba, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschränkungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabaukastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schräfer, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von
Zubringeinrichtungen**
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer
Zellenrechnersoftware**
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56889-5
- 62 *Stetter, R.*
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dindorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender
Werkzeugmaschinen**
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-
Layoutoptimierung**
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur
Planung manueller Montagesysteme**
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen
Automatisierung von Produktionssystemen**
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
**Simulationsgestützte CAD/ICAM-Kopplung für die 3D-
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
**Automatische Inbetriebnahme
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von
Produktionssystemen**
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
**Rechnergestütztes Projektinformations- und
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
**Verfahren zur simulationsgestützten
Produktionsregelung in der Einzel- und
Kleinserienproduktion**
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer
flexiblen Fertigung**
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in
der Arbeitsvorbereitung**
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
**Strömungstechnische Optimierung von
Produktionssystemen durch Simulation**
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*
**Technologisches Prozeßmodell für die
Kugelschleifbearbeitung**
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanov, P.*
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von
Werkzeugmaschinen**
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen
Fertigungszellen**
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der
Hartbearbeitung**
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionszellen**
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung
und logistisches Störungsmanagement**
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
**Systematische Planung anwendungsspezifischer
Materialflußsteuerungen**
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in
Montageanlagen**
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Limmer, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
**Integrierte Planung von Informationssystemen für
rechnergestützte Produktionssysteme**
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deuschle, U.*
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in
mittelständischen Unternehmen**
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
 1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
 1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
 1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
 1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
 1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
 1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
 1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie
 1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
 1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
 1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischeltzrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
 1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
 1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
 1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
 1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
 1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
 1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krönert, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
 1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
 1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
 1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
 1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
 1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
 1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
 1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermeier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
 1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
 1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
 1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
 1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
 1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
 1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgleitete Planung von Laseranlagen
 1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten · ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ins Ziel**
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibel und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

- 47 **Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation**
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 **Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik**
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 **Mechatronik · Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen**
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 **Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten**
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 **Fabrikplanung 2004 · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen**
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 **Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen**
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 **Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik**
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 76 **Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapselfur zur aseptischen Ampulle**
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 **ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen**
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 **Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen**
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 **Produktionsmanagement**
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 **Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche**
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 **Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder**
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 **Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement**
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 **Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen**
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 **Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?**
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 **3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau**
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 **Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung**
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 **Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand**
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 **Mechatronik · Vorsprung durch Simulation**
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 **RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten**
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

Forschungsberichte iw b

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Forschungsberichte iw b ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 122 Schneider, Burghard
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößner, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnernverbänden
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
 2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
 2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
 2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
 2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
 2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
 2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
 2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
 2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian
Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
 2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
 2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich
Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
 2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof
Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
 2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
 2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Hohn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
 2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
 2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
 2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
 2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
 2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fahrer
Ganzeitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner
Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte
Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger
Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob
Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel
Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
 2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun
Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
 2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen
Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer
Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen
Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton
Ein Beitrag zur Entwicklung telepräseneter Montagesysteme
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser
Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitinge
Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling
Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch
Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
 2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein
Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak
Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr
Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber
Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt
Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer
Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger
Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl
Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch
Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl
Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek
Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer
Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke
Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried
Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner
Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich
Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl
Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann
Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp
Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz
Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner
Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein
Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren
Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf
Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch
Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer
Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack
Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff
Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller
Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler
Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickerieder
Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller
Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl
Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen
2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge
Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wunsch
Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli
Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
2008 · 184 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3

