

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik

**Bewertung kundenspezifischer
Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz**

Johannes Hendrik Schellmann

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. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Technische Universität Darmstadt

Die Dissertation wurde am 20.10.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 13.02.2012 angenommen.

Hendrik Schellmann

**Bewertung kundenspezifischer
Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 260

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2012

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 · 2012

ISBN 978-3-8316-4189-5

Printed in EU
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.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.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

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

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, dem Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich herzlich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich Saskia Reinhardt, Jörg Egbers und Christian Thiemann, die meine Dissertation mit kritischem Auge durchgesehen haben und mir viele konstruktive Ratschläge geben konnten, wodurch sich die Arbeit qualitativ abrunden ließ. Mein ausdrücklicher Dank gilt auch Sebastian Schindler für vielfältige fachliche Diskussionen, in denen ich zahlreiche Ideen entwickeln konnte. Außerdem danke ich Erika Hetherington, Christian Albertshofer, Florian Geiger, Nils Niederkleine und Thomas Sailer, die mich im Rahmen von Studienarbeiten bei der Umsetzung der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Methode in ein MATLAB-Simulationsmodell unterstützt und mich dabei auf etliche neue Gedanken gebracht haben.

Schließlich gilt mein besonderer Dank meinen Eltern, meinen Geschwistern und Adelheid Eysholdt, die durch ihre immerwährende Unterstützung wesentlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben.

München, im April 2012

Hendrik Schellmann

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	V
Formelzeichenverzeichnis	VII
Lateinische Buchstaben	VII
Griechische Buchstaben	XI
1 Einführung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen und Stand der Forschung	7
2.1 Kapitelüberblick	7
2.2 Begriffsdefinitionen	7
2.2.1 Allgemeine Definitionen	7
2.2.2 Flexibilität	10
2.2.3 Spezielle Flexibilitätsarten	13
2.3 Flexibilität in Wertschöpfungsnetzen	15
2.3.1 Charakterisierung von Lieferketten und Wertschöpfungsnetzen	15
2.3.2 Allgemeines zu Flexibilitätskonzepten	17
2.3.3 Arten des Flexibilitätsbedarfs im Wertschöpfungsnetz	17
2.3.4 Beherrschung von Bedarfsmengenschwankungen	19
2.4 Flexibilitätsvereinbarungen in Kunden-Lieferanten-Beziehungen	21
2.4.1 Zwecke und Arten von Rahmenverträgen	21
2.4.2 Vertragskonzept zur Mengenflexibilität	23
2.4.3 Preismodelle bei Mengenbedarfsschwankungen	27
2.5 Gestaltungsfaktoren zur Erzielung von Mengenflexibilität	29
2.5.1 Systematisierungsansatz	29
2.5.2 Kapazität als zentraler Einflussfaktor der Mengenflexibilität	30

2.5.3	Weitere Einflussfaktoren auf die Mengenflexibilität	33
2.6	Bewertung von Flexibilitätsbedarf und -angebot	37
2.6.1	Grundlagen zur Bewertung von Flexibilität	37
2.6.2	Bestimmung des kundenseitigen Mengenflexibilitätsbedarfs	38
2.6.3	Darstellung des lieferantenseitigen Mengenflexibilitätsangebots	41
2.6.4	Gestaltungsorientierte Bewertung der Mengenflexibilität	45
2.7	Flexibilitätsaspekte in betrieblichen Planungssystemen	49
2.8	Zusammenfassung und Handlungsbedarf	52
3	Konzeption der Methode zur Ermittlung kundenspezifischer Mengenflexibilität	55
3.1	Kapitelüberblick	55
3.2	Anforderungen an die Methode	55
3.3	Diskussion zu betrachtender Flexibilitätsfaktoren	58
3.4	Betrachtungsumfang	62
3.4.1	Abgrenzung der Unternehmenstypologie	62
3.4.2	Abgrenzung des betrachteten Systems	64
3.5	Referenzmodell zur Mengenflexibilitätsbewertung	66
3.5.1	Formulierung des Referenzmodells aus Bedarfssicht	66
3.5.2	Deutung des Referenzmodells aus Angebotssicht	70
3.6	Bewertungskonzept	72
3.6.1	Auswahl der Berechnungsmethode	72
3.6.2	Konzept des Simulationsablaufs	76
3.6.3	Methodisches Vorgehen zur Bewertung	78
3.7	Annahmen und Vereinfachungen in der Modellwelt	80
4	Detaillierung der Methode	83
4.1	Kapitelüberblick	83
4.2	Systemmodellierung	83
4.2.1	Vorbemerkung	83

4.2.2	Modellierung eines Kunden mit seinem spezifischen Produkt	84
4.2.3	Modellierung eines Lieferanten mit seinem jeweiligen Material	90
4.2.4	Modellierung von Arbeitssystemen	91
4.3	Berechnungsschritte während der Simulation	95
4.3.1	Übersicht über die Funktionen des Berechnungsmodells	95
4.3.2	Prognoseaktualisierung	96
4.3.3	Materialbedarfsplanung	97
4.3.4	Kapazitätsangebotsermittlung	103
4.3.5	Kapazitätsabgleich	108
4.3.6	Kapazitätsanpassung	116
4.3.7	Flexibilitätsauswertung	122
4.4	Auswertung der Simulationsergebnisse	131
4.4.1	Ermittlung der Flexibilitätsgrenzen	131
4.4.2	Auswertung der Flexibilitätskosten	134
4.4.3	Interpretation der Ergebnisse	136
5	Beispielhaftes Anwendungsszenario	139
5.1	Kapitelüberblick	139
5.2	Betrachtungsrahmen	139
5.2.1	Beschreibung des Modellunternehmens	139
5.2.2	Allgemeine Parameter	140
5.2.3	Bestimmung der Produktparameter	141
5.2.4	Bestimmung der Materialparameter	143
5.2.5	Bestimmung der Arbeitssystemparameter	144
5.3	Ergebnisse und Interpretation	147
5.4	Bewertung der Methode	151
6	Zusammenfassung und Ausblick	157
7	Literaturverzeichnis	161
8	Abbildungsverzeichnis	177

9 Tabellenverzeichnis	181
10 Anhang	183
Algorithmus zur Maßnahmenauswahl	183

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
bzw.	beziehungsweise
d. h.	das heißt
ERP	Enterprise Resource Planning
f./ff.	und folgende (Singular/Plural)
ggf.	gegebenenfalls
Gl.	Gleichung
JIT	Just in Time
OR	Operations Research
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
S.	Seite
SC	Supply Chain
SCM	Supply Chain Management
W'keit	Wahrscheinlichkeit
z. B.	zum Beispiel

Formelzeichenverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Variable	Bedeutung
a	Index zur Bezeichnung der betrachteten Kapazitätsanpassungsmaßnahme
A_n^{min}	Mindestauslastungsgrad im Arbeitssystem n
\mathcal{A}_n	Menge der Kapazitätsanpassungsmaßnahmen im Arbeitssystem n
$b_{k,l}$	Abhängigkeitsbeziehung zwischen zwei Kapazitätsanpassungsmaßnahmen $k, l \in \mathcal{A}_n$
$c_{p,j}(t)$	Stückkosten von p in Planungsperiode j
$\tilde{c}_{n,j}(t)$	anfallende Kosten pro genutzter Kapazitätseinheit im Arbeitssystem n in Planungsperiode j
$\Delta c_{p,j}(\varepsilon, t)$	Differenz der Stückkosten von p bei einer Änderung der Produktionsmenge um ε in Planungsperiode j
$\Delta \bar{c}_{p,j}(\varepsilon)$	mittlere Differenz der Stückkosten von p bei einer Bestellmengenänderung von ε innerhalb von Planungsperiode j
$\Delta \bar{c}_{p,\varepsilon}(j)$	mittlere Differenz der Stückkosten von p bei einer Bestellmengenänderung von ε innerhalb von Planungsperiode j
C_a^{akt}	einmalig pro Maßnahmeneinsatz anfallende Aktivierungskosten der Maßnahme a
C_a^{lauf}	in jeder Periode der Nutzungszeit anfallende laufende Kosten der Maßnahme a
C_n^G	Kosten der Grundkapazität
$C_{n,j}(t)$	im Arbeitssystem n in Planungsperiode j anfallende Kosten
$C_{p,j}^K(t)$	auf die geplante Produktionsmenge $X_{p,j}(t)$ anteilmäßig entfallende Kapazitätskosten
$\Delta C^K(\varepsilon)$	Differenz der Kapazitätskosten durch eine Mengenänderung um ε

Variable	Bedeutung
e	Index zur Bezeichnung des Simulationsszenarios
E	Anzahl der Simulationsszenarien in der Menge \mathcal{E}
\mathcal{E}	Menge der Simulationsszenarien
$G(X_p)$	Preisfunktion eines Produkts in Abhängigkeit der Bestellmenge X_p
$\bar{G}(W)$	durchschnittlicher Produktpreis in Abhängigkeit der Bestellmengenverteilung W
i	Index zur Bezeichnung der Prozessalternative
i_p^*	effizienteste Prozessalternative zu Herstellung von Produkt p
I_p	Zahl der verfügbaren Produktionsrouten für Produkt p
J_p	Menge der Prozessalternativen für Produkt p
j	Index zur Bezeichnung der betrachteten Planungsperiode
K_n^G	Grundkapazität des Arbeitssystems n
$K_{n,j}(t)$	Kapazitätsbedarf im Arbeitssystem n in der Planungsperiode j
$K_{n,j}^{Plan}(t)$	Plankapazität von Arbeitssystem n in Planungsperiode j
$K_{n,j}^{max}(t)$	maximale Kapazität von Arbeitssystem n in Planungsperiode j
$K_{n,j}^{min}(t)$	minimale Kapazität im Arbeitssystem n in Planungsperiode j
$K_{n,j}^{min,w}(t)$	aus Wirtschaftlichkeitssicht minimal auszulastende Kapazität im Arbeitssystem n in Planungsperiode j
ΔK_a	Kapazitätsbeitrag der Maßnahme a pro Periode
$\Delta K_{n,j}^+(t)$	mögliche Kapazitätserhöhung im Arbeitssystem n in Planungsperiode j
$\Delta K_{n,j}^-(t)$	mögliche Kapazitätsreduzierung im Arbeitssystem n in Planungsperiode j
$\vec{I}_m(t)$	Lagerbestandsvektor für Material m
$L_{m,0}(t)$	aktueller Lagerbestand zum Zeitpunkt t

Variable	Bedeutung
$L_{m,j}(t)$	geplanter Lagerbestand am Ende von Planungsperiode j
m	Index zur Bezeichnung des betrachteten Materials
M	Anzahl der Materialien in der Menge \mathcal{M}
M^{Plan}	Strafkoeffizient für Fehlkapazität gegenüber Plankapazität
M^{max}	Strafkoeffizient für Fehlkapazität gegenüber maximaler Kapazität
\mathcal{M}	Menge der Materialien
n	Index zur Bezeichnung des betrachteten Arbeitssystems
N	Anzahl der Arbeitssysteme in der Menge \mathcal{N}
\mathcal{N}	Menge der Arbeitssysteme
p	Index zur Bezeichnung des betrachteten Produkts
p^*	im Rahmen der Bewertung zu betrachtendes Produkt
\mathcal{P}	Anzahl Elemente in der Menge \mathcal{P}
\mathcal{P}	Menge der Produkte
$R_{n,j}^{max}(t)$	Fehlkapazität gegenüber maximaler Kapazität im Arbeitssystem n in Planungsperiode j
$R_{n,j}^{Plan}(t)$	Fehlkapazität gegenüber Plankapazität im Arbeitssystem n in Planungsperiode j
t	Betrachtungszeitpunkt
T	Anzahl an Planungsperioden im Planungshorizont
t_a^{akt}	Aktivierungszeit der Maßnahme a
$t_a^{ND,max}$	maximale Nutzungsdauer der Maßnahme a
$t_a^{ND,min}$	minimale Nutzungsdauer der Maßnahme a
t_a^{ND}	geplante Nutzungsdauer der Maßnahme a
t_a^{reg}	Regenerationszeit der Maßnahme a

Variable	Bedeutung
U	Anzahl der Perioden im Untersuchungszeitraum
W	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Bestellmengenschwankung
X_p	Bestellmenge des Produkts p
\bar{X}_p	mittlere Bestellmenge des Produkts p
$X_p^{Prog}(t)$	Bedarfsprognose für Produkt p zum Zeitpunkt t
$X_p^{Trend}(t)$	Trendkomponente des Bedarfs von Produkt p
$X_p^{Sais}(t)$	saisonale Komponente des Bedarfs von Produkt p
$X_p^{irr}(t)$	irreguläre Komponente des Bedarfs von Produkt p
$\vec{X}_p(t)$	Mengenbedarfsvektor für Produkt p zum Zeitpunkt t
$X_{p,j}(t)$	(prognostizierte) Bestellmenge von Produkt p für den Lieferzeitpunkt $t + j$
$\vec{X}_{p,j}(t)$	Vektor zur Aufteilung des Mengendbedarfs auf die Produktionsrouten für Produkt p in Planungsperiode j
$X_{p,j,i}(t)$	Menge von p , die in Planungsperiode j über Route i hergestellt wird
$\Delta X_{p,j,m}^+(t)$	mögliche Ausbringungsmengenerhöhung von p in Planungsperiode j aufgrund von Material m
$\Delta X_{p,j,m}^-(t)$	mögliche Ausbringungsmengenreduzierung von p in Planungsperiode j aufgrund von Material m
$\Delta X_{p,j,n}^+(t)$	mögliche Ausbringungsmengenerhöhung von p in Planungsperiode j aufgrund von Arbeitssystem n
$\Delta X_{p,j,n}^-(t)$	mögliche Ausbringungsmengenreduzierung von p in Planungsperiode j aufgrund von Arbeitssystem n
$Y_{m,j}(t)$	Bestellmenge von Material m für Planungsperiode j
$Y_{m,j}^*(t)$	vorläufige Bestellmenge von Material m für Planungsperiode j
$Y_{m,j}^B(t)$	Bruttobedarf an Material m für Planungsperiode j

Variable	Bedeutung
$Y_{m,j}^{max}(t)$	maximale Bestellmenge von Material m für Planungsperiode j
$Y_{m,j}^{min}(t)$	Mindestbestellmenge von Material m für Planungsperiode j
$\Delta Y_{m,j}^+(t)$	zulässige Bestellmengenerhöhung von Material m für Planungsperiode j
$\Delta Y_{m,j}^-(t)$	zulässige Bestellmengenreduzierung von Material m für Planungsperiode j
Z	Zielfunktion der Routenauswahl

Griechische Buchstaben

Variable	Bedeutung
$\vec{\alpha}_m$	Flexibilitätsvektor zur Definition der zulässigen Erhöhung der Bestellmenge von Material m
$\alpha_{m,j}$	zulässige Erhöhung der Bestellmenge von Material m für Planungsperiode j
$\vec{\alpha}_p$	Flexibilitätsvektor zur Definition der zulässigen Erhöhung der Bedarfsmenge von p in absoluten Stückzahlen
$\alpha_{p,j}$	mögliche Erhöhung der Bestellmenge von p innerhalb von Planungsperiode j in absoluten Stückzahlen
$\alpha_{p,j}^r$	resultierender relativer Faktor der maximal zulässigen Erhöhung von Bestellmenge $X_{p,j}(t)$ bis zum Lieferzeitpunkt $t + j$
$\alpha_{p,j}^{r*}$	relativer Faktor der maximal zulässigen Erhöhung von Bestellmenge $X_{p,j}(t)$ bis zum Zeitpunkt $t + 1$
γ	Menge an Material, die in der Planungsperiode $j - v$ zusätzlich geliefert werden kann
δ	Differenzbetrag zwischen vorläufiger und maximaler Bestellmenge eines Materials
ε	Bestellmengenänderung von $X_{p,j-1}(t + 1)$ gegenüber $X_{p,j}(t)$

Variable	Bedeutung
$\Delta \varepsilon$	Schrittweite der Mengenanpassung zur Ermittlung der Stückkostenveränderung
$\vec{\kappa}_{p,i}$	Kapazitätsbedarfsvektor von Produkt p bei Prozessalternative i
$\kappa_{p,i,n}$	spezifischer Kapazitätsbedarf von Produkt p in Arbeitssystem n bei Prozessalternative i
λ	Sicherheitsniveau zur Bestimmung der Flexibilitätskorridore
$\vec{\mu}_p$	Materialbedarfsvektor des Produkts p
$\mu_{p,m}$	Bedarf an Material m für ein Stück des Produkts p
ν	Periodenzahl, um die die Bestellung des Differenzbetrags δ vorgezogen wird
ξ_j	Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten zur Routenaufteilung in Planungsperiode j
$\vec{\sigma}_p$	Schwankungsvektor der Bestellmengenanpassung von Kunde p
σ_p^{irr}	Standardabweichung der irregulären Komponente des Bedarfs von Produkt p
$\sigma_{p,j}$	Standardabweichung einer Bestellmengenanpassung von p innerhalb von Planungsperiode j
$\vec{\tau}_p$	Wahrscheinlichkeitsvektor für Bestellmengenanpassungen von Kunde p
$\tau_{p,j}$	Wahrscheinlichkeit einer Bestellmengenanpassung von Kunde p innerhalb von Planungsperiode j
$\varphi_{p,j}^+(t)$	mögliche Mengenerhöhung von Produkt p in Planungsperiode j
$\varphi_{p,j}^-(t)$	mögliche Mengenreduzierung von Produkt p in Planungsperiode j
$\vec{\omega}_m$	Flexibilitätsvektor zur Definition der zulässigen Reduzierung der Bestellmenge von Material m
$\omega_{m,j}$	zulässige Reduzierung der Bestellmenge von Material m für Planungsperiode j

Variable	Bedeutung
$\vec{\omega}_p$	Flexibilitätsvektor zur Definition der zulässigen Reduzierung der Bedarfsmenge von p in absoluten Stückzahlen
$\omega_{p,j}$	mögliche Reduzierung der Bestellmenge von p innerhalb von Planungsperiode j in absoluten Stückzahlen
$\omega_{p,j}^{r*}$	relativer Faktor der maximal zulässigen Verringerung von Bestellmenge $X_{p,j}(t)$ bis zum Zeitpunkt $t + 1$
$\omega_{p,j}^r$	resultierender relativer Faktor der maximal zulässigen Verringerung von Bestellmenge $X_{p,j}(t)$ bis zum Lieferzeitpunkt $t + j$

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation

Das wirtschaftliche Umfeld produzierender Unternehmen wandelt sich laufend. Unter dem Einfluss von Megatrends wie der Globalisierung, dem Aufkommen neuer Technologien in immer geringeren Zeitabständen, der stetigen Verkürzung von Produktlebenszyklen sowie einer zunehmenden Zahl individueller Produktvarianten nimmt die Stabilität von Rahmenbedingungen der Produktion ab. Die Unternehmen müssen sich infolge dessen immer kurzfristiger an neue Gegebenheiten anpassen (ABELE & REINHART 2011 S. 10 ff.). Die geringere Stabilität äußert sich insbesondere in kurzfristigen Änderungen von Spezifikationen der an den Märkten nachgefragten Produkte, in wechselnden Wettbewerbssituationen oder in stark schwankenden Absatzzahlen (WIENDAHL 2002). Dieser als turbulentes Unternehmensumfeld bezeichnete Sachverhalt stellt eine zentrale Herausforderung für die Unternehmen dar (WESTKÄMPER ET AL. 2000).

Flexibilität gilt als entscheidender Wettbewerbsfaktor von produzierenden Unternehmen, um im turbulenten Umfeld bestehen zu können (vgl. JACOB 1990, GROOTE 1994, KALUZA ET AL. 2005, CHRYSOLOURIS 2006, DIDEKHANI ET AL. 2009). Besonders für Unternehmen aus den traditionellen Industrienationen ist es entscheidend, trotz Produktvielfalt und komplexer Produktionsprozesse eine hohe Effizienz in der Produktion zu erzielen und damit ihre Produktionsressourcen bestmöglich auszulasten, da sie nicht auf den Vorteil eines niedrigen Lohnniveaus setzen können. Flexibilität, die in erster Linie dazu dient, ein System schnell und ohne zusätzliche Investitionen an sich ändernde Anforderungen anzupassen (NYHUIS ET AL. 2008A), ist eine wesentliche Voraussetzung, um dies zu realisieren. Die Flexibilität ist daher schon seit mindestens drei Jahrzehnten Untersuchungsgegenstand der produktionswissenschaftlichen Forschung (vgl. SLACK 1983, BROWNE ET AL. 1984, SETHI & SETHI 1990, SHEWCHUK & MOODIE 1998, TONI & TONCHIA 1998, BEACH ET AL. 2000, KALUZA 2007, ABELE ET AL. 2010).

Schon früh wurde dabei erkannt, dass Flexibilität ein sehr vielschichtiger und kaum umfassend zu durchdringender Begriff ist (SETHI & SETHI 1990). Dementsprechend wurden in Wissenschaft und Praxis zahlreiche Flexibilitätskonzepte und -modelle entwickelt, die kaum in einen systematischen Gesamtzusammenhang zu bringen sind. Dies ist einer der Gründe dafür, dass eine zielgerichtete Anwendung von Flexibilitätskonzepten in der Praxis häufig schwer fällt (DAS 1996, SHEWCHUK &

MOODIE 1998). Eine weitere Ursache ist in dem nach wie vor bestehenden Problem zu sehen, die in einem Unternehmen vorhandene sowie benötigte Flexibilität zu bestimmen und quantitativ zu bemessen (CHRYSSOLOURIS 2006 S. 23). Der Bedarf nach sowie das Angebot an Flexibilität können jedoch nur durch eine geeignete methodische Unterstützung zur Bewertung von Flexibilität in Einklang gebracht werden (GERWIN 1987).

Flexibilität beschränkt sich nicht nur auf unternehmensinterne Anwendungsbereiche. Da für die Herstellung der meisten Produkte Lieferketten bestehen, die zahlreiche Unternehmen umfassen (SIMCHI-LEVI ET AL. 2003 S. 1), ist auch eine Abstimmung von Flexibilität zwischen den Unternehmen dieser Lieferketten notwendig. Dies geschieht in der Regel durch Rahmenverträge, die zwischen den Unternehmen auf bilateraler Ebene abgeschlossen werden (ILIEV 2007). Um solche Rahmenverträge rechtlich bindend und durchsetzbar zu gestalten, ist eine Nachvollziehbarkeit der Grenzen der darin vereinbarten Flexibilität unabdingbar. Für beide Vertragspartner ist es jedoch auch geboten sicherzustellen, dass die ausgehandelten Vertragsinhalte auch wirtschaftlich sinnvoll sind, damit ihr Geschäftserfolg nicht negativ beeinträchtigt wird: Der Kunde sollte nicht mehr Flexibilität fordern als unbedingt notwendig, da mit einer höheren Flexibilität auch meist höhere Kosten einhergehen. Der Lieferant hingegen muss die Erfüllbarkeit der geforderten Flexibilität absichern, ohne die Wirtschaftlichkeit seiner Produktion zu gefährden. Dies erfordert quantitative Bewertungsverfahren sowohl für den Flexibilitätsbedarf des Kunden, als auch für das Flexibilitätsangebot des Lieferanten.

Ein zentraler Aspekt der Flexibilität, der meist in Rahmenverträgen geregelt wird, ist die Mengenflexibilität, die ein lieferndes Unternehmen seinem Kunden bei der regelmäßigen Bestellung von Produkten einräumt (ILIEV 2007 S. 31 ff., MÜLLER 2011 S. 87 ff.). Häufig steckt dahinter implizit die Frage, welcher der beiden Vertragspartner Sicherheitsbestände vorhalten und für die Bestandskosten aufkommen muss. Bei einer zunehmenden Zahl von Produktvarianten und teilweise kundenindividuellen Gestaltungsmerkmalen rückt diese Frage jedoch in den Hintergrund, da eine Bevorratung solcher Produkte schlichtweg nicht mehr wirtschaftlich oder gar unmöglich ist. Hier ist vielmehr die Mengenflexibilität gefragt, die aufgrund der Konfiguration von Produktionssystem und -prozessen des liefernden Unternehmens bereitgestellt werden kann.

1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht in der Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Mengenflexibilität, die ein produzierendes Unternehmen einem bestimmten Kunden bei der Bestellung der von ihm nachgefragten Produkte zusichern kann. Dabei sollen lieferantenseitig technische, organisatorische und wirtschaftliche Restriktionen berücksichtigt werden. Weil die meisten Unternehmen nicht nur einen einzelnen Kunden beliefern, sondern mehrere verschiedene Produkte für unterschiedliche Kunden herstellen, sind sie in entsprechend viele Lieferketten involviert, die sich zu einem sogenannten Wertschöpfungsnetz verflechten (LÖDDING 2008 S. 108). Die Randbedingungen, die sich aus den Beziehungen im Wertschöpfungsnetz ergeben, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit ebenfalls untersucht und in die Bewertungsmethode einbezogen. Als wesentliche Randbedingung sei hier angeführt, dass sich Bedarfsschwankungen weiterer Kunden auf die Mengenflexibilität auswirken können, die ein zu betrachtender Kunde in Anspruch nehmen kann.

Als Grundlage der Bewertung wird angenommen, dass sich für einen Kunden im Wertschöpfungsnetz ein Mengenflexibilitätsprofil bestimmen lässt (vgl. Abbildung 1), das die Mengenänderungen definiert, die ihm zu verschiedenen Planungszeitpunkten zur Verfügung stehen (REINHART ET AL. 2008C). Dieses Konzept, das auch bestimmten Rahmenvertragsmodellen zugrunde liegt (vgl. z. B. TSAY & LOVEJOY 1999), geht von der Annahme aus, dass der Kunde bereits frühzeitig eine erste Bestellmengenprognose an das liefernde Unternehmen übermittelt. Im Rahmen einer rollierenden Planung wird diese Prognose regelmäßig aktualisiert und immer weiter verfeinert bis sie sich schließlich auf den tatsächlichen Bedarf zum Liefertermin einpendelt. Dabei dürfen sich die Bestellmengenanpassungen nur innerhalb definierter Mengenflexibilitätskorridore abspielen, die für verschiedene Zeiträume vor dem Liefertermin festgelegt sind. Die Korridorbreite bestimmt dabei jeweils den Stückzahlbereich, innerhalb dessen eine Mengenanpassung stattfinden darf. Dadurch wird gewährleistet, dass das liefernde Unternehmen die gewünschte Mengenanpassung in der verbleibenden Zeit auch realisieren kann. Je kürzer die verbleibende Zeit bis zum Liefertermin ist, desto schmaler fallen die Mengenflexibilitätskorridore in der Regel aus, da davon ausgegangen werden kann, dass die realisierbaren Mengenschwankungen kurzfristig geringer sind als längerfristig. Die Gesamtheit der Mengenflexibilitätskorridore wird in der vorliegenden Arbeit als Mengenflexibilitätsprofil bezeichnet. Der Zeitraum, für den die Mengenflexibilitätskorridore definiert sind, wird zur weiteren Strukturierung in mehrere Planungsperioden (z. B. Wochen) unterteilt.

Abbildung 1 zeigt einen möglichen Verlauf der Bestellmengenanpassung für einen einzelnen Liefertermin. Die grauen Felder deuten dabei die verfügbaren Mengenflexibilitätskorridore an. Ihre vertikale Lage orientiert sich stets an der Prognose, die zu Beginn der für den Korridor jeweils maßgeblichen Planungsperiode vorliegt. In dieser Darstellung wurden beispielhaft acht Planungsperioden zugrunde gelegt.

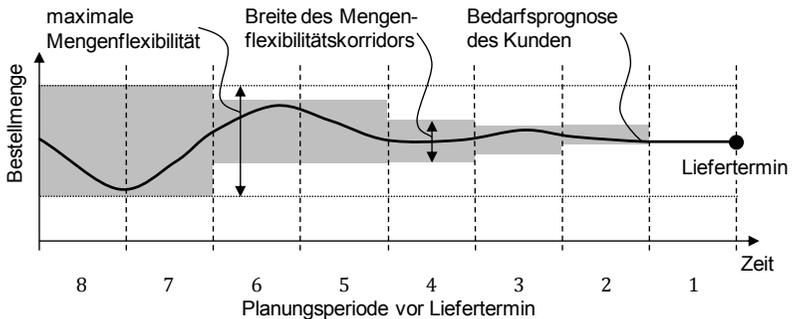


Abbildung 1: Mengenflexibilitätskorridore bei einer rollierenden Planung der Bestellmenge

Die entscheidenden Fragen, die sich ein lieferndes Unternehmen stellen muss, bevor es ein derartiges Mengenflexibilitätsprofil mit einem Kunden vereinbart, werden nachfolgend aufgeführt. Sie stehen auch bei der Erarbeitung der Bewertungsmethode in der vorliegenden Arbeit im Vordergrund:

Welche Mengenflexibilität kann in den verschiedenen Planungsperioden aus technisch-organisatorischer Sicht bereitgestellt werden?

Mit welchen Stückkostenveränderungen für das Produkt ist bei der Inanspruchnahme der Mengenflexibilität zu rechnen?

Konkret bedeutet die erste Frage, wie breit die Flexibilitätskorridore in den einzelnen Planungsperioden sein können, ohne dass das liefernde Unternehmen Gefahr läuft, Anforderungen des Kunden nicht erfüllen zu können. Bei der zweiten Frage hingegen tritt die Überlegung in den Vordergrund, ob die Erfüllung für das liefernde Unternehmen auch stets wirtschaftlich ist. Beide Faktoren können in vielfältiger Art und Weise in die Gestaltung von Flexibilitätsvereinbarungen aufgenommen werden. Neben einer reinen Festlegung der vertraglich zugesicherten Mengen-

flexibilität können beispielsweise auch Anhaltspunkte für Preismodelle abgeleitet werden, die den Preis in Abhängigkeit der in Anspruch genommenen Flexibilität berechnen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist folgendermaßen gegliedert (vgl. auch Abbildung 2): Im Anschluss an diese Einführung werden in Kapitel 2 Grundlagen und Forschungsstand zur Vereinbarung, Nutzung und Bewertung von Flexibilität im Allgemeinen und Mengenflexibilität im Besonderen dargelegt. Nach einigen fundamentalen Definitionen in Abschnitt 2.2 folgen in 2.3 Ausführungen über die Arten von Flexibilitätsbedarf, die in Lieferketten und Wertschöpfungsnetzen vorherrschen. Abschnitt 2.4 geht auf Rahmenvertragsmodelle ein, in denen solche Flexibilitätsaspekte vereinbart werden, und stellt insbesondere ein Vertragskonzept zur Mengenflexibilität vor, das im Weiteren zur Konkretisierung des in 1.2 vorgestellten Mengenflexibilitätsprofils dient. Die inner- und überbetriebliche Gestaltung mengenflexibler Produktionssysteme als Grundlage für die Bewertung wird in 2.5, bestehende Ansätze zur Bewertung von Mengenflexibilität werden in Abschnitt 2.6 erläutert. Schließlich wird in Abschnitt 2.7 darauf eingegangen, inwiefern Flexibilitätsaspekte bereits in gängigen Softwaresystemen zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) implementiert sind, bevor der Handlungsbedarf in 2.8 aufgezeigt wird.

In Kapitel 3 wird das Konzept für die Bewertungsmethode erarbeitet. Ausgehend von Anforderungen an die Methode (3.2) wird in 3.3 diskutiert, welche Einflussfaktoren auf die Mengenflexibilität in die Bewertung einzubeziehen sind. In 3.4 wird eine Abgrenzung des Betrachtungsumfangs vorgenommen. Der Bewertung wird nachfolgend in 3.5 ein Referenzmodell zugrunde gelegt, das das bereits erläuterte Konzept eines Mengenflexibilitätsprofils konkretisiert und den Aspekt der Stückkostenveränderung integriert. Darauf aufbauend wird das grundlegende Bewertungskonzept in Abschnitt 3.6 erarbeitet, das eine Simulation verschiedener Szenarien zur Auswertung der bestehenden Mengenflexibilität beinhaltet. Das Kapitel schließt mit Annahmen und Vereinfachungen, die für die nachfolgende Modellierung getroffen werden (3.7).

In Kapitel 4 wird das Bewertungsvorgehen detailliert. Dafür wird zunächst in 4.2 auf die Modellierung der einzelnen Elemente des zu betrachtenden Systems eingegangen. Abschnitt 4.3 erklärt die einzelnen Berechnungsschritte der Simulation

und deren datentechnische Verknüpfungen. Schließlich folgen Erläuterungen zur Auswertung und Interpretation der Simulationsergebnisse (4.4).

In Kapitel 5 wird die Bewertungsmethode anhand eines beispielhaften Anwendungsszenarios überprüft und veranschaulicht. Abschnitt 5.4 bewertet abschließend Aufwand und Nutzen der Methode.

Kapitel 6 fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten, die für den Praxiseinsatz bzw. die Weiterentwicklung der Methode durchzuführen sind. Die folgende Abbildung 2 stellt die Inhalte der vorliegenden Arbeit übersichtlich dar.

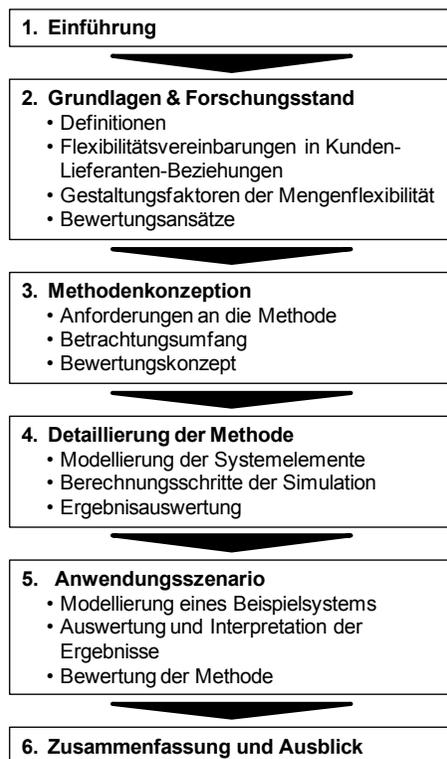


Abbildung 2: Struktur der vorliegenden Arbeit

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Kapitelüberblick

In diesem Kapitel wird ein grundlegender Kenntnisstand für die in der vorliegenden Arbeit behandelte Thematik vermittelt. Dafür werden zunächst zentrale Begriffe definiert, um ein einheitliches Verständnis zu schaffen (2.2).

In Abschnitt 2.3 folgt eine allgemeine Schilderung der Situation in Lieferketten und Wertschöpfungsnetzen und eine Konkretisierung von Flexibilitätsaspekten, die in diesen Wertschöpfungsstrukturen von Bedeutung sind. Daran anschließend wird in 2.4 auf Rahmenvertragsmodelle eingegangen, mit denen entsprechende Flexibilitätsaspekte in einer Kunden-Lieferanten-Beziehung vereinbart werden können.

Als Grundlagen für die Bewertung von Mengenflexibilität werden in Abschnitt 2.5 Möglichkeiten zur Erzielung von Mengenflexibilität in der Produktion aus inner- und überbetrieblicher Sicht erläutert. Darauf aufbauend erfolgt eine Diskussion bestehender Ansätze zur Bewertung von Mengenflexibilität bzw. verwandter Sachverhalte (2.6). Abschnitt 2.7 geht auf die Berücksichtigung von Aspekten der Mengenflexibilität in gängigen Datenverarbeitungssystemen zur betrieblichen Planung ein. In Abschnitt 2.8 wird der Handlungsbedarf aufgezeigt.

2.2 Begriffsdefinitionen

2.2.1 Allgemeine Definitionen

Produktionssystem

Unter einem *Produktionssystem* wird in der vorliegenden Arbeit ein soziotechnisches System verstanden, dessen Aufgabe es ist, aus einem gegebenen Input im Rahmen wertschöpfender und assoziierter Prozesse End- oder Zwischenprodukte zu erstellen (NYHUIS ET AL. 2008A S. 85). Zu einem Produktionssystem gehören somit die für Bearbeitung, Transport, Lagerung und Handhabung notwendigen Mitarbeiter und Betriebsmittel sowie Regeln und Methoden, die den Ablauf der Produktion definieren (GOTTSCHALK 2007 S. 6). Die Eigenschaften eines Produktionssystems werden durch die Gesamtheit seiner Elemente bestimmt.

Sofern im Produktionsablauf auch Methoden der *schlanken Produktion* eingesetzt werden, sind diese ebenfalls inbegriffen. Der Begriff ist jedoch im Folgenden nicht

im Sinne des *Toyota Produktionssystems* zu verstehen, womit die grundsätzlich verfügbaren bzw. praktizierten Methoden zur Effizienzsteigerung in der Produktion beschrieben werden (vgl. OHNO 1993).

Arbeitssystem

Ein *Arbeitssystem* ist ein organisatorisch untergeordnetes Objekt des Produktionssystems, das zur Erfüllung einer spezifischen Arbeitsaufgabe bzw. eines definierten Arbeitsumfangs eingesetzt wird. Es besteht aus einer oder mehreren über bestimmte Fähigkeiten verfügende Personen, Maschinen oder Anlagen (GOTTSCHALK 2007 S. 6). Je nach Organisationsstruktur des übergeordneten Produktionssystems können einzelne Arbeitsplätze entweder als eigenständige Arbeitssysteme definiert oder auch als Gruppe zusammengefasst werden. Voraussetzung für eine Zusammenfassung ist nicht nur die Gleichartigkeit der Arbeitsaufgabe, sondern auch die Möglichkeit, Arbeitsaufträge abhängig von der Belastungssituation weitestgehend beliebig zwischen den zusammenzufassenden Arbeitsplätzen zu verteilen.

Kapazität

Die *Kapazität* eines Arbeitssystems beschreibt sein Potential zum Ausstoß von Leistungen in einer festgelegten Zeitperiode. Maßeinheiten für die Kapazität können Mengen-, Wert- oder andere Recheneinheiten der produzierten Leistungen sowie Zeiteinheiten sein (BETGE 1996 S. 852 ff.). Werden in einer Produktionsumgebung verschiedenartige Güter mit denselben Arbeitssystemen hergestellt, ist die Wahl von Zeiteinheiten üblich. Sie drücken die zur Produktion von Leistungen mit einem jeweils definierten Zeitbedarf zur Verfügung stehende Arbeitszeit aus (SCHÖNSLEBEN 2007 S. 28). In der vorliegenden Arbeit werden für die Kapazität daher stets Zeiteinheiten zugrunde gelegt.

Die Kapazität selbst wird wiederum durch verschiedene Faktoren geprägt, die auch als *Kapazitätsdeterminanten* bezeichnet werden (BETGE 1996 S. 853): Als primäre Faktoren werden das Personal und die Betriebsmittel bezeichnet, die gemeinsam die Kapazität eines Arbeits- bzw. Produktionssystems bestimmen. Weiterhin wirken sekundäre Faktoren wie z. B. Roh- und Hilfsmaterialien oder Energie limitierend auf den Ausstoß eines Produktionssystems (GOTTSCHALK 2007 S. 32). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die sekundären Faktoren jedoch nicht als Bestandteil der Kapazität von einzelnen Arbeitssystemen angesehen, sondern als eigenständige Faktoren in die Betrachtung einbezogen.

Spezifischer Kapazitätsbedarf

Als *spezifischer Kapazitätsbedarf* wird in der vorliegenden Arbeit die Kapazitätsmenge definiert, die zur Herstellung einer Einheit eines bestimmten Produkts in einem betrachteten Arbeitssystem benötigt wird. Der spezifische Kapazitätsbedarf fasst damit die Zeit je Einheit (Stückzeit) sowie anteilig entsprechend der Losgröße die Rüstzeit nach REFA (1997 S. 42 ff.) zusammen.

Lieferkette (Supply Chain)

Die *Lieferkette*, die auch mit dem englischen Begriff *Supply Chain* (SC) bezeichnet wird, stellt die verschiedenen Stufen der Leistungserstellung für ein Produkt in ihrer Abfolge dar (BLECHER 2006 S. 13). Sie umfasst damit sämtliche Aktivitäten, die für die Erstellung des Produktes von der Rohstoffgewinnung bis zur Auslieferung an den Kunden durchgeführt werden (LUMMUS & VOKURKA 1999). In der Regel sind an diesen Aktivitäten verschiedene, rechtlich selbständige Unternehmen beteiligt (BLECHER 2006 S. 13). Ein Fokus bei der Betrachtung der Lieferkette liegt daher auf der Kooperation zwischen ihren einzelnen Akteuren (MEIER ET AL. 2008), die sich in den jeweiligen Kunden-Lieferanten-Beziehungen widerspiegelt.

Alle Aktivitäten, die vor einem bestimmten Ereignis oder Akteur in der Lieferkette stattfinden, liegen *flussaufwärts* (*upstream*), alle danach ablaufenden Aktivitäten liegen *flussabwärts* (*downstream*) in der Lieferkette (APICS 2008).

In der Standardliteratur wird der Begriff der Lieferkette häufig gleichgesetzt mit dem Begriff des Liefernetzwerks bzw. Wertschöpfungsnetzwerks, wobei der Bezug zu einem bestimmten Produkt aufgehoben wird. Stattdessen schließt der Begriff bei dieser Gleichsetzung sämtliche direkten und indirekten Beziehungen eines Unternehmens auf Lieferanten- und Kundenseite ein (vgl. z. B. SCHÖNSLEBEN 2007 S. 13, LÖDDING 2008 S. 108, APICS 2008). In der vorliegenden Arbeit wird jedoch bewusst zwischen produktspezifischen Lieferketten und dem nachfolgend definierten Begriff des Wertschöpfungsnetzes differenziert.

Wertschöpfungsnetz

In Anlehnung an STENDEL (1999, S. 18) und MÖLLER (2006, S. 64) wird ein *Wertschöpfungsnetz* als ein Netz von Unternehmen definiert, in dem unternehmensübergreifend Leistungen mit der Absicht zur Gewinnerzielung erstellt werden. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass in der Regel zur Erstellung einer Leistung die Zusammenarbeit mit mehreren Partnern erforderlich ist und viele Unternehmen unterschiedliche Leistungen für verschiedene Abnehmer erstellen, besteht ein Wertschöpfungsnetz aus zahlreichen, ineinander verflochtenen Lieferketten.

In der Wissenschaft und Praxis wird für diesen Sachverhalt häufig der Begriff Wertschöpfungsnetzwerk verwendet. In der vorliegenden Arbeit wird diesbezüglich jedoch bewusst eine Differenzierung vorgenommen, da der Begriff *Netzwerk* eine gezielt auf einen konkreten Zweck ausgerichtete Struktur impliziert, so wie es bei der Lieferkette der Fall ist. Nach dem hier zugrundeliegenden Verständnis beinhaltet ein Wertschöpfungsnetz aber auch Kooperationsbeziehungen zwischen Unternehmen, die nicht der Erfüllung eines einzelnen übergeordneten Netzwerk-Zwecks, sondern individuellen wirtschaftlichen Interessen der jeweiligen Kooperationspartner dienen (vgl. auch MÖLLER 2006 S. 66 f.). Der Ausdruck Wertschöpfungsnetz trägt der Tatsache Rechnung, dass die Entstehung und Entwicklung solcher Netze nicht durch eine übergeordnete Instanz koordiniert wird, sondern aus Sicht des gesamten Netzes einer nicht planbaren Komponente unterliegt.

2.2.2 Flexibilität

Der Begriff *Flexibilität* leitet sich von dem lateinischen Verb *flectere* (dt. biegen, krümmen, lenken; STOWASSER ET AL. 1994) ab und bedeutet im heutigen allgemeinen Sprachgebrauch so viel wie Biegsamkeit oder Anpassungsfähigkeit (DUDEN 2010). Aufbauend auf dieser sprachlichen Begriffsbestimmung werden in der ingenieurwissenschaftlichen und betriebswirtschaftlichen Literatur vielfältige, häufig problemspezifische Definitionen für Flexibilität angeführt, die sich inhaltlich teilweise ähneln und teilweise stark voneinander abweichen (vgl. SETHI & SETHI 1990, TONI & TONCHIA 1998). Eine eindeutige, allgemein gültige Definition des Flexibilitätsbegriffs hat sich in diesen Fachdisziplinen jedoch nicht herauskristallisiert (PIBERNIK 2001 S. 5 ff.). Dies ist zum einen auf die vielfältigen Facetten des Sachverhalts der Flexibilität zurückzuführen. Zum anderen unterliegt der Flexibilitätsbegriff mit dem Aufkommen neuer, verwandter Begriffe wie *Wandlungsfähigkeit*, *Rekonfigurierbarkeit* oder *Agilität* ständigen Änderungen und Ausdifferenzierungen, um klare Abgrenzungen zu schaffen (vgl. WIENDAHL 2002, WIENDAHL 2009). Im Folgenden wird die Bedeutung von Flexibilität für den hier betrachteten produktionstechnischen Zusammenhang kurz diskutiert und definiert:

Das von der Association for Operations Management (APICS) herausgegebene Wörterbuch definiert Flexibilität als die Fähigkeit eines Produktionssystems, kurzfristig in Bezug auf Anpassungsbereich und Zeitbedarf auf externe oder interne Änderungen zu reagieren (APICS 2008). Diese allgemeine Definition ist jedoch nicht weitgehend genug, da sie einerseits zu den Begriffen Wandlungsfähigkeit oder Rekonfigurierbarkeit keine ausreichende Abgrenzung bietet und andererseits Kosten-

aspekte vernachlässigt, die schon frühzeitig von einigen Autoren als wichtiges Merkmal der Flexibilität hervorgehoben wurden (STIGLER 1939, MARSCHAK & NELSON 1962, SLACK 1983, SUAREZ ET AL. 1996).

Eine diesbezügliche weiterführende Definition wird von NYHUIS ET AL. (2008A) vorgeschlagen. Diese versteht Flexibilität als die Fähigkeit, ein System schnell und ohne zusätzliche Investitionen innerhalb eines durch bekannte Maßnahmen vorgegebenen Korridors anzupassen. Vergleichbare Definitionen der Flexibilität sind auch bei WESTKÄMPER ET AL. (2000), SUDHOFF (2008, S. 17 ff.) und MÖLLER (2008, S. 13 ff.) zu finden, wobei WESTKÄMPER ET AL. und SUDHOFF noch zusätzlich den Aspekt der Reversibilität hervorheben, also die Möglichkeit, im Rahmen der Flexibilität getroffene Veränderungen vollständig wieder rückgängig zu machen. Hierdurch wird ausgeschlossen, dass im Rahmen der Flexibilität Maßnahmen durchgeführt werden, die die Eigenschaften des Systems nachhaltig verändern und somit verhindern, dass eine bestimmte Ausgangssituation später wieder erreicht werden kann. In der Definition von NYHUIS ET AL. (2008A) ist diese Forderung teilweise enthalten, da zusätzliche Investitionen ausgeschlossen werden. Eine kurzfristig nicht reversible Systemanpassung kann jedoch auch ohne Investitionen, dafür aber mit hohen Folgekosten stattfinden, beispielsweise durch die Festanstellung neuen Personals oder durch das Eingehen langfristiger Leasingverträge für Betriebsmittel. Für die vorliegende Arbeit wird die Definition von NYHUIS ET AL. (2008A) daher folgendermaßen abgeändert:

Unter Flexibilität wird die Fähigkeit verstanden, ein System schnell und mit geringen Zusatzkosten reversibel innerhalb eines durch bekannte Maßnahmen vorgegebenen Korridors an sich ändernde Randbedingungen anzupassen.

Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 3 verdeutlicht. Die obere und die untere Flexibilitätsgrenze beschränken den Flexibilitätskorridor, innerhalb dessen eine wirtschaftliche Produktion durch vorgeplante Anpassungsmaßnahmen möglich ist.

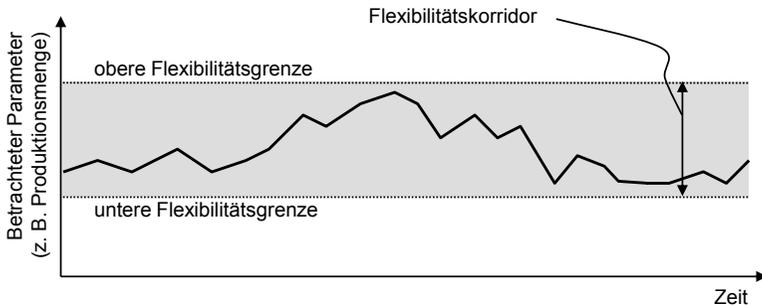


Abbildung 3: Definition von Flexibilität (REINHART ET AL. 2008A)

Die Definition grenzt sich insofern von dem Begriff Wandlungsfähigkeit ab, als Wandlungsfähigkeit als Potential verstanden wird, auch jenseits der vorgehaltenen Korridore organisatorische und technische Veränderungen bei Bedarf reaktiv oder proaktiv durchführen zu können (ZÄH ET AL. 2005, NYHUIS ET AL. 2008A). Eine Reversibilität wie im Fall der Flexibilität ist bei der Wandlungsfähigkeit nicht gefordert. Sie umfasst damit Potentiale, die Möglichkeiten zur Veränderung eines Systems über seine Flexibilität hinaus beschreiben (NYHUIS ET AL. 2008A). Indem bei der Flexibilität die Maßnahmen zur Systemanpassung bereits vorher definiert sind, beschreibt sie operative Möglichkeiten für reaktive Veränderungen. In einem wandlungsfähigen System sind hingegen Vorkehrungen getroffen worden, die eine Systemveränderung unterstützen (z. B. durch standardisierte Schnittstellen), konkrete Maßnahmen werden jedoch erst im Bedarfsfall abgeleitet und umgesetzt. Es handelt sich bei der Wandlungsfähigkeit also um eine taktische Fähigkeit (WIENDAHL 2009). Der Begriff der Rekonfigurierbarkeit beschreibt einen ähnlichen Aspekt wie die Wandlungsfähigkeit. Neben der Tatsache, dass sie sich auf einen kürzeren Zeithorizont bezieht, ist sie jedoch außerdem auf technische Systeme begrenzt, während bei der Wandlungsfähigkeit organisatorische Aspekte eine entscheidende Rolle spielen (ZÄH ET AL. 2005, WIENDAHL 2009). Die Agilität hingegen bezeichnet die strategische Fähigkeit eines gesamten Unternehmens, neue Märkte zu erschließen und dafür die notwendigen Produktionsstrukturen aufzubauen (WIENDAHL 2009). Sie bezieht sich somit auf einen deutlich langfristigeren Zeithorizont.

Von einer ausführlichen Diskussion und Abgrenzung weiterer verwandter Begriffe zur Flexibilität wird an dieser Stelle abgesehen, da hierzu umfangreiche weiterführende Literatur verfügbar ist (vgl. z. B. WESTKÄMPER ET AL. 2000, REINHART

2000, REINHART ET AL. 2008B, WIENDAHL 2002, 2009, WIENDAHL ET AL. 2007, ZÄH ET AL. 2005, NYHUIS ET AL. 2008A, 2008B).

2.2.3 Spezielle Flexibilitätsarten

Die im vorangegangenen Kapitel angeführte Definition der Flexibilität beschreibt zunächst einen abstrakten Sachverhalt und kann auf vielfältige Betrachtungsgegenstände angewandt werden. Um eine Bedeutung für praktische Untersuchungen und Anwendungen zu erlangen, wird daher eine Konkretisierung des Flexibilitätsbegriffes auf bestimmte Sachlagen notwendig. Entsprechend wurden in der wissenschaftlichen Literatur zahlreiche problemspezifische *Flexibilitätsarten* definiert. Übersichten und Systematisierungen von Flexibilitätsarten aus Sicht von produktionstechnischen Fragestellungen liefern beispielweise BROWNE ET AL. (1984), SETHI & SETHI (1990), TONI & TONCHIA (1998) oder BEACH ET AL. (2000). Betriebswirtschaftliche Überlegungen führen teilweise zu einer weiteren Art der Differenzierung und Untergliederung von Flexibilitätsarten (vgl. z. B. KALUZA 1994 S. 62 ff.).

Auch die in der Literatur verwendeten Definitionen für die einzelnen Flexibilitätsarten sind keineswegs einheitlich. Teilweise existieren verschiedene Definitionen für denselben Begriff, teilweise auch unterschiedliche Begriffe für dieselben Sachverhalte (SHEWCHUK & MOODIE 1998 S. 326). Im Folgenden werden für diejenigen Flexibilitätsarten Definitionen angeführt, auf die im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingegangen wird. Die vorangegangene allgemeine Definition von Flexibilität auf Seite 11 behält dabei als übergeordneter Begriff stets ihre Gültigkeit, auch wenn einzelne Aspekte dieser Definition, wie z. B. der Zeit- oder der Kostenbezug, im Folgenden nicht weiter hervorgehoben werden.

Mengenflexibilität

Mengenflexibilität wird als die Fähigkeit eines Unternehmens definiert, die Mengenausbringung von Produkten als Antwort auf geänderte sozioökonomische Randbedingungen wirtschaftlich und ohne Betriebsunterbrechungen reversibel anzupassen (JACK & RATURI 2002). Neben dem Begriff der Mengenflexibilität werden im Deutschen auch die Begriffe *Volumenflexibilität* (ABELE ET AL. 2008A) oder *Stückzahlflexibilität* (AURICH ET AL. 2003) als Synonyme verwendet. Die Begriffe sind daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit ebenfalls als gleichbedeutend zu betrachten.

Ein *Mengenflexibilitätskorridor* stellt in diesem Zusammenhang die Spannweite zwischen maximaler und minimaler Ausbringungsmenge dar.

Routenflexibilität

Unter *Routenflexibilität* wird die Möglichkeit verstanden, ein bestimmtes Produkt über alternative Routen oder Fertigungspfade durch das Produktionssystem herzustellen (BROWNE ET AL. 1984, SETHI & SETHI 1990). In der Praxis drücken sich alternative Routen durch unterschiedliche Arbeitsvorgangsfolgen im Arbeitsplan aus, die zur Herstellung eines Produktes herangezogen werden können. Obwohl Routenflexibilität ursprünglich nur als Redundanz im Falle von Störungen vorgesehen war, kann sie außerdem genutzt werden, um Engpässe durch Überbelastung einzelner Arbeitssysteme zu umgehen oder die Produktionsauslastung zu optimieren (ROSCHE 2008 S. 27, WEMHÖNER 2006 S. 35, ZHANG ET AL. 2003 S. 178).

Maschinenflexibilität

Maschinenflexibilität bezieht sich auf die Menge der Funktionen, die eine Maschine (oder ein Arbeitssystem) ausführen kann, ohne dass ein großer Umrüstaufwand besteht (SETHI & SETHI 1990). Die Maschinenflexibilität eines Bearbeitungszentrums steigt somit beispielsweise mit der Zahl der Achsen oder mit der Zahl der verfügbaren Werkzeuge im Werkzeugwechsler. Auch Möglichkeiten, verschiedene Baugrößen von Produkten zu realisieren, die Form von Produkten flexibel anzupassen (vgl. HAGEMANN 2009), oder unterschiedliche Technologien einzusetzen (vgl. FELDMANN & SLAMA 2001), sind als Erweiterung des Funktionsumfangs einer Maschine oder Anlage anzusehen und werden daher unter der Maschinenflexibilität subsumiert.

Operationsflexibilität

Operationsflexibilität beschreibt die Möglichkeit, ein Produkt auf unterschiedliche Art und Weise herzustellen (SETHI & SETHI 1990). Dies ist beispielweise der Fall, wenn unterschiedliche Produktionsverfahren angewandt werden können, um bestimmte Produkteigenschaften zu erzielen.

Kapazitätsflexibilität

Unter *Kapazitätsflexibilität* wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Gesamtheit an verfügbaren Maßnahmen verstanden, die zur reversiblen Anpassung der Kapazität eines Arbeits- bzw. Produktionssystems genutzt werden können. Eine Diskussion von diesbezüglichen Maßnahmen erfolgt in Abschnitt 2.5.2.

2.3 Flexibilität in Wertschöpfungsnetzen

2.3.1 Charakterisierung von Lieferketten und Wertschöpfungsnetzen

Die nach wie vor anhaltende Neigung von Unternehmen, sich immer mehr auf Kernkompetenzen zu spezialisieren, hat zur Folge, dass sich die Herstellung eines Produktes auf Lieferketten erstreckt, die über mehrere Unternehmensgrenzen hinweg reichen (SIMCHI-LEVI ET AL. 2003 S. 1). Um die komplexen Prozesse in der Lieferkette effizient abzuwickeln und die Reaktionsfähigkeit der Kette zu steigern, sind vor allem optimal gestaltete Kunden-Lieferanten-Beziehungen von Bedeutung (WIENDAHL ET AL. 2008). Zu diesem Zweck hat sich in der Vergangenheit das Supply Chain Management (SCM) als wissenschaftliche Disziplin etabliert. Nach SIMCHI-LEVI ET AL. (2003, S. 1) umfasst das SCM grundsätzlich Methoden, um Lieferanten, Hersteller, Lager und Handel effizient zu integrieren, so dass Waren in den richtigen Mengen, an den richtigen Orten und zur richtigen Zeit produziert bzw. bereitgestellt werden. Dadurch sollen die systemweiten Kosten minimiert und den notwendigen Servicegradanforderungen genügt werden. Zur Strukturierung der dafür notwendigen unternehmensübergreifenden Planungsaktivitäten wurde vom *Supply Chain Council* das *Supply Chain Operations Reference-(SCOR)-Modell* entwickelt. Abbildung 4 stellt eine Lieferkette nach dem vereinfachten SCOR-Modell dar. Der Gesamtprozess der Lieferkette wird dabei in die Grundprozesse *Beschaffen*, *Herstellen* und *Liefern* untergliedert (LÖDDING 2008 S. 107).

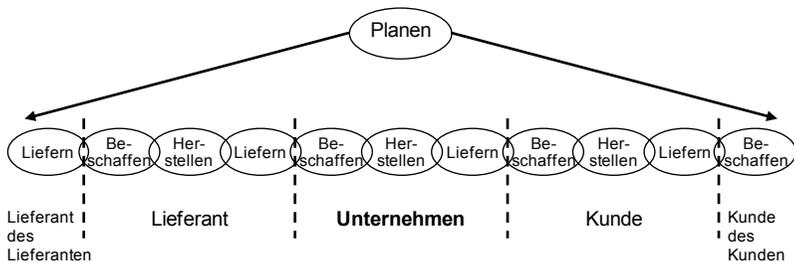


Abbildung 4: Modellierung der Lieferkette nach dem SCOR-Modell (LÖDDING 2008)

Der Gedanke des Supply Chain Managements wurde in den vergangenen Jahren so weit gefasst, dass einige Autoren überzeugt sind, der Wettbewerb finde nicht mehr

zwischen einzelnen Unternehmen, sondern zwischen ganzen Lieferketten statt (SADLER 2007 S. 18, WILDEMANN 2003 S. 1 f.). Die zentrale und übergreifende Planung von Lieferketten ist dann eine wesentliche Voraussetzung, um in diesem Wettbewerb bestehen zu können.

Obwohl in der wissenschaftlichen Literatur immer wieder belegt wird, dass zentrale Planungen der Auftragskoordination in Lieferketten bestmögliche Lösungen für das SCM bereitstellen können (z. B. ALICKE 2002), ist die vollständige Kontrolle einer gesamten Kette durch eine einzelne Instanz in der Realität kaum möglich, da sämtliche Partner der Kette unabhängige Unternehmen mit individuellen Präferenzen darstellen (HABICHT 2009 S. 30). Dies ist im Wesentlichen damit zu begründen, dass sich Lieferketten definitionsgemäß jeweils nur auf ein Produkt bzw. eine Produktfamilie beschränken (vgl. 2.2.1). Die meisten Unternehmen produzieren jedoch unterschiedliche Produkte für mehrere Kunden. Solche Unternehmen sehen sich vielmehr als Teil eines Wertschöpfungsnetzes, in dem vielfältige Lieferketten miteinander verflochten sind (LÖDDING 2008 S. 108). Eine zielgerichtete Gestaltung einzelner Ketten unabhängig voneinander ist in einem solchen Netz nicht möglich, da zahlreiche Interdependenzen zwischen den Lieferketten bestehen können (ZAHN ET AL. 2007). Neuere Ansätze verfolgen daher das Ziel, ganzheitliche Gestaltungsansätze für die Koordination von Wertschöpfungsnetzen zu schaffen, die solche Interdependenzen berücksichtigen (z. B. ZAHN ET AL. 2007, SPATH ET AL. 2001)

Auch wenn die Zielsetzung des SCM grundsätzlich für jede Produktionsart von der Einzel- über die Kleinserien- bis zur Massenfertigung besteht und SCM mittlerweile in fast allen Produktionsunternehmen betrieben wird, ergeben sich die größten Hebel besonders im Bereich der Serien- und Massenfertigung, in der langfristig stabile Kooperationsbeziehungen vorherrschen. In diesem Umfeld gibt es zahlreiche wiederkehrende Geschäftsprozesse, deren systematische und integrative Gestaltung zu einer hohen Effizienz führt, während im Bereich einer kundenindividuellen Einzel- oder Kleinserienfertigung der Gestaltungsaufwand zur Integration von Kunden und Lieferanten den daraus entstehenden Nutzen schnell überschreiten kann. In den nachfolgenden Betrachtungen von Lieferketten und Netzwerken sowie den darin enthaltenen Kunden-Lieferanten-Beziehungen wird daher stets davon ausgegangen, dass es sich hierbei um längerfristige Konstrukte handelt, die die serienmäßige Herstellung von Produkten zum Zweck haben.

2.3.2 Allgemeines zu Flexibilitätskonzepten

Flexibilität gehört heutzutage anerkanntermaßen zu den wichtigen strategischen Erfolgsfaktoren produzierender Unternehmen, da sie zur angemessenen Reaktion auf unsichere Randbedingungen aus dem turbulenten Unternehmensumfeld befähigt (KALUZA & BLECKER 2005 S. 3 ff.). Besonders im Zuge der steigenden Kostenkonkurrenz im internationalen Umfeld wird Flexibilität zum Differenzierungsmerkmal deutscher Unternehmen und stellt damit einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor dar (KINKEL ET AL. 2007). Während sich frühe Ansätze zur flexiblen Gestaltung zunächst auf unternehmensinterne Prozesse bezogen, hat Flexibilität in den vergangenen Jahren auch als Gestaltungsmerkmal von Kunden-Lieferanten-Beziehungen an Bedeutung gewonnen (TERPEND ET AL. 2008, SCHNETZLER ET AL. 2006, FALKENHAUSEN 2011).

Flexibilität als unternehmerisches Gesamtkonzept ist kaum als Ganzes zu erfassen, da sie sich auf zahlreiche Gestaltungsdimensionen bezieht, die teilweise Interdependenzen aufweisen (vgl. SETHI & SETHI 1990). Ansätze zur umfassenden Betrachtung der Unternehmensflexibilität sowie zur ganzheitlichen Bewertung von Flexibilitätskonzepten haben sich nicht durchgesetzt (NARAIN ET AL. 2000 S. 205 f.). Daher ist es sinnvoll, auf einzelne Arten von Flexibilität zurückzugreifen, um die jeweiligen Sachverhalte besser zu durchdringen und zielgerichtete Gestaltungskonzepte zu entwickeln (UPTON 1994 S. 73).

2.3.3 Arten des Flexibilitätsbedarfs im Wertschöpfungsnetz

SUAREZ ET AL. (1991) heben hervor, dass zunächst geeignete Klassifizierungssysteme entwickelt werden sollten, bevor Überlegungen zur Gestaltung der Flexibilität angestellt werden. Im Sinne dieser Forderung werden im Folgenden die im Rahmen von Lieferketten und Wertschöpfungsnetzen relevanten Flexibilitätsarten vorgestellt und eine Eingrenzung für die weiteren Betrachtungen vorgenommen.

Bei der Entwicklung eines Rahmenkonzepts zur Analyse von Flexibilität unterscheidet UPTON (1994, S. 75) grundsätzlich zwischen interner Flexibilität, die die Handlungsoptionen innerhalb eines Unternehmens zur Reaktion auf sich ändernde Randbedingungen beschreibt, und externer Flexibilität, die den direkten Kundennutzen charakterisiert und somit einen Wettbewerbsvorteil verschafft. Daraus wird deutlich, dass bei der Gestaltung von langfristig ausgerichteten Kunden-Lieferanten-Beziehungen innerhalb von Wertschöpfungsnetzen nicht sämtliche Arten und

Ausprägungen der Flexibilität eine Rolle spielen, sondern lediglich diejenigen, die dem Kunden einen direkten Nutzen verschaffen.

Da Flexibilität im Wesentlichen als Reaktionsmöglichkeit auf unsichere Planungsparameter betrachtet wird, ist es sinnvoll, von den wesentlichen Unsicherheiten auszugehen, die in Kunden-Lieferanten-Beziehungen vorherrschen. Diese bestehen in *Bestellmengen*, *Lieferterminen* und *Spezifikationen* der jeweiligen Produkte (STEVENSON & SPRING 2007 S. 701, BARTHEL 2006 S. 45, WILDEMANN 2010 S. 106). Hieraus entstehen die folgenden Bedarfsfälle für Flexibilität:

Die Änderung von Bestellmengen bzw. Lieferterminen ist für die Organisation von Lieferketten von entscheidender Bedeutung, sie flussaufwärts weitere Änderungen nach sich zieht. Entsprechend heben DAS & ABDEL-MALEK (2003, S. 171) und WANG (2008, S. 1193) die Wichtigkeit der Mengenflexibilität und der Lieferterminflexibilität in Lieferketten besonders hervor. Grundsätzlich stellen die Variation der Bestellmenge und die Variation des Liefertermins zwar zwei verschiedene Sachverhalte dar; für das produzierende und liefernde Unternehmen resultieren sie jedoch letztendlich in derselben Konsequenz, nämlich in der Änderung der bereitzustellenden Menge eines Produktes zu einem bestimmten Zeitpunkt. Sofern diese Schwankungen nicht durch Lagerbestände ausgeglichen werden sollen, muss in beiden Fällen also mit einer Anpassung der Mengenausbringung der Produktion in bestimmten Zeitperioden reagiert werden. In der vorliegenden Arbeit werden die beiden Aspekte daher in der Mengenflexibilität zusammengefasst.

Die Änderung der Spezifikation eines Produktes erfordert die technische Fähigkeit des Lieferanten, bestimmte Produkteigenschaften auf die Anforderungen des Kunden zuzuschneiden und somit eine Variante des ursprünglichen Produktes zu liefern. Diese Fähigkeit wird auch als Variantenflexibilität bezeichnet (KINKEL & SPOMENKA 2010). Sie basiert im Wesentlichen auf den für die Produktion eingesetzten Betriebsmitteln sowie auf der konkreten Gestaltung der Produktionsprozesse. Verwandt mit dem Konzept der Variantenflexibilität ist auch das der Mixflexibilität, das die Möglichkeit beschreibt, unterschiedliche Zusammensetzungen des Produkt- bzw. Variantenmixes wirtschaftlich produzieren zu können (SCHUH ET AL. 2004).

Die vorstehenden Folgerungen decken sich auch mit den Untersuchungsergebnissen weiterer Autoren: So stellen ZHANG ET AL. (2003) fest, dass die Mengen- und die Mixflexibilität zentrale Faktoren für die Kundenzufriedenheit darstellen. Die Autoren zeigen allerdings auch auf, dass die Fähigkeiten dazu wiederum auf anderen Flexibilitätsarten im liefernden Unternehmen beruhen. Umfrageergebnisse von

LANZA ET AL. (2010) unter 16 Industrieunternehmen stellen ebenfalls die Mengen- und Variantenflexibilität als besonders wichtige Eigenschaften von Produktionssystemen heraus.

Im Fokus der vorliegenden Arbeit wird die Mengenflexibilität als eine der entscheidenden Flexibilitätsarten innerhalb von Kunden-Lieferanten-Beziehungen im Wertschöpfungsnetz behandelt. Die Untersuchung von Varianten- bzw. Mixflexibilität ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

2.3.4 Beherrschung von Bedarfsmengenschwankungen

In Bezug auf die Reaktionsfähigkeit von Lieferketten bei Bestellmengenschwankungen sind zwei relevante Restriktionen zu beachten: Die erste Restriktion beschreibt die *Trägheit der Lieferkette* bei der Reaktion auf Bestellmengenschwankungen. Sie resultiert aus den logistischen Abläufen, die entlang der Kette für die Anpassung der Produktionsmenge notwendig sind. Je größer die Zahl der Unternehmen in der Lieferkette und je geringer die Möglichkeit, auftragsneutrale Zwischenprodukte durch Sicherheitsbestände logistisch von den Bedarfsmengenschwankungen am Absatzmarkt zu entkoppeln, desto länger benötigt die Kette zur Reaktion auf solche Schwankungen. Der Grund dafür liegt darin, dass zunächst die Unternehmen am Beginn der Lieferkette ihre Produktionsmenge anpassen müssen, bevor sukzessive auf den nachfolgenden Stufen eine Mengenanpassung vorgenommen werden kann, da hierfür die Bereitstellung der richtigen Menge und Art an Zwischenprodukten gegeben sein muss. Die Reaktionszeit bestimmt sich somit mindestens aus dem Zeitbedarf zur Herstellung und Distribution der (Zwischen-)Produkte auf allen relevanten Wertschöpfungsstufen. Gegebenenfalls ist noch jeweils der Zeitbedarf zur Planung und Umsetzung der Produktionsmengenanpassung hinzuzufügen.

Die zweite Restriktion bezieht sich auf das *Ausmaß der Mengenänderung*, das innerhalb der Lieferkette möglich ist. Sie basiert auf den Kapazitätsbeschränkungen der einzelnen Akteure in der Lieferkette. So werden die maximale und die minimale Mengenausbringung jeweils von denjenigen Akteuren bestimmt, deren Fähigkeitsgrenzen als erstes erreicht werden. Dies müssen nicht zwangsläufig immer dieselben Akteure sein. Es ist durchaus möglich dass die Kapazitätsbeschränkungen je nach Auftragslage dynamisch an verschiedenen Stellen in der Lieferkette auftreten.

Um im Rahmen der Restriktionen der Lieferkette Mengenschwankungen so effizient wie möglich abzuwickeln, ist es notwendig, die von den einzelnen

Akteuren der Lieferkette jeweils vorgehaltene Mengenflexibilität aufeinander abzustimmen. Andernfalls besteht die Gefahr, dass Bemühungen einiger Akteure zur Schaffung einer hohen Mengenflexibilität ins Leere laufen, da die Flexibilität der gesamten Kette durch das schwächste Glied begrenzt wird. Dies führt zu wirtschaftlicher Ineffizienz, weil die Kosten solcher Bemühungen dann keinem effektiven Nutzen gegenüberstehen. Besonders entscheidend ist die Abstimmung der Flexibilität entlang der Kette, wenn eine Bevorratung von Zwischenprodukten aufgrund zahlreicher kundenindividueller Produktmerkmale nicht mehr wirtschaftlich möglich ist und somit keine Materialpuffer angelegt werden können.

Ein Phänomen, das bei Mengenschwankungen in Lieferketten häufig auftritt, ist der sogenannte *Peitschenschlag-Effekt* (engl. *Bullwhip Effect*). Es beschreibt die Tatsache, dass bereits kleine Änderungen des Mengenbedarfs beim Endverbraucher deutlich größere Bestellmengenschwankungen in den jeweils vorgelagerten Stufen der Lieferkette induzieren können (LEE ET AL. 1997, WERNER 2008 S. 38 ff.). Wie bei einem Peitschenschlag, bei dem kleine Bewegungen der Hand zu großen und schnellen Bewegungen des Peitschenendes führen, schaukeln sich die Bestellmengenschwankungen vom Kunden bis zum Beginn der Lieferkette immer weiter auf. Die Ursache dieses Effektes ist zumindest teilweise in den oben genannten Restriktionen zu sehen. Ist nämlich die realisierbare Mengenschwankung eines Unternehmens begrenzt, so dass der Bedarf seines Kunden nicht vollständig gedeckt werden kann, neigt der Kunde dazu, eine größere Menge als notwendig zu bestellen, um auf diese Weise einen hohen Anteil der tatsächlich benötigten Stückzahl zu erhalten (LEE ET AL. 1997). Die Vermeidung bzw. Reduzierung des Peitschenschlag-Effektes stellt eine zentrale Aufgabe des SCM dar, die meist durch die Synchronisation der Bedarfsinformationen entlang der Lieferkette mithilfe elektronischer Kommunikationssysteme bewältigt wird (WERNER 2008 S. 41). Eine Abstimmung der Mengenflexibilität innerhalb der Lieferkette kann zusätzlich dem Peitschenschlag-Effekt entgegenwirken: Wenn dem Kunden die Möglichkeiten des liefernden Unternehmens zur Anpassung der Produktionsmenge bekannt ist, kann er sich frühzeitig darauf einstellen, welche zusätzliche Menge an Produkten er erhalten wird und somit „Überbestellungen“ vermeiden.

Nur in wenigen Fällen, in denen ein Unternehmen einen beherrschenden Einfluss auf die Lieferkette ausüben kann, lassen sich Lieferketten zentral planen und steuern, sodass auch eine koordinierte Abstimmung der Mengenflexibilität entlang der Kette möglich ist. Beispiele, in denen dies funktioniert, sind in der Automobilindustrie zu beobachten. Hier gehen die Bestrebungen meist vom sogenannten Original Equipment Manufacturer (OEM) am Ende der Lieferkette aus. Die bereits

in Abschnitt 2.3.1 beschriebene Tatsache, dass Unternehmen häufig Teile von Wertschöpfungsnetzen sind und nicht nur einer Lieferkette angehören, macht eine ganzheitliche Betrachtung des Netzes zur Optimierung der Mengenflexibilität jedoch nahezu unmöglich. Nicht zuletzt deshalb ist eine dezentrale Planung in den meisten Lieferketten und Wertschöpfungsnetzen verbreitet. Eine Möglichkeit, um dabei ein hohes Maß an Abstimmung zu erzielen und verlässliche Randbedingungen zur Planung zu schaffen, ist die vertragliche Vereinbarung von Konditionen zur Mengenflexibilität in Kunden-Lieferanten-Beziehungen (TSAY & LOVEJOY 1999 S. 89). Im Folgenden wird daher auf einige Aspekte von Rahmenvertragsvereinbarungen zur Mengenflexibilität eingegangen, die auch in dieser Arbeit als ein zentrales Element zu Gestaltung von Lieferketten angesehen werden.

2.4 Flexibilitätsvereinbarungen in Kunden-Lieferanten-Beziehungen

2.4.1 Zwecke und Arten von Rahmenverträgen

In langfristig ausgerichteten Kunden-Lieferanten-Beziehungen werden in der Regel Rahmenverträge zwischen den Partnern abgeschlossen, die sämtliche festzulegende Gestaltungsparameter der Geschäftsbeziehung regeln, um eine mittelfristige Planungssicherheit für beide Seiten zu schaffen. Typische Klauseln solcher Verträge betreffen beispielsweise Preise, Mengen, Termine oder auch Liefer- und Qualitätsvorschriften (MÜLLER 2011 S. 59 f.). Während früher in solchen Verträgen häufig exakte Liefermengen vereinbart wurden, lassen sich heutzutage vermehrt Bestimmungen zur Flexibilität finden, die dem Kunden beim kurzfristigen Abruf der Leistungen gewährt wird (ILIEV 2007 S. 33 ff.). Eine Studie unter 51 vorwiegend produzierenden Unternehmen unterstreicht, dass Rahmenverträge heute ein weit verbreitetes Instrument sind, um Bedarfs- und Bestandsrisiken zu minimieren und gleichzeitig eine höhere Liefer- und Reaktionsfähigkeit zu erzielen (SCHNETZLER ET AL. 2006 S. 33).

Grundsätzlich bestehen aufgrund der Vertragsfreiheit vielfältige Möglichkeiten zur Gestaltung von Flexibilitätsvereinbarungen in Rahmenverträgen. Damit ein Vertrag rechtlich bindend und auch juristisch durchsetzbar ist, müssen die einzelnen Klauseln auf eine Weise formuliert sein, dass eindeutig voneinander abgegrenzt werden kann, welche Konditionen Vertragsbestandteil sind und welche nicht. Zur Vereinbarung von Mengenflexibilität existieren zahlreiche Vertragstypen, die

beispielsweise Klauseln über Mindestabnahmemengen, Preisanpassungen, Rückkaufverpflichtungen oder zulässige Mengenschwankungen enthalten (ILIEV 2007 S. 31 ff., MÜLLER 2011 S. 87 ff.).

Da in der vorliegenden Arbeit keine konkreten Vertragsmodelle analysiert oder neue Vertragstypen entworfen werden sollen, ist eine ausführliche Vorstellung und Diskussion bestehender Vertragstypen besonders im Hinblick auf ihre Vielzahl hier sicherlich nicht angebracht. Der interessierte Leser sei daher auf weiterführende Ausführungen verwiesen, die neben den oben genannten Arbeiten z. B. bei TSAY ET AL. (2003), GOMEZ-PADILLA ET AL. (2005) oder KESSINGER & PIEPER (2005) zu finden sind.

Interessant sind an dieser Stelle solche Arten von Rahmenverträgen, die zulässige Schwankungen bei der Anpassung von Bestellmengen zeitlich genau festlegen. Diese gehen auf die beiden relevanten Restriktionen der Mengenanpassung in Lieferketten ein (vgl. 2.3.4) und können damit als Rahmen für die in dieser Arbeit zu entwickelnde Methode zur Bewertung von kundenspezifischer Mengenflexibilität dienen. Typischerweise definieren solche Verträge Prozentwerte, um die die Bestellmenge relativ zu einer vorher abgegebenen Vorhersage schwanken darf. Je weiter der Bedarf in der Zukunft liegt, desto höher fallen in der Regel diese zulässigen Bestellmengenschwankungen aus, um sowohl die höhere Unsicherheit, als auch die bessere Reaktionsfähigkeit des Lieferanten widerzuspiegeln (GOMEZ-PADILLA ET AL. 2005 S. 531, KESSINGER & PIEPER 2005 S. 145). TSAY & LOVEJOY (1999) haben ein entsprechendes Vertragsmodell mathematisch formuliert und im Rahmen einer Simulationsstudie untersucht. Im folgenden Abschnitt 2.4.2 wird dieses Modell, das auch in der industriellen Praxis häufig angewandt wird, exemplarisch für derartige Vertragsvereinbarungen vorgestellt.

Da Änderungen von Produktionsmengen in der Regel auch mit Änderungen der Kostenstrukturen in der Produktion einhergehen, ist es an dieser Stelle außerdem interessant, auf Rahmenvertragsmodelle einzugehen, die bei Inanspruchnahme von Mengenflexibilität Preisveränderungen vorsehen. Daher wird in Abschnitt 2.4.3 auf Preismodelle eingegangen, die darauf abzielen, die Bedarfsschwankungen des Kunden zu reduzieren oder die Veränderungen von Kostenstrukturen im Preis abzubauen.

2.4.2 Vertragskonzept zur Mengenflexibilität

Das Vertragskonzept nach TSAY & LOVEJOY (1999) modelliert die Mengenflexibilität, die einem Kunden bei der regelmäßigen Bestellung eines bestimmten Produktes zur Verfügung steht. Der Vereinbarung liegt die Annahme zugrunde, dass von dem Kunden zu jedem periodisierten Zeitpunkt $t \in \mathbb{Z}$ eine Prognose über die Bestellmengen in einer Reihe von in der Zukunft liegenden Perioden, sowie eine feste Bestellmenge in der jeweils gegenwärtigen Periode vorliegt. Die betrachteten Perioden werden mit dem Index $j \in \{\mathbb{Z} | j \geq 0\}$ nummeriert und im Folgenden als *Planungsperioden* bezeichnet, da das liefernde Unternehmen für diese Perioden aufgrund der vorliegenden Prognose eine Produktionsplanung durchführen kann. Der Wert des Indexes j der jeweiligen Planungsperiode gibt dabei jeweils an, wie viele Perioden vom Zeitpunkt t bis zur vorgesehenen Auslieferung des prognostizierten Bedarfs noch verbleiben.

Die (prognostizierten) Bestellmengen des Kunden für ein Produkt p in den einzelnen Planungsperioden werden durch den Mengenbedarfsvektor $\vec{X}_p(t)$ zusammengefasst:

$$\vec{X}_p(t) = [X_{p,0}(t), X_{p,1}(t), \dots, X_{p,j}(t), \dots] \quad (\text{Gl. 1})$$

p	Index zur Bezeichnung des betrachteten Produkts
j	Index zur Bezeichnung der betrachteten Planungsperiode
t	Zeitpunkt der Betrachtung
$\vec{X}_p(t)$	Mengenbedarfsvektor von Produkt p zum Zeitpunkt t
$X_{p,j}(t)$	(prognostizierte) Bestellmenge von Produkt p für den Lieferzeitpunkt $t + j$

Mit voranschreitender Zeit t kann der Kunde die Bestellmengen im Sinne einer rollierenden Planung von Periode zu Periode innerhalb vorgegebener Korridore anpassen. Die hierbei in den einzelnen Planungsperioden zulässigen Mengenflexibilitätskorridore werden durch die Faktoren $\alpha_{p,j}^{r*}$ und $\omega_{p,j}^{r*}$ aufgespannt, wobei $\alpha_{p,j}^{r*}$ die zulässige Erhöhung und $\omega_{p,j}^{r*}$ die zulässige Verringerung der Bestellmenge jeweils relativ zur zuvor abgegebenen Mengenprognose bestimmt.¹ Es gilt stets $\alpha_{p,j}^{r*} \geq 0$ sowie $0 \leq \omega_{p,j}^{r*} \leq 1 \forall p, j$.

¹ Der Hochindex r deutet die Relation zur zuvor abgegebenen Bestellprognose an, das Symbol $*$ kennzeichnet, dass die Faktoren nur innerhalb der betrachteten Planungsperiode unabhängig von anderen Planungsperioden gültig ist. Diese Einschränkung wird im weiteren Verlauf des Abschnitts verdeutlicht.

Die zulässige Anpassung der Bestellmenge zwischen den Zeitpunkten t und $t + 1$ wird schließlich durch folgende Bedingung bestimmt:

$$X_{p,j}(t)(1 - \omega_{p,j}^{r*}) \leq X_{p,j-1}(t + 1) \leq X_{p,j}(t)(1 + \alpha_{p,j}^{r*}) \quad (\text{Gl. 2})$$

mit

- $\alpha_{p,j}^{r*}$ relativer Faktor der maximal zulässigen Erhöhung von Bestellmenge $X_{p,j}(t)$ bis zum Zeitpunkt $t + 1$
- $\omega_{p,j}^{r*}$ relativer Faktor der maximal zulässigen Verringerung von Bestellmenge $X_{p,j}(t)$ bis zum Zeitpunkt $t + 1$

In Abbildung 5 ist das Konzept des Rahmenvertrags nach TSAY & LOVEJOY (1999) anhand des beispielhaften Verlaufs einer Bestellmengenentwicklung über drei Perioden für einen Lieferzeitpunkt schematisch dargestellt.²

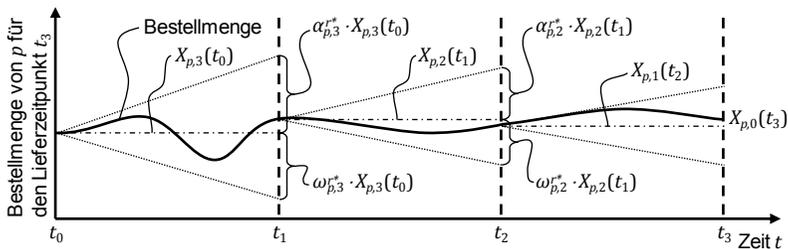


Abbildung 5: Mengenflexibilität beim Vertragskonzept nach TSAY & LOVEJOY (1999)

Zum Zeitpunkt t_0 liegt drei Perioden vor dem Liefertermin eine erste Prognose der Bestellmenge von Produkt p vor. Ausgehend von dieser Prognose wird der zulässige Korridor für eine Mengenanpassung bis zum nächsten Zeitpunkt $t_1 = t_0 + 1$ bestimmt. Dies wird durch die gepunkteten Linien angedeutet. Die Strichpunktlinien markieren die zu Beginn der Planungsperiode jeweils vorliegende Bestellmengenprognose. Vertragsgemäß muss die Bestellmenge zum Zeitpunkt t_1 innerhalb des errechneten Korridors liegen. Ist der Zeitpunkt t_1 erreicht wird die aktuelle Bestellmenge als neuer Ausgangswert übernommen, um die zulässige Mengen-

² Aus Darstellungsgründen ist ein kontinuierlicher Verlauf der Bestellmengenentwicklung gewählt worden, da auf diese Weise Schwankungen besser visualisiert werden können. In der Realität würde hier sicherlich ein dem Modell entsprechender, diskreter Verlauf vorliegen.

anpassung bis zum Zeitpunkt $t_2 = t_1 + 1$ zu bestimmen, usw. Zum Zeitpunkt t_3 erfolgt schließlich die Auslieferung.

Bei einer genauen Betrachtung der Vorgehensweise in Abbildung 5 wird deutlich, dass die zwischen dem Zeitpunkt t_0 und dem Zeitpunkt t_3 insgesamt verfügbare Flexibilität zur Mengenanpassung nach diesem Vertragskonzept deutlich größer ist als die einzelnen, in den jeweiligen Planungsperioden vorgesehenen Flexibilitätskorridore es vermuten lassen. Das liegt daran, dass die jeweiligen Grenzen der Flexibilität über mehrere Perioden aggregiert werden können. Dadurch ergeben sich resultierende Flexibilitätskorridore für die Zeitpunkte t_0 bis t_2 , die von den jeweiligen Zeitpunkten aus gesehen bis zum Liefertermin insgesamt zur Verfügung stehen. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 6 veranschaulicht.

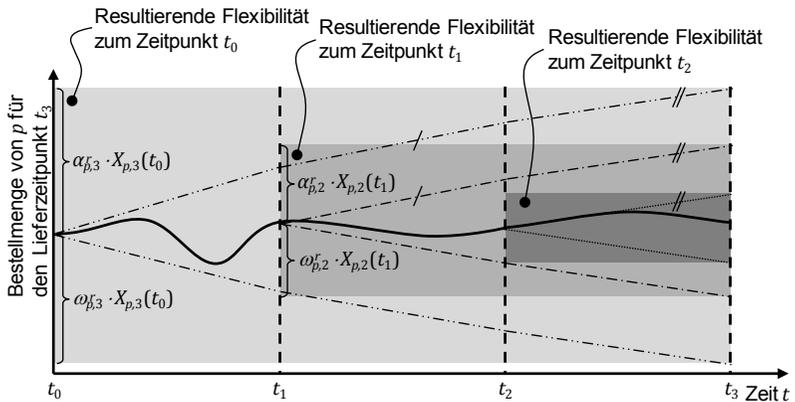


Abbildung 6: Resultierende Flexibilitätskorridore beim Vertragskonzept nach TSAY & LOVEJOY (1999)

Die gepunkteten bzw. die Strichpunkt-Linien stellen in Abbildung 6 die äußersten Grenzen der zulässigen Bestellmengen dar, die jeweils von t_0 , t_1 und t_2 aus vom Kunden geordert werden können. Die grau hinterlegten Flächen markieren die entsprechend resultierenden Flexibilitätskorridore für die Zeitpunkte t_0 , t_1 und t_2 . Die Mengenflexibilität in diesen resultierenden Korridoren wird durch die Faktoren $\alpha_{p,j}^r$ und $\omega_{p,j}^r$ bestimmt, die sich nicht mehr ausschließlich auf die jeweilige Planungsperiode, sondern auf die Zeit bis zur Auslieferung beziehen und daher

nicht mehr mit dem Symbol * versehen sind. Es gilt der folgende mathematische Zusammenhang (TSAY & LOVEJOY 1999):

$$X_{p,j}(t)(1 - \omega_{p,j}^r) \leq X_{p,0}(t + j) \leq X_{p,j}(t)(1 + \alpha_{p,j}^r) \quad (\text{Gl. 3})$$

Dabei gilt:

$$1 + \alpha_{p,j}^r = \prod_{q=1}^j (1 + \alpha_{p,q}^{r*}) \quad (\text{Gl. 4})$$

$$1 - \omega_{p,j}^r = \prod_{q=1}^j (1 - \omega_{p,q}^{r*}) \quad (\text{Gl. 5})$$

mit

- $\alpha_{p,j}^r$ resultierender relativer Faktor der maximal zulässigen Erhöhung von Bestellmenge $X_{p,j}(t)$ bis zum Lieferzeitpunkt $t + j$
- $\omega_{p,j}^r$ resultierender relativer Faktor der maximal zulässigen Verringerung von Bestellmenge $X_{p,j}(t)$ bis zum Lieferzeitpunkt $t + j$

Es wird deutlich, dass das Vertragskonzept damit auch der im vorigen Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Annahme gerecht wird, dass zu einem früheren Planungszeitpunkt mehr Flexibilität zur Verfügung steht als zu einem späteren. Im Kontext der vorliegenden Arbeit ist es angebracht, sich auf die Betrachtung der resultierenden Mengenflexibilitätskorridore zu konzentrieren. Denn aus Sicht des liefernden Unternehmens ist zu gewährleisten, dass alle möglichen Mengenschwankungen innerhalb dieser Korridore bis zum Liefertermin realisiert werden können. Aus Kundensicht ist zu prüfen, ob die resultierende Mengenflexibilität in dem entsprechenden Zeithorizont tatsächlich auch benötigt wird.

Durch Simulationsstudien weisen TSAY & LOVEJOY (1999) positive Auswirkungen ihres Vertragskonzeptes auf eine Lieferkette nach. Neben verringerten Lagerhaltungskosten spiegeln sich diese in einer Dämpfung der Bedarfsschwankungen wider. Im Rahmen der Untersuchung betrachten sie auch den Einfluss einzelner Parameter, wie z. B. der vereinbarten Flexibilitätsprofile oder der Variabilität des Bedarfs auf die Kostenersparnis. Durch eine geeignete Festsetzung des Produktpreises können diese Einsparungen gleichmäßig auf die Vertragspartner verteilt werden, so dass eine Win-Win-Situation entsteht. Einschränkend ist für die Gültigkeit dieser Betrachtungen jedoch anzumerken, dass das Simulationsmodell sich lediglich auf die Entwicklung von Lagerbeständen bezieht und der Produktionsprozess keinen Kapazitätsbeschränkungen unterliegt.

Neben dem nachgewiesenen wirtschaftlichen Nutzen stellt die Planungssicherheit sowohl auf Seiten von Kunden als auch von Lieferanten einen wesentlichen Vorteil

solcher Rahmenverträge dar (STEVENSON & SPRING 2007 S. 695). Auf Lieferantenseite können somit unerfüllbare Kundenwünsche, auf Kundenseite Enttäuschungen durch Lieferausfälle bzw. -rückstände vermieden werden. Sinnvollerweise stellt eine solche vertragliche Regelung jedoch vor allem eine Mindestleistung dar, denn es lassen sich Konstellationen (vor allem im Zusammenspiel mit weiteren Kundenaufträgen) vorstellen, bei denen die Über- oder Unterschreitung der Grenzen auch zu einer Glättung der Kapazitätsauslastung und somit einer Kostenentlastung beim liefernden Unternehmen führen können.

2.4.3 Preismodelle bei Mengenbedarfsschwankungen

Bestellmengenschwankungen eines Kunden können mithilfe von Rahmenvertragsvereinbarungen nicht nur eingeschränkt, sondern auch gezielt im Sinne des Lieferanten beeinflusst werden, wenn Anreizsysteme in Form von Preismodellen geschaffen werden. Diese gewähren dem Kunden dann einen günstigeren Produktpreis, wenn dem Lieferanten ebenfalls Vorteile entstehen. Hierdurch wird der wirtschaftliche Nutzen zwischen Kunden und Lieferanten aufgeteilt, so dass in der Regel ein beiderseitiges Interesse an derartigen Vereinbarungen besteht. Auch für diese Form von Verträgen ist eine Vielzahl an Modellen in der wissenschaftlichen Literatur zu finden, die sich im Wesentlichen hinsichtlich der Aufteilung des Nutzens zwischen den Partnern, aber auch hinsichtlich der pragmatischen Umsetzbarkeit unterscheiden. Eine Übersicht über einige Modelle geben MÜLLER (2011, S. 87 ff.), BASSOK & ANUPINDI (1997), BASSOK & ANUPINDI (2008) und LIAN & DESHMUKH (2009).

An dieser Stelle wird exemplarisch ein Preismodell vorgestellt, das auch in der Arbeit von MÜLLER (2011) angewandt wird, da es dem Sachverhalt schwankender Produktionsmengen in einem Unternehmen in hohem Maße gerecht wird und das zugrundeliegende Problem veranschaulicht.

Das Modell geht von einem um einen Mittelwert \bar{X}_p gleichverteilt schwankenden Kundenbedarf X_p aus (vgl. Abbildung 7). Werden diese Schwankungen eins zu eins in der Produktion des Lieferanten abgebildet, so entstehen hier Kosten durch häufige Kapazitätsanpassungen, die sich in den Herstellkosten des Produktes niederschlagen. Der Lieferant hat das Ziel, diese Anpassungskosten zu vermeiden. Die effizienteste Produktion lässt sich für ihn bei einer konstanten Ausbringung realisieren. Die dadurch niedrigeren Herstellkosten wirken sich sowohl positiv auf seine Erträge aus, können aber auch durch geringere Produktpreise an den Kunden weitergegeben werden. In dieser Situation wird ein Preismodell angesetzt, das den nie-

drigsten Preis für eine dem Mittelwert entsprechende Bestellmenge ansetzt und eine Preissteigerung für Abweichungen vom Mittelwert vorsieht. Dies wird nicht nur der tatsächlichen Kostensituation besser gerecht, sondern erlaubt sogar eine Differenzierung nach reinen Produktkosten und Kosten der Mengenflexibilität. Für den Kunden übersteigen diese Kosten ab einem gewissen Punkt seinen Nutzen aus einer höheren Flexibilität, sodass er die Bestellmengenschwankung auf dieses Maß begrenzt.

Abbildung 7 veranschaulicht das Schaffen von Anreizen durch eine Preisfunktion. In Abbildung 7 a) liegt ein konstanter Preis G_1 für das Produkt vor. Für den Kunden ist es daher unerheblich, ob sein Bedarf eine höhere Schwankung (symbolisiert durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion W_1) oder eine geringere Schwankung (W_2) aufweist, da der durchschnittlich zu entrichtende Preis \bar{G}_1 stets gleichbleibt. In Abbildung 7 b) wird der Anreiz durch die Preisfunktion G_2 deutlich, da der durchschnittliche Produktpreis \bar{G}_2 für den Kunden bei geringerer Bedarfsschwankung sinkt.

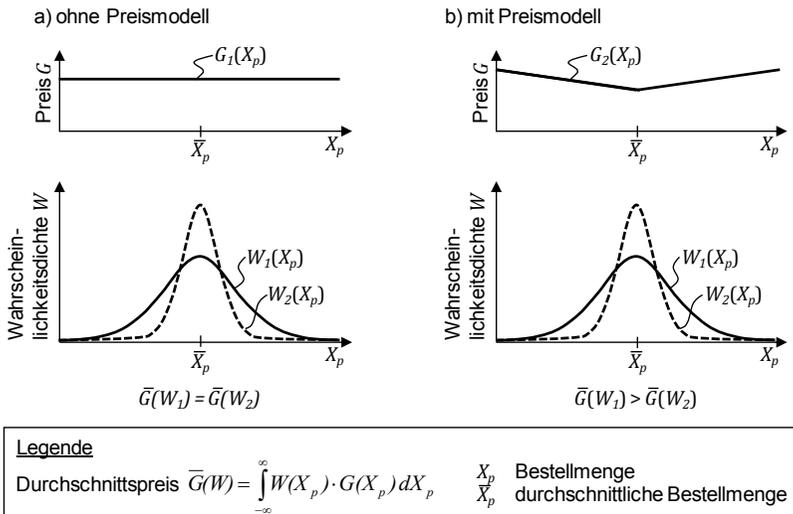


Abbildung 7: Anreiz zur Reduzierung der Nachfrageschwankung durch ein Preismodell nach MÜLLER (2011)

MÜLLER (2011, S. 135 ff.) geht in seiner Arbeit konkret auf die Gestaltung solcher Vereinbarungen ein. Mithilfe spieltheoretischer Überlegungen weist er die Wirksamkeit zur Reduzierung von Nachfrageschwankungen nach und ermittelt den Gewinn, der in der Kunden-Lieferanten-Beziehung durch den Einsatz von Preismodellen realisiert werden kann. Schließlich diskutiert er verschiedene Verlaufsformen für die Preisfunktion und gibt Hinweise zu deren Parametrierung. Sein Modell zielt jedoch im Wesentlichen darauf ab, Bedarfsschwankungen insgesamt zu reduzieren und auf einen für die Produktion günstigen Bereich zu beschränken. Er geht nicht darauf ein, welche Vorplanungszeit Lieferanten zur Realisierung von Mengenschwankungen benötigen und ob die dadurch entstehenden Kosten bei unterschiedlichen Zeithorizonten verschieden ausfallen.

2.5 Gestaltungsfaktoren zur Erzielung von Mengenflexibilität

2.5.1 Systematisierungsansatz

Um die verfügbare Mengenflexibilität in einem Unternehmen fundiert bewerten zu können, ist zunächst die Kenntnis derjenigen Faktoren erforderlich, die die Mengenflexibilität determinieren oder beeinflussen. Im Folgenden werden diese Faktoren aufgeführt, erläutert und für die weitere Behandlung innerhalb dieser Arbeit systematisiert. Für die Systematisierung werden zwei Klassen von Faktoren unterschieden:

Einige Faktoren basieren auf Systemeigenschaften, die zwar ein flexibles Agieren des Unternehmens ermöglichen oder erleichtern, jedoch im Falle von Mengenschwankungen keinen eigenen Handlungsspielraum zu Anpassung des Systems bereithalten. Sie zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass einmalige oder laufende Kosten unabhängig davon anfallen, ob die durch sie geschaffene Flexibilität tatsächlich in Anspruch genommen wird. Im Folgenden werden diese Faktoren als *Hilfsfaktoren* bezeichnet (REINHART & SCHELLMANN 2011). Vorgehaltene, überschüssige Kapazitäten sind beispielsweise Hilfsfaktoren, da die Kosten dafür unabhängig von ihrer Nutzung anfallen. Ebenso dienen Sicherheitsbestände im Lager als Hilfsfaktor, sofern sie als reiner Puffer stets etwa gleich groß gehalten und nicht dynamisch an die Auftragslage angepasst werden.

Die zweite Klasse umfasst Faktoren, die im Bedarfsfall einen Handlungsspielraum bieten, um die Mengenausbringung zielgerichtet zu verändern. Diese werden hier als *Stellfaktoren* bezeichnet. Im Gegensatz zu den Hilfsfaktoren verändern sich die im Unternehmen anfallenden Kosten, wenn die Mengenausbringung mithilfe von

Stellfaktoren angepasst wird. Dies führt zu einer weitestgehenden Variabilisierung der Kosten im Einklang mit der Ausbringungsmenge (REINHART & SCHELLMANN 2011). So werden z. B. Überstunden angeordnet, um die Kapazität einzelner Arbeitssysteme kurzfristig anzupassen. Kosten fallen dafür nur an, wenn die Mitarbeiter in der Produktion aufgrund der Anordnung tatsächlich länger als gewöhnlich arbeiten.

2.5.2 Kapazität als zentraler Einflussfaktor der Mengenflexibilität

Schon die Definition der Produktionskapazität in Abschnitt 2.2.1 als Potential zum Ausstoß von Leistungen in einer festgelegten Zeitperiode macht deutlich, dass diese die zentrale Größe zur Bestimmung der Mengenausbringung eines Unternehmens ist. In vielen Fällen wird die Kapazität sogar in Mengeneinheiten des zu produzierenden Gutes pro Zeitperiode angegeben (BETGE 1996 S. 852 ff.). Eine Variation der Ausbringungsmenge kann daher in erster Linie durch die entsprechende Veränderung der Produktionskapazität vollzogen werden.

Nach KALUZA (1994, S. 55 ff.) setzt sich die Kapazität eines Arbeitssystems aus der Betriebsmittel- und der Personalkapazität zusammen. Jede dieser beiden Größen wird wiederum durch das Produkt der drei Faktoren *Einsatzzeit*, *Kapazitätsquerschnitt* und *Intensität* bzw. *Leistungsgrad* bestimmt. Die Einsatzzeit beschreibt dabei die maximale Dauer, für die ein Betriebsmittel bzw. das Personal eingesetzt werden kann. Der Kapazitätsquerschnitt gibt die Anzahl gleichartiger verfügbarer Betriebsmittel bzw. gleichartig einsetzbarer Mitarbeiter an. Die Intensität und der Leistungsgrad schließlich sind ein Maß für die vorliegenden Arbeitsgeschwindigkeiten von Betriebsmitteln bzw. Mitarbeitern im Verhältnis zu einer Referenz-Arbeitsgeschwindigkeit.

Die Veränderung der Kapazität zur flexiblen Anpassung der Produktionsmenge bedarf der Anpassung eines oder mehrerer dieser Faktoren, wobei zu beachten ist, dass die Schnittmenge der beiden Größen die nutzbare Kapazität bestimmt, Betriebsmittel- und Personalkapazität sich also in den einzelnen Dimensionen jeweils gegenseitig Restriktionen setzen (vgl. Abbildung 8). So ist es beispielsweise nicht sinnvoll, die Personalkapazität durch zusätzliches Personal beliebig zu erhöhen, wenn nicht in ausreichender Anzahl Betriebsmittel zur Verfügung stehen, an denen dieses Personal eingesetzt werden kann. Hier stellt der Kapazitätsquerschnitt der Betriebsmittel eine Grenze für den nutzbaren Kapazitätsquerschnitt des Personals dar.

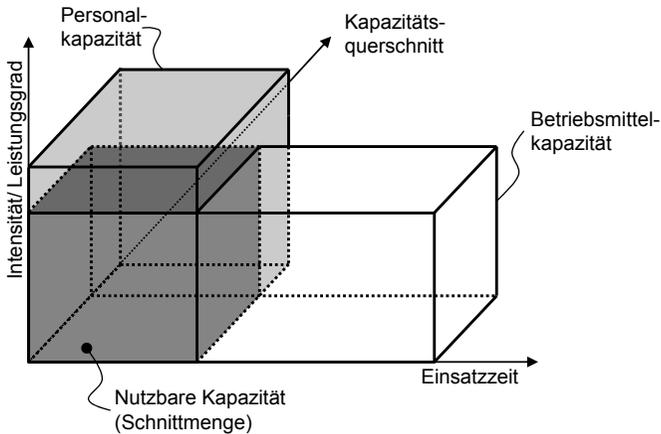


Abbildung 8: Zusammensetzung der Kapazität eines Arbeitssystems in Anlehnung an KALUZA (1994)

Anpassung der Personalkapazität

Die Einsatzzeit des Personals stellt eine der gängigsten Stellgrößen der Produktionskapazität dar. Sie lässt sich beispielsweise durch die Anordnung von Überstunden gut an den Kapazitätsbedarf anpassen (GOTTSCHALK 2007 S. 41). Um die Möglichkeiten zur Kapazitätsanpassung über die Personaleinsatzzeit zu erweitern, wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche flexible Arbeitszeitmodelle entwickelt und erfolgreich in Unternehmen eingesetzt (WANGER 2006). Üblich ist in vielen Unternehmen beispielsweise der Einsatz von Arbeitszeitkonten, in denen zu Zeiten hoher Arbeitsbelastung Überstunden angesammelt werden, die in Zeiten geringer Belastung wieder durch Freizeit ausgeglichen werden. Auch die Möglichkeit, das Schichtsystem zu verändern, zählt zu den Maßnahmen zur Anpassung der Personaleinsatzzeit. Hierfür ist es häufig notwendig, zusätzliches Personal z. B. in Form von Leiharbeitern zu akquirieren. Die Anpassung der Personaleinsatzzeit ist als Stellfaktor zu klassifizieren, da sich die anfallenden Kosten im Zuge der Anpassungsmaßnahmen verändern. Auch beim Arbeitszeitkonto ist dies der Fall, wenn es als Kostenverrechnungskonto betrachtet wird.

Neben der Anpassung der Einsatzzeit bietet der Einsatz von Leiharbeitern darüber hinaus die Möglichkeit, den Kapazitätsquerschnitt des Personals zu ändern, indem die Personalstärke innerhalb der bestehenden Arbeitsschichten verstärkt wird (SUAREZ ET AL. 1995). Diese Möglichkeit ist ebenfalls als ein Stellfaktor zu sehen.

Die Erhöhung des geforderten Leistungsgrads der Mitarbeiter ist als Maßnahme zur flexiblen Kapazitätsanpassung nicht zu empfehlen, da diese mit einer deutlich höheren Belastung der Mitarbeiter einhergeht und damit höhere Fehlerraten oder sogar Unfälle nach sich ziehen kann. Dies bedeutet jedoch nicht, dass Leistungssteigerungen durch Rationalisierungsmaßnahmen (z. B. durch zusätzliche Hilfsmittel) ausgeschlossen werden. Solche Verbesserungen werden stets im Rahmen von Produktivitätssteigerungen umgesetzt, jedoch werden sie nicht wieder rückgängig gemacht, sobald die Kapazität reduziert werden muss (GOTTSCHALK 2007 S. 41). Da für flexible Kapazitätsanpassungen aber Reversibilität gefordert ist, kommen sie hier nicht in Frage.

Anpassung der Betriebsmittelkapazität

Die Erweiterung oder Reduzierung der Kapazität von Betriebsmitteln gestaltet sich etwas anders: Während beim Menschen nach einer gewissen Einsatzzeit Erschöpfungerscheinungen auftreten und daher seine Einsatzzeit begrenzt ist, sind Maschinen – abgesehen von Wartungs-, Reparatur- und betriebsbedingten Stillstandzeiten – rund um die Uhr einsetzbar. Eine Erweiterung der maximalen Einsatzdauer ist dadurch nicht realisierbar. Um mengenflexibles Produzieren zu ermöglichen, wird daher meist von vornherein eine höhere Betriebsmittelkapazität als im Regelfall notwendig vorgesehen, so dass stets ein Kapazitätsüberschuss vorhanden ist, der flexibel genutzt werden kann (RATURI & JACK 2004). Dies führt jedoch dann zu Zielkonflikten, wenn mit der Anschaffung des Betriebsmittels erhebliche Investitionen verbunden sind, die nur durch eine hohe Auslastung wirtschaftlich zu rechtfertigen sind. Unweigerliche Folge ist in einem solchen Fall eine hohe Inflexibilität des entsprechenden Arbeitssystems in Bezug auf Kapazitätsanpassungen. Das Vorhalten von Kapazitätsüberschüssen bei Betriebsmitteln ist als Hilfsfaktor einzustufen.

Die flexible Änderung des Kapazitätsquerschnitts bedeutet eine kurzfristige Anschaffung oder Veräußerung von Betriebsmitteln. Dies ist – wenn überhaupt – nur in sehr geringem Umfang möglich, da für eine Anschaffung Investitionen notwendig sind und die Reversibilität der Kapazitätserweiterung mit geringen Kosten in Frage zu stellen ist. Die Möglichkeit widerspricht daher der hier gewählten Flexibilitätsdefinition (vgl. 2.2.2) und wird eher als eine Maßnahme der Wandlungsfähigkeit verstanden. Eingeschränkte Möglichkeiten bestehen jedoch ggf. im kurzfristigen Leihen oder Leasen von Betriebsmitteln. Liegt diese Möglichkeit vor, handelt es sich um einen Stellfaktor der Mengenflexibilität.

Auch die Anpassung der Intensität der Nutzung von Betriebsmitteln, die z. B. KALUZA (1994, S. 56) als Flexibilisierungsmöglichkeit anführt, wird hier eher kri-

tisch gesehen. Der Argumentation GOTTSCHALKS (2007, S. 41) folgend können Änderungen der Intensität entweder aufgrund ohnehin zu hebender Rationalisierungspotentiale durchgeführt werden und führen somit zu einer dauerhaften Intensitätssteigerung, oder es ist im Zuge der Intensitätssteigerung mit Qualitätseinbußen zu rechnen. Die intensivere Nutzung von Produktionsanlagen wird hier nur in dem Fall als sinnvoll erachtet, wenn durch einen höheren Personaleinsatz z. B. Handhabungszeiten reduziert werden können und somit die Anlage ohne Qualitätseinbußen schneller betrieben werden kann. Dies ist jedoch nur durch eine gleichzeitige Erhöhung des Kapazitätsquerschnitts beim Personal möglich.³

2.5.3 Weitere Einflussfaktoren auf die Mengenflexibilität

JACK & RATURI haben sich in mehreren sehr umfangreichen Studien mit Faktoren zur Erhöhung der Mengenflexibilität in der Produktion befasst (JACK & RATURI 2002, 2003, RATURI & JACK 2004). Sie unterscheiden dabei zwischen internen Faktoren, die durch die Organisation innerhalb eines Unternehmens determiniert werden, und externen Faktoren, die sich durch die Zusammenarbeit mit anderen Unternehmen ergeben (JACK & RATURI 2002).

Neben den oben bereits erläuterten Möglichkeiten zu Anpassung der Produktionskapazität, haben JACK & RATURI weitere *interne Faktoren* identifiziert, die ein Unternehmen dazu befähigen, mengenflexibel zu produzieren. Sie zielen im Wesentlichen darauf ab, die im Unternehmen bestehende Kapazität besser auszunutzen:

- *Lagerbestände* können vorgesehen werden, um den Marktbedarf von der Produktion zu entkoppeln und die Produktionsauslastung zu verstetigen (JACK & RATURI 2002, COX 1989). Wird ein Lagerbestand als gleichbleibender Sicherheitsbestand vorgesehen (statische Bestandsführung), handelt es sich um einen Hilfsfaktor der Mengenflexibilität, da konstante Kosten anfallen. Wird er hingegen gezielt zur Antizipation eines vorhersehbaren zukünftigen Bedarfs aufgebaut (dynamische Bestandsführung) ist er als Stellfaktor zu klassifizieren.
- Die *Verringerung von Rüstzeiten* erhöht die Wirtschaftlichkeit der Produktion kleiner Losgrößen und erleichtert damit die Anpassung der Produktions-

³ Neue Forschungsansätze verfolgen das Ziel der Intensitätssteigerung durch den Einsatz von mobilen Assistenzrobotern (REINHART ET AL. 2010). Hierdurch ist zwar eine nur vorübergehende Intensitätssteigerung möglich, jedoch werden dafür zusätzliche Handhabungsroboter benötigt, was letztendlich als Veränderung des Kapazitätsquerschnitts bei den Betriebsmitteln zu sehen ist. Da derartige Ansätze in der Praxis noch nicht etabliert sind, werden sie im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

menge (GUPTA & GOYAL 1989). Es handelt sich hierbei um einen Hilfsfaktor, da einmal verkürzte Rüstzeiten nicht wieder künstlich verlängert werden.

- *Vielseitig ausgebildete Mitarbeiter* sorgen als Springer für einen Kapazitätsausgleich, wenn in Arbeitssystemen sehr unterschiedliche Kapazitätsbelastungen vorliegen (GERWIN 1989). Sie werden als Hilfsfaktor klassifiziert, da sie nicht zur Veränderung der anfallenden Kosten im Rahmen der Mengenflexibilität beitragen.
- *Flexible Maschinen*, die einen großen Funktionsumfang besitzen, lassen sich für die Herstellung unterschiedlicher Produkte nutzen und sorgen so für eine ausgeglichene Kapazitätsbelastung trotz schwankender Produktbedarfe (vgl. SETHI & SETHI 1990). Eine flexible Maschine stellt einen Hilfsfaktor dar, weil sie nach ihrer Anschaffung gleichbleibende Kosten verursacht.
- Der *Einsatz geeigneter Planungs- und Steuerungssysteme* im Vertrieb, im Auftragsmanagement und in der Produktionsplanung trägt zu einer besseren Prognostizierbarkeit schwankender Mengenbedarfe bei und ermöglicht eine gleichmäßigere Produktionsauslastung (RATURI & JACK 2004). Die Systemanschaffung erfolgt einmalig und nicht im Zuge von Mengenanpassungen, somit handelt es sich hier um einen Hilfsfaktor.
- *Kurze Auftragsdurchlaufzeiten* in Planung und Produktion vereinfachen die kurzfristige Anpassung von Produktionsplänen an sich ändernde Rahmenbedingungen (RATURI & JACK 2004). Da die Durchlaufzeit nicht gezielt im Rahmen der Mengenflexibilität verändert wird, liegt hier ein Hilfsfaktor vor.
- Eine *flexibilitätsorientierte Produktgestaltung*, die eine späte Variantenbildung erlaubt, trägt zur Erzielung von Mengenflexibilität bei, da das Produkt weitestgehend auftragsneutral vorproduziert werden kann und nur die variantenbildenden Prozesse den Mengenschwankungen der Marktnachfrage unterliegen (SWAMINATHAN & TAYUR 2003, SALVADOR ET AL. 2007 S. 1181 f.). Auch hierbei handelt es sich um einen Hilfsfaktor.

Externe Faktoren beziehen sich im Wesentlichen auf die Beziehungen zu Lieferanten, Kunden und Händlern (JACK & RATURI 2002, 2003, RATURI & JACK 2004):

- Die Mengenflexibilität, die von Lieferanten hinsichtlich der Lieferung von Material und Vorprodukten realisiert werden kann, ist ein entscheidender Aspekt für die Mengenflexibilität eines Unternehmens, da die Verfügbarkeit von Material und Vorprodukten limitierend auf die Mengenausbringung wirkt. Insbesondere wenn es sich um auftragspezifische und somit nicht bevorratungsfähige Vorprodukte handelt, ist *Mengenflexibilität bei Lieferanten* gefragt (REINHART & SCHELLMANN 2009). Geeignete Flexibilitäts-

vereinbarungen in Rahmenverträgen und Ansätze des SCM sind hier die wesentlichen Gestaltungsmerkmale (TSAY & LOVEJOY 1999). Mengenflexibilität von Lieferanten stellt einen wichtigen Stellfaktor dar, weil innerhalb der Flexibilitätsgrenzen des Lieferanten die Liefermenge direkt an den Materialbedarf angepasst werden kann.

- Die *Nutzung von Fremdkapazität* bei Kapazitätsengpässen ist ebenfalls als Stellfaktor zu betrachten. Hierbei werden Produktionsumfänge kurzfristig und nur vorübergehend an Lieferanten ausgelagert, die über vergleichbare Produktionskapazitäten verfügen (WINDT 2001). Die Nutzung sogenannter Betreibermodelle (vgl. LAY ET AL. 2003) wird in der vorliegenden Arbeit ebenfalls unter diesem Punkt subsummiert. In der Praxis wird das Prinzip der vorübergehenden Nutzung von Fremdkapazität auch als *verlängerte Werkbank* bezeichnet. Es bietet den Vorteil, dass neben der Personal- auch gleichzeitig die Betriebsmittelkapazität erhöht werden kann.
- Ähnlich zur Nutzung von Fremdkapazität ist das *Bündeln und gemeinsame Nutzen von Produktionskapazitäten mit strategischen Partnern*. Hierdurch können sich Bedarfsschwankungen der Partner gegenseitig ausgleichen (RATURI & JACK 2004). Kosten fallen hierbei nur für die genutzte Kapazität an, daher ist diese Option ebenfalls als Stellfaktor einzustufen.

Im Rahmen einer empirischen Untersuchung zeigen JACK & RATURI (2002) die Bedeutung einzelner Faktoren für das operative Geschäft von Unternehmen auf. Dabei stellen sich besonders der flexible Einsatz von Arbeitskräften sowie das Vorsehen von Kapazitäts- und Materialpuffern als gängige Maßnahmen zur kurzfristigen Realisierung von Mengenflexibilität heraus, die von vielen Unternehmen eingesetzt werden. Eine Diskussion der praktischen Realisierbarkeit ausgewählter Flexibilitätssmaßnahmen findet darüber hinaus auch bei SALVADOR ET AL. (2007) statt. Dort werden neben einem geeigneten Produktdesign der flexible Einsatz von Arbeitskräften und die Lieferantenflexibilität als entscheidende Faktoren identifiziert.

Zusätzlich zu den von JACK & RATURI genannten Faktoren stellen BROWNE ET AL. (1984, S. 115) *Routenflexibilität* explizit als Mittel heraus, um Mengenflexibilität zu erlangen. Sie eröffnet die Möglichkeit, Produkte auf verschiedenen Fertigungspfaden herzustellen und infolgedessen unterschiedliche Sequenzen von Arbeitssystemen für die Produktion einzusetzen. Auf diese Weise können ggf. auftretende Kapazitätsengpässe umgangen oder beseitigt werden (ROSCHE 2008 S. 27, WEMHÖNER 2006 S. 35, ZHANG ET AL. 2003 S. 178). Routenflexibilität wird hier als Stellfaktor eingestuft, weil sie die Möglichkeit bietet, Kapazitätsbedarfe so zu wählen, dass ein möglichst günstiges Kostenniveau erreicht wird.

Ein Verfahren zur gleichmäßigen Auslastung der Produktion trotz schwankender Bedarfe für einzelne Produkte stellt die *Produktionsglättung* dar. Hierbei werden für die verschiedenen Produkte jeweils standardisierte Losgrößen definiert, die gleichgroße Kapazitätsbedarfseinheiten in der Produktion aufweisen. Kurzfristige Änderungen der Abarbeitungsreihenfolge der Lose sowie unterschiedliche mengenmäßige Zusammensetzungen des Produktmixes im Produktionsprogramm können dadurch mit geringem Planungsaufwand realisiert werden und führen zu einer besseren Kapazitätsausnutzung (ERLACH 2007 S. 205 ff.). Die bessere kurzfristige Planbarkeit der Produktionsreihenfolge bringt dabei den Hauptnutzen für die Mengenflexibilität. Der Einsatz der Produktionsglättung ist ähnlich zu sehen, wie der Einsatz von geeigneten PPS-Systemen, und ist somit als Hilfsfaktor zu betrachten.

In nachfolgender Tabelle 1 werden die in diesem und dem vorangegangenen Abschnitt 2.5.2 aufgeführten Faktoren den jeweiligen Klassen zugeordnet.

Tabelle 1: Faktoren zur Erzielung von Mengenflexibilität (REINHART & SCHELLMANN 2011)

Stellfaktoren	Hilfsfaktoren
<ul style="list-style-type: none"> • Überstunden • Flexible Arbeitszeitmodelle • Leiharbeitskräfte • Leihen oder Leasen von Betriebsmitteln • Mengenflexibilität von Lieferanten • Nutzbare Fremdkapazität • Gebündelte und mit Partnern gemeinsam genutzte Kapazität • Routenflexibilität • Material- und Fertigwarenbestände (dynamische Bestandsführung) 	<ul style="list-style-type: none"> • Überschüssige Kapazität • Geringe Rüstzeiten • Vielseitig ausgebildete Mitarbeiter • Flexible Maschinen • Geeignete Planungs- und Steuerungssysteme • Kurze Auftragsdurchlaufzeiten • Flexibilitätsorientierte Produktgestaltung • Produktionsglättung durch standardisierte Losgrößen • Material- und Fertigwarenbestände (statische Bestandsführung)

2.6 Bewertung von Flexibilitätsbedarf und -angebot

2.6.1 Grundlagen zur Bewertung von Flexibilität

In Anbetracht der umfangreichen Literatur ist die Flexibilisierung der Produktion unumstritten eine entscheidende Herausforderung, um die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen zu erhalten und auszubauen. Flexibilität hat sich so zu einer der begehrtesten Eigenschaften in Produktionssystemen entwickelt (SHEWCHUK & MOODIE 1998 S. 325). Die von Unternehmen verfolgten Flexibilitätsstrategien sind vielfältig, eine einheitliche Erfolgsformel für die Gestaltung flexibler Produktionssysteme hat sich bisher noch nicht durchgesetzt. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass – gemäß dem Grundsatz „you cannot manage what you cannot measure“ – für eine zielgerichtete Gestaltung eines Systems auch eine Bewertung benötigt wird, die das Maß der Zielerfüllung darlegt oder Verbesserungspotentiale aufzeigt (vgl. CHRYSOLOURIS 1996 S. 581, ABELE ET AL. 2006). Bisher stehen für die Bewertung von Mengenflexibilität und anderer Flexibilitätsarten kaum allgemein anerkannte Verfahren zur Verfügung (ROGALSKI & OVTCHAROVA 2009, RÜHL 2010 S. 27).

Die Vielschichtigkeit der Flexibilität (vgl. SETHI & SETHI 1990, TONI & TONCHIA 1998) macht ihre ganzheitliche Bewertung nahezu unmöglich. Ansätze von Autoren, verschiedene Arten der Produktionsflexibilität mit einzelnen oder wenigen aggregierten Kennzahlen umfassend zu bewerten, setzen meist feste Gewichtungen zwischen den Flexibilitätsarten voraus. Dadurch wird jedoch das dahinterstehende Konzept der Produktionsflexibilität undurchschaubar (vgl. z. B. ABELE ET AL. 2008A). Die Tatsache, dass einzelne Autoren zur vollständigen Beschreibung von speziellen Flexibilitätsarten jeweils bis zu fünf verschiedene Kennzahlen definieren (vgl. DAS 1996), zeigt deutlich, wie wichtig es ist, den zu bewertenden Sachverhalt zunächst klar zu fassen und das Ziel der Flexibilitätsbewertung aufzuzeigen.

Für eine sinnvolle Parametrierung von Vereinbarungen zur Mengenflexibilität in Rahmenverträgen werden zum einen Kennzahlen benötigt, anhand derer der Mengenflexibilitätsbedarf eines Kunden sowie das Mengenflexibilitätsangebot eines Lieferanten bemessen und eindeutig charakterisiert werden können. Zum zweiten besteht Bedarf an Methoden, um die jeweiligen Werte für diese Kennzahlen zu bestimmen. In den folgenden Abschnitten wird daher auf bestehende Bewertungsverfahren und Beschreibungsmodelle der Mengenflexibilität eingegangen und ihre diesbezügliche Eignung überprüft.

2.6.2 Bestimmung des kundenseitigen Mengenflexibilitätsbedarfs

In diesem Abschnitt werden Methoden aufgeführt, um den Bedarf eines Kunden nach Mengenflexibilität bei der Bestellung von Material oder Vorprodukten zu bestimmen. Dieser leitet sich wiederum aus den Bedarfsschwankungen seines Absatzmarktes ab.

Verlässliche Informationen über den bestehenden Marktbedarf nach einem Produkt liegen grundsätzlich erst beim Verkauf des Produktes am Absatzmarkt vor. Die Prognose von Absatzmengen ist daher schon immer eine Aufgabe gewesen, die Unternehmen bewältigen müssen, um Produktionskapazitäten planen zu können. Dies gilt umso mehr, wenn zum Aufbau von Kapazitäten langfristige Investitionen getätigt werden. Zur Gewinnung von Absatzprognosen werden häufig Szenarienbasierte Prognoseverfahren eingesetzt, bei denen Nachfrageverläufe aus einer Verdichtung von Marktszenarien und Verkaufsprognosen gewonnen werden (MÜLLER 2011 S. 72). Übersichten und weiterführende Studien zu solchen Prognoseverfahren sind bei CHAND ET AL. (2002), ÇAKANYILDIRIM & ROUNDY (2002) und RYAN (2003) zu finden.

Für die Planung von Mengenflexibilität in einem Produktionssystem ist es notwendig, nicht nur den zukünftigen Bedarf zu antizipieren, sondern auch Informationen über mögliche Schwankungen des Bedarfs zu erhalten. Szenarienbasierte Prognoseverfahren vernachlässigen jedoch größtenteils die Einflüsse von Unsicherheiten und Marktdynamik (MÜLLER 2011 S. 72). Längerfristige Schwankungen, z. B. aufgrund von saisonalen Effekten oder Produktlebenszyklen werden meist noch bei der Bedarfsprognose berücksichtigt. In der Realität sind jedoch darüber hinaus Abweichungen von dem prognostizierten Bedarf zu beobachten, die auf vielfältigen Marktunsicherheiten bei der Prognose basieren. Diese Bedarfsunsicherheiten sind die Hauptursache dafür, dass in Produktionssystemen und Lieferketten schnell zu realisierende Flexibilitätsmaßnahmen vorgesehen werden müssen.

Informationen, um die Schwankungen des Bedarfs abzuschätzen, können durch eine Abstimmung mit Kunden, oder durch die Analyse von Bedarfsinformationen aus der Vergangenheit gewonnen werden (ZÄH & MÜLLER 2007A S. 155). Eine Abstimmung mit dem Kunden geschieht im Regelfall während der Verhandlung eines Rahmenvertrags, worauf bereits in Abschnitt 2.4 eingegangen wurde. Unter der Annahme, dass höhere Flexibilität höhere Kosten verursacht und der Kunde bei geringsten Kosten gerade die für ihn notwendige Mengenflexibilität aushandelt, kann davon ausgegangen werden, dass der Rahmenvertrag genau den Mengenflexibili-

tätsbedarf des Kunden widerspiegelt. Nichtsdestotrotz kann – insbesondere wenn keine Rahmenvereinbarung besteht – beobachtet werden, dass Kunden die Mengenflexibilität ihres Lieferanten stärker ausnutzen als eigentlich notwendig wäre, um ihren Bedarf zu sichern (LEE ET AL. 1997, DAS & ABDEL-MALEK 2003 S. 172, REN ET AL. 2006).

Unabhängig davon, ob ein Rahmenvertrag besteht, kann die Auswertung historischer Bestelldaten mit einer Zeitreihenanalyse weitere Auskünfte über den Mengen- und Flexibilitätsbedarf der Kunden liefern. Zeitreihen stellen Sequenzen von Beobachtungen eines Wertes dar, die entlang einer Zeitachse angeordnet sind. Im Falle von Bedarfsinformationen sind dies beispielsweise die eingegangenen Bestellungen für ein betrachtetes Produkt. Aus einer Zeitreihenanalyse können kontinuierliche Verteilungen gewonnen werden, die die Schwankungen eines Prognosewertes charakterisieren (MÜLLER 2011 S. 73). Beispielhaft wird hier auf das Verfahren der dreifachen exponentiellen Glättung eingegangen, das auch als Holt-Winters-Verfahren bekannt ist (HOLT 2004, WINTERS 1960, vgl. auch MAKRIDAKIS ET AL. 1998 S. 161 ff., SCHUHR 2005 S. 40 ff.). Dieses Verfahren wird auch von ZÄH & MÜLLER (2007A) für ihr Modell zur Bewertung von Kapazitätsflexibilität genutzt. Die Zeitreihe kann dabei in drei Komponenten, den *Trend*, die *Saisonalität* und die *irreguläre Komponente*, die häufig auch als *Rauschen* bezeichnet wird, zerlegt werden (MAKRIDAKIS ET AL. 1998 S. 82, TOUTENBURG & HEUMANN 2008 S. 206). Wird eine Zeitreihenanalyse mit dem Holt-Winters-Verfahren für eingegangene Bestellungen durchgeführt, kann die Bedarfsprognose nach dem jeweiligen Produkts p durch folgende Formel beschrieben werden kann:

$$X_p^{Prog}(t) = X_p^{Trend}(t) + X_p^{Sais}(t) + X_p^{irr}(t) \quad (\text{Gl. 6})$$

mit

- $X_p^{Prog}(t)$ Bedarfsprognose für Produkt p zum Zeitpunkt t
- $X_p^{Trend}(t)$ Trendkomponente des Bedarfs von Produkt p
- $X_p^{Sais}(t)$ saisonale Komponente des Bedarfs von Produkt p
- $X_p^{irr}(t)$ irreguläre Komponente des Bedarfs von Produkt p

Die Trendkomponente zeigt eine langfristige Entwicklung des Mengenbedarfs auf und basiert z. B. auf den Phasen des Produktlebenszyklus oder auf konjunkturellen Entwicklungen (MAKRIDAKIS ET AL. 1998 S. 82).

Die saisonale Komponente spiegelt wiederkehrende Bedarfsentwicklungen z. B. aufgrund von jahreszeitlichen Bedarfsmustern wider (MAKRIDAKIS ET AL. 1998

S. 82). Sie gibt Aufschluss über die Mengenflexibilität, die aufgrund regelmäßiger Schwankungen benötigt wird und somit einer verhältnismäßig guten Planbarkeit unterliegt.

Die irreguläre Komponente gibt allgemein auftretende Bedarfsschwankungen wieder, die keiner speziellen Ursache zugeordnet werden können. Beim Holt-Winters-Verfahren wird davon ausgegangen, dass die irreguläre Komponente einer Normalverteilung unterliegt (MÜLLER 2011 S. 75). Im Mittel ergibt sie den Wert 0 (TOUNTENBURG & HEUMANN 2008 S. 206). Sie kann daher durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$X_p^{irr}(t) \sim N(0, \sigma_p^{irr^2}) \quad (\text{Gl. 7})$$

mit

σ_p^{irr} Standardabweichung der irregulären Komponente des Bedarfs von Produkt p

Die irreguläre Komponente stellt den wesentlichen Mengenflexibilitätsbedarf der Kunden dar, allerdings gibt sie noch keine Auskunft über die Fristigkeit des Flexibilitätsbedarfs.

BARTHEL (2006, S. 87 ff.) liefert einen Ansatz zur Antizipation von Bestellmengen-schwankungen der Kunden, der nicht auf die Prognose zukünftiger Absatzmengen, sondern auf die Beschreibung des Bestellverhaltens der Kunden während einer rollierenden Planung abzielt. Mit diesem Ansatz können Informationen darüber gewonnen werden, mit welcher Vorlaufzeit Mengenänderungen typischerweise auftreten. Ähnlich wie bei dem in Abschnitt 2.4.2 erläuterten Vertragskonzept wird dabei davon ausgegangen, dass der Kunde frühzeitig eine erste Prognose über seinen Mengenbedarf abgibt, die er im Laufe der Zeit aktualisiert. Dadurch entsteht eine logische Bestellreihe, die die Entwicklung der Bestellmenge bezogen auf einen Liefertermin widerspiegelt. Für solche Bestellreihen stellt BARTHEL eine Analyse-methode vor, die ihm zur Bestimmung des Kundenbedarfs nach Mengen- und Terminflexibilität dient. Mit seiner Methode können nicht nur die jeweiligen Schwankungsbreiten, sondern auch deren zeitliche Veränderung bei näherrückendem Liefertermin bestimmt werden. BARTHEL gibt schließlich einen Ausblick, wie die Ergebnisse seiner Analyse-methode für die Gestaltung von Rahmenverträgen herangezogen werden können (BARTHEL 2006 S. 133 ff.).

Um mit der Methode von (BARTHEL 2006) statistisch zuverlässige Aussagen über das typische Kundenbestellverhalten zu erhalten, sind zahlreiche logische Be-

stellreihen aus der Vergangenheit als Datenbasis notwendig. In vielen realen Kunden-Lieferanten-Beziehungen ist die Verfügbarkeit einer entsprechenden Datenbasis jedoch anzuzweifeln, da die Daten entweder über mehrere Jahre angesammelt werden müssten, oder die rollierende Bestellplanung in sehr kurzen Zeitabständen (z. B. täglich) stattfinden müsste. Nichtsdestotrotz liegt mit der Methode von Barthel aber ein gutes Hilfsmittel vor, um eine qualifizierte Einschätzung des Bestellverhaltens zu unterstützen. In Verbindung mit der zu Beginn dieses Abschnitts vorgestellten Zeitreihenanalyse wird die Methode als hinreichend angesehen, um den Mengenflexibilitätsbedarf aus Kundensicht für Rahmenvertragsverhandlungen zu bestimmen.

2.6.3 Darstellung des lieferantenseitigen Mengenflexibilitätsangebots

Zur Beschreibung der in einem System verfügbaren Mengenflexibilität werden verschiedene Modelle angewendet. Sehr einfache Modelle gehen davon aus, dass theoretisch jede Mengenausbringung realisierbar ist und sich lediglich die durchschnittlichen Stückkosten dabei verändern. Die Mengenflexibilität wird dann durch die Steigung der Durchschnittskostenkurve ausgedrückt (SUAREZ ET AL. 1996, TEMPELMEIER & KUHN 1993). Solche Überlegungen bauen im Wesentlichen auf der Kostentheorie in der Mikroökonomik auf (vgl. z. B. WIESE 2010 S. 212 ff.), sind jedoch für praxisnahe Überlegungen eher ungeeignet, da außer den Kosten alle übrigen Restriktionen der Flexibilität vernachlässigt werden.

Ein weiteres, sehr einfaches Modell bestimmt den verfügbaren Mengenflexibilitätskorridor eines Systems, indem die Grenzen der technisch möglichen bzw. wirtschaftlichen Produktion ermittelt werden und den Flexibilitätskorridor festlegen. Die maximale Ausbringungsmenge bestimmt sich dabei aus der maximalen Kapazität, die durch sämtliche verfügbaren Maßnahmen zu Kapazitätsanpassung erzielt werden kann. Als minimale Ausbringungsmenge wird aufbauend auf einer Kostenanalyse die Absatzmenge errechnet, bei der die Gewinnschwelle übertreten wird (DAS 1996 S. 82 ff., ROGALSKI & OVTCHAROVA 2009). Es wird davon ausgegangen, dass zwischen minimaler und maximaler Ausbringungsmenge jede beliebige Menge realisierbar ist. Die wesentliche Voraussetzung besteht jedoch darin, dass sich der Produktmix dabei nicht verändert (ROGALSKI & OVTCHAROVA 2009). Abbildung 9 veranschaulicht die Bestimmung des Flexibilitätskorridors anhand der Erlös- und der Kostenentwicklung über der Produktionsmenge.

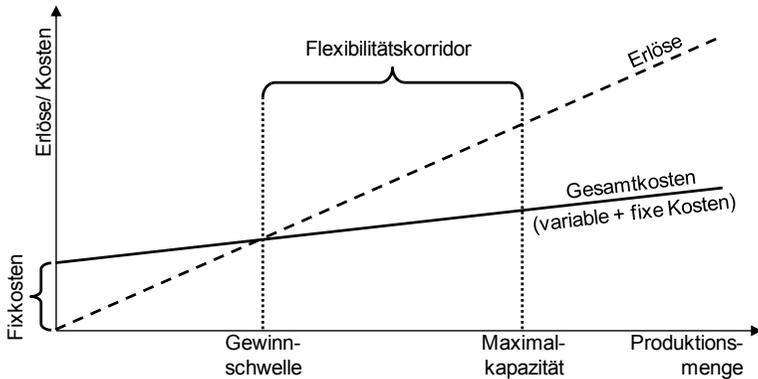


Abbildung 9: Bestimmung des Flexibilitätskorridors nach ROGALSKI & OVTCHAROVA (2009)

MÜLLER (2011, S. 111 ff.) definiert die Kapazitätsflexibilität eines Systems, indem er diskrete Zustände unterschiedlicher Kapazität beschreibt, die das System annehmen kann, und diesen ein jeweils damit verbundenes Fixkostenniveau zuweist (vgl. auch ZÄH & MÜLLER 2007B). Im Gegensatz zu dem in Abbildung 9 dargestellten Modell geht er auf die eher der Realität entsprechenden Tatsache ein, dass im Zuge der Veränderung der Ausbringungsmenge nicht nur die variablen Kosten proportional steigen, sondern durch die Kapazitätsanpassungen zusätzliche sprungfixe Kosten entstehen. Es ist daher nicht von einem linearen, sondern von einem un stetigen Gesamtkostenverlauf auszugehen. Der Fixkostenverlauf aufgrund der Kapazitätsflexibilität kann über ein Fixkosten-Kapazitäts-Diagramm veranschaulicht werden, wie es beispielhaft in Abbildung 10 dargestellt ist. Die Bestimmung der Mengenflexibilität aus diesen Informationen erfolgt analog zu Abbildung 9, jedoch müssen für die Gesamtkostenfunktion die sprungfixen Kosten aus Abbildung 10 mit den variablen Kosten überlagert werden. Vergleichbare Ansätze sind auch in anderen Arbeiten zu finden, so z. B. bei REINHART ET AL. (2007), WEMHÖNER (2006, S. 124 ff.), FRIESE (2008, S. 29 ff.) oder RÜHL (2010, S. 90 f.). Meistens basieren die Kapazitätszustände dabei auf den unterschiedlichen, im Unternehmen realisierbaren Schichtmodellen oder sind auf längerfristige Konfigurationsänderungen des Produktionssystems ausgelegt.

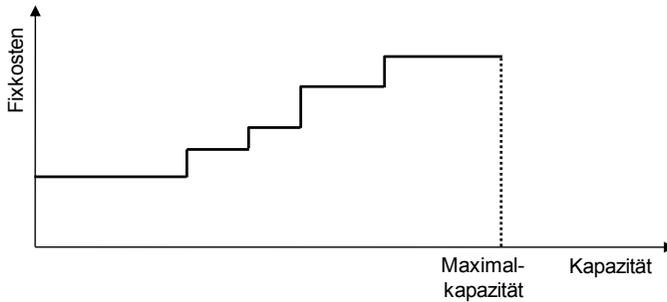


Abbildung 10: Fixkosten-Kapazitätsdiagramm zur Beschreibung der Kostenveränderung bei sich änderndem Kapazitätsbedarf

Nachteilig an den bisher genannten Modellen ist, dass sie keine Information darüber enthalten, mit welcher Frist die jeweiligen Kapazitätszustände erreicht werden können.

WIENDAHL & BREITHAUP (1998) stellen ein Modell vor, das auf zeitliche Abhängigkeiten der Kapazitätsflexibilität eingeht. Mit der Intention, die Möglichkeiten flexibler Arbeitszeitmodelle für Führungskräfte anschaulich darzulegen, entwickeln sie das Konzept der Kapazitätshüllkurven. Diese stellen die maximale sowie die minimale erzielbare Kapazität eines betrachteten Systems dar und bilden dabei die Reaktionszeit bis zur Bereitstellung sowie die Mindestinstallationszeit zusätzlicher Kapazität ab. Die verfügbare Mengenflexibilität ist direkt aus den Kapazitätshüllkurven errechenbar, sofern jeder produzierten Einheit ein fester spezifischer Kapazitätsbedarf zugrunde liegt.

GOTTSCHALK (2007) greift das Modell der Kapazitätshüllkurven auf. Er erweitert das bisher lediglich auf Arbeitszeitmodelle beschränkte Modell um zusätzliche Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung, wie z. B. eine temporäre Fremdvergabe von Produktionsumfängen an Lieferanten, und beschreibt jede Anpassungsmaßnahme mit einem standardisierten Satz an Parametern, die neben der Reaktionszeit bis zur Kapazitätsbereitstellung den jeweiligen Kapazitätsbeitrag einer Maßnahme, ihre minimale und maximale Nutzungsdauer sowie die Kosten für den Maßnahmen-einsatz umfassen. Darauf aufbauend bestimmt er sogenannte Flexibilitätsprofile für einzelne Arbeitssysteme, die neben den Kapazitätshüllkurven von WIENDAHL & BREITHAUP (1998) auch die einzelnen verfügbaren Anpassungsmaßnahmen abbilden. Bei der Aufstellung der Flexibilitätsprofile trägt GOTTSCHALK den Beginn

jeder Kapazitätsanpassungsmaßnahme zum frühesten möglichen Zeitpunkt in ein Diagramm ein und lässt die Maßnahme nach der maximalen Nutzungsdauer enden (vgl. Abbildung 11). Die Kapazitätshüllkurven nehmen daher anders als bei der Darstellung von WIENDAHL & BREITHAUPT (1998) in der fernen Zukunft wieder ab. Durch diese Darstellung lassen sich mögliche Zwischenstufen der Kapazitätsanpassung besser einschätzen und es werden zeitliche Begrenzungen bei der maximalen Nutzungsdauer aufgezeigt. Abbildung 11 zeigt ein beispielhaftes Flexibilitätsprofil eines Arbeitssystems. Die jeweiligen Anpassungsmaßnahmen sind darin als Flächen mit verschiedenen Mustern dargestellt, deren Höhe den jeweiligen Beitrag der Maßnahmen zu Kapazitätserhöhung bzw. -reduzierung widerspiegelt.

Um das Flexibilitätsprofil nach GOTTSCHALK vom dem in dieser Arbeit betrachteten kundenspezifischen Mengenflexibilitätsprofil abzugrenzen, wird die Darstellung GOTTSCHALKS im Folgenden stets als *Kapazitätsflexibilitätsprofil* bezeichnet.

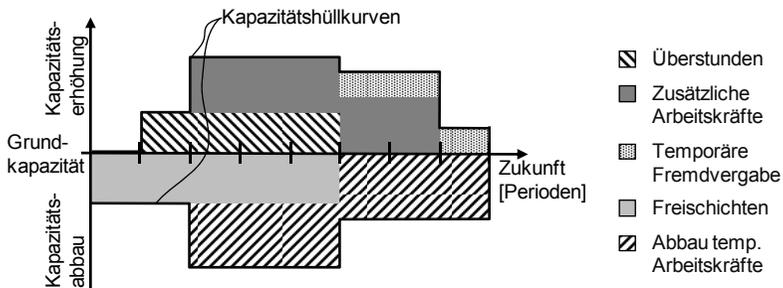


Abbildung 11: Beispiel für ein Kapazitätsflexibilitätsprofil (GOTTSCHALK 2007)

GOTTSCHALK (2007) leitet außerdem Algorithmen her, um Kapazitätsflexibilitätsprofile auch für verkettete Arbeitssysteme zu ermitteln. Einschränkend ist dabei jedoch einzuwenden, dass die Bestimmung der Flexibilität verketteter Arbeitssysteme nur bei starren Prozessketten in Produktionslinien möglich ist. Dabei muss nicht nur die Reihenfolge der Prozesse, sondern auch der spezifische Kapazitätsbedarf der Produkte sowie die Transportzeit zwischen den Einzelprozessen stets gleich bleiben.

Die Kapazitätsflexibilitätsprofile nach GOTTSCHALK können direkt verwendet werden, um Flexibilitätskorridore zu unterschiedlichen Zeitpunkten für ein Produkt zu bestimmen, indem aus den Kapazitätshüllkurven die maximale und minimale Men-

genausbringung eines Produktionssystems errechnet werden. Ohne zusätzliche Informationen über Bedarfsschwankungen ist die Anwendung dieser Methode ist dabei jedoch auf Systeme für ein spezifisches Produkt beschränkt, da in diesem Fall nur bei einem einheitlichen spezifischen Kapazitätsbedarf eine direkte Umrechnung der verfügbaren Kapazität in Produktionsmengen möglich ist. Liegen verkettete Arbeitssysteme vor, können gemäß den obenstehenden Ausführungen ohnehin nur noch solche Systeme betrachtet werden.

Ein Kritikpunkt bei der Darstellung der Kapazitätsflexibilitätsprofile kann in der zeitlichen Begrenzung der Maßnahmen durch die maximale Nutzungsdauer gesehen werden. Das Modell zeigt damit zwar alle möglichen Kapazitätzzustände auf, die zum aktuellen Zeitpunkt garantiert werden können, es impliziert dadurch aber eine starke Beschränkung der Kapazitätsflexibilität in der fernen Zukunft, die tatsächlich nur besteht, wenn die Anpassungsmaßnahmen auch zum nächstmöglichen Zeitpunkt eingesetzt werden. Als Planungsinstrument in der Produktion ist die Darstellung dadurch zwar dennoch geeignet, für die Auswertung kundenspezifischer Mengenflexibilität widerspricht sie aber der Forderung nach ansteigender Mengenflexibilität bei zunehmender Vorplanungszeit (vgl. 2.4.1).

2.6.4 Gestaltungsorientierte Bewertung der Mengenflexibilität

Die im vorangehenden Abschnitt dargelegten Beschreibungsmodelle werden vorrangig dafür verwendet, die in einem Produktionssystem vorherrschende Mengenflexibilität hinsichtlich verschiedener Kriterien aufzuzeigen. Ziel ist dabei die Unterstützung von Entscheidungen bei der Auswahl von Planungs- bzw. Umsetzungsalternativen oder die Beobachtung der vorliegenden Flexibilität, um bei unzureichendem Ergebnis Verbesserungsmaßnahmen anzustoßen. In diesem Abschnitt wird auf verschiedene Bewertungsverfahren der Mengenflexibilität eingegangen, wobei das Augenmerk schwerpunktmäßig auf solche Verfahren und Kennzahlen gelegt wird, die auch zur lieferantenseitigen Gestaltung von Mengenflexibilität in Kunden-Lieferanten-Beziehungen herangezogen werden können.

Auf Basis theoretischer betriebswirtschaftlicher Überlegungen wird ein Produktionssystem als mengenflexibel charakterisiert, wenn es eine flach verlaufende Stückkostenfunktion besitzt (TEMPELMEIER & KUHN 1993, SUAREZ ET AL. 1996). Ein Unternehmen, bei dem Anpassungen der Ausbringungsmenge also mit keiner wesentlichen Änderung der Stückkosten einhergehen, ist flexibler als ein Unternehmen, bei dem sich die Stückkosten dabei deutlich verändern. Eine hohe Mengenflexibilität setzt damit eine weitgehende Variabilisierung der Kosten in der Produktion

voraus. Dieser Definition kann eine allgemeine Gültigkeit kaum abgesprochen werden. Die Operationalisierung der Steigung der Stückkostenfunktion als Kennzahl für Mengenflexibilität bringt jedoch Probleme mit sich, da in der Praxis kurzfristig kaum stetig verlaufende Stückkostenfunktionen zu beobachten sind. Die Steigung der Stückkostenfunktion ist als Kennzahl der Flexibilität daher eher von theoretischer Bedeutung.

Zahlreiche Autoren haben verschiedenartige Kenngrößen entwickelt, um die Mengenflexibilität von Unternehmen bewerten und vergleichen zu können. Einige dieser Kenngrößen bauen auf vergangenheitsbezogenen Informationen auf. So wird z. B. die Schwankung des Produktionsvolumens im Verhältnis zu Stückkosten und Ausschuss als ein Indikator für Mengenflexibilität vorgeschlagen, wobei ein Unternehmen dann als flexibler als ein anderes gilt, wenn es höhere Volumenschwankungen bei geringeren Kosten und Ausschuss realisieren kann (SUAREZ ET AL. 1996). Ein anderer Ansatz setzt die Absatzmengenschwankungen eines Unternehmens mit den Schwankungen der Produktionskosten oder den Bestandsmengen im Lager ins Verhältnis (JACK & RATURI 2003). ABELE ET AL. (2008B) schlagen einen Verschwendungsindex zur Bewertung der Mengenflexibilität vor, der durch die Summe des ungenutzten Kapazitätsangebots und der unbefriedigten Kapazitätsnachfrage innerhalb eines Betrachtungszeitraums berechnet wird. Ein System, dessen Kapazität an den tatsächlichen Bedarf gut angepasst werden kann, weist damit eine geringere Verschwendung auf als ein unflexibles System. Der Nachteil an diesen vergangenheitsbezogenen Bewertungsmethoden liegt jedoch darin, dass sie kaum Aufschluss darüber zulassen, ob das betrachtete Unternehmen für mögliche Bedarfssituationen in der Zukunft gerüstet ist. Sie erlauben lediglich eine Aussage darüber, wie gut ein Unternehmen innerhalb eines konkret vorliegenden Bedarfszenarios reagieren konnte. Zur Bewertung von Mengenflexibilität für die Vertragsgestaltung erscheinen solche Methoden daher nicht als geeignet.

Vorgehensweisen für eine zukunftsbezogene Bewertung der Flexibilität eines Unternehmens bauen häufig auf Kennzahlensystemen auf, die eine detailliertere Betrachtung verschiedener Faktoren vornehmen und somit eine zukunftsbezogene Bewertung ermöglichen. Anschließend erfolgt eine Aggregation der Bewertungen für die einzelnen Faktoren z. B. durch eine Nutzwertanalyse. Für die Bewertung von Lieferanten stellen WINKLER ET AL. (2007) eine derartige Methode vor, wobei die Mengenflexibilität nicht im Vordergrund steht, sondern nur implizit in anderen Bewertungsgrößen enthalten ist. SCHUH ET AL. (2004) bewerten Produktionssysteme hinsichtlich ihrer Varianten-, Stückzahl- und Produktänderungsflexibilität. Sie verwenden dabei ein objektorientiertes Systemkonzept als Grundgerüst für ihr Kenn-

zahlensystem. Das Gesamtsystem wird analytisch in Subsysteme bis hinunter zur Arbeitsplatzebene aufgegliedert. Basierend auf verschiedenen Marktszenarien lassen sich auf der untersten Ebene Bewertungen mit einfachen Kennzahlen durchführen, die anschließend wiederum zu einer Gesamtkennzahl aggregiert werden. Auch ABELE ET AL. (2008A) stellen ein Kennzahlensystem zur Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen vor, an dessen Spitze die *Overall Equipment Flexibility* (OEF) steht. Sie setzt sich aus vier weiteren Flexibilitätskennzahlen zusammen, von denen eine die Mengenflexibilität charakterisiert. Der Wert dieser Kennzahl gibt wieder, wie viel Prozent der aktuellen Produktionsmenge noch zusätzlich produziert werden könnten. Alle drei Verfahren setzen auf ein analytisches Vorgehen, um Detailinformationen zu Aussagen über Systemeigenschaften zu aggregieren. Für eine zukunftsbezogene Bewertung ist dieses Vorgehen grundsätzlich zu befürworten. Es werden jedoch bei den Ansätzen entweder zeitliche Aspekte der Flexibilität vernachlässigt, oder die Datenaggregation mündet in Kennzahlen, die nur qualitative Aussagen darüber zulassen, welches System bzw. welcher Lieferant besser oder schlechter bewertet ist. Quantitative Aussagen über verfügbare Mengenflexibilitätskorridore zu bestimmten Planungszeitpunkten sind nicht möglich.

Eine umfangreiche Bewertungssystematik für Alternativen bei der Fabrikplanung unter besonderer Berücksichtigung der Flexibilität wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) gemeinsam mit dem Bereich Corporate Technology der Siemens AG entwickelt und in dem Software-Tool *PlantCalc*[®] umgesetzt. Bei dem Bewertungsvorgehen werden die zu untersuchenden Planungsalternativen und ihre Umweltentwicklung zunächst in Form eines Berechnungsmodells modelliert. Unsichere Planungsparameter werden dabei mithilfe von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen beschrieben. Im Rahmen einer stochastischen Simulation mit der Monte-Carlo-Methode (vgl. hierzu auch Abschnitt 3.6.1.3) werden für diese Parameter mehrfach zufällige Werte gezogen, deren Verteilung die jeweiligen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen widerspiegeln. Aufbauend auf diesen Werten wird die Verteilung eines Ergebniswertes bestimmt. Als Ergebnisgrößen werden meist der Kapitalwert oder die Projektkosten angesetzt. Mengenflexibilität wird insoweit bei der Bewertung berücksichtigt, als im Modell für jede Alternative verschiedene Kapazitätsniveaus mit ihren jeweiligen Kosten hinterlegt sind, aus denen während der Simulation entsprechend der gezogenen Parameterwerte das benötigte Niveau ausgewählt wird. Als die flexibelste Alternative wird diejenige angesehen, deren Ergebnisstreuung am geringsten ausfällt (REINHART ET AL. 2007, KORVES & KREBS 2009, KREBS ET AL. 2009). Die Flexibilität wird hierbei also implizit bewertet und äußert sich in der monetären Vorteilhaftigkeit einer Alternative.

RÜHL (2010) wählt einen ähnlichen Ansatz, um Produktionssysteme hinsichtlich ihrer Mengen- und Variantenflexibilität bereits während der Produktentwicklungsphase zu bewerten und somit frühzeitig Entscheidungen zur Auswahl von Planungsalternativen treffen zu können. Auf Basis von Parameterschätzungen in Bezug auf die Ausgestaltung des zukünftigen Produktionsprozesses werden dabei Planungsunsicherheiten abgeleitet, die neben sicheren Planungswerten in ein stochastisches Bewertungsmodell einfließen. Mit diesem Modell werden die Herstellkosten für Produkte in Abhängigkeit der Produktionsstückzahlen (über alle Varianten) und der Zahl der Varianten ermittelt, wobei sich wie beim zuvor erläuterten Ansatz ein Mittelwert und eine Streuung der Herstellkosten ergeben. Das der Mengenflexibilität zugrunde liegende Kapazitätsmodell ergibt sich aus den möglichen Schichtmodellen für das Produktionssystem. Beeinflusst wird das Kapazitätsangebot zusätzlich durch zufällig erzeugte Qualitäts- und Leistungsgrade sowie Verfügbarkeitszeiten der Produktionsanlagen. Die Bewertung der Mengenflexibilität beschränkt sich bei diesem Ansatz auf mögliche Mengenschwankungen und die Kosten, die dadurch verursacht werden. Die Ergebnisse lassen eher Aussagen über die Systemgüte zu, als über die Mengenflexibilität, die einem Kunden im Rahmenvertrag angeboten werden kann.

ROGALSKI (2009) stellt einen Bewertungsansatz vor, mit dem ein Produktionssystem hinsichtlich der Mengen-, der Produktmix- und der Erweiterungsflexibilität untersucht werden kann. In Bezug auf die Mengenausbringung zeigt er dabei sogenannte Flexibilitätsräume auf, die den Spielraum zum flexiblen Agieren charakterisieren und somit dem in dieser Arbeit verwendeten Begriff der Flexibilitätskorridore entsprechen. Bestimmt wird dieser Flexibilitätsraum durch die minimale und die maximale wirtschaftlich produzierbare Produktionsmenge. Voraussetzung zur Ermittlung der Mengenflexibilität ist dabei, dass ein Produktmix für das Produktionssystem vorgegeben ist. Das Ziel der Bewertungsmethode von ROGALSKI besteht darin, Produktionsplanern und Managern Kennzahlen zur Einschätzung der Flexibilität ihrer Produktionssysteme zur Verfügung zu stellen, um sowohl bestehende wie auch in der Planung befindliche Systeme analysieren und vergleichen zu können.

MÜLLER (2011) entwickelt ein stochastisches Modell, um zunächst zu ermitteln, welchen Gewinn ein produzierendes Unternehmen an einem Produkt erwirtschaftet, das einer schwankenden Nachfrage unterliegt. Er geht davon aus, dass die Produktionskapazität stufenweise flexibel angepasst werden kann. Das verwendete Beschreibungsmodell wurde bereits im vorangehenden Abschnitt erläutert. Der durchschnittliche Gewinn ist in diesem Falle umso geringer, je höher die Standardabweichung der Bedarfsnachfrage ist. MÜLLER verwendet die Erkenntnisse schließlich

für die Parametrierung von Preismodellen, die einen Preisnachlass bei geringer Abweichung vom mittleren Bedarf und einen Preisaufschlag bei einer großen Abweichung bewirken (vgl. 2.4.3). Er zeigt auf, dass solche Preismodelle zum beiderseitigen Nutzen von Kunden und Lieferanten führen können. Das in Abbildung 12 aufgezeigte Gewinn- bzw. das dahinterstehende Kostenmodell ließe sich jedoch auch unabhängig vom Preismodell für den Vergleich von flexiblen Produktionssystemen einsetzen.

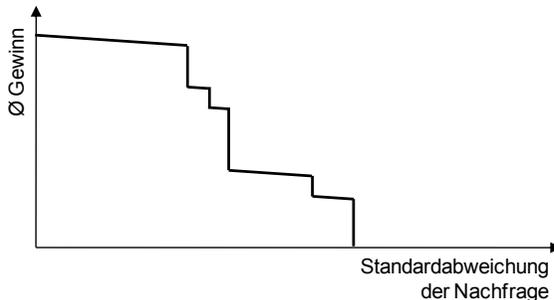


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Gewinn eines Produktionssystems und der Standardabweichung der Nachfrage nach MÜLLER (2011)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass zahlreiche Kennzahlen und Bewertungssystematiken bereits bestehen, um Flexibilitätskriterien und insbesondere Mengenfähigkeit in Produktionssystemen zu bestimmen und zu vergleichen. Die meisten Ansätze zielen dabei darauf ab, mehrere Systeme z. B. in der Planungsphase untereinander vergleichen zu können, oder ein System systematisch weiterzuentwickeln. Für eine kundenorientierte Bewertung der Flexibilität mit dem Ziel, die Kunden-Lieferanten-Beziehung zu gestalten, liegen bisher jedoch nur wenige Ansätze vor. Eine konkret auf die Parametrierung von Rahmenverträgen abzielende Bewertung wurde außer bei MÜLLER (2011) nicht gefunden.

2.7 Flexibilitätsaspekte in betrieblichen Planungssystemen

Wie aus den vorangehenden Abschnitten deutlich wird, beschreibt Flexibilität Spielräume, die im Rahmen der Abwicklung des operativen Geschäfts eines Unternehmens genutzt werden können. Zahlreiche Unternehmen setzen für die Planung

ihrer operativen Tätigkeiten sogenannte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme (PPS-Systeme) oder Enterprise Resource Planning-Systeme (ERP-Systeme) ein, wobei letztere in der Regel den Funktionsumfang von PPS-Systemen enthalten (KURBEL 2005 S. 3). Bei solchen Systemen handelt es sich meist um eine modulare aufgebaute Anwendungssoftware, der eine Datenbank zugrunde liegt, die für die verschiedenen Module Informationen bereitstellt und einen Datenaustausch ermöglicht (EVERSHEIM 2002 S. 256). Im Hinblick auf die Produktion unterstützen PPS-Systeme die Mengen-, Termin-, und Kapazitätsplanung, wobei eine hohe Termintreue, hohe und gleichmäßige Kapazitätsauslastungen, kurze Durchlaufzeiten, geringe Bestände und die Wahrung hoher Flexibilität als Ziele verfolgt werden (SCHUH 2006 S. 28). Dieser Abschnitt gibt einen kurzen Überblick darüber, welche Aspekte im Zusammenhang mit Mengenflexibilität bereits in PPS- bzw. ERP-Systemen berücksichtigt werden.

Produktionsprogrammplanung und Bedarfsprognose

Die Produktionsprogrammplanung steht am Beginn sämtlicher Planungen zum Produktionsablauf. Sie legt fest, welche Produkte in welchen Mengen zu welchen Terminen hergestellt werden sollen. Für die Planung des Produktionsprogramms ist es zunächst notwendig, die Primärbedarfe des Marktes bzw. der Kunden zu ermitteln. In zahlreichen ERP- bzw. PPS-Systemen sind dafür verschiedene Prognoseverfahren implementiert (FANDEL & GUBITZ 2008 S. 197 ff.). Sie beruhen im Wesentlichen auf der Auswertung von Absatzstatistiken (FANDEL ET AL. 1994 S. 87 ff.). Beispielhaft seien hier exponentielle Glättungsverfahren oder das Holt-Winters-Verfahren (vgl. 2.6.2) genannt, auf die an dieser Stelle jedoch nicht im Detail eingegangen werden soll (FANDEL ET AL. 1994 S. 88 f., BROCKWELL & DAVIS 2002 S. 322 ff.). Solche Verfahren können gezielt zur Analyse der Bedarfsnachfrage einzelner Kunden eingesetzt werden, woraus sich auch Aussagen über deren Mengenflexibilitätsbedarf ableiten lassen.

Kapazitätsplanung und -abstimmung

Aufbauend auf dem Produktionsprogramm lässt sich die für die Produktion notwendige Kapazität bestimmen. Die Gegenüberstellung dieser Kapazitätsnachfrage und des Kapazitätsangebots offenbart Über- bzw. Unterauslastungen in der Produktion, die im Rahmen der Kapazitätsabstimmung ausgeglichen werden müssen (FANDEL ET AL. 1994 S. 238). Grundsätzlich wird dabei entweder das Angebot dem Bedarf angepasst, oder der Bedarf mit dem Angebot abgeglichen. Konkret bedeutet das, dass im ersten Fall die Kapazität im Rahmen der vorliegenden Kapazitätsflexibilität verändert wird und dass im zweiten Fall Aufträge in Perioden mit Unterauslastung verschoben werden. Die zweite Option hat jedoch entweder

eine Änderung des Liefertermins oder eine Einlagerung des betreffenden Auftrags zur Folge. Eine weitere Möglichkeit besteht, wenn Ausweichmaschinen verwendet werden können, so dass die Aufträge auch innerhalb einer Periode zu Maschinen mit geringerer Auslastung oder zu einem externen Lieferanten verschoben werden können (vgl. Abbildung 13) (KURBEL 2005 S. 154 ff., SCHUH 2006 S. 48 f.).

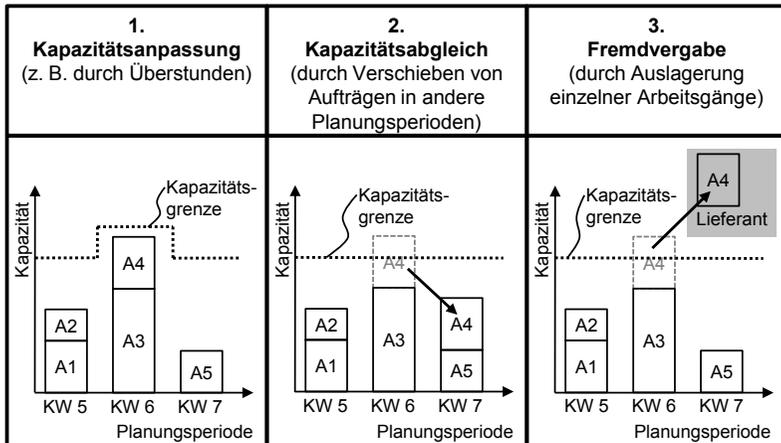


Abbildung 13: Möglichkeiten zur Kapazitätsabstimmung nach SCHUH (2006, S. 49)

Die Durchführung dieser Aufgaben hat sich in der Praxis aufgrund des mehrdimensionalen Zielsystems als zu komplex erwiesen, als dass sie mit automatischen Algorithmen zufriedenstellend zu bewältigen wären. Deshalb ist für diese Aufgabe menschlicher Sachverstand gefordert. Dem PPS-System kommt hier lediglich eine Unterstützungsfunktion zu (KURBEL 2005 S. 158 u. S. 271 ff., GRONAU 2010 S. 145). Nichtsdestotrotz bieten einige Systeme Möglichkeiten zum Kapazitätsabgleich mittels linearer Optimierung oder Heuristiken an (FANDEL & GUBITZ 2008 S. 283 ff.).

Rahmenverträge mit Kunden und Lieferanten

Zahlreiche Anbieter von ERP-Systemen bieten Möglichkeiten, um Vertragsvereinbarungen zur Mengenflexibilität mit Kunden und Lieferanten softwaretechnisch abzubilden und somit für die Produktionsprogrammplanung bzw. die Materialdisposition zu berücksichtigen. Allerdings sind nicht alle gängigen Vertragstypen in allen Systemen modellierbar. Handelt es sich um Verträge mit Lieferanten, werden

durch die Softwaremodule zumeist Auswertfunktionen ermöglicht, die einem Disponenten oder Einkäufer bestehende Restriktionen und Flexibilitätsspielräume aufzeigen, die er bei der Bestellung von Vorprodukten zu beachten hat. Bei Verträgen mit Kunden bestehen vor allem Möglichkeiten zur Bedarfsprognose und der Ableitung des Produktionsprogramms (ILIEV 2007 S. 43 ff.).

Personaleinsatzplanung

Die Planung und Durchführung eines flexiblen Personaleinsatzes im Rahmen von Arbeitszeitmodellen fand in der vergangenen Zeit nur wenig Unterstützung durch PPS-Systeme, obwohl die Personaleinsatzplanung entscheidenden Einfluss auf die Kapazitätsplanung und -abstimmung hat (SCHIEFERDECKER 2006 S. 810 f., SCHERF 2004). Diesbezügliche Entwicklungen von Softwaremodulen haben erst vor wenigen Jahren begonnen. Erste Erfahrungen mit Prototypen und ersten kommerziellen Anwendungen wurden grundsätzlich positiv bewertet. Durch eine systematische Personaleinsatzplanung mithilfe von PPS-Systemen können Flexibilitätspotentiale des Mitarbeiter Einsatzes aufgezeigt und damit zur Unterstützung der Kapazitätsabstimmung eingesetzt werden (SCHIEFERDECKER 2006, LUDEWIG 2005).

2.8 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

In den vorangehenden Abschnitten wurde zunächst der grundlegende Bedarf nach Flexibilität in Wertschöpfungsnetzen aufgezeigt. Dabei wurden die einzelnen, innerhalb solcher Netze bedeutenden Flexibilitätswerte herausgearbeitet und eine erste Eingrenzung dieser Arbeit auf die Mengenflexibilität als einer dieser Faktoren vorgenommen. Weiterhin wurde darauf eingegangen, dass die Organisation in Wertschöpfungsnetzen sich aus der Vielfalt bilateraler Vereinbarungen zwischen den Netzwerkpartnern ergibt, die nur selten von einer übergeordneten Instanz ganzheitlich koordiniert werden können. Deshalb ist es notwendig, solche Vereinbarungen auf eine Art und Weise zu treffen, dass unter Berücksichtigung der Anforderungen sämtlicher Netzwerkpartner eine möglichst hohe Gesamteffizienz im Netzwerk erzielt wird. Dies trifft auch auf die Vereinbarung von Mengenflexibilität zu, für die exemplarisch Vertragsmodelle als Koordinationsmechanismen vorgestellt wurden. Um eine effizienzorientierte Vertragsgestaltung zu ermöglichen, müssen jedoch Anforderungen der Kunden und Potentiale der Lieferanten auf eine Weise erfasst und bewertet werden, dass ein direkter Abgleich möglich ist und Anhaltspunkte für eine durchsetzbare Vertragsgestaltung geliefert werden.

Zur Definition der Anforderung von Kunden hält die Literatur bereits praktikable Methoden bereit: Mithilfe von verschiedenartigen Zeitreihenanalysen lassen sich nicht nur Bedarfsverläufe prognostizieren, sondern auch Abschätzungen über den notwendigen Mengenflexibilitätsbedarf treffen. Bei der Bewertung des Mengenflexibilitätspotentials von Lieferanten wird es deutlich schwieriger. Die meisten Bewertungsverfahren sind auf den Vergleich von Produktionssystemalternativen in der Planungsphase ausgelegt und lassen kaum Rückschlüsse auf kundenspezifisch realisierbare Flexibilität zu. Andere, teilweise auf Kunden-Lieferanten-Beziehungen ausgelegte Bewertungsverfahren erlauben lediglich qualitative Beurteilungen (beispielsweise im Rahmen einer üblichen Lieferantenbewertung), liefern jedoch keine quantitativen Daten für eine Vertragsgestaltung. Nur vereinzelte Ansätze gehen auf die Ableitung bestimmter Vertragsparameter ein. Um die im Rahmen der üblichen Produktionsplanung für einen spezifischen Kunden realisierbaren Flexibilitätskorridore zu ermitteln, ist unter der gesichteten Literatur mit dem Kapazitätsflexibilitätsprofil von GOTTSCHALK (2007) nur ein einziger geeigneter Ansatz zu finden, der sich jedoch auf den Fall eines auf ein Produkt spezialisierten Produktionssystems beschränkt. Der Handlungsbedarf besteht daher in der Entwicklung eines Ansatzes, um die Mengenflexibilität zu bestimmen, die ein in ein Wertschöpfungsnetz eingebundenes Unternehmen einem spezifischen Kunden anbieten kann.

3 Konzeption der Methode zur Ermittlung kundenspezifischer Mengenflexibilität

3.1 Kapitelüberblick

Nachdem Kapitel 2 auf die Grundlagen der Planung, Bewertung und Vereinbarung von Mengenflexibilität in Kunden-Lieferanten-Beziehungen innerhalb eines Wertschöpfungsnetzes eingegangen ist und der Bedarf nach einer Methode zur Bewertung der lieferantenseitig verfügbaren Mengenflexibilität aufgezeigt wurde, wird in diesem Kapitel ein Konzept für eine entsprechende Methode entworfen. Dafür werden zunächst in Abschnitt 3.2 Anforderungen formuliert, die an eine solche Methode zu stellen sind. Anschließend erfolgt in Abschnitt 3.3 eine Diskussion der im Rahmen der Methode zu betrachtenden Flexibilitätsfaktoren. Diese Diskussion baut auf den Ausführungen in Abschnitt 2.5 auf. In 3.4 wird der Betrachtungsumfang der Arbeit auf ein sinnvolles Maß beschränkt und das im Rahmen der Bewertung zu modellierende System eingegrenzt. Zur Konzeption der eigentlichen Bewertungsmethode wird zunächst in 3.5 ein Referenzmodell für einen Rahmenvertrag definiert, das die erwarteten Bewertungsergebnisse aufzeigt. Basierend darauf folgt in Abschnitt 3.6 der Entwurf eines geeigneten Simulationskonzepts. Schließlich wird auf Annahmen und Vereinfachungen eingegangen, die der Modellierung für die Simulation zugrunde gelegt werden (3.7).

3.2 Anforderungen an die Methode

Eine Methode zur Ermittlung der Mengenflexibilität, die ein Lieferant einem spezifischen Kunden innerhalb eines Rahmenvertrags zur Verfügung stellen kann, muss sowohl technische, organisatorische als auch wirtschaftliche Restriktionen auf Seiten des Lieferanten berücksichtigen. Ziel einer solchen Methode muss es daher sein, Antworten auf folgende Fragen zu liefern, die auch die zentralen Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit darstellen:

1. Welche Mengenflexibilität kann einem spezifischen Kunden zu verschiedenen Zeitpunkten einer rollierenden Bestellplanung zur Verfügung gestellt werden, ohne dass dadurch Lieferengpässe auftreten oder die Produktion unwirtschaftlich wird?
2. Welche Kostenveränderungen treten auf, wenn die verfügbare Flexibilität in Anspruch genommen wird?

Eine Analyse und Detaillierung dieser Forschungsfragen führt zu den Anforderungen an eine entsprechende Bewertungsmethode. Die identifizierten Aspekte ergeben sich zum einem aus der Zielsetzung der Rahmenvertragsgestaltung und zum anderen aus dem betrachteten Umfeld eines flexiblen Produktionssystems:

Anforderung: Kundenbezug der Mengenflexibilität

Die Bewertung von Flexibilität für die Parametrierung von Rahmenverträgen ist nur dann sinnvoll, wenn sie sich direkt auf einen spezifischen Kunden bezieht, was bereits durch die erste Forschungsfrage verdeutlicht wird. Eine allgemeine Beschreibung bzw. Bewertung von Flexibilitätsfaktoren des betrachteten Unternehmens muss also auf einen einzelnen Kunden projiziert werden können, um der Aufgabenstellung gerecht zu werden.

Anforderung: Quantitative Bewertung der Mengenflexibilität

Aus den Ausführungen in Abschnitt 2.4 wird deutlich, dass Vereinbarungen zur Flexibilität in Rahmenverträgen nur dann durchsetzbar sind, wenn zulässige Forderungen des Vertragspartners von unzulässigen unterschieden werden können. In Bezug auf die Mengenflexibilität erfordert dies eine quantitative Festlegung der zulässigen Spielräume im Vertrag. Entsprechend sollte auch die Bewertung bereits quantitative Ergebnisse liefern.

Anforderung: Dimensionsbezogene Bewertung der Mengenflexibilität

SLACK (1983) weist darauf hin, dass jede Art von Flexibilität mindestens anhand von drei verschiedenen Dimensionen bewertet werden kann: Der *Spielraum* bestimmt die Grenzen der Anpassungsfähigkeit. Die *Anpassungszeit* bestimmt die Zeitspanne, die mindestens benötigt wird, bis ein gewisser Spielraum auch genutzt werden kann. Die *Kosten der Inanspruchnahme* zeigen schließen Zusatzkosten durch die Flexibilitätsnutzung auf. Jeweils zwei dieser drei Dimensionen spiegeln sich auch in den Ansätzen von MÜLLER (2011), WIENDAHL & BREITHAUPT (1998) und GOTTSCHALK (2007) (vgl. 2.6.3) sowie im Rahmenvertragsmodell nach TSAY & LOVEJOY (1999) (vgl. 2.4.2) wider. Vor dem Hintergrund, dass die drei Dimensionen von unterschiedlichen Akteuren je nach Situation verschiedenmaßen gewichtet werden können, ist es geboten, dass die Bewertung diese drei Dimensionen getrennt voneinander ausgibt. Eine Reduzierung der Mengenflexibilität auf eine einzelne Dimension oder eine aggregierte Kennzahl – wie sie verschiedene andere Autoren vorschlagen (vgl. 2.6.3 und 2.6.4) – wird für den vorliegenden Anwendungsfall nicht als sinnvoll erachtet.

Anforderung: Vollständigkeit der Mengenflexibilitätsfaktoren

Um ein vollständiges, der Realität weitgehend entsprechendes Bewertungsergebnis zu erhalten, wird die Forderung aufgestellt, sämtliche Faktoren, die eine Auswirkung auf die Mengenflexibilität haben, in das Bewertungsvorgehen einzubeziehen. Auf diese Weise soll die bestehende Mengenflexibilität vollständig erfasst werden.

Anforderung: Berücksichtigung von Wirkbeziehungen zwischen den Faktoren

Einige Faktoren, die sich auf die Mengenflexibilität auswirken, stehen miteinander in Zusammenhang und können sich gegenseitig beeinflussen. So führt ein Auftreten bestimmter Effekte zu einer gegenseitigen Verstärkung oder auch Abschwächung. Zum anderen wirken einzelne Maßnahmen zur Flexibilisierung auch nur im Zusammenhang mit anderen Faktoren. Die Berücksichtigung solcher Wirkzusammenhänge ist im Sinne der Realitätsnähe von hoher Bedeutung.

Anforderung: Berücksichtigung betrieblicher Planungsprozesse

Um die Anwendbarkeit der hier zu erarbeitenden Methode zu gewährleisten und um die Realität in geeigneter Weise abzubilden, sollte sich die Vorgehensweise soweit wie möglich an üblichen betrieblichen Planungsprozessen orientieren. Insbesondere die Datenbereitstellung und Modellierung von Produktionssystemen ist dabei an gängigen Modellen anzulehnen, um eine aufwandsarme Implementierung der Methode in bestehende Unternehmensabläufe zu ermöglichen.

In Abbildung 14 werden die Anforderungen an die im Rahmen dieser Arbeit herzuleitende Methode zur Mengenflexibilitätsbewertung noch einmal zusammengefasst.

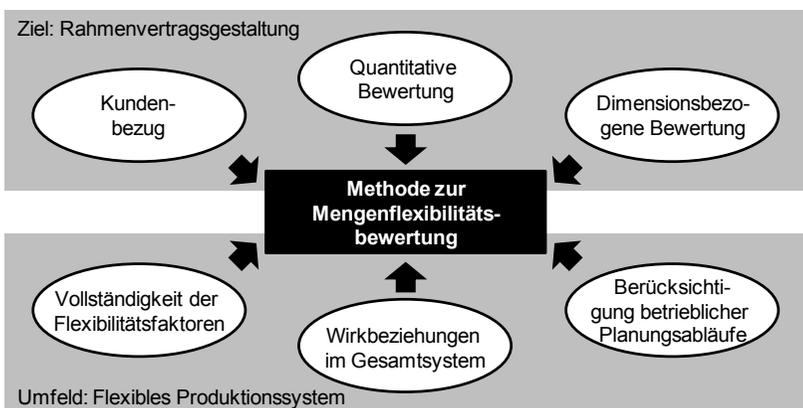


Abbildung 14: Anforderungen an die Methode zur Mengenflexibilitätsbewertung

3.3 Diskussion zu betrachtender Flexibilitätsfaktoren

Die Literaturrecherche in Abschnitt 2.5 offenbart zahlreiche Faktoren, die die Anpassungsfähigkeit der Produktionsmenge eines Unternehmens beeinflussen können. Dabei wurde bereits eine Unterscheidung zwischen Hilfs- und Stellfaktoren vorgenommen. Im Folgenden wird diskutiert, inwiefern diese Faktoren in die Bewertungsmethode eingebunden werden können und welche systematischen Zusammenhänge zwischen ihnen bestehen.

Hilfsfaktoren begünstigen die flexible Anpassung der Produktionsmenge, stellen aber im Wesentlichen konstante Faktoren in einem Produktionssystem dar, die selbst nicht im Rahmen der Flexibilität verändert werden. Bei der nachfolgenden Modellierung dürfen sie zwar nicht vernachlässigt werden, ausschlaggebend für die tatsächliche Flexibilität des Produktionssystems sind jedoch eher die Stellfaktoren, die direkte Anpassungen und dadurch eine weitestgehende Variabilisierung der Kosten zulassen. Der Fokus des im Folgenden zu entwickelnden theoretischen Modells über die Zusammenhänge der Faktoren liegt daher zunächst auf den Stellfaktoren.

Wie bereits herausgearbeitet wurde, stellt die Kapazität der im Produktionssystem verfügbaren Produktionsressourcen den zentralen und bestimmenden Faktor für die Mengenausbringung eines Unternehmens dar. Die Kapazität lässt sich bis zu einer Begrenzung durch die verfügbare Betriebsmittelkapazität durch flexible Arbeitskräfte an den Bedarf anpassen. Darüber hinaus kann die Nutzung von Fremdkapazität zu einer weiteren Kapazitätserweiterung führen, worunter an dieser Stelle auch das Leihen oder Leasen von Betriebsmitteln sowie gemeinsam mit strategischen Partnern gebündelte Kapazitäten subsummiert werden (vgl. 2.5.2 und 2.5.3). Nach GOTTSCHALK (2007, S. 40 ff.) lassen sich alle Möglichkeiten im Rahmen der Kapazitätsanpassung durch Einzelmaßnahmen beschreiben (z. B. Überstunden, Leiharbeit oder kurzfristige Fremdvergabe von Produktionsumfängen an Lieferanten), die insgesamt unter dem Aspekt der *Kapazitätsflexibilität* zusammengefasst werden können. Diese stellt somit den ersten zentralen Bestimmungsfaktor der Mengenflexibilität dar (SCHELLMANN & REINHART 2009).

Trotz bestehender Kapazitätsflexibilität können in der Produktion Kapazitätsengpässe auftreten. Wenn der Produktmix variiert, können diese Engpässe je nach Belastung der einzelnen Arbeitssysteme sogar dynamisch an unterschiedlichen Stellen auftreten. *Routenflexibilität* kann in diesen Fällen dazu eingesetzt werden, solche Engpässe zu umgehen, indem alternative Arbeitspläne für die Produktherstellung eingesetzt werden. Die Möglichkeit, alternative Arbeitspläne zu definieren,

basiert vor allem auf verfügbarer Maschinen- sowie Operationsflexibilität (SETHI & SETHI 1990).

Die Verfügbarkeit von Vorprodukten und Materialien ist ein Aspekt, der bei zahlreichen Flexibilitätsbetrachtungen vernachlässigt wird, obwohl die Wichtigkeit der Lieferanten im Wertschöpfungsnetz im Rahmen der Flexibilitätsstrategie stets hervorgehoben wird (vgl. KALUZA 2007). Es wird meist davon ausgegangen, dass Materialien als Vorrat im Lager verfügbar sind. Die zunehmende Tendenz zur lagerlosen Fertigung durch JIT-Belieferungsstrategien und die Tatsache, dass Produktvarianten häufig schon beim Lieferanten erzeugt werden, führen jedoch dazu, dass die lieferantenseitigen Randbedingungen ebenfalls in die Bewertungsmethode mit einbezogen werden müssen (REINHART & SCHELLMANN 2009). Unter dem Begriff der *Materialflexibilität* werden daher die Lieferflexibilität von Lieferanten sowie eventuell (statisch oder dynamisch) vorgehaltene Lagerbestände für Produktionsmaterial zusammengefasst.

Mit den vorstehend erläuterten drei Faktoren *Kapazitätsflexibilität*, *Routenflexibilität* und *Materialflexibilität* können sämtliche Stellfaktoren der Mengenflexibilität (vgl. Tabelle 1) in aggregierter Form beschrieben werden. Da diese die Hebel zur Anpassung der Mengenausbringung darstellen, beinhalten sie sämtliche Potentiale, die im Rahmen der Mengenflexibilität für ein Unternehmen bestehen. Diese Flexibilität wird jedoch von mehreren Kunden in Anspruch genommen und steht nicht einem einzelnen Kunden vollständig zur Verfügung. Außerdem gleichen sich die Flexibilitätsansprüche der Kunden auch teilweise in der Produktion aus (LÖDDING 2008 S. 105). Die reine Betrachtung der drei Faktoren ermöglicht also noch keine Schlussfolgerungen auf eine sinnvolle Aufteilung der Mengenflexibilität auf verschiedene Kunden. Um die kundenspezifische Mengenflexibilität zu ermitteln, sind daher die Bedarfsschwankungen der Produkte einzubeziehen, die durch das kundenspezifische Bestellverhalten charakterisiert werden. Erst dadurch lässt sich ermitteln, welche Mengenbedarfe sich eventuell gegenseitig nivellieren und welche sich schließlich in der Produktion als zusätzliche Kapazitätsbedarfe niederschlagen.

Zusammenfassend sind die diskutierten Zusammenhänge zwischen den Flexibilitätsfaktoren zur Ermittlung kundenspezifischer Mengenflexibilität in Abbildung 15 dargestellt.

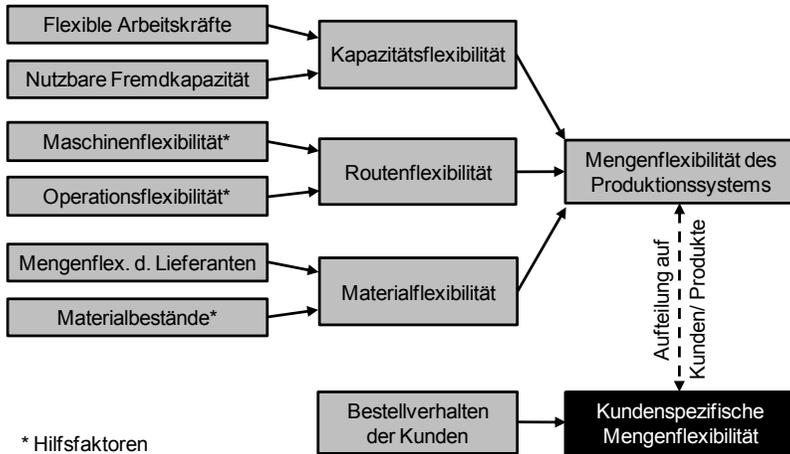


Abbildung 15: Zusammenhang zwischen Flexibilitätsebenen

Den in Abschnitt 3.1 definierten Anforderungen entsprechend sind auch die Hilfsfaktoren der Mengenflexibilität in der Methode zu berücksichtigen. Teilweise finden sich diese in den oben definierten drei Faktoren als Randbedingungen wieder, teilweise lassen sie sich auf andere Art und Weise in die Methode integrieren. Inwiefern dies für die in Tabelle 1 aufgeführten Hilfsfaktoren der Fall ist, wird im Folgenden kurz erläutert:

- *Überschüssige Kapazität* bei Betriebsmitteln ist eine Voraussetzung, um durch den Einsatz unterschiedlicher Arbeitszeitmodelle die Kapazität anpassen zu können. Dieser Aspekt wird im Rahmen der Kapazitätsflexibilität berücksichtigt. Darüber hinaus ist im Rahmen der Methode zu beachten, dass für mengenflexibles Handeln in der Regel auch eine Unterauslastung der bestehenden Gesamtkapazität in Kauf genommen werden kann, solange die Wirtschaftlichkeit der Produktion nicht gefährdet ist.
- Eine *flexibilitätsorientierte Produktgestaltung* spiegelt sich implizit in den Arbeitsplänen, der Routenflexibilität, den zur Herstellung benötigten Kapazitäten sowie in der Lage des Kundenentkopplungspunktes wider. Die ersten drei Aspekte sind in den oben genannten Flexibilitätsebenen bereits enthalten. Die Lage des Kundenentkopplungspunktes ist bei der Modellierung des Produktionssystems zu berücksichtigen, indem alle Arbeitssysteme für die auftragspezifische Fertigung in die Modellierung aufgenommen werden.

Eine gezielte Berücksichtigung des Produktdesigns wird nicht als notwendig angesehen.

- *Geeignete Planungs- und Steuerungs-Systeme* vereinfachen die Produktionsplanung und ermöglichen kurzfristige Änderung von Auftragszusammensetzungen. Moderne PPS-Systeme umfassen in der Regel entsprechende Funktionalitäten (vgl. 2.7). Durch die Forderung, dass sich die Bewertungsmethode an gängigen Verfahren der PPS in Unternehmen anlehnen soll (vgl. 3.1), wird dieser Aspekt entsprechend berücksichtigt.
- Je länger die Durchlaufzeit eines Produktes ist, desto länger benötigt die Produktion, um auf Nachfrageschwankungen zu reagieren. Insofern sind *kurze Durchlaufzeiten* fördernd für die Mengenflexibilität. Die Durchlaufzeit wird in der vorliegenden Arbeit jedoch als reine Randbedingung der Planung gesehen, die zum einen durch die Zeit bis zur Verfügbarkeit von Vorprodukten sowie zum anderen durch den Zeitraum des Kapazitätsbedarfs für Herstellung der Produkte gegeben ist. Die Modellierung der Zeit bis zur Materialverfügbarkeit erfolgt im Rahmen der Materialflexibilität, auf den Zeitraum des Kapazitätsbedarfs wird in Abschnitt 3.7 noch weiter eingegangen.
- *Standardisierte Losgrößen* sorgen zum Einen für einen konstanten Anteil der Rüstzeit am spezifischen Kapazitätsbedarf der einzelnen Produkte und gehen auf diesem Wege in die in die Bewertung ein. Wie in 2.5.3 beschrieben, ist zum Zweiten ihr eigentliches Flexibilitätspotential darin zu sehen, dass eine Produktionsglättung ermöglicht wird, die eine kurzfristige Umstellung von Auftragsreihenfolgen und -zusammensetzungen zulässt. Ähnlich wie PPS-Systeme wirken sich standardisierte Losgrößen damit auf den Zeitbedarf aus, der für die organisatorische Umsetzung von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen notwendig ist.
- Ebenso ist eine *geringe Rüstzeit* ein Faktor, der die kurzfristige Planung unterstützt, da die wirtschaftliche Produktion kleiner Losgrößen erhöht wird. Somit wird der Zeitbedarf für die Organisation von Mengenanpassungen positiv beeinflusst, da kürzere Wartezeiten eingehalten werden müssen, bis ausreichend große Losgrößen erreicht worden sind. Kurze Lieferzeiten sind darüber hinaus eine Voraussetzung, um die zuvor beschriebene Produktionsglättung mit standardisierten Losgrößen durchzuführen.
- *Vielseitig ausgebildete Mitarbeiter* werden im Rahmen der Mengenflexibilität vor allem als eine Möglichkeit gesehen, um Feinabstimmungen des Kapazitätsbedarfs in den einzelnen Arbeitssystemen vorzunehmen und Unregelmäßigkeiten beim Personaleinsatz z. B. aufgrund von Urlaub oder Krankheit auszugleichen. Sie sind damit ein Garant für die Zuverlässigkeit der Kapazi-

tätsbereitstellung. In die Methode zur Bewertung von Mengenflexibilität werden sie nicht explizit einbezogen.

3.4 Betrachtungsumfang

3.4.1 Abgrenzung der Unternehmenstypologie

Um ein strukturiertes Vorgehen bei der Entwicklung der Bewertungsmethode zu gewährleisten und um ihren späteren Anwendungsbereich klar zu definieren, ist eine sinnvolle Eingrenzung des Untersuchungsbereichs essentiell. In diesem Abschnitt wird zunächst eine Abgrenzung von unternehmenstypologischen Eigenschaften vorgenommen, für die die zu entwickelnde Methode gültig sein soll. Diese Abgrenzung leitet sich aus der Aufgabenstellung sowie der vorangegangenen Analyse der zu betrachtenden Flexibilitätsfaktoren ab und orientiert sich an der in Tabelle 2 dargestellten unternehmenstypologische Morphologie, die in Anlehnung an GÖBEL (2005, S. 134) und NEISE & BREDOW (2006) erstellt wurde. Die Morphologie definiert produktspezifische Merkmale, Aspekte der Produktionsorganisation, die Vielfalt von Beziehungen des betrachteten Unternehmens im Wertschöpfungsnetz, sowie Gesichtspunkte der Auftragsabwicklung. Die in der vorliegenden Arbeit zu betrachtenden Ausprägungen sind in der Tabelle dunkelgrau hervorgehoben und werden folgendermaßen begründet:

Die rahmenvertragliche Vereinbarung von Mengenflexibilität bei Bestellabrufen ist in der Regel nur dann zweckmäßig, wenn die Kunden-Lieferanten-Beziehung die regelmäßige Lieferung von Produkten beinhaltet, deren Eigenschaften soweit definiert sind, dass der Produktionsaufwand weitestgehend planbar ist. Dies trifft im Wesentlichen für standardisierte Produkte zu, die serienmäßig hergestellt werden. Bei endkundenspezifischen Einzelprodukten ist ein Mengenflexibilitätsbedarf nicht zu erwarten, weshalb diese Art von Produkten sowie die Einzelfertigung vom Betrachtungsbereich ausgeschlossen werden. Auch typisierte Produkte mit Varianten werden hier nicht betrachtet: Sie weisen zwar grundsätzlich ähnliche Bauformen auf, unterscheiden sich aber häufig stark z. B. hinsichtlich Baugrößen oder einzelner Funktionalitäten, so dass eine einheitliche Planbarkeit des Produktionsaufwands für derartige Produkte nicht gegeben ist. Die Eingrenzung auf Stückgüter erfolgt aus Gründen der Vereinfachung für die Herleitung der Methode. Die spätere Übertragbarkeit auf eine Fließgutproduktion wird hier nicht von vornherein ausgeschlossen, ist jedoch im Detail zu prüfen.

Tabelle 2: *Unternehmenstypologische Morphologie zur Eingrenzung des Betrachtungsumfangs*

Merkmale	Merkmalsausprägung			
Erzeugnis-spezifikation	endkunden-spezifisch	typisiert mit Varianten	standardisiert mit Varianten	standardisiert
Produktform	Fließgüter		Stückgüter	
Fertigungsart	Einzelfertigung	Serienfertigung		Massenfertigung
Fertigungsprinzip	Baustelle	Werkstatt	Gruppe	Linie
Anzahl Kunden	einer		mehrere	
Anzahl Lieferanten	einer		mehrere	
Bedarf beim Endkunden	konstant	(saisonal) schwankend	unregelmäßig	
Kundenent-kopplungspunkt	Make to Stock		Make to Order	

Die Massenfertigung von Produkten findet in der Regel auf produktspezifischen Linien statt. Für diesen Fall ist eine Bewertung der verfügbaren Mengenflexibilität bereits mit den von GOTTSCHALK (2007) vorgeschlagenen Kapazitätsflexibilitätsprofilen möglich, weshalb sowohl die Massenfertigung als auch das Fertigungsprinzip *Linie* nicht im Fokus der Arbeit stehen. Das Baustellenprinzip hingegen wird überwiegend bei der Einzelfertigung und nur selten bei Serienprodukten angewandt weshalb es ebenfalls ausgeschlossen wird.

Eine Eingrenzung auf nur einen Kunden und einen Lieferanten wird der Wirklichkeit vieler Unternehmen in Wertschöpfungsnetzen nicht gerecht und schränkt die Anwendbarkeit der Methode stark ein. Deshalb wird grundsätzlich von einer Belieferung mehrerer Kunden und einem Bezug von Material von mehreren Lieferanten ausgegangen. Darüber hinaus kämen im Fall nur eines Kunden die im vorangehenden Abschnitt genannten Ausgleichseffekte zwischen den Kundenbedarfen als Einflussfaktor der Mengenflexibilität nicht zu Geltung.

Es wird angenommen, dass ein regelmäßiger Bedarf beim Endkunden besteht, der sowohl saisonale als auch irreguläre Schwankungen aufweist. Ein konstanter Bedarf

ist auszuschließen, da in diesem Fall keine Mengenflexibilität notwendig ist. Bei einem vollkommen unregelmäßigen Bedarf sind hingegen rahmenvertragliche Vereinbarungen eher unüblich. In diesem Fall findet meist eine gezielte einzelvertragliche Bestellung statt.

Wie bereits erläutert wurde, ist ein wesentliches Ziel von Flexibilitätsvereinbarungen in der Vermeidung von Lagerbeständen zu sehen. Daher wird ausschließlich eine Make-to-Order-Produktion betrachtet, die keinerlei Lagerbestände zum Ausgleich der Bedarfsschwankungen in der Produktion vorsieht. Auf diese Weise wird erreicht, dass ausschließlich die Mengenflexibilität der Produktion Gegenstand der Bewertung ist.

3.4.2 Abgrenzung des betrachteten Systems

Auf Basis der unternehmenstypologischen Abgrenzung wird das in Abbildung 16 gezeigte System als Untersuchungsgegenstand für die Bewertungsmethode definiert. Es bildet einen Ausschnitt aus einem Wertschöpfungsnetz ab, der ein produzierendes Unternehmen mit seinen direkten Kunden und Lieferanten umfasst. Da eine Modellierung und Analyse der vollständigen einzelnen Lieferketten aufgrund der Komplexität der Vernetzungen kaum durchführbar ist, wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sich die Anforderungen flussabwärts in den Lieferketten bei den direkten Kunden aggregieren und dass die flussaufwärts liegenden Randbedingungen sich in den Restriktionen der direkten Lieferanten widerspiegeln.

Im Folgenden werden mit dem Begriff *Kunden* stets die Kunden des produzierenden Unternehmens und mit dem Begriff *Lieferanten* stets seine Lieferanten bezeichnet. Für das Unternehmen selbst wird der Begriff *Unternehmen* konsequent verwendet, auch wenn es in bestimmten Situationen als Kunde oder Lieferant auftritt.

Das Produktspektrum des Unternehmens umfasst die Menge \mathcal{P} an P unterschiedlichen standardisierten Produkten p_1 bis p_P , die serienmäßig produziert werden. Die zur Produktion benötigten Materialien bzw. Vorprodukte werden durch die Menge \mathcal{M} definiert, die M Elemente m_1 bis m_M enthält.⁴ Im Folgenden wird zwischen Material und Vorprodukt nicht weiter differenziert, sondern nur noch der Begriff Material verwendet. Das Produktionssystem des betrachteten Unternehmens um-

⁴ Um die Modellierung überschaubar zu halten, sollten nur diejenigen Materialien bzw. Vorprodukte einbezogen werden, bei denen im Rahmen der Mengenflexibilität Engpässe wahrscheinlich sind. Üblicherweise sind das solche Materialien, die nicht oder nur im geringen Umfang bevorratet werden und vornehmlich einer deterministischen Bestellabwicklung unterliegen. Von einer Modellierung von Standardmaterialien wie z. B. Schrauben sollte abgesehen werden.

fasst die Menge \mathcal{N} mit der Anzahl N an Arbeitssystemen n_1 bis n_N . In der Regel wird jedes Arbeitssystem im Rahmen des Herstellprozesses verschiedener Produkten in Anspruch genommen.

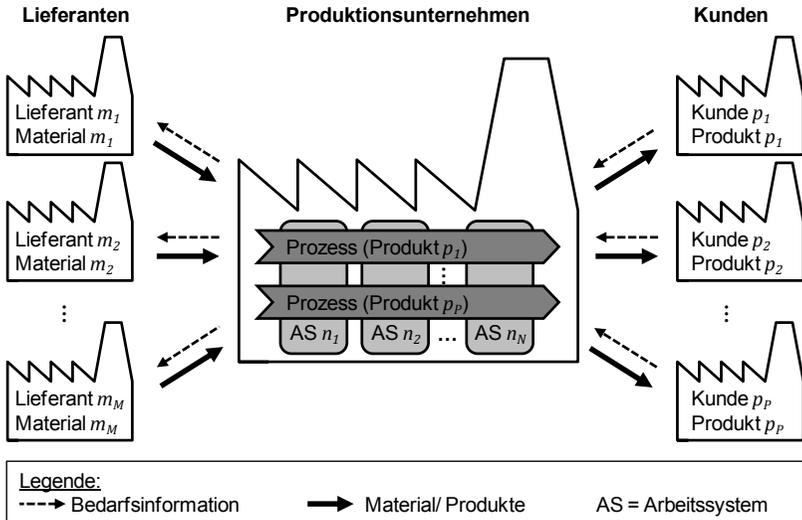


Abbildung 16: Betrachtungsumfang der Untersuchung

Für die Modellierung wird im Folgenden angenommen, dass jedes Produkt einem spezifischen Kunden zugeordnet werden kann und jeder Kunde auch nur dieses eine Produkt bezieht. Kunde und Produkt ergeben modelltechnisch somit eine Einheit. Analog werden auch zwischen Material und Lieferanten 1:1-Beziehungen unterstellt. Die Menge der Kunden kann damit ebenfalls durch \mathcal{P} , die Menge der Lieferanten durch \mathcal{M} beschrieben werden (vgl. Abbildung 16).⁵ Von Korrelationen zwischen den Bestellverhalten verschiedener Kunden wird im Folgenden grundsätzlich nicht ausgegangen.

⁵ Die Annahme von 1:1-Beziehungen zwischen Kunden und Produkten sowie zwischen Lieferanten und Materialien wird rein zu Modellierungszwecken getroffen. Sollte ein Kunde in der Realität mehrere Produkte beziehen, können für diese Produkte jeweils gleiche Kundeneigenschaften modelliert werden. In dem Fall, dass mehrere Kunden das gleiche Produkt beziehen, ist dieses Produkt entsprechend mehrfach in das Produktspektrum aufzunehmen. Analog ist mit Lieferanten und Materialien verfahren werden.

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu entwickelnde Bewertungsverfahren zielt darauf ab, die spezifische Mengenflexibilität zu ermitteln, die das produzierende Unternehmen einem zuvor bestimmten Kunden $p^* \in \mathcal{P}$ bereitstellen kann.

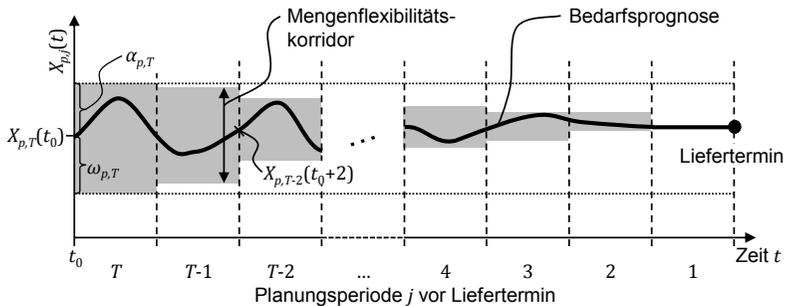
3.5 Referenzmodell zur Mengenflexibilitätsbewertung

3.5.1 Formulierung des Referenzmodells aus Bedarfssicht

Bevor die Bewertungsmethode systematisch konzipiert werden kann, gilt es, eine klare Vorstellung von den Anforderungen an das Bewertungsergebnis vor Augen zu haben. Sinnvollerweise orientieren sich die Ergebnisparameter direkt an den Rahmenvertragsmodellen, zu deren Konkretisierung sie beitragen sollen. In Abschnitt 2.4 wurde bereits auf Möglichkeiten zur Vereinbarung von Mengenflexibilität in Kunden-Lieferanten-Beziehungen eingegangen. Darauf aufbauend wird hier ein Referenzmodell für einen Rahmenvertrag formuliert, das den nachfolgenden Ausführungen zur Bewertungsmethode zugrunde gelegt wird. Ziel der Bewertungsmethode ist somit, Werte für die einzelnen Parameter des Referenzmodells zu ermitteln.

Das Rahmenvertragsmodell von TSAY & LOVEJOY (1999) wird der in Abschnitt 3.2 aufgestellten Anforderung, die Mengenflexibilität getrennt nach den drei Dimensionen nach SLACK (1983) zu bewerten, bereits teilweise gerecht. Deshalb wird es als Grundlage für das Referenzmodell verwendet. Im Referenzmodell wird davon ausgegangen, dass der Kunde eines produzierenden Unternehmens stets T Perioden vor dem Liefertermin eine erste Bestellmengenprognose abgibt, die er im Rahmen einer rollierenden Planung in den Grenzen vorgegebener Flexibilitätskorridore anpassen kann. Durch die Definitionen von Flexibilitätskorridoren für die einzelnen Planungsperioden wird schon eine separate Betrachtung des *Spielraums* und der *Anpassungszeit* vorgenommen (vgl. 3.2), da in jeder Planungsperiode nur der Korridor zugelassen wird, der innerhalb der gegebenen Zeit bis zum Liefertermin noch realisierbar ist. Wird nun für jeden der Flexibilitätskorridore zusätzlich ein *Kostenmodell* hinterlegt, das die Differenz der Stückkosten durch die Inanspruchnahme der Flexibilität beschreibt, ergibt sich ein Referenzmodell, das alle drei Dimensionen nach SLACK (1983) berücksichtigt. Das Kostenmodell kann sich dabei an den Preismodellen in der Arbeit von MÜLLER (2011, vgl. 2.4.3) orientieren. Abbildung 17 stellt die zulässigen Bestellmengenänderungen aus *Bedarfssicht* dar. Diese Sicht zeigt den Verlauf der Mengenanpassungen mit fortschreitender Zeit t , wie er sich für den Kunden in Bezug auf einen einzelnen Liefertermin ergibt. Abbildung 18

zeigt das Kostenmodell, das die Stückkostenveränderung des betrachteten Produkts durch Bestellmengenanpassungen innerhalb einer Planungsperiode beschreibt. Beide Abbildungen zusammen charakterisieren das vollständige Referenzmodell für die Bewertung.



Legende

$X_{p,j}(t)$ (prognostizierte) Bestellmenge von Produkt p für den Lieferzeitpunkt $t + j$

$\alpha_{p,j}$ während Planungsperiode j zulässige Erhöhung der Bestellmenge von p

$\omega_{p,j}$ während Planungsperiode j zulässige Reduzierung der Bestellmenge von p

Abbildung 17: Zulässige Bestellmengenänderungen im Referenzmodell

Im Allgemeinen wird von der Annahme ausgegangen, dass das liefernde Unternehmen Mengenschwankungen umso besser bedienen kann, je früher ihm die entsprechenden Bestellinformationen vorliegen (vgl. GOMEZ-PADILLA ET AL. 2005 S. 531, KESSINGER & PIEPER 2005 S. 145). Die Grenzen eines einmal definierten Flexibilitätskorridors sollten daher sinnvollerweise nicht in einer späteren Planungsphase überschritten werden dürfen, d. h. Mengenflexibilitätskorridore einer späteren Planungsperiode bleiben stets innerhalb der Grenzen von Flexibilitätskorridoren früherer Planungsperioden. So wird gewährleistet, dass zu Beginn der Planung die höchste Bandbreite an Flexibilität zur Verfügung steht. Dies entspricht auch grundsätzlich dem Prinzip der resultierenden Mengenflexibilitätskorridore in Abschnitt 2.4.2.

Die mathematische Modellierung des beschriebenen Referenzmodells kann analog zum Rahmenvertrag von TSAY & LOVEJOY (1999) durchgeführt werden, wobei hier einige Abwandlungen vorgenommen werden: In Abschnitt 2.4.2 wurden durch die Parameter $\alpha_{p,j}^r$ und $\omega_{p,j}^r$ die zulässigen Mengenänderungen relativ zu der Bestellmengenprognose definiert, die zu Beginn der jeweiligen Planungsperiode j abgege-

ben wurde. Im Folgenden wird es jedoch für sinnvoll erachtet, die zulässigen Mengenschwankungen in absoluten Stückzahlen zu definieren. Der Grund dafür ist, dass die Flexibilitätskorridore durch die Definition in absoluten Stückzahlen stets gleich groß bleiben, wohingegen eine relative Bestimmung der Flexibilität bei einer hohen vorliegenden Mengenprognose zu einem größeren Flexibilitätskorridor führt, als bei einer geringen Mengenprognose. Da es keine Anhaltspunkte dafür gibt, dass ein lieferndes Unternehmen eine größere Mengenanpassung bedienen kann, wenn die Prognose zuvor nur hoch genug ausfällt, wird dieser Ansatz verworfen. Außerdem führt eine relative Skalierung der Mengenflexibilität bei der Auswertung von Stückkostenänderungen bei Mengenanpassungen zu Verfälschungen da verschieden große Stückzahlmengen miteinander verglichen und kostenmäßig beurteilt werden.⁶ Für das vorliegende Referenzmodell werden die zulässigen Mengenänderungen dementsprechend durch die folgenden Parameter in absoluten Stückzahlen definiert:

$\alpha_{p,j}$	mögliche Erhöhung der Bestellmenge von $p \in \mathcal{P}$ innerhalb von Planungsperiode j in absoluten Stückzahlen
$\omega_{p,j}$	mögliche Reduzierung der Bestellmenge von $p \in \mathcal{P}$ innerhalb von Planungsperiode j in absoluten Stückzahlen

Im Rahmen des Referenzmodells gilt für die Parameter j , p und t :

j	Index zur Bezeichnung der Planungsperiode, $j \in \{1, \dots, T\}$
p	Index zur Bezeichnung des Produkts, $p \in \mathcal{P}$
t	Betrachtungszeitpunkt

Bei Vorliegen der Parameter $\alpha_{p,j}$ und $\omega_{p,j}$ gilt als Abwandlung von Gl. 3:

$$X_{p,j}(t) - \omega_{p,j} \leq X_{p,0}(t + j) \leq X_{p,j}(t) + \alpha_{p,j} \quad (\text{Gl. 8})$$

$X_{p,j}(t)$ (prognostizierte) Bestellmenge von Produkt p für den Lieferzeitpunkt $t + j$

Die Parameter $\alpha_{p,j}$ und $\omega_{p,j}$ beschreiben damit die maximalen Mengenänderungen, die jeweils bis zum Liefertermin bedient werden können. Als Zusammenfassung dieser Parameter werden die folgenden beiden Vektoren definiert, die das *Mengenflexibilitätsprofil* aufspannen:

⁶ Soll beispielsweise beurteilt werden, welche Stückkostenveränderungen eine Mengenänderung von 10% mit sich bringt, liegen diesem Anteil – je nachdem ob die vorhergehende Prognose 100 Stück oder 200 Stück betragen hat – entweder eine Menge von 10 Stück oder von 20 Stück zugrunde. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Stückkostenveränderung in beiden Fällen etwa gleich ausfällt.

$$\vec{\alpha}_p = [\alpha_{p,1}, \alpha_{p,2}, \dots, \alpha_{p,T}] \quad (\text{Gl. 9})$$

$$\vec{\omega}_p = [\omega_{p,1}, \omega_{p,2}, \dots, \omega_{p,T}] \quad (\text{Gl. 10})$$

- $\vec{\alpha}_p$ Flexibilitätsvektor zur Definition der zulässigen Erhöhung der Bestellmenge von p in absoluten Stückzahlen
- $\vec{\omega}_p$ Flexibilitätsvektor zur Definition der zulässigen Reduzierung der Bestellmenge von p in absoluten Stückzahlen

Die Veränderung von Stückkosten, die aufgrund einer Inanspruchnahme der Mengenflexibilität in den einzelnen Planungsperioden zu erwarten ist, lässt sich durch eine Funktion $\Delta\bar{c}_{p,j}(\varepsilon)$ beschreiben, die die mittlere Differenz der Stückkosten in Abhängigkeit der Bestellmengenänderung darstellt (vgl. Abbildung 18):

- $\Delta\bar{c}_{p,j}(\varepsilon)$ mittlere Differenz der Stückkosten von p bei einer Bestellmengenänderung von ε innerhalb von Planungsperiode j
- ε Bestellmengenänderung

Es gilt dabei:

$$\varepsilon = X_{p,j-1}(t+1) - X_{p,j}(t) \quad (\text{Gl. 11})$$

Die mittlere Differenz wird gewählt, da sich abhängig von der vorliegenden Bedarfssituation und den verfügbaren Möglichkeiten zur Mengenanpassung unterschiedliche Stückkostendifferenzen ergeben können, die sich über eine Mittelwertbildung zusammenfassen lassen.

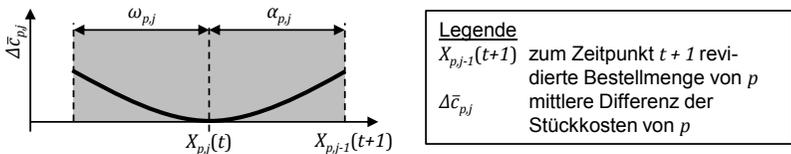


Abbildung 18: Mittlere Stückkostendifferenz durch Bestellmengenanpassungen innerhalb einer Planungsperiode j im Referenzmodell

Im Rahmen der zu entwickelnden Bewertungsmethode ist zu bestimmen, welche Grenzen der Mengenflexibilität aus technisch-organisatorischer Sicht tatsächlich bestehen und mit welchen Kostenveränderungen durch die Inanspruchnahme dieser Flexibilität zu rechnen wäre. Mit der Methode sind also konkrete Werte für $\alpha_{p,j}$ und $\omega_{p,j}$ sowie für die mittlere Stückkostendifferenz $\Delta\bar{c}_{p,j}$ zu bestimmen.

3.5.2 Deutung des Referenzmodells aus Angebotssicht

Bisher wurde das Referenzmodell und insbesondere das Prinzip des Mengenflexibilitätsprofils aus der Bedarfssicht dargestellt und aufgezeigt, inwiefern durch Mengenflexibilitätskorridore die Bestellmengenanpassungen eines Kunden in Bezug auf einen spezifischen Lieferzeitpunkt beschränkt werden. Um die Fähigkeiten des liefernden Unternehmens in Bezug auf Bestellmengenanpassungen auswerten zu können, ist es entscheidend, auch die Bedeutung der Flexibilitätsprofile aus *Angebotsicht* zu verinnerlichen: Für das Unternehmen besteht der Vorteil einer derartigen Mengenflexibilitätsvereinbarung darin, dass es frühzeitig Informationen über den Mengenbedarf der Kunden erhält und somit rechtzeitig die benötigte Kapazität einplanen sowie das Material bestellen kann. Auf diese Weise kann es sicherstellen, dass Kapazität und Material zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung stehen.

Der Dispositionszeitraum in der Zukunft, für den das Unternehmen diese Planung durchführen kann, umfasst genauso wie das Mengenflexibilitätsprofil T Planungsperioden. Dieser Zeitraum wird als *Planungshorizont* bezeichnet. Mit den Vektoren $\vec{X}_p(t)$ liegen dem Unternehmen zum Zeitpunkt t die Bestellmengen bzw. -prognosen der Kunden für alle Perioden des Planungshorizonts vor. Dies ist in Abbildung 19 dargestellt.

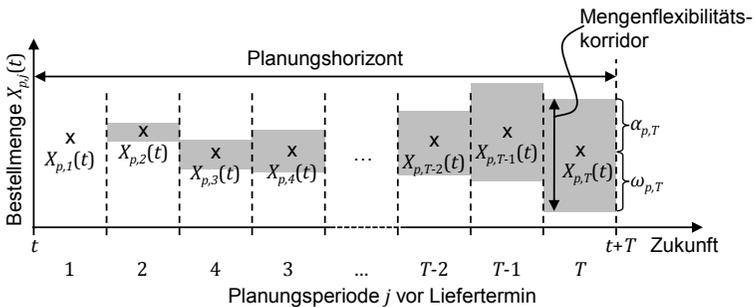


Abbildung 19: Planungshorizont des produzierenden Unternehmens

Die Prognosen sind in dieser Sicht unabhängig voneinander, da sie sich auf verschiedene Liefertermine beziehen. Deshalb sind sie als Einzelwerte durch ein x markiert und nicht durch eine Linie miteinander verbunden. Genauso wie in Abbildung 17 sind die Mengenflexibilitätskorridore als graue Flächen gekennzeichnet.

net. Das liefernde Unternehmen muss also damit rechnen, dass die vorliegenden Bestellmengen noch innerhalb dieser Korridore angepasst werden. Ihre Lage zueinander ist in dieser Sicht genauso unabhängig wie die einzelnen Prognosen. Da die Sichtweise in dieser Darstellung zukunftsbezogen ist (und nicht vergangenheitsbezogen wie in Abbildung 17), sind die schmalen Korridore in der nahen Zukunft und die breiten Korridore in der fernen Zukunft zu finden.

Der Zusammenhang zwischen der Bedarfssicht und der Angebotssicht der Flexibilitätsprofile ist in Abbildung 20 noch einmal verdeutlicht. Die horizontale Achse zeigt die Perioden in der Zukunft, für die das liefernde Unternehmen seine Produktionsplanung durchführen kann. Die vertikale Achse zeigt den Zeitverlauf.⁷

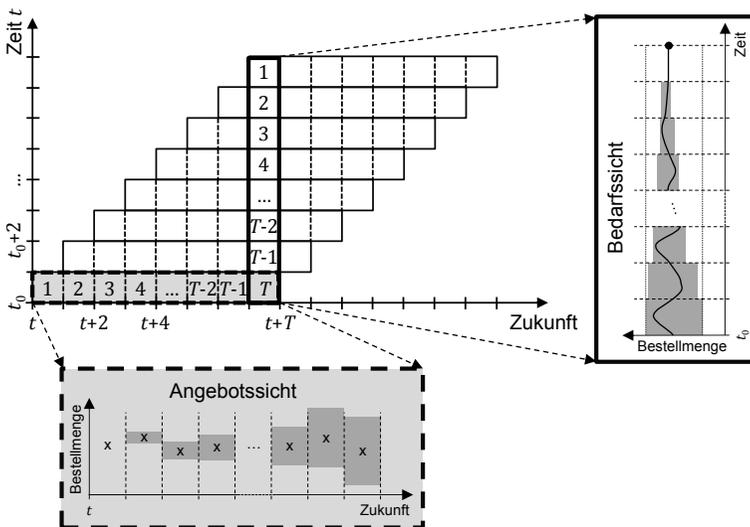


Abbildung 20: Zusammenhang der Flexibilitätskorridore aus Nachfrage- und aus Angebotssicht

Der im Unternehmen vorliegende Planungshorizont zur Produktionsplanung wird jeweils durch eine horizontale Reihe an Planungsperioden dargestellt. Mit fortschreitender Zeit verschiebt sich dieser Planungshorizont auf der Zukunftsachse

⁷ Genau genommen handelt es sich bei der horizontalen Achse auch um eine Zeitachse. Durch die gewählte Darstellung wird jedoch die Sicht auf die Zukunft klar von zeitlichen Abläufen getrennt.

nach rechts. Die markierte vertikale Reihe an Planungsperioden spiegelt den Verlauf der Bestellmenge für den Lieferzeitpunkt $t_0 + T$ wider, die sich von der ersten Prognose T Perioden vor dem Liefertermin bis zur endgültigen Bestellmenge zum Zeitpunkt $t_0 + T$ entwickelt.

3.6 Bewertungskonzept

3.6.1 Auswahl der Berechnungsmethode

3.6.1.1 Simulation

Quantitative Bewertungen von technischen oder organisatorischen Sachverhalten können auf Basis verschiedener Systematiken durchgeführt werden. Hinsichtlich der Genauigkeit und der besseren theoretischen Fundierung sind analytische mathematische Modelle grundsätzlich zu bevorzugen, jedoch erschließen sich viele reale Probleme nicht einer derartigen Modellierung oder der Aufwand dafür steht in keinem Verhältnis zum Nutzen (vgl. MUN 2006 S. 73). Insbesondere dynamische Zusammenhänge, wie sie im Bereich von Managementproblemen häufig auftreten, erschließen sich keiner analytisch-mathematischen Lösung. Simulationen sind in diesen Fällen das Mittel der Wahl, um zu einer fundierten quantitativen Lösung zu kommen (COYLE 1996 S. 84). Unter einer Simulation wird allgemein ein virtuelles Experiment auf einem Computer verstanden (BUNGARTZ ET AL. 2009 S. 1). Dabei wird das Verhalten eines modellierten Systems anhand einer oder mehrerer Referenzsituationen analysiert und aus den Ergebnissen werden Schlussfolgerungen über das Verhalten des realen Systems gezogen.

Auch für die vorliegende Aufgabenstellung ist der Einsatz einer Simulation aus folgendem Grund ein geeignetes Mittel: In den Abschnitten 2.5 und 2.6 wurde an verschiedenen Stellen deutlich, dass die Mengenflexibilität eines Produktionssystems in erster Linie vom jeweils vorliegenden Systemzustand abhängig ist. So basiert die realisierbare Mengenflexibilität z. B. auf der Verfügbarkeit von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen, aktuellen Lagerbeständen oder den jeweils vorliegenden Bestellmengen der Kunden. Die jeweilige Ausprägung dieser Faktoren hängt wiederum teilweise von vorhergehenden Systemzuständen ab. Aufgrund dieser dynamischen Veränderung des Systemzustands ist eine analytische Modellierung und Berechnung nicht möglich.

Als Simulationsmethoden bieten sich im vorliegenden Fall zwei Verfahren an:

- Die *zeitdiskrete Simulation* eignet sich zur Abbildung des dynamischen Systemverhaltens.
- Die *Monte-Carlo-Methode* kann zur Erzeugung und Untersuchung von verschiedenen Referenzszenarien herangezogen werden.

In den folgenden Abschnitten werden die beiden Verfahren kurz erläutert und aufgezeigt, inwiefern sie im Rahmen der zu entwickelnden Bewertungsmethode eingesetzt werden können.

3.6.1.2 Zeitdiskrete Simulation

Zeitdiskrete Simulationen werden eingesetzt, um das Verhalten dynamischer Systeme zu untersuchen. Ein dynamisches System wird insbesondere dadurch charakterisiert, dass seine Systemzustände nicht nur auf aktuellen Inputgrößen, sondern auch auf zeitlich vorangehenden Systemzuständen beruhen.

Bei der zeitdiskreten Simulation wird eine schrittweise Berechnung der Modellzustände durchgeführt, wobei jeweils der Zustand des vorangegangenen Simulationsschritts sowie ggf. neue Inputwerte aus Umweltvariablen des Modells herangezogen werden (vgl. Abbildung 21). Der Zeitschritt zwischen zwei Modellzuständen wird dabei als konstant angenommen (ZEIGLER ET AL. 2000 S. 37 f.). Als Ergebnis liefert eine solche Simulation das Zeitverhalten des betrachteten Modells in Form von Zeitreihen bestimmter zu beobachtender Systemvariablen.

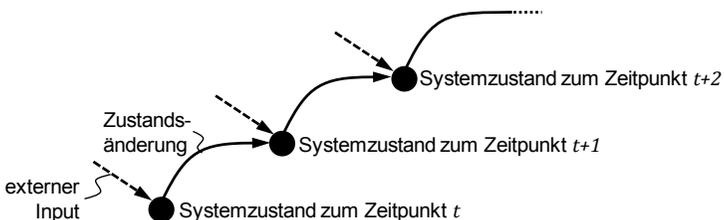


Abbildung 21: Prinzip der Zeitdiskreten Simulation (in Anlehnung an ZEIGLER ET AL. 2000)

Für den Einsatz einer zeitdiskreten Simulation spricht in erster Linie das dynamische Verhalten der Mengenflexibilität. Lagerbestände, Kapazitätzustände und die

Verfügbarkeit von Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (vgl. GOTTSCHALK 2007 S. 60 ff.) können auf diese Weise von Simulationsschritt zu Simulationsschritt fortgeschrieben werden. Die rollierende Anpassung von Bestellmengen durch die Kunden lässt sich ebenfalls mit einer zeitdiskreten Simulation auf geeignete Weise nachbilden. Der Ablauf der Simulation in zeitdiskreten Schritten harmoniert dabei mit der periodenbezogenen Formulierung des Referenzmodells zur Mengenflexibilitätsbewertung (vgl. 3.5).

Mit einer zeitdiskreten Simulation kann somit das Verhalten des im Rahmen der Flexibilitätsbewertung zu betrachtenden Systems aus Unternehmen, Kunden und Lieferanten simuliert werden (vgl. 3.4.2). Dabei wird ein Szenario durchlaufen, das die Mengenbedarfsentwicklung aller Kunden über einen gewissen Zeitraum beschreibt. Nach einer Kapazitätsbedarfsplanung für die vorliegenden Kundenbestellungen lassen sich in jedem Simulationsschritt die Möglichkeiten zur Anpassung der Ausbringungsmenge analysieren und die dadurch gegebene Mengenflexibilität im Zeitverlauf beobachten. Am Ende der Simulation kann schließlich eine Aggregation der beobachteten Mengenflexibilitätszustände Aufschluss darüber ergeben, welches Maß an Flexibilität im System jederzeit verfügbar gewesen ist.

Der Nachteil an diesem Vorgehen ist, dass nur ein einzelnes Mengenbedarfsszenario untersucht wird. Somit beziehen sich die Ergebnisse nur auf eine mögliche Entwicklung von Bestellmengen. Es kann daher nicht mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass sie repräsentativ für jede mögliche Bedarfssituation sind.

3.6.1.3 Monte-Carlo-Methode

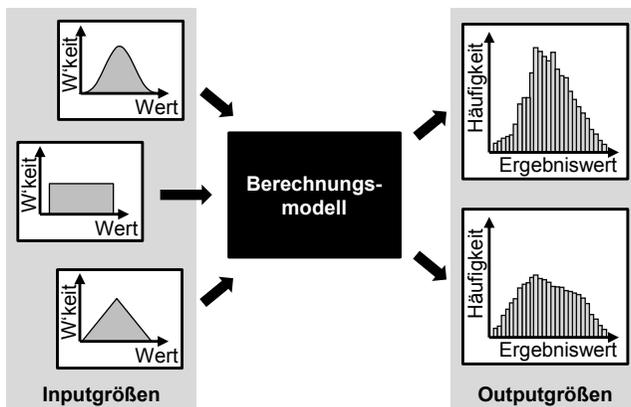
Die Tatsache, dass die Bestellmengen der Kunden als Auslöser des Flexibilitätsbedarfs jeweils unsichere Einflussfaktoren aus dem Unternehmensumfeld darstellen, lässt weiterhin den Einsatz einer Monte-Carlo-Simulation als geeignet erscheinen (KREBS ET AL. 2009).

Die Monte-Carlo-Methode ist ein gängiges Verfahren zur Analyse und Quantifizierung von Risiken sowie zur Ableitung von Prognosen. Das ihr zugrundeliegende Prinzip besteht darin, aus möglichen Entwicklungen einzelner Inputgrößen eine Vielzahl an möglichen Zukunftsszenarien zu generieren, deren charakteristischer Einfluss auf eine Ergebnisgröße anschließend ausgewertet werden kann (MUN 2006 S. 73). Dabei wird das Gesetz der großen Zahlen aus der Stochastik angewandt, das besagt, dass sich die relative Häufigkeit eines Zufallsergebnisses im Experiment der Wahrscheinlichkeit des Ergebnisses annähert, je häufiger das

Experiment durchgeführt wird (COTTIN & DÖHLER 2009 S. 373). Der Vorteil an diesem Verfahren besteht in der einfachen Implementier- und Handhabbarkeit entsprechender Modelle sowie der unkomplizierten Lösung mithilfe von Simulationen (MUN 2006 S. 73 ff.).

Das Prinzip einer Monte-Carlo-Simulation ist in Abbildung 22 dargestellt. Unsichere Inputgrößen des Berechnungsmodells werden mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen beschrieben. Diese spiegeln jeweils die Wahrscheinlichkeit dafür wider, dass ein bestimmter Wert für die betrachtete Größe eintritt (VOSE 1996 S. 13 ff.).

Während der Simulation werden für die Inputgrößen zufällige Werte entsprechend der jeweiligen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen gezogen, die anschließend im Rechenmodell miteinander kombiniert werden, um die Outputgrößen zu berechnen. Dieses Vorgehen wird sehr häufig wiederholt, so dass sich für die Outputgrößen entsprechend viele Werte ergeben, die als Histogramm abgebildet werden. Das Histogramm stellt eine Annäherung an die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Outputgröße dar, die sich bei dem gegebenen Rechenmodell aus den Verteilungen der Inputgrößen ergibt (SHONKWILER & MENDIVIL 2009 S. 5).



W'keit = Wahrscheinlichkeit

Abbildung 22: Prinzip der Monte-Carlo-Methode

Die Auswertung einer Monte-Carlo-Simulation erfolgt mit Methoden der deskriptiven Statistik. So können z. B. Erwartungswerte und Streuungsmaße sowie spezi-

fische Risikokennzahlen wie der Value-at-Risk abgeleitet werden (vgl. auch WOLF & RUNZHEIMER 2009 S. 144). Für ausführliche Erläuterungen sei an dieser Stelle auf Standardliteratur verweisen (z. B. COTTIN & DÖHLER 2009 S. 101 ff.).

Mithilfe der Monte-Carlo-Methode lassen sich schwankende und unsichere Bestellmengen von Kunden über Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen modellieren und verschiedene zu untersuchende Szenarien daraus ableiten. Sie erspart jedoch nicht den zusätzlichen Einsatz der zeitdiskreten Simulation, da die Monte-Carlo-Methode für sich genommen kein dynamisches Systemverhalten abbilden kann. Vielmehr kann sie dazu genutzt werden, mehrere Referenzszenarien zu erzeugen, die jeweils im Rahmen eines zeitdiskreten Simulationslaufs hinsichtlich Mengenflexibilität analysiert werden. Auf diese Weise können ausreichend Daten gewonnen werden, die repräsentativ für zahlreiche mögliche Zukunftsszenarien sind. Der Nachteil des isolierten Einsatzes der zeitdiskreten Simulation kann somit durch die Überlagerung mit der Monte-Carlo-Methode ausgeräumt werden.

3.6.2 Konzept des Simulationsablaufs

Der Einsatz der im vorangegangenen Abschnitt 3.6 genannten Simulationsmethoden – der zeitdiskreten Simulation und der Monte-Carlo-Methode – zielt darauf ab, während der Simulation zahlreiche repräsentative Daten über das Systemverhalten in unterschiedlichen Szenarien zu ermitteln, die anschließend gesamthaft mit Methoden der deskriptiven Statistik ausgewertet werden können. Die zu untersuchenden Szenarien werden durch die Menge \mathcal{E} an E unterschiedlichen Szenarien e_1 bis e_E beschrieben. Für den Simulationsablauf wird folgendes Konzept zugrunde gelegt (vgl. Abbildung 23):

Zur Untersuchung jedes einzelnen Szenarios wird das betrachtete System zunächst in einen Initialzustand versetzt, der den Systemzustand insbesondere hinsichtlich der verfügbaren Flexibilität zum Zeitpunkt t_0 charakterisiert (Operation 1 in Abbildung 23). Der Initialzustand entspricht idealerweise dem real vorliegenden Systemzustand zum Zeitpunkt der Untersuchung. Es kann jedoch auch ein fiktiver Initialzustand geschaffen werden, der aber realitätsnah sein sollte. Mit der Monte-Carlo-Methode wird für das Szenario darüber hinaus ein Ausgangszustand der vorliegenden (prognostizierten) Bestellmengen der Kunden erzeugt.

Die Untersuchung der Mengenflexibilität anhand eines Szenarios erfolgt im Rahmen eines zeitdiskreten Simulationslaufs. Dafür wird das Szenario über einen Untersuchungszeitraum weiterentwickelt (Operation 2 in Abbildung 23), der U

Perioden umfasst. Der Beginn jeder dieser Perioden stellt einen Zeitschritt $t \in \{1, \dots, U\}$ des zeitdiskreten Simulationslaufs dar. Zu jedem dieser Zeitschritte liegen für das produzierende Unternehmen (prognostizierte) Bestellmengen aller Kunden innerhalb des T Perioden umfassenden Planungshorizonts vor (vgl. 3.5.2), auf deren Basis die Kapazitäts- und Materialplanung durchgeführt und anschließend die verfügbare Mengenflexibilität ausgewertet wird (Operation 3 in Abbildung 23).

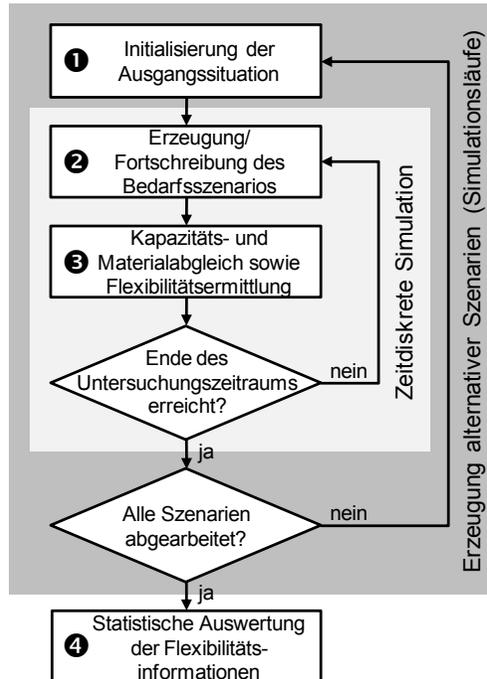


Abbildung 23: Konzept zum Ablauf der Gesamtsimulation

Bei der Weiterentwicklung von Simulationsschritt zu Simulationsschritt rückt der Betrachtungszeitpunkt t um eine Periode nach vorn auf $t + 1$. Damit verschiebt sich auch der Planungshorizont um eine Periode. Der Systemzustand wird bei diesem Schritt dadurch fortgeschrieben, dass der Planzustand hinsichtlich der Kapazitäts- und Materialdisposition vom Zeitpunkt t nun zum Ist-Zustand vom Zeitpunkt $t + 1$ erklärt wird. Auch die Bestellmengen werden fortgeschrieben: Der Bedarf $X_{p,1}(t)$ liegt aus Simulationssicht nun in der Vergangenheit und braucht im Folgenden nicht

weiter berücksichtigt zu werden. Die Prognosen $X_{p,j}(t)$ der übrigen Planungsperioden $j = \{2, \dots, T\}$ werden gemäß des Kundenbestellverhaltens aktualisiert indem sie für die Berechnung der neuen Prognosen zum Zeitpunkt $t + 1$ herangezogen werden:

$$X_{p,j}(t + 1) = f \left(X_{p,j+1}(t) \right) \quad \forall j = \{1, \dots, T - 1\} \quad (\text{Gl. 12})$$

Für $X_{p,T}(t + 1)$ wird unabhängig davon eine neue Prognose erzeugt. Abbildung 24 verdeutlicht das schrittweise Fortschreiben des Szenarios im Rahmen des zeitdiskreten Simulationslaufs.

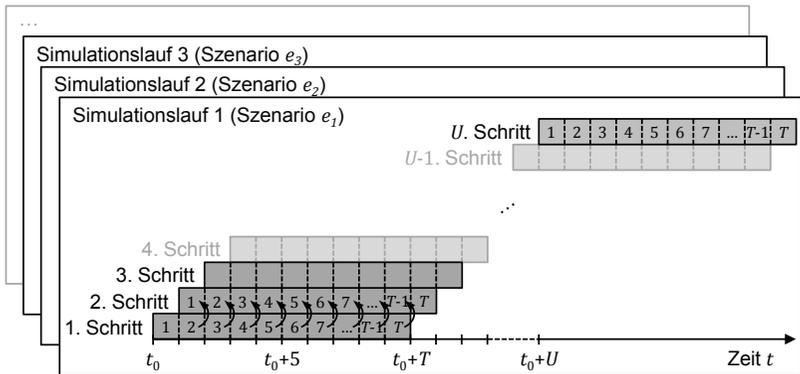


Abbildung 24: Fortschreibung eines Szenarios während eines zeitdiskreten Simulationslaufs

Nach der Abarbeitung sämtlicher Szenarien erfolgt schließlich eine gesamthafte Auswertung der gewonnenen Daten mit Methoden der deskriptiven Statistik (Operation 4 in Abbildung 23).

3.6.3 Methodisches Vorgehen zur Bewertung

Um eine Simulation nach dem im vorangehenden Abschnitt 3.6.2 beschriebenen Konzept durchzuführen, sind einige vorbereitende Tätigkeiten notwendig. Um diese in die Bewertungsmethode mit einzubeziehen und das Bewertungsvorgehen für die Beschreibung im weiteren Verlauf der Arbeit sinnvoll zu gliedern, wurde ein dreiphasiges Vorgehensmodell entworfen, das in Abbildung 25 dargelegt ist und im Folgenden kurz erläutert wird.

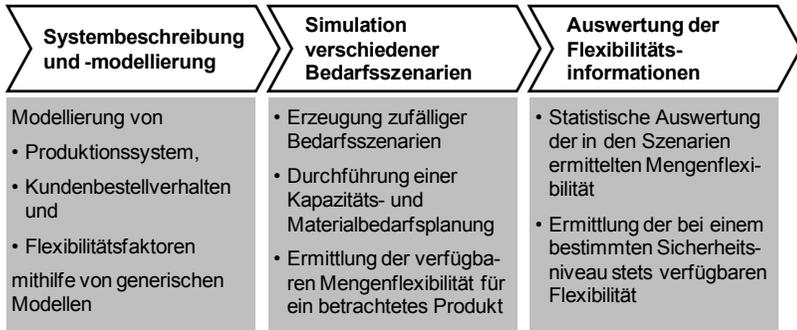


Abbildung 25: Vorgehen zur Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilitätsprofile

Um die Simulation durchführen zu können, muss zunächst ein Modell erstellt werden, mit dem das zu betrachtende System in einer für die eingesetzte Software geeigneten Weise beschrieben wird (BUNGARTZ ET AL. 2009 S. 5). Dabei sind die charakteristischen Eigenschaften der einzelnen Systemelemente (insbesondere hinsichtlich Flexibilitätspotentialen) sowie deren Relationen zueinander zu beschreiben. Gemäß dem in Abschnitt 3.4 festgelegten Betrachtungsumfang liegt der Fokus dabei auf der Modellierung des Produktionssystems des Unternehmens, der Kunden mit ihren spezifischen Produkten sowie der Lieferanten und den jeweiligen Materialien. Für die zu entwickelnde Methode gilt das Ziel, möglichst generische Modelle für die Modellierung bereitzustellen, um die Methode allgemeingültig zu formulieren und eine je nach Anwendungsfall problemspezifische Parametrierung zu ermöglichen. Für die Beschreibung der Modelle sowie der Simulation wird im weiteren Verlauf der Arbeit eine softwareneutrale mathematische Formulierung gewählt.

Auf der Modellierung aufbauend kann die Simulation verschiedener, mithilfe der Monte-Carlo-Methode erzeugter Bedarfsszenarien durchgeführt werden. Im Rahmen einer zeitdiskreten Simulation wird jedes einzelne Szenario Schritt für Schritt fortgeschrieben, um das dynamische Systemverhalten abzubilden. In jedem Simulationsschritt werden eine Kapazitäts- und Materialbedarfsplanung durchgeführt und ggf. Anpassungsmaßnahmen im Rahmen der Mengenflexibilität vorgenommen. Anschließend wird die in den einzelnen Planungsperioden verfügbare Mengenflexibilität (d. h. die Stückzahl-ober- und -untergrenzen) in Bezug auf ein zu betrachtendes Produkt ausgewertet und abgespeichert. Zusätzlich wird ermittelt, welche Stückkostenveränderungen durch die Inanspruchnahme der Flexibilität entstehen.

Im letzten Schritt erfolgt schließlich die Auswertung der gespeicherten Flexibilitätsinformationen, wobei Mithilfe von Methoden der deskriptiven Statistik untersucht wird, mit welcher Häufigkeit bestimmte Flexibilitätsgrenzen in den einzelnen Planungsperioden während der gesamten Simulation vorgekommen sind. Wurde eine ausreichende Zahl an Szenarien untersucht, lässt eine Kumulation der Häufigkeiten Aussagen darüber zu, welche Flexibilitätsgrenzen mit welcher Sicherheit erreicht werden können und mit welchen Stückkostenänderungen dabei jeweils zu rechnen ist.⁸ Wird von dem betrachteten Unternehmen eine Mindestsicherheit für die Lieferfähigkeit angestrebt, so kann diese zugrunde gelegt werden, um das kundenspezifische Mengenflexibilitätsprofil zu bestimmen.

3.7 Annahmen und Vereinfachungen in der Modellwelt

Für die Modellierung und Beschreibung der Vorgehensweise zur Bewertung werden einige vereinfachende Annahmen vorausgesetzt. Diese dienen im Wesentlichen der Förderung des Verständnisses der Bewertungsmethode sowie der Reduzierung des Simulationsaufwands. In diesem Abschnitt werden die jeweiligen Annahmen aufgezeigt und Hinweise darauf gegeben, inwiefern sie mit einer komplexeren Realität in Einklang gebracht werden können.

Ausschluss periodenübergreifender Material- und Kapazitätsbedarfe

Im Folgenden werden die einzelnen Planungsperioden hinsichtlich des Kapazitäts- und Materialbedarfs isoliert voneinander betrachtet. Das bedeutet konkret, dass im Rahmen der Bewertung davon ausgegangen wird, dass der Produktbedarf des Kunden für eine Periode j am Ende dieser Periode das Produktionswerk zur Auslieferung verlassen soll und dass sämtliche Kapazitätsbedarfe zur Fertigung innerhalb der Periode j anfallen. Das benötigte Material muss entsprechend zu Beginn dieser Periode bereitstehen. Diese Annahme wird vor allem zur Förderung des Verständnisses der Methode formuliert.

Sofern Produktionsabläufe vorliegen, die sich über mehrere Perioden erstrecken, kann eine Aufschlüsselung von Kapazitäts- und Materialbedarf auf die jeweiligen Perioden als unproblematisch angesehen werden (zum Vorgehen vgl. z. B. WIEN-DAHL ET AL. 1996 S. 14-19 ff.). Dies würde jedoch hier die Modellierung unnötig verkomplizieren.

⁸ Die Sicherheit spiegelt den Anteil aller Fälle an der Grundgesamtheit wider, in denen eine bestimmte Mengenflexibilität verfügbar ist.

Vernachlässigung von Prozessreihenfolgen in der Produktion

In Bezug auf die Produktionsprozesse in dem Unternehmen werden im Folgenden die Reihenfolgen einzelner Prozessschritte vernachlässigt. Die Planung findet somit auf einer Makro-Ebene statt, auf der die Bereitstellung der notwendigen Ressourcen und Kapazitäten thematisiert wird, ohne konkrete Abläufe festzulegen (vgl. ELMARAGHY 1993 S. 740). Hierbei wird davon ausgegangen, dass innerhalb einer Periode eine weitestgehend gleichmäßige Auslastung der Arbeitssysteme erzielt werden kann. Dieser Vereinfachung liegt im Wesentlichen die Annahme zugrunde, dass die Bearbeitungszeiten der einzelnen Produkte im Verhältnis zur Periodenlänge relativ kurz sind. Somit bestehen ausreichende Freiheiten für die Durchführung einer geeigneten Reihenfolgeplanung und Produktionsnivellierung.

Auf die Routenflexibilität hat diese Vereinfachung keinen Einfluss, da diese in der vorliegenden Arbeit primär als Möglichkeit angesehen wird, um Kapazitätsbedarfe zwischen Arbeitssystemen zu verlagern, jedoch nicht um Bearbeitungsreihenfolgen zu ändern.

Vernachlässigung unternehmensinterner Logistikprozesse

Logistikprozesse werden nicht explizit in das Modell einbezogen. Grundsätzlich wird hierbei davon ausgegangen, dass sich sämtliche modellierte Produktionsrouten auch aus logistischer Sicht realisieren lassen. Sind die Kapazitäten von einzelnen Logistiksystemen begrenzt, lässt sich dieser Aspekt dadurch in die Bewertung integrieren, dass das Logistiksystem als eigenständiges Arbeitssystem modelliert wird.

Vernachlässigung zusätzlicher Kapazitätsrestriktionen

Die in einem Unternehmen installierte Kapazität weicht in der Regel von der tatsächlich verfügbare Kapazität ab. Gründe dafür sind z. B. technische oder organisatorische Störungen sowie Wartungs- oder Reparaturzeiten, die dazu führen, dass nicht die volle Kapazität produktiv ausgeschöpft werden kann (VDI 3423). Darüber hinaus können auch Urlaubs- und Krankheitsausfälle beim Personal zeitweise zu einer Verringerung der nutzbaren Kapazität führen.

Ebenso wie die verfügbare Kapazität wird auch der spezifische Kapazitätsbedarf nicht allein durch die Stückzeit des Produktes und eine anteilige Rüstzeit charakterisiert. Zusätzliche Kapazitätsbedarfe können z. B. auftreten, wenn mit Ausschuss zu rechnen ist und entsprechend eine höhere als die bestellte Stückzahl produziert werden muss, um den Kundenauftrag zu erfüllen.

Diese zusätzlichen Kapazitätsrestriktionen – sowohl bei der verfügbaren Kapazität als auch beim spezifischen Kapazitätsbedarf – werden nachfolgend nicht gesondert

betrachtet. Dies wird damit begründet, dass zur Berücksichtigung derartiger Restriktionen in der Praxis häufig definierte Zu- oder Abschläge auf die jeweiligen Werte angesetzt werden. Das hier dargestellte Rechenmodell würde dadurch unnötig verkompliziert werden. Für die Erläuterung der hier vorliegenden Grundlagenbetrachtung bietet dieses Vorgehen keinen Mehrwert. Es wird daher im Folgenden davon ausgegangen, dass solche Faktoren bei der Bestimmung der verfügbaren Kapazität sowie des spezifischen Kapazitätsbedarfs bereits enthalten sind. Hinweise darauf, wie das rechnerisch geschehen kann, sind z. B. bei WIENDAHL & HEGENSCHIEDT (2006), WIENDAHL ET AL. (1996), VDI 3423 oder RÜHL (2010) zu finden, wobei letzterer auch Vorschläge unterbreitet, wie mit Unsicherheiten hinsichtlich dieser Faktoren im Rahmen einer Simulation umgegangen werden kann.

Ausschluss eines periodenübergreifenden Bedarfsabgleichs im Rahmen der Mengenflexibilität

Bei der Auswertung der verfügbaren Mengenflexibilität werden – ebenso wie bei der Kapazitäts- und Materialbedarfsplanung – die einzelnen Perioden isoliert voneinander betrachtet. Bei einer Begrenzung der maximalen Mengenausbringung in einer Periode wird somit ein darüber hinausgehender Bedarf nicht in zeitlich frühere Perioden verschoben, wie es beispielsweise im Rahmen eines Kapazitätsabgleichs in PPS-Systemen möglich wäre (vgl. 2.7). Genaugenommen wird durch dieses Vorgehen auch nicht die Mengenflexibilität einer betrachteten Periode erhöht, sondern die einer früheren Periode in Anspruch genommen. Die Periodenzuordnung sollte hier jedoch zugunsten eines klaren Bewertungsergebnisses erhalten bleiben.

Auswertung der Flexibilität nur hinsichtlich der effizientesten Route

Die verfügbare Routenflexibilität wird im Folgenden dafür eingesetzt, dass bei der Kapazitätsplanung zunächst die verfügbare Kapazität bestmöglich ausgenutzt wird, bevor Kapazitätsanpassungen vorgenommen werden. Bei der Auswertung der verfügbaren Mengenflexibilität wird die Routenflexibilität hingegen nicht berücksichtigt sondern nur eine Referenzroute herangezogen. Diese Einschränkung erfolgt aufgrund der Annahme, dass die einzelnen Routen für ein Produkt nicht die gleiche Effizienz aufweisen, da einerseits Arbeitssysteme mit unterschiedlichen Kostensätzen beansprucht werden und andererseits verschiedene spezifische Kapazitätsbedarfe eines Produktes für die einzelnen Routen bestehen (vgl. 4.2.2.3). Das betrachtete Unternehmen wird jedoch aus wirtschaftlichen Gründen ein Interesse daran haben, stets die effizienteste Route einzusetzen und die Routenflexibilität nur zu beanspruchen, wenn dadurch andere Mehrkosten erspart werden. Als Referenzroute für die Mengenflexibilitätsauswertung wird daher stets die effizienteste Route gewählt.

4 Detaillierung der Methode

4.1 Kapitelüberblick

Die Detaillierung des Bewertungsvorgehens in diesem Kapitel orientiert sich an den in Abbildung 25 auf Seite 79 dargestellten Vorgehensschritten. Zunächst geht Abschnitt 4.2 auf die Modellierung des zu betrachtenden Systems ein. Dabei werden Modelle vorgestellt, mit denen Flexibilitätsfaktoren und Rahmenbedingungen der Simulation mathematisch beschrieben werden können. Die während des Simulationsablaufs durchzuführenden Berechnungsschritte werden in Abschnitt 4.3 vorgestellt. In Abschnitt 4.4 folgen Erläuterungen zur Auswertung und Interpretation der Simulationsergebnisse.

4.2 Systemmodellierung

4.2.1 Vorbemerkung

Zur Durchführung der Simulation gilt es zunächst, ein Systemmodell zu erstellen, das die einzelnen Elemente des Systems in hinreichender Weise abbildet und deren Relationen zueinander verdeutlicht. Ein erstes, noch überwiegend qualitatives Modell wurde bereits in Abschnitt 3.4 im Rahmen der Spezifizierung des Betrachtungsumfangs entworfen und in Abbildung 16 dargestellt. Als wesentliche Systemelemente gehen hieraus Kunden bzw. Produkte, das aus mehreren Arbeitssystemen bestehende Produktionssystem und Lieferanten bzw. Materialien hervor. Die Relationen zwischen diesen Elementen werden im Wesentlichen durch die Produktionsprozesse hergestellt, die Material und Kapazität als Inputgrößen aufweisen und Produkte in entsprechender Menge als Output liefern.

Im Folgenden wird aufgezeigt, dass die in Abschnitt 3.3 diskutierten Flexibilitätsfaktoren als Eigenschaften der genannten Elemente interpretiert werden können. Somit kann durch eine Modellierung dieser Elemente das zu betrachtende System für die vorliegende Aufgabenstellung vollständig beschrieben werden.

4.2.2 Modellierung eines Kunden mit seinem spezifischen Produkt

4.2.2.1 Allgemeine Eigenschaften

Wie in Abschnitt 3.4 dargelegt wurde, werden zur Modellierung aus Gründen der Vereinfachung zwischen Kunden und Produkten 1:1-Beziehungen angenommen. Kunde und Produkt können somit als einheitliches Element modelliert werden. Die für die Bewertungsmethode relevanten Eigenschaften des Kunden bzw. Produkts bestehen in

- dem zu erwartenden Bedarf und dem Bestellverhalten des Kunden,
- den zur Produktion notwendigen Produktionsprozessen (inklusive der dabei bestehenden Routenflexibilität) und
- den Materialien, die für eine Einheit des Produkts benötigt werden.

Der Materialbedarf für ein Produkt ist in der Regel in Form von Stücklisten dokumentiert (BRANKAMP ET AL. 1996). Geht man davon aus, dass zur Produktion die Materialien der Menge \mathcal{M} eingesetzt werden, so lässt sich der Materialbedarf für ein Produkt p aus der Stückliste in einen Materialbedarfsvektor übersetzen:

$$\vec{\mu}_p = (\mu_{p,m_1}, \dots, \mu_{p,m_M}) \quad (\text{Gl. 13})$$

mit

$$\begin{array}{ll} \vec{\mu}_p & \text{Materialbedarfsvektor des Produkts } p \in \mathcal{P} \\ \mu_{p,m} & \text{Bedarf an Material } m \in \mathcal{M} \text{ für eine Einheit des Produkts } p \end{array}$$

Die Modellierung des Kundenbedarfs sowie der Produktionsprozesse ist umfangreicher, zumal Flexibilitätsfaktoren zu berücksichtigen sind. Diesen beiden Aspekten sind daher die folgenden zwei Abschnitte gewidmet.

4.2.2.2 Bedarf und Bestellverhalten

Die Modellierung von Bedarf und Bestellverhalten dient dazu, während der Simulation Bedarfsszenarien zu erzeugen, die für die weitere Bewertung der Mengenflexibilität herangezogen werden sollen. Insofern ist es sinnvoll, diese an das Referenzmodell anzulehnen, das auch als Basis für die Bewertung dient und später das zulässige Bestellverhalten für einen spezifischen Kunden verdeutlichen soll. Es wird also davon ausgegangen, dass T Perioden vor dem Liefertermin eine initiale Bestellmengenprognose vom Kunden abgegeben und während des Planungshorizonts von Periode zu Periode angepasst wird (vgl. Abschnitt 3.5). In Abbildung 26

ist dies schematisch dargestellt. Der Bestellmengenanpassung liegt dabei innerhalb jeder Planungsperiode eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (graue Fläche) zugrunde, die ausgehend von der zum Zeitpunkt t vorliegenden Prognose die Wahrscheinlichkeit der angepassten Bestellmenge bis zum nächsten Zeitpunkt $t + 1$ charakterisiert. In der Abbildung wurden hierfür Normalverteilungen angenommen, deren wahrscheinlichster Wert die vorliegende Bestellmenge darstellt. Da im Rahmen der Modellierung davon ausgegangen wird, dass Bestellmengenanpassungen nicht kontinuierlich, sondern in diskreten Schritten zu den jeweiligen Zeitpunkten durchgeführt werden, ist die Darstellung in Abbildung 26 entsprechend angepasst. Anders als in vorhergehenden Darstellungen liegt innerhalb einer Planungsperiode somit stets eine konstante Bestellmenge vor.

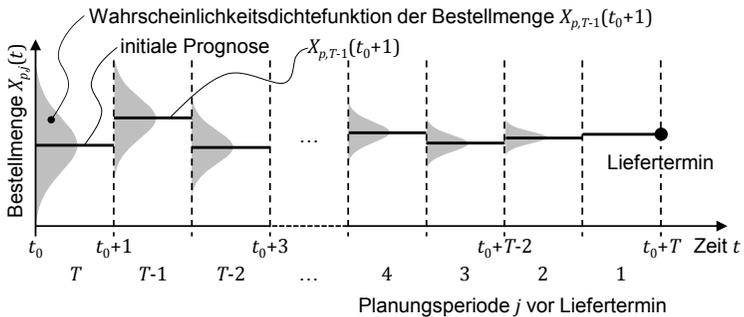


Abbildung 26: Beschreibungsmodell für das Kundenbestellverhalten

Um solche Bedarfsszenarien erzeugen zu können, gilt es, das Verhalten jedes einzelnen Kunden im Hinblick auf die Abgabe von Bedarfsprognosen und die Anpassung der Bestellmengen auf geeignete Weise zu beschreiben. Hierbei sind zwei Aspekte zu berücksichtigen:

1. Schwankungen und Entwicklungen auf den Absatzmärkten des Kunden führen teilweise zu systematischen Abweichungen des tatsächlichen Kundenbedarfs nach dem Produkt p von Periode zu Periode, die sich in den Zeitreihen der endgültigen Bestellmengen des Kunden widerspiegeln.
2. Die Fähigkeit des Kunden, diese Abweichungen zu antizipieren, und spezielle Verhaltensmuster bei der Übermittlung seines Bedarfs an den Lieferanten charakterisieren die Schwankungen, die innerhalb des Planungshorizonts bei der rollierenden Bedarfsanpassung beobachtet werden können.

Der erste Punkt beinhaltet das klassische Problem der Analyse und Prognose des Markt- bzw. Kundenbedarfs, worauf bereits in Abschnitt 2.6.2 eingegangen wurde. Die dort genannten Verfahren können auch hier zum Einsatz kommen, wobei wie im Falle des Holt-Winters-Verfahren eine Aufspaltung der Bedarfsinformation in die Komponenten Trend, Saisonalität und eine irreguläre Komponente vorgeschlagen wird. Der zugrundeliegende Bedarfsverlauf lässt sich dann mit der bereits auf Seite 39 definierten Gl. 6 beschreiben.

Der zweite Punkt hängt zum einen mit den Unsicherheiten auf dem Absatzmarkt zusammen: Schwankt der Marktbedarf stark, wirkt sich dies auch auf die Vorhersagegenauigkeit des Kundenbedarfs aus. Aufgrund der dabei entstehenden Schätzfehler muss der Kunde seine Bedarfsprognose entsprechend häufig revidieren. Neben dieser Tatsache können zum anderen aber auch spezifische Verhaltensmuster des Kunden auftreten, die sein Bestellverhalten zusätzlich charakterisieren: So erwähnen z. B. LEE ET AL. (1997, S. 98), dass manche Kunden zu Beginn der Prognose ihren Bedarf übertreiben, um später sicherzugehen, dass sie die tatsächlich benötigte Menge der Produkte auch wirklich bekommen. Um sowohl die Schätzfehler als auch solche Verhaltensmuster bei der Abgabe der Mengenprognosen zu charakterisieren, kann auf die von BARTHEL (2006, S. 87 ff.) vorgeschlagene Zeitreihenanalyse für logische Bestellreihen zurückgegriffen werden. In solchen Bestellreihen werden sämtliche Bestellinformationen des Kunden zusammengefasst, die in einen einzelnen Lieferauftrag resultieren. Durch die Analyse mehrerer derartiger Zeitreihen lässt sich feststellen, zu welchen Zeitpunkten vor der Auslieferung der Kunde typischerweise Bedarfsanpassungen vornimmt und wie umfangreich diese ausfallen. So lässt sich zum einen ein Vektor ableiten, der die Wahrscheinlichkeiten dafür beinhaltet, dass im Rahmen der einzelnen Planungsperioden Prognoseanpassungen für das Produkt p vorgenommen werden:

$$\vec{\tau}_p = (\tau_{p,1}, \dots, \tau_{p,T}) \quad (\text{Gl. 14})$$

mit

- $\vec{\tau}_p$ Wahrscheinlichkeitsvektor für Bestellmengenanpassungen von Kunde p
- $\tau_{p,j}$ Wahrscheinlichkeit einer Bestellmengenanpassung von p innerhalb von Planungsperiode j

Zum zweiten kann ein Vektor ermittelt werden, der die Standardabweichung der jeweils in den Planungsperioden beobachteten Mengenänderungen ausgehend vom vorhergehenden Prognosewert enthält:

$$\vec{\sigma}_p = (\sigma_{p,1}, \dots, \sigma_{p,T}) \quad (\text{Gl. 15})$$

$\vec{\sigma}_p$ Schwankungsvektor der Bestellmengenanpassung von Kunde p
 $\sigma_{p,j}$ Standardabweichung einer Bestellmengenanpassung von p innerhalb
von Planungsperiode j

In der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Mengenänderungen Normalverteilungen unterliegen, da unterstellt wird, dass sie im Wesentlichen durch Schätzfehler bei der Bedarfsprognose verursacht werden.⁹ In diesem Fall ist die Beschreibung des Bestellverhaltens für ein Produkt p durch die Komponenten $X_p^{Trend}(t)$, $X_p^{Sais}(t)$, $X_p^{irr}(t)$ sowie durch die Vektoren $\vec{\tau}_p$ und $\vec{\sigma}_p$ für das Modell vollständig möglich.

Um bei der Ermittlung der Elemente der Vektoren $\vec{\tau}_p$ und $\vec{\sigma}_p$ statistisch verlässliche Ergebnisse zu bekommen, ist eine große Menge an Daten notwendig. In der Realität dürfte diese Datenbasis jedoch nur in wenigen Fällen zur Verfügung stehen. Nichtsdestotrotz eignet sich die Vorgehensweise beim Fehlen einer entsprechenden Datenbasis, um eine qualifizierte Schätzung auf der Grundlage der verfügbaren Daten vornehmen zu können.

Eine weitere Eingrenzung des Kundenbestellverhaltens kann zusätzlich vorgenommen werden, wenn zwischen dem Unternehmen und einem zu modellierenden Kunden bereits eine Flexibilitätsvereinbarung besteht, die eine Beschränkung der Mengenflexibilitätskorridore im Sinne des Referenzmodells zulässt. In diesem Fall wird die zulässige Variation der Bestellprognosen im Planungshorizont beschränkt durch die beiden Vektoren $\vec{\alpha}_p$ und $\vec{\omega}_p$ (vgl. 2.4.2 und 3.5). Bei einer vorliegenden Bestellprognose lassen sich damit die anzusetzenden Flexibilitätskorridore für die zulässige Mengenvariation bis zum Zeitpunkt $t+1$ bestimmen durch die Bedingung:

$$X_{p,j}^{min}(t) \leq X_{p,j-1}(t+1) \leq X_{p,j}^{max}(t) \quad (\text{Gl. 16})$$

Dabei gilt:

$$X_{p,j}^{min}(t) = \max[X_{p,j}(t) - \omega_{p,j}, X_{p,j+1}^{min}(t-1)] \quad (\text{Gl. 17})$$

$$X_{p,j}^{max}(t) = \min[X_{p,j}(t) + \alpha_{p,j}, X_{p,j+1}^{max}(t-1)] \quad (\text{Gl. 18})$$

$$\forall j \in \{1, \dots, T-1\}$$

⁹ Sollten Hinweise darauf bestehen, dass der Bestellmengenanpassung andere Verteilungsformen als die Normalverteilung zugrunde liegen, so müssen ggf. weitere Parameter modelliert werden. Da diesbezüglich zahlreiche Spezialfälle denkbar sind, deren einzelne Behandlung an dieser Stelle zu weit ging und nur geringen Mehrwert für die vorliegende Methode lieferte, wird dieser Aspekt nicht weiter vertieft.

- $X_{p,j}^{min}(t)$ Untergrenze der zulässigen Bestellmenge von p in Planungsperiode j zum Zeitpunkt t
- $X_{p,j}^{max}(t)$ Obergrenze der zulässigen Bestellmenge von p in Planungsperiode j zum Zeitpunkt t

Die Einbeziehung der Terme $X_{p,j+1}^{min}(t-1)$ bzw. $X_{p,j+1}^{max}(t-1)$ in Gl. 17 und Gl. 18 gewährleistet, dass einmal definierte Flexibilitätsgrenzen nicht später wieder überschritten werden können (vgl. 3.5.1). In Abbildung 27 ist dieser Sachverhalt beispielhaft anhand der Planungsperiode $T-1$ dargestellt. Für die Periode T wird der Korridor ausschließlich durch die Werte $X_{p,T}^{min}$ und $X_{p,T}^{max}$ begrenzt. Dieser Korridor stellt die im Rahmen der Vereinbarung insgesamt mögliche Mengenflexibilität dar.

Die durch eine Flexibilitätsvereinbarung festgelegten Mengenflexibilitätskorridore beschränken die Möglichkeiten des Kunden, beliebige Anpassungen der Bestellmenge vorzunehmen. Um dies modelltechnisch umzusetzen, werden die oben definierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen jeweils an den Korridor Grenzen beschnitten (vgl. Abbildung 27).

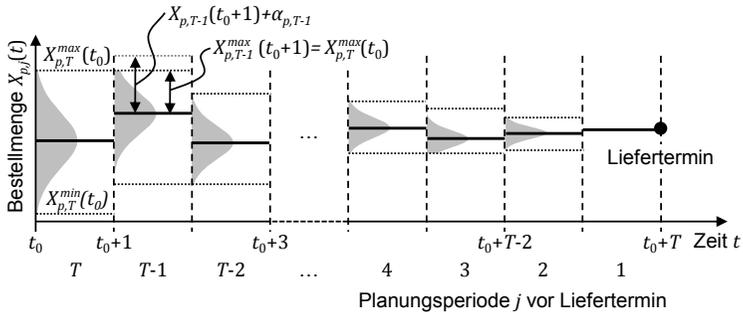


Abbildung 27: Beschreibungsmodell für das Kundenbestellverhalten bei bestehender Flexibilitätsvereinbarung

4.2.2.3 Produktionsprozess und Routenflexibilität

Die Herstellungsprozesse stellen das Bindeglied zwischen den Produkten und den Arbeitssystemen des produzierenden Unternehmens dar. Sie sind in der Regel in Form von Arbeitsplänen dokumentiert, die neben den beteiligten Arbeitssystemen jeweils die benötigte Kapazität spezifizieren. Bearbeitungsreihenfolgen werden in der vorliegenden Arbeit gemäß der Annahmen in Abschnitt 3.7 nicht betrachtet.

Ist bei einer Prozessalternative kein Arbeitsschritt in einem bestimmten Arbeitssystem vorgesehen, wird der entsprechende spezifische Kapazitätsbedarf $\kappa_{p,i,n}$ für das entsprechende Arbeitssystem n und die Prozessalternative i auf null gesetzt.

4.2.3 Modellierung eines Lieferanten mit seinem jeweiligen Material

Der Einfluss der Lieferanten im Zusammenhang mit der Mengenflexibilitätsbewertung besteht darin, dass sie den Mengenausstoß der Produktion limitieren, wenn keine ausreichende Menge an Material geliefert werden kann. Folglich sollten hier grundsätzlich nur solche Lieferanten bzw. Materialien modelliert werden, die für den Produktionsablauf kritisch sind. Da auch hier davon ausgegangen wird, dass zwischen Lieferanten und Materialien 1:1-Beziehungen bestehen, ist eine einheitliche Modellierung von Lieferant und Material in einem Datensatz möglich.

Für die Mengenflexibilität der Lieferanten wird eine Beschreibung vorausgesetzt, die eine Auswertung der Lieferfähigkeit zulässt. Idealerweise besteht zwischen dem Unternehmen und dem betrachteten Lieferanten eine Mengenflexibilitätsvereinbarung. Genügt diese dem in Abschnitt 3.5 eingeführten Referenzmodell, können für den betreffenden Lieferanten m analog zu den Kunden ebenfalls Mengenflexibilitätsprofile über folgende Vektoren definiert werden:

$$\vec{\alpha}_m = [\alpha_{m,1}, \dots, \alpha_{m,T}] \quad (\text{Gl. 20})$$

$$\vec{\omega}_m = [\omega_{m,1}, \dots, \omega_{m,T}] \quad (\text{Gl. 21})$$

$\forall m \in \mathcal{M}$

$\vec{\alpha}_m$	Flexibilitätsvektor zur Definition der zulässigen Erhöhung der Bestellmenge von Material m
$\alpha_{m,j}$	zulässige Erhöhung der Bestellmenge von Material m für Planungsperiode j
$\vec{\omega}_m$	Flexibilitätsvektor zur Definition der zulässigen Reduzierung der Bestellmenge von Material m
$\omega_{m,j}$	zulässige Reduzierung der Bestellmenge von Material m für Planungsperiode j

In diesem Falle stellen die Vektoren die realisierbaren Mengenschwankungen dar, an die sich das betrachtete Unternehmen als Kunde bei der Materialbestellung halten muss. Im Sinne einer systematischen Auswertung sind die Parameter $\alpha_{m,j}$ und $\omega_{m,j}$ so zu wählen, dass sie sich auf die mögliche Liefermenge zu Beginn der

betreffenden Periode beziehen, da das Material bei Beginn des Produktionsprozesses bereitstehen muss.

Für die spätere Untersuchung von Kostenänderungen der Produkte durch bestehende Preismodelle bei der Materialbeschaffung könnte für das Material auch eine Implementierung von Preismodellen durchgeführt werden. Da sich Materialpreise bei der Bestimmung von Stückkosten jedoch als Einzelkosten niederschlagen, stellen sie lediglich einen durchlaufenden Posten dar, dessen weitere Behandlung trivial ist. Aus Gründen der Vereinfachung und Übersichtlichkeit wird daher in der vorliegenden Arbeit darauf verzichtet.

Besteht keine Vereinbarung zur Mengenflexibilität zwischen Unternehmen und Lieferanten, so sollten auf Basis des beschriebenen Modells Abschätzungen (z. B. auf Basis von Erfahrungen aus der Vergangenheit oder in Abstimmung mit dem Lieferanten) vorgenommen werden, sofern der Lieferant in die Betrachtungen einbezogen werden soll.

4.2.4 Modellierung von Arbeitssystemen

Arbeitssysteme zeichnen sich dadurch aus, dass sie einen bestimmten Umfang an Arbeitsaufgaben verrichten können, wofür eine definierte Kapazität zur Verfügung steht. Der Funktionsumfang der Arbeitssysteme braucht hier nicht gezielt modelliert zu werden, da er bereits implizit durch die Definition der Produktionsrouten im Rahmen der Modellierung von Produkten bzw. Kunden (vgl. 4.2.2.3) festgelegt wurde. Die wesentliche zu beschreibende Eigenschaft besteht somit in der Kapazität der Arbeitssysteme. In den vorangegangenen Ausführungen ist schon darauf eingegangen worden, dass diese durch zahlreiche Flexibilitätsmaßnahmen angepasst werden kann und damit den zentralen Bestimmungsfaktor der Mengenflexibilität darstellt.

Als Grundkapazität K_n^G eines Arbeitssystems n wird diejenige Kapazität bezeichnet, die bei gleichmäßiger Auslastung ohne die Inanspruchnahme zusätzlicher Flexibilitätsmaßnahmen pro Periode zur Verfügung steht. Für die Bereitstellung der Grundkapazität fallen pro Periode gleichbleibende Kosten in Höhe von C_n^G an.

Zur Beschreibung der Kapazitätsflexibilität eines Arbeitssystems wird hier das Konzept von GOTTSCHALK (2007) herangezogen (vgl. auch Abschnitt 2.6.3). Er zeigt, dass alle Arten von Maßnahmen zur Anpassung der Kapazität auf gleiche Weise modelliert und durch einen einheitlichen Parametersatz beschrieben werden

können, um daraus die Kapazitätsflexibilität des Arbeitssystems abzuleiten. Diese Modellierung wird für die vorliegende Arbeit übernommen und teilweise erweitert.

Die Menge der in einem Arbeitssystem n zur Verfügung stehenden Maßnahmen zur Anpassung der Kapazität sei mit \mathcal{A}_n bezeichnet. Jede einzelne Maßnahme $a \in \mathcal{A}_n$ wird nach GOTTSCHALK (2007, S. 66) durch folgende Parameter charakterisiert:

ΔK_a	Kapazitätsbeitrag der Maßnahme a pro Periode
t_a^{akt}	Aktivierungszeit der Maßnahme a
$t_a^{ND,max}$	maximale Nutzungsdauer der Maßnahme a
$t_a^{ND,min}$	minimale Nutzungsdauer der Maßnahme a

Der Kapazitätsbeitrag gibt an, welche Kapazität durch die Aktivierung der Maßnahme zusätzlich zur Verfügung steht. Im Falle einer kapazitätsreduzierenden Maßnahme ist ΔK_a negativ. Die Aktivierungszeit beschreibt die Zeitspanne, die benötigt wird, bis die zusätzliche Kapazität bereitsteht und genutzt werden kann. Sie resultiert in der Regel aus organisatorischen Abläufen, die für die Kapazitätsanpassung notwendig sind. Die minimale und die maximale Nutzungsdauer definieren die Zeitspannen, für die eine Maßnahme nach dem Eintreten ihrer Wirksamkeit ohne Unterbrechung mindestens genutzt werden muss bzw. höchstens genutzt werden kann (GOTTSCHALK 2007 S. 66).¹⁰ Mithilfe dieser Informationen leitet GOTTSCHALK das Kapazitätsflexibilitätsprofil für ein Arbeitssystem her, wie es bereits auf Seite 44 in Abbildung 11 illustriert wurde.

In der Arbeit GOTTSCHALKS haben die Kapazitätsflexibilitätsprofile einen vorwiegend statischen Charakter. Er bestimmt die zukünftig möglichen Kapazitätzzustände einmalig mit den genannten Parametern, ohne darauf einzugehen, dass sich die Profile durch die Inanspruchnahme einzelner Maßnahmen im Laufe der Zeit verändern können. In der vorliegenden Arbeit spielt dieser Aspekt eine entscheidende Rolle. Daher wird zusätzlich zu den von ihm vorgeschlagenen Parametern eine Spezifizierung der Zeitspanne notwendig, die verstreichen muss, bis eine Maßnahme nach einer vorhergehenden Nutzungsphase erneut genutzt werden kann. Diese Zeitspanne charakterisiert beispielsweise vorgeschriebene Erholungszeiten, wenn Mitarbeiter im Rahmen einer Maßnahme über das übliche Maß hinaus beansprucht werden. Sie wird hier als Regenerationszeit bezeichnet:

t_a^{reg}	Regenerationszeit der Maßnahme a
-------------	------------------------------------

¹⁰ Im Falle der Nutzung von Arbeitszeitkonten ergeben sich maximale und minimale Nutzungsdauern aus den Grenzwerten und dem Stand des jeweiligen Zeitkontos; zur Vertiefung vgl. GOTTSCHALK 2007 S. 75 ff.

Die definierten Parameter werden in Abbildung 29 noch einmal graphisch erläutert. Nach der Entscheidung zur Nutzung einer Maßnahme, muss zunächst die Aktivierungszeit verstreichen, bis die Aktivphase beginnt. In dieser Phase liefert die Maßnahme ihren Kapazitätsbeitrag. Die Aktivphase kann frühestens nach der minimalen Nutzungsdauer enden. Im Beispiel endet sie nach der maximalen Nutzungsdauer. Nach ihrem Ende muss zunächst die Regenerierungszeit vergehen, erst dann kann die Aktivierungszeit erneut beginnen.

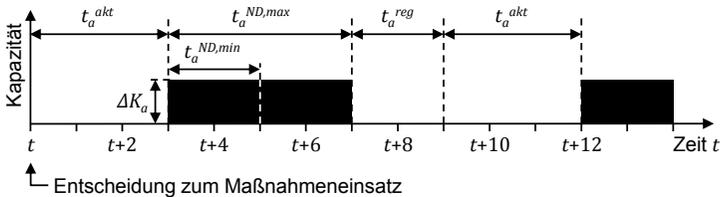


Abbildung 29: Parameter zur Beschreibung der Kapazitätsmaßnahmen

Zur Anpassung der Kapazität auf das gewünschte Maß können einzelne oder auch mehrere Maßnahmen gleichzeitig genutzt werden. Eine beliebige Kombination ist jedoch nicht immer möglich, da zwischen den Maßnahmen Interdependenzen in der Form bestehen können, dass sie sich nicht miteinander kombinieren lassen (Ausschluss), oder dass sie die Aktivität einer anderen Maßnahme voraussetzen (Voraussetzung). Als Beispiel für eine Voraussetzung kann die Nutzung einer dritten Schicht genannt werden, die erst dann einzusetzen ist, wenn eine zweite Schicht bereits installiert wurde. Ein Ausschluss besteht z. B., wenn Überstunden im Falle eines bestehenden Drei-Schicht-Betriebs nicht mehr eingesetzt werden können, da die verfügbaren Betriebsmittelkapazitäten durch die drei Schichten bereits vollständig ausgelastet sind. Solche gegenseitigen Abhängigkeiten lassen sich über Abhängigkeitsbeziehungen $b_{k,l} \forall k, l \in \mathcal{A}_n$ modellieren. Dabei kann eine frei definierbare Kodierung für die nachfolgend beschriebenen fünf Abhängigkeiten gewählt werden. Die dabei aufgeführten Klammerwerte (0) bis (4) bezeichnen die Kodierung, die im Rahmen des beispielhaften Anwendungsszenarios in Kapitel 5 gewählt wurde:

- Es besteht kein gegenseitiger Einfluss zwischen den Maßnahmen k und l (0). Dies gilt grundsätzlich für $k = l$.
- Die Maßnahmen k und l schließen sich gegenseitig aus. Maßnahme k hat bei der Ermittlung des Kapazitätsflexibilitätsprofils Priorität (1).

- Die Maßnahmen k und l schließen sich gegenseitig aus. Maßnahme l hat bei der Ermittlung des Kapazitätsflexibilitätsprofils Priorität (2).
- Maßnahme l setzt Maßnahme k voraus (3).
- Maßnahme k setzt Maßnahme l voraus (4).

Die Priorität zweier Maßnahmen bei gegenseitigem Ausschluss kann auf Basis verschiedener Kriterien festgelegt werden. Beispielsweise kann eine effiziente Maßnahme stets einer weniger effizienten vorgezogen werden. Da die Priorität in der vorliegenden Arbeit lediglich zur Bestimmung der maximal bzw. minimal möglichen Kapazität herangezogen wird (näheres dazu in Abschnitt 4.3.4.3), wird hier die Priorität stets so gesetzt, dass eine Maßnahme dann Priorität vor einer anderen genießt, wenn ihr Kapazitätsbeitrag betragsmäßig größer ist als derjenige der anderen Maßnahme. So wird später gewährleistet, dass bei der Ermittlung der maximal bzw. minimal möglichen Kapazität im Rahmen der Kapazitätsflexibilität stets diejenigen Maßnahmen vorgezogen werden, die jeweils den größten Beitrag liefern.

Bei dieser Konvention der Abhängigkeitsbeziehungen $b_{k,l}$ lässt sich eine Rangfolge der Maßnahmen ableiten, in der sie nach Prioritäten bzw. Voraussetzungsbeziehungen geordnet sind. In dieser Rangfolge werden alle nachrangigen Maßnahmen nach den jeweiligen Maßnahmen aufgeführt, auf die sich die Nachrangigkeit bezieht.

Die Anpassung der Kapazität ist in der Regel mit Kosten verbunden. Grundsätzlich können zwei verschiedene Arten von Kosten auftreten. Dies sind zum einen Kosten, die einmalig durch die Aktivierung (und auch die anschließende Deaktivierung) einer Maßnahme anfallen und hier als Aktivierungskosten bezeichnet werden. Besteht die Maßnahme beispielsweise in der Einrichtung einer zusätzlichen Arbeitsschicht, umfassen die Aktivierungskosten Kosten für die Akquise und Schulung von zusätzlichem Personal zu Beginn der Nutzung der Zusatzschicht und ggf. Kosten zur Freisetzung des Personals am Ende der Nutzungsphase. Zum zweiten können laufende Kosten für jede Nutzungsperiode entstehen, in der eine Maßnahme eingesetzt wird. Werden z. B. Überstunden angeordnet, so müssen diese Arbeitsstunden (teilweise sogar mit Zuschlägen) vergütet werden. Diese Kostenfaktoren werden ebenfalls als beschreibende Parameter einer Flexibilitätsmaßnahme definiert:

- C_a^{akt} einmalig pro Maßnahmeneinsatz anfallende Aktivierungskosten, der Maßnahme a
- C_a^{lauf} in jeder Periode der Nutzungszeit anfallende laufende Kosten der Maßnahme a

4.3 Berechnungsschritte während der Simulation

4.3.1 Übersicht über die Funktionen des Berechnungsmodells

Zur Strukturierung der in jedem zeitdiskreten Simulationsschritt durchzuführenden Berechnungen wurde das in Abbildung 30 dargestellte Modell entwickelt. Es detailliert die Operationen 2 und 3 des in Abbildung 23 gezeigten Simulationskonzepts. Dazu teilt es die gesamten Vorgänge in einzelne Berechnungsmodule auf und stellt deren informatorische Verknüpfungen heraus.

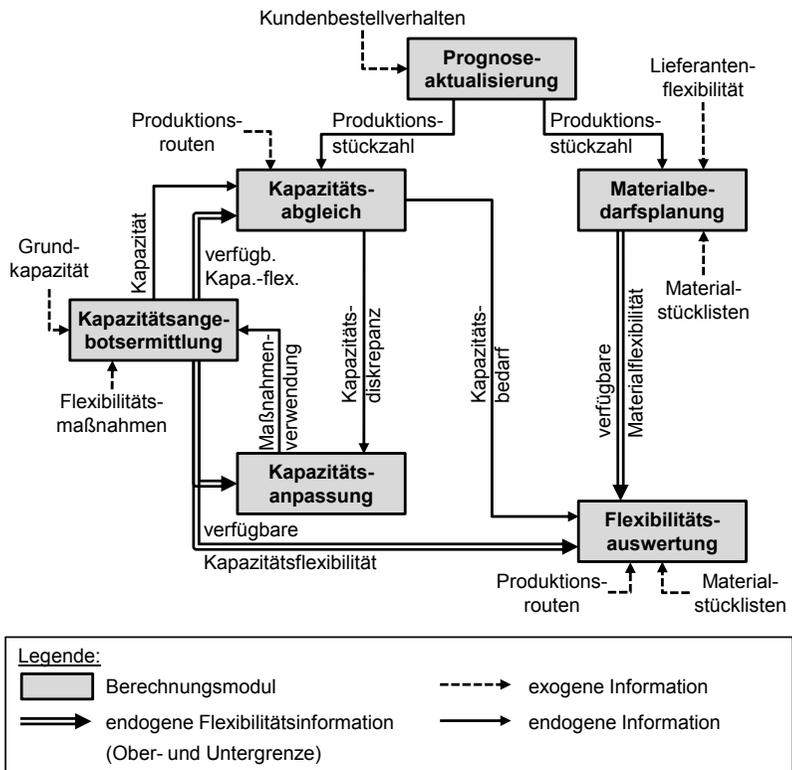


Abbildung 30: Modell der Berechnungsschritte während der Simulation

Zu Beginn jedes Simulationsschritts wird die Bestellmengenprognose auf Basis des modellierten Bestellverhaltens der Kunden aktualisiert. Dadurch werden die notwendigen Produktionsstückzahlen festgelegt, die im Folgenden zur Durchführung der Materialbedarfsplanung und des Kapazitätsabgleichs benötigt werden. Bei der Materialbedarfsplanung wird überprüft, ob das Material im Rahmen der Lieferantenflexibilität verfügbar ist, und es werden neue Bestellmengenprognosen errechnet, die der Lieferantenflexibilität in dem nachfolgenden Simulationsschritt zugrundegelegt werden können.

Die Durchführung des Kapazitätsabgleichs setzt zunächst die Ermittlung des Kapazitätsangebots voraus. Dabei wird aus der Grundkapazität, den Maßnahmenparametern sowie aus Informationen über die aktuelle Verwendung von Kapazitätsmaßnahmen die verfügbare Kapazität ermittelt. Darauf aufbauend kann durch den Kapazitätsabgleich eine Routenauswahl getroffen werden, bei der die verfügbare Kapazität bestmöglich genutzt wird. Bestehen nach dieser Auswahl noch Kapazitätsdiskrepanzen, wird diese Information an das Modul Kapazitätsanpassung übergeben, in dem entsprechende Maßnahmen getroffen werden.

Aus der ermittelten verfügbaren Kapazitäts- und Materialflexibilität sowie dem Kapazitätsbedarf wird schließlich die in dem Simulationsschritt verfügbare Mengenflexibilität errechnet.

4.3.2 Prognoseaktualisierung

Im Berechnungsmodul Prognoseaktualisierung werden zu Beginn jedes Simulationsschrittes Bestellmengen erzeugt bzw. fortgeschrieben. Als Eingangsinformation dieses Berechnungsmoduls dient das gemäß Abschnitt 4.2.2.2 modellierte Kundenbestellverhalten. Die in diesem Modul durchzuführenden Berechnungen können in zwei Rechenschritte aufgeteilt werden.

Erzeugung einer initialen Bestellmengenprognose in Planungsperiode T

Für die äußerste Planungsperiode T des jeweiligen Planungshorizonts muss stets eine neue, initiale Bestellmengenprognose erzeugt werden (vgl. 3.6.2). Dabei gilt es insbesondere zu berücksichtigen, dass dem Bedarfsverlauf Trends und Saisonalitäten zugrundeliegen können. Die Erzeugung der initialen Prognose für Planungsperiode T folgt daher in geeigneter Weise der Gleichung (vgl. 2.6.2 und 4.2.2.2)

$$X_{p,T}(t) = X_p^{Trend}(t) + X_p^{Sais}(t) + X_p^{irr}(t) \quad (\text{Gl. 22})$$

Fortschreibung der bestehenden Bestellmengenprognosen

Für die übrigen Planungsperioden liegen aus vorhergehenden Simulationsschritten bereits Bestellmengenprognosen vor. Diese müssen im Sinne der rollierenden Planung aktualisiert werden. Dafür werden aufbauend auf den Bestellmengen des vorhergehenden Simulationsschritts $\tilde{X}_{p,j+1}(t-1)$ neue Werte nach dem Zufallsprinzip gezogen, wobei der Ziehung zum einen die Wahrscheinlichkeit $\tau_{p,j+1}$ zugrunde liegt, dass überhaupt eine Änderung stattfindet, und zum zweiten im Falle einer Änderung eine Normalverteilung mit dem alten Prognosewert als Mittelwert und der Standardabweichung $\sigma_{p,j+1}$ angesetzt wird. Die Funktion zur Revision der Bestellmengenprognosen im Rahmen der Simulation kann damit durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$X_{p,j}(t) \sim \left[\tau_{p,j+1} N(X_{p,j+1}(t-1), \sigma_{p,j+1}^2) + (1 - \tau_{p,j+1}) \delta(X_{p,j+1}(t-1)) \right] \quad (\text{Gl. 23})$$

$$\forall p \in \mathcal{P}, j \in \{1, \dots, T-1\}$$

Zusätzlich muss stets die Bedingung $X_{p,j}(t) \geq 0$ erfüllt sein, da ein negativer Bedarf nicht sinnvoll ist. Die Verteilung N repräsentiert demnach eine Normalverteilung, die jedoch in ihren Grenzen so angepasst ist, dass diese Bedingung erfüllt ist.

Im Falle eines vorliegenden Rahmenvertrags werden den Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen weitere Grenzen durch Gl. 16 gesetzt. Auch in diesem Fall folgt die Verteilung N nur innerhalb dieser Grenzen einer Normalverteilung.

4.3.3 Materialbedarfsplanung

4.3.3.1 Aufgabe des Moduls

Bei der Materialbedarfsplanung gilt es zu untersuchen, welcher Bedarf an Material für die Produktion besteht und ob dieser im Rahmen der Materialflexibilität verfügbar ist. Der Materialbedarf errechnet sich aus der Produktionsstückzahl mithilfe von Materialstücklisten. Die Materialflexibilität setzt sich aus der Lieferflexibilität der Lieferanten sowie ggf. aus vorhandenen Lagerbeständen zusammen (vgl. Abschnitt 3.3). Die Möglichkeit, Lagerbestände von Materialien vorzuhalten, hängt im Wesentlichen davon ab, ob diese Materialien bereits auftragspezifische Eigenschaften aufweisen. Je mehr Merkmale eines Materials bereits auf den Endkunden abgestimmt sind, desto weniger eignet es sich für eine Bevorratung, insbesondere wenn bestimmte Merkmalseigenschaften nur selten nachgefragt werden.

Die im Folgenden in die Modellierung einbezogene Bevorratungsstrategie gleicht einem dynamischen Puffer. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass in einer Periode immer genau die Menge an Material bestellt wird, die auch zur Produktion benötigt wird. Sofern im Rahmen der Lieferflexibilität sämtliches Material beschafft werden kann, werden also keinerlei Bestände vorgesehen. Überschreitet der Materialbedarf jedoch die Grenze dessen, was der Lieferant noch bereitstellen kann, wird der fehlende Bedarf – sofern möglich – in frühere Perioden vorgezogen und bis zu seinem Verbrauch eingelagert (Vorbereitung). Unterschreitet hingegen der Bedarf die minimale Liefermenge, so wird überschüssiges Material eingelagert und die Bestellmenge in späteren Perioden entsprechend reduziert (Überschussreduktion). Diese Bevorratungsstrategie setzt voraus, dass der Materialbedarf späterer Aufträge jeweils zeitlich vorgezogen und eingelagert werden kann. Dafür dürfen entweder noch keine endkundenspezifischen Merkmale beim Material bestehen, oder unter den Bestellprognosen muss sich ein entsprechender Anteil an Aufträgen befinden, die mit Sicherheit nicht storniert werden.

Um die Materialbedarfsplanung auf diese Weise durchzuführen und die Materialflexibilität auszuwerten, sind fünf Schritte notwendig, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden:

1. Ermittlung des Brutto-Materialbedarfs
2. Ermittlung der Lieferflexibilität für Material
3. Planung der Überschussreduktion bei Unterschreitung von Mindest-Liefermengen
4. Planung der Vorbereitungen bei Lieferengpässen
5. Feststellung des Netto-Bedarfs und Ermittlung der Materialflexibilität

4.3.3.2 Ermittlung des Brutto-Materialbedarfs

Der Brutto-Materialbedarf kann mittels Stücklistenauflösung direkt aus den Bestellmengenprognosen für die Produkte abgeleitet werden (ARNOLDS ET AL. 2010). In jeder Planungsperiode j ergibt er sich der Bedarf an Material m somit durch folgende Gleichung:

$$Y_{m,j}^B(t) = \sum_{p \in \mathcal{P}} X_{p,j}(t) \cdot \mu_{p,m} \quad \forall m \in \mathcal{M}, j \in \{1, \dots, T\} \quad (\text{Gl. 24})$$

mit

$$\begin{array}{ll} Y_{m,j}^B(t) & \text{Bruttobedarf an Material } m \text{ für Planungsperiode } j \text{ zum Zeitpunkt } t \\ \mu_{p,m} & \text{Bedarf an Material } m \text{ für eine Einheit des Produkts } p \end{array}$$

4.3.3.3 Ermittlung der Lieferflexibilität

Im nächsten Schritt gilt es zu überprüfen, welche Bestellmengen im Rahmen der Flexibilitätsvereinbarung mit dem Lieferanten realisiert werden können. Wie aus dem zugrundeliegenden Referenzmodell hervorgeht, basieren diese auf der Bestellmengenprognose des vorhergehenden Simulationsschrittes (vgl. Abschnitte 3.5 und 2.4.2). Die zulässigen Bestellmengen eines Materials m werden damit durch folgende Gleichungen eingeschränkt (vgl. hierzu auch Gl. 16):¹¹

$$Y_{m,j}^{\min}(t) \leq Y_{m,j}(t) \leq Y_{m,j}^{\max}(t)$$

Dabei gilt

$$Y_{m,j}^{\min}(t) = \max[Y_{m,j+1}(t-1) - \omega_{m,j}, Y_{m,j+1}^{\min}(t-1)] \quad (\text{Gl. 25})$$

$$Y_{m,j}^{\max}(t) = \min[Y_{m,j+1}(t-1) + \alpha_{m,j}, Y_{m,j+1}^{\max}(t-1)] \quad (\text{Gl. 26})$$

$$\forall j \in \{1, \dots, T-1\}$$

$Y_{m,j}(t)$	Bestellmenge von m für Planungsperiode j zum Zeitpunkt t
$Y_{m,j}^{\min}(t)$	Mindestbestellmenge von m für Planungsperiode j zum Zeitpunkt t
$Y_{m,j}^{\max}(t)$	Maximale Bestellmenge von m für Planungsperiode j zum Zeitpunkt t

Planungsperiode $j = T$ stellt einen Sonderfall dar, da es keine Bestellmengenprognose aus dem vorhergehenden Simulationsschritt gibt. Sofern ein absolutes Maximum und Minimum für die Bestellmenge definiert wurden, markieren diese Werte in Planungsperiode T die Ober- bzw. Untergrenze der möglichen Bestellmenge. Andernfalls kann die Bestellprognose in dieser Planungsperiode frei gewählt werden.

4.3.3.4 Überschussreduktion bei Unterschreitung von Mindest-Liefermengen

Unterschreitet der Bedarf nach einem Material in einer Planungsperiode die Mindestbestellmenge, so hängt die Konsequenz daraus davon ab, was für diesen Fall im Rahmen des Vertrages mit dem betreffenden Lieferanten vereinbart worden ist. Modellseitig wird der Fall betrachtet, dass die minimale Liefermenge trotz geringeren

¹¹ Der aufmerksame Leser wird feststellen, dass die Verwendung von $\omega_{m,j}$ und $\alpha_{p,j}$ (analog $\alpha_{m,j}$ und $\alpha_{p,j}$) nicht einheitlich erfolgt. Während sich $\omega_{p,j}$ auf die aktuelle Bedarfsprognose $X_{p,j}(t)$ des Produkts p bezieht und die zulässige Mengenreduktion bis zum nächsten Simulationsschritt markiert, ist der Bezug für $\omega_{m,j}$ der Prognosewert $X_{m,j+1}(t-1)$ des Materials m aus dem vorangehenden Simulationsschritt. Diese Differenzierung wurde bewusst getroffen, da auf diese Weise die innerhalb eines Simulationsschrittes relevanten Parameter ω und α mit dem gleichen Index j versehen werden können.

Bedarfes bestellt werden muss. Es werden also Materialbedarfe nachfolgender Perioden antizipiert und bis zu ihrer Verwendung eingelagert. Um dies systematisch zu planen, wird folgender Lagerbestandsvektor eingeführt:

$$\vec{L}_m(t) = [L_{m,0}(t), L_{m,1}(t), \dots, L_{m,T}(t)] \quad (\text{Gl. 27})$$

- $\vec{L}_m(t)$ Lagerbestandsvektor für Material m zum Zeitpunkt t
- $L_{m,0}(t)$ aktueller Lagerbestand von Material m zum Zeitpunkt t
- $L_{m,j}(t)$ zum Zeitpunkt t geplanter Lagerbestand am Ende von Planungsperiode j

Das vorliegende Modell geht dabei von einer unbegrenzten Lagerkapazität aus. Zu Beginn eines jeden Simulationsschrittes gelten die folgenden Zuweisungen:

$$L_{m,0}(t) = L_{m,1}(t-1) + Y_{m,1}(t-1) - Y_{m,1}^B(t-1) \quad (\text{Gl. 28})$$

$$L_{m,j}(t) = 0 \quad \forall j \in \{1, \dots, T\} \quad (\text{Gl. 29})$$

Vorgegeben ist also lediglich der Lagerbestand, der zum Zeitpunkt t vorliegt, alle weiteren Planwerte werden im Rahmen der Bestellmengenplanung ermittelt.

Für die Erläuterung des in Abbildung 31 dargestellten Algorithmus zur Überschussreduktion wird folgende Variable eingeführt:

- $Y_{m,j}^*(t)$ vorläufige Bestellmenge von Material m in Planungsperiode j zum Zeitpunkt t

Bei der Planung der Bestandsreduzierung wird sukzessive für jede Planungsperiode beginnend bei $j = 1$ überprüft, ob der Nettobedarf die Mindestbestellmenge unterschreitet. Der Nettobedarf ergibt sich dabei aus dem Bruttobedarf, vermindert um den aus der Vorperiode geplanten Lagerbestand. Ist dies der Fall, wird die vorläufige Bestellmenge $Y_{m,j}^*(t)$ auf die Mindestbestellmenge gesetzt und die überschüssige Menge in den geplanten Lagerbestand $L_{m,j}(t)$ gebucht. Falls nicht, wird die vorläufige Bestellmenge $Y_{m,j}^*(t)$ auf den Nettobedarf festgelegt. Der geplante Lagerbestand nimmt dann den Wert 0 an. Nach der vollständigen Abarbeitung der Überschussreduktion beginnt der Algorithmus zur Durchführung von Vorbestellungen, der im folgenden Abschnitt erläutert wird.

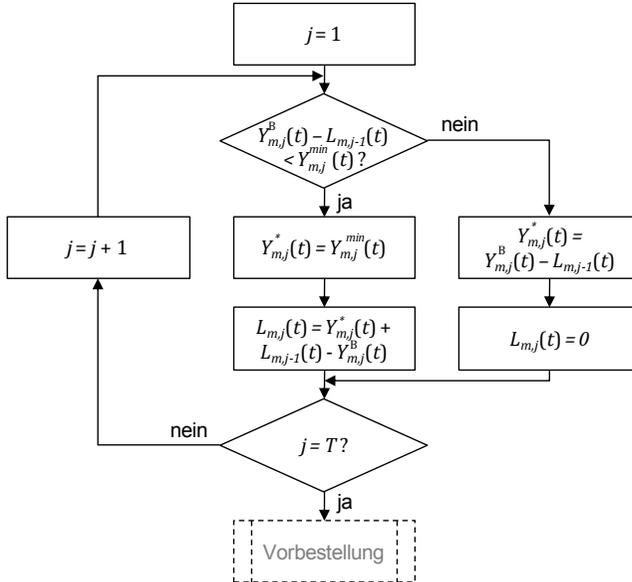


Abbildung 31: Algorithmus zur Überschussreduktion von Materialien

4.3.3.5 Vorbestellungen bei Lieferengpässen

Überschreitet die ermittelte vorläufige Bestellmenge in einer oder mehreren Planungsperioden die maximale Bestellmenge, so muss davon ausgegangen werden, dass der Materialbedarf in den jeweiligen Perioden nicht gedeckt werden kann. In dem Fall besteht die Möglichkeit, die Materialbedarfe zu antizipieren und in zeitlich vorangehende Perioden zu verschieben. Auf diese Weise werden Bestände nur dann aufgebaut, wenn sie tatsächlich benötigt werden, was in Abschnitt 2.5.3 bereits als dynamische Bestandsführung erläutert wurde. Für diesen Sachverhalt wurde der in Abbildung 32 gezeigte Algorithmus formuliert, der in dieser Arbeit als *Vorbestellung* bezeichnet wird. Zur Erläuterung des Algorithmus werden die folgenden Variablen definiert:

- δ Differenzbetrag zwischen vorläufiger und maximaler Bestellmenge
- v Periodenzahl, um die die Bestellung des Differenzbetrag vorgezogen wird
- γ Menge an Material, die in der Planungsperiode $j - v$ zusätzlich geliefert werden kann

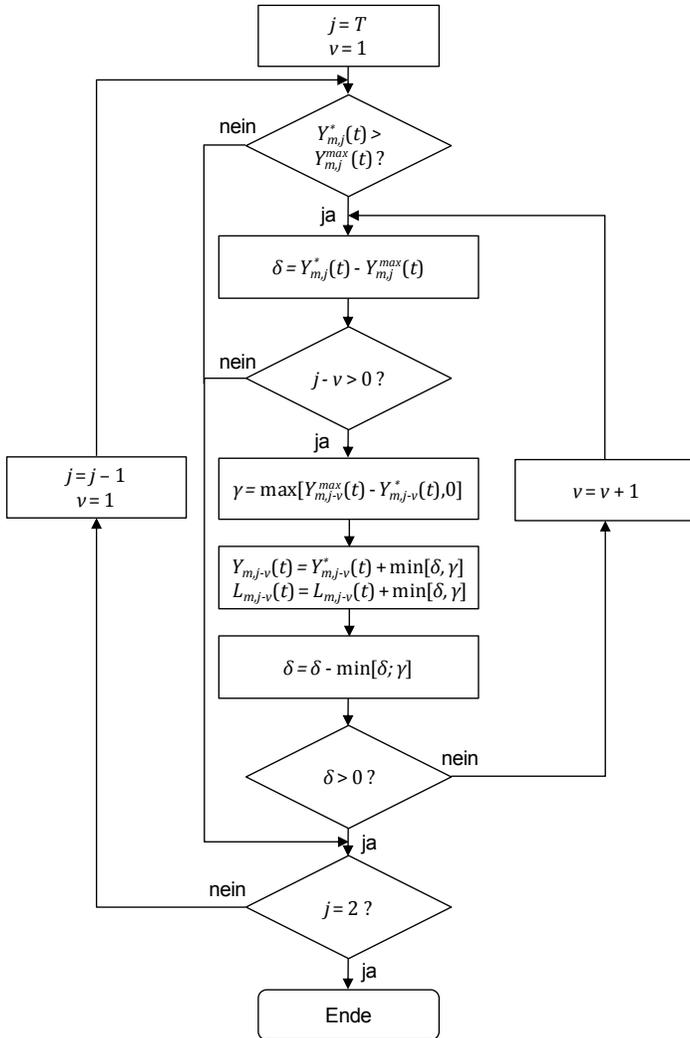


Abbildung 32: Ablauf zur Vorbestellung von Materialien

Die Planungsperioden werden in dem Algorithmus rückwärts beginnend bei $j = T$ durchlaufen, denn auf diese Weise können in einer Planungsperiode Vorbestellungen aus mehreren zeitlich nachfolgenden Perioden systematisch aggregiert werden.

Liegt in der jeweiligen Periode die vorläufige über der maximalen Bestellmenge, wird zunächst der Differenzbetrag δ ermittelt, der in zeitlich frühere Perioden vorgezogen werden muss. Nun wird überprüft, ob dieser Betrag innerhalb der Lieferflexibilität der vorangehenden Periode $j - v$ zusätzlich bestellt werden kann. Ist dies vollständig oder teilweise der Fall, werden die vorläufige Bestellmenge und der Lagerbestandsvektor in dieser Periode entsprechend erhöht. Kann der Differenzbetrag nur teilweise (oder gar nicht) in dieser Periode bestellt werden, wird der verbleibende Differenzbetrag ermittelt und es erfolgt eine weitere Bedarfsverschiebung. Die Variable v wird dabei sukzessive von 1 bis $j - 1$ durchlaufen.

4.3.3.6 Erweiterungen der Algorithmen

Die in den beiden vorangehenden Abschnitten 4.3.3.4 und 4.3.3.5 erläuterten Algorithmen zur Überschussreduktion und Vorbestellung stellen Grundprinzipien einer dynamischen Bestandsführung dar, um Materialflexibilität zu erzielen. Es ist leicht vorstellbar, diese Algorithmen mit weiteren Restriktionen zu versehen. So lässt sich beispielsweise eine Begrenzung des verfügbaren Lagerplatzes einführen oder die Zahl der Perioden, um die der Bedarf vorgezogen werden darf, beschränken.

Soll zusätzlich zu dem dynamischen Pufferlager noch ein statischer Sicherheitsbestand vorgesehen werden, kann der Lagerbestand so definiert werden, dass er im Normalfall nicht den Wert 0 sondern die definierte Sicherheitsbestandsmenge anstrebt. Dies eröffnet noch einmal mehr Möglichkeiten, um unterschiedliche Strategien zum Vorbestellen von Material bzw. zum nachträglichen Wiederauffüllen des Sicherheitsbestands zu implementieren. Durch derartige Anpassungen können verschiedenste Bestellpolitiken verwirklicht werden. Außerdem kann durch einen Sicherheitsbestand vermieden werden, dass die Mengenflexibilität in Planungsperioden kurz vor dem Liefertermin durch die Materialflexibilität stark beschränkt wird.

4.3.4 Kapazitätsangebotsermittlung

4.3.4.1 Aufgabe des Moduls

In diesem Modul werden die Plankapazität sowie die Kapazitätsflexibilität ermittelt, die im aktuellen Simulationsschritt vorherrschen. Als Plankapazität wird die Kapazität in den einzelnen Arbeitssystemen bezeichnet, die nach dem aktuellen Planungsstand innerhalb des Planungshorizonts verfügbar ist, ohne dass weitere Maßnahmen im Rahmen der Kapazitätsflexibilität vorgenommen werden. Sie entspricht

der Grundkapazität, die ggf. durch bereits aktivierte Flexibilitätsmaßnahmen in einzelnen Planungsperioden erhöht oder verringert ist.

Die Bestimmung der Kapazitätsflexibilität zielt auf die Ermittlung der Hüllkurven für die maximal und die minimal realisierbare Kapazität in den einzelnen Planungsperioden ab, wobei zeitliche Parameter der einzelnen Maßnahmen sowie Interdependenzen zwischen den Maßnahmen zu berücksichtigen sind. Der Algorithmus dafür baut auf dem von GOTTSCHALK (2007) vorgestellten Verfahren auf (vgl. auch Abschnitt 4.2.4), wobei jedoch für die vorliegende Problemstellung eine entscheidende Abwandlung vorgenommen wurde:

Die Darstellung nach GOTTSCHALK (2007) geht davon aus, dass alle kapazitätsverändernden Maßnahmen unter Berücksichtigung von Ausschluss- und Vorrangkriterien zu ihrem nächstmöglichen Zeitpunkt aktiviert werden und nach Ablauf der maximalen Nutzungsdauer enden. Die Hüllkurven charakterisieren somit sämtliche garantiert erreichbaren Kapazitätszustände innerhalb des Planungshorizonts.

Für die vorliegende Fragestellung wird es jedoch als zielführender erachtet, die maximal verfügbare Flexibilität innerhalb des Planungshorizonts zu ermitteln. Auch dabei wird der frühestmögliche Aktivierungszeitpunkt für die Maßnahmen angenommen, jedoch beschränkt die maximale Nutzbarkeitsdauer in diesem Fall nur dann die Flexibilität in künftigen Planungsperioden, wenn eine Maßnahme bereits aktiviert worden ist, der früheste und späteste Endtermin der Maßnahme somit also bereits feststeht. Die Hüllkurven begrenzen dann die Kapazitätszustände, die in jeder einzelnen Planungsperiode grundsätzlich noch erreicht werden können. Eine Inanspruchnahme der Kapazitätsflexibilität in einer Planungsperiode kann jedoch nachträglich zu einer Beschränkung der Flexibilität in einer anderen Periode führen.

Der Grund, die maximal verfügbare Flexibilität anzusetzen liegt darin, dass im Rahmen der Untersuchungen zu jedem Betrachtungszeitpunkt das volle Flexibilitätspotential ausgeschöpft werden soll. Ergibt sich durch die Inanspruchnahme von Flexibilitätsmaßnahmen eine Beschränkung in der Zukunft, wird dies berücksichtigt, sobald die Maßnahme unwiderruflich aktiviert worden ist. Das Durchspielen verschiedener Bedarfsszenarien im Rahmen der Monte-Carlo-Methode sorgt schließlich dafür, dass Restriktionen im notwendigen Maße berücksichtigt werden. Dieser Ansatz wird auch der Forderung aus dem Rahmenvertragsmodell (vgl. 2.4.2) gerecht, nach welcher die Flexibilität in ferner Zukunft größer sein sollte, als in der nahen Zukunft. Beim Modell von GOTTSCHALK (2007) ist dieser Sachverhalt nicht gegeben (vgl. Abbildung 11 auf S. 44).

Der Algorithmus zur Bestimmung von Plankapazität und Kapazitätsflexibilität gliedert sich in zwei Schritte, die in den folgenden beiden Abschnitten erläutert werden:

1. Stusermittlung der Maßnahmen und Bestimmung der Plankapazität
2. Ermittlung der Kapazitätshüllkurven

4.3.4.2 Stusermittlung der Maßnahmen und Bestimmung der Plankapazität

Sowohl für die Bestimmung der Plankapazität als auch der Kapazitätsflexibilität gilt es zunächst zu ermitteln, welcher Aktivierungsstatus den verschiedenen Kapazitätsanpassungsmaßnahmen eines Arbeitssystems in den einzelnen Planungsperioden zugewiesen ist. Es können drei Zustände unterschieden werden: Zum ersten kann die Maßnahme in einer Periode *nicht aktivierbar* (0) sein, z. B. wenn die Periode innerhalb der Aktivierungszeit liegt. Zum zweiten ist es möglich, dass sie *aktivierbar* (1) ist und in der betrachteten Periode einen Kapazitätsbeitrag liefern könnte. Drittens kann sie bereits *aktiv* (2) sein, was bedeutet, dass sie einen Beitrag zur Kapazität in der betrachteten Periode liefert und dieser Zustand nicht mehr geändert werden kann. Die Werte in Klammern (0), (1) und (2) geben die im Folgenden für die Modellierung der drei Zustände in einem Statusvektor verwendeten Werte an.

Die Ermittlung der Zustände wird beispielhaft anhand Abbildung 33 und Abbildung 34 erläutert. Hierbei wird eine Maßnahme a zugrunde gelegt, die eine Aktivierungszeit t_a^{akt} , eine Regenerationszeit t_a^{reg} und eine maximale Nutzungsdauer $t_a^{ND,max}$ von jeweils drei Perioden sowie eine minimale Nutzungsdauer $t_a^{ND,min}$ von zwei Perioden aufweist (vgl. auch 4.2.4). Ein schwarzer Balken zeigt dabei die Aktivität einer Maßnahme, ein grauer Balken eine Aktivierbarkeit an.

Sobald die Entscheidung zur Nutzung der Maßnahme vom Zeitpunkt t aus in der Vergangenheit liegt und die Aktivierungszeit begonnen hat, ist ihre Aktivität ab dem Ende der Aktivierungszeit definitiv festgelegt (vgl. Abbildung 33). Sie liefert dann ihren Kapazitätsbeitrag bis zum Ablauf der minimalen Nutzungsdauer. Zwischen dem Ende der minimalen Nutzungsdauer und dem Ende der maximalen Nutzungsdauer besteht darüber hinaus Aktivierbarkeit. Hier kann zum aktuellen Zeitpunkt t noch über die Nutzung der Maßnahme entschieden werden. Nach dem Ende der Aktivität müssen zuerst die Regenerationszeit und anschließend wieder die Aktivierungszeit eingehalten werden, bevor die Maßnahme erneut einen Kapazitätsbeitrag liefern kann. Nach dem vorliegenden Informationsstand ist ein Ende der Aktivität frühestens zum Zeitpunkt $t + 3$ möglich. Sollte jedoch positiv über einen Maßnahmeneinsatz bis $t + 4$ entschieden werden, verschieben sich Regenerations-

und Aktivierungszeit entsprechend nach hinten. Ab $t + 9$ gilt keine zeitliche Beschränkung der Aktivierbarkeit mehr, da die Maßnahme zu jedem beliebigen Zeitpunkt genutzt werden kann und bisher noch keine terminliche Festlegung besteht.

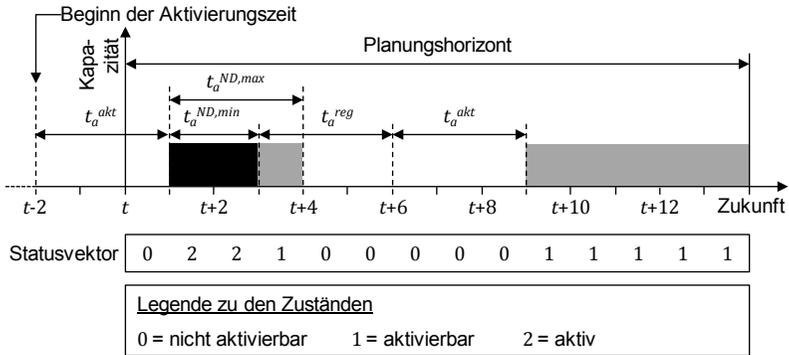


Abbildung 33: Statusbestimmung bei einer bereits definitiv eingeplanten Maßnahme

Ist kein Maßnahmeninsatz geplant, oder die Aktivierungszeit für einen geplanten Einsatz zum Zeitpunkt t noch nicht angelaufen, liegt modelltechnisch keine Aktivierung vor (Abbildung 34). In diesem Falle ist die Maßnahme nur innerhalb der Aktivierungszeit nicht aktivierbar. Für die sich anschließenden Perioden besteht eine Aktivierbarkeit ohne weitere zeitliche Einschränkungen.

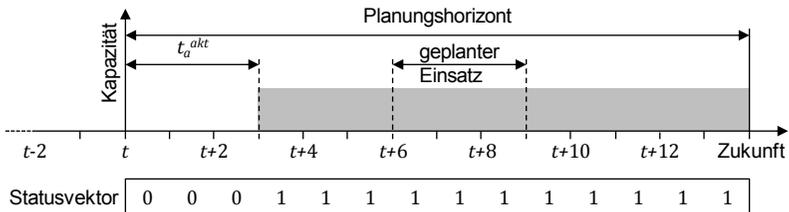


Abbildung 34: Statusbestimmung bei einer nicht definitiv eingeplanten Maßnahme

Liegen für einzelne Maßnahmen bereits Aktivitätszeiträume vor, so ist die Plankapazität zu errechnen, indem die Grundkapazität in den mit dem Status *aktiv* (2) gekennzeichneten Perioden um die Kapazitätsbeiträge dieser Maßnahmen erhöht wird.

4.3.4.3 Ermittlung der Kapazitätshüllkurven

In diesem Schritt wird geprüft, welche maximale bzw. minimale Kapazität sich aufgrund der Kombination aktivierbarer Maßnahmen erreichen lässt. Hierbei wird periodenweise vorgegangen. Das Vorgehen lehnt sich an den Algorithmus von GOTTSCHALK (2007 S. 72 ff.) an, wobei einige Änderungen aufgrund der abweichenden Zielsetzung vorgenommen wurden.

Zur Bestimmung der maximal möglichen Kapazität wird zunächst für die betrachtete Periode die Liste aller aktivierbaren Maßnahmen mit positivem Kapazitätsbeitrag ermittelt. Entsprechend der Prioritätsrangfolge der Maßnahmen (vgl. 4.2.4) wird anschließend geprüft, ob eine Einplanung in das Flexibilitätsprofil möglich ist, indem Ausschluss- und Voraussetzungsbeziehungen mit zuvor eingeplanten oder bereits aktiven Maßnahmen überprüft werden. Bestehen diesbezüglich keine Einwände, wird ein boolescher Planstatus für die entsprechende Maßnahme und Periode auf 1 gesetzt. Andernfalls bleibt er auf dem Wert 0. Wurde dies für sämtliche Maßnahmen durchgeführt, kann die maximale Kapazität ermittelt werden, indem zur Plankapazität die Kapazitätsbeiträge derjenigen Maßnahmen addiert werden, deren Planstatus auf 1 gesetzt wurde.

Analog wird bei der Ermittlung der minimal möglichen Kapazität verfahren, wobei in diesem Fall lediglich Maßnahmen mit einem negativen Kapazitätsbeitrag betrachtet werden. Bei der Überprüfung der Ausschlussbeziehungen müssen alle bereits aktiven Maßnahmen (auch positive) berücksichtigt werden. Ansonsten werden die positiven Maßnahmen vernachlässigt, da eine Kapazitätsverringerung unabhängig von einer Kapazitätserhöhung stattfinden kann.

In Abbildung 35 ist beispielhaft ein Flexibilitätsprofil abgebildet, wie es im Rahmen der vorliegenden Bewertungsmethode auftreten könnte. Bei dieser Darstellung wurde angenommen, dass Maßnahme a_1 ab den Zeitpunkt $t + 1$ bereits aktiv ist und somit für eine minimale Nutzungsdauer von zwei Perioden definitiv festgelegt ist (durch gepunktete Linie gekennzeichnet). Danach wäre noch eine weitere Nutzung bis zu einer maximalen Nutzungsdauer von 4 Perioden möglich. Da die kapazitätsreduzierende Maßnahme a_5 nicht gleichzeitig mit Maßnahme a_1 eingesetzt werden kann, ist diese frühestens ab $t + 3$ nutzbar. Die Maßnahmen a_2 , a_3 , a_4 und a_6 sind so eingetragen, dass sie zu ihrem frühesten Aktivierungstermin beginnen können. In der weiteren Zukunft sind sie grundsätzlich nicht beschränkt, da sie sich innerhalb des betrachteten Zeitraums zu jedem beliebigen Termin einsetzen ließen und somit noch für jede Periode zur Verfügung stehen. Eine

Besonderheit ist jedoch, dass sich die Maßnahmen a_2 und a_4 gegenseitig ausschließen, wobei Maßnahme a_4 aufgrund des höheren Kapazitätsbeitrags Priorität genießt. Daher wird ab dem Punkt $t + 6$ nur noch Maßnahme a_4 vorgesehen, da diese maßgeblich für die maximal erzielbare Kapazität ist (vgl. auch 4.2.4).

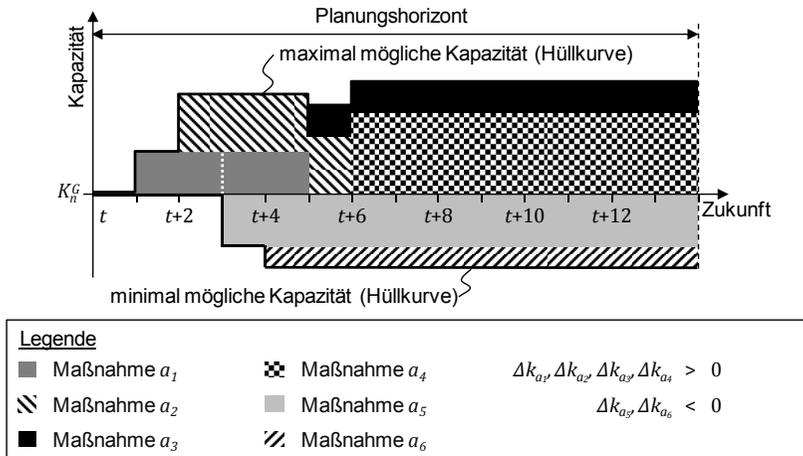


Abbildung 35: Beispielhafte Ermittlung der Kapazitätshüllkurven

4.3.5 Kapazitätsabgleich

4.3.5.1 Aufgabe des Moduls

In dem Modul *Kapazitätsabgleich* wird die Kapazität ermittelt, die zur Herstellung der Produkte in den einzelnen Arbeitssystemen benötigt wird. Dabei wird die Routenflexibilität dahingehend ausgeschöpft, dass einerseits die Plankapazität bestmöglich ausgenutzt wird und andererseits Kapazitätsanpassungsmaßnahmen in den Arbeitssystemen gering ausfallen.

Die nachfolgenden Erläuterungen gehen zuerst auf die grundsätzlichen Berechnungsschritte bei der Kapazitätsbedarfsermittlung ein. Darauf aufbauend wird das Routenauswahlproblem allgemein beschrieben. Nach einem kurzen Exkurs über Optimierungsverfahren aus dem Fachgebiet des Operations Research wird eine Lösung für die Routenauswahl formuliert und geeignete Algorithmen ausgewählt.

4.3.5.2 Kapazitätsbedarfsermittlung

Die Ermittlung der zur Produktion erforderlichen Kapazität geschieht durch die Multiplikation der Bestellmengen der Produkte mit den jeweiligen spezifischen Kapazitätsbedarfen und der anschließenden Summation der Bedarfe in den einzelnen Arbeitssystemen (vgl. EVERSHEIM 2002 S. 139). Dabei muss ggf. berücksichtigt werden, dass die Produkte über unterschiedliche Produktionsrouten hergestellt werden können. Der Mengenbedarf $X_{p,j}$ eines Produktes p in einer Planungsperiode j wird daher untergliedert in Faktoren $X_{p,j,i}(t) \in \{\mathbb{Z} | X_{p,j,i}(t) > 0\} \forall i \in \mathcal{J}_p$:

$X_{p,j,i}(t)$ Menge von p , die in Planungsperiode j über Route i hergestellt wird

Dabei gilt stets

$$\sum_{i \in \mathcal{J}_p} X_{p,j,i}(t) = X_{p,j}(t) \quad (\text{Gl. 30})$$

Der Kapazitätsbedarf $K_{j,n}$ in den Arbeitssystemen $n \in \mathcal{N}$ für die Planungsperiode j wird damit durch folgende Gleichung berechnet:

$$K_{n,j} = \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{i \in \mathcal{J}_p} X_{p,j,i} \kappa_{p,i,n} \quad (\text{Gl. 31})$$

mit

$K_{n,j}$ Kapazitätsbedarf im Arbeitssystem n in die Planungsperiode j

Voraussetzung für die Berechnung des Kapazitätsbedarfs ist, dass die Produktionsmengen für die jeweiligen Routen festgelegt sind. Der Auswahl der Routen widmen sich die folgenden Abschnitte.

4.3.5.3 Beschreibung des Routenauswahlproblems

Die Routenflexibilität kann genutzt werden, den Kapazitätsbedarf innerhalb einer Planungsperiode j dahingehend zu beeinflussen, dass er dem bestehenden Kapazitätsangebot möglichst gerecht wird und nur wenige Maßnahmen zur Anpassung der Kapazität vorzunehmen sind. Im Idealfall ist es möglich, alle Arbeitssysteme in der Höhe ihrer Grundkapazität auszulasten, so dass keine Flexibilitätsmaßnahmen in Anspruch genommen werden müssen. Wenn in einem Arbeitssystem bereits langfristig wirksame Flexibilitätsmaßnahmen aktiviert sind (z. B. eine zusätzliche Arbeitsschicht), kann dies ebenfalls bei der Routenauswahl berücksichtigt werden.

Das Vorgehen zur Auswahl der Produktionsrouten ist dem der Kapazitätsabstimmung im Rahmen gewöhnlicher Arbeitssteuerungstätigkeiten ähnlich (vgl.

EVERSHEIM 2002 S. 139 f.). Durch die Wahl alternativer Routen für die Produktion innerhalb einer Planungsperiode werden Kapazitäten zwischen den Arbeitssystemen unterschiedlich aufgeteilt. Es gilt, eine Kombination zu finden, die möglichst zu einem Kapazitätsbedarf unterhalb der Plankapazität, auf jeden Fall jedoch unterhalb der maximal möglichen Kapazität führt. Abbildung 36 veranschaulicht das Prinzip. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Verschiebungen im Rahmen der Routenflexibilität insgesamt zu einem Mehrbedarf an Kapazität führen können.

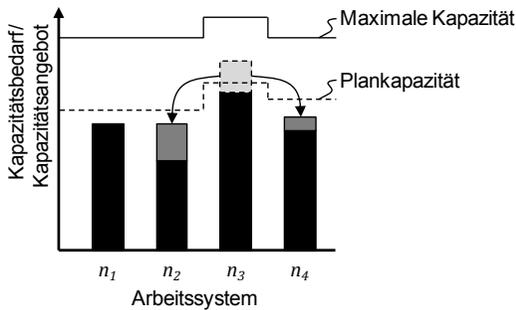


Abbildung 36: Verschiebung von Kapazitäten zwischen Arbeitssystemen

Für die Auswahl der Produktionsrouten ergeben sich prinzipiell vielfältige Kombinationsmöglichkeiten, wenn angenommen wird, dass jede einzelne zu produzierende Einheit eines Produkts einer beliebigen Route zugewiesen werden kann. In Bezug auf jedes Produkt p ergibt sich ein klassisches Kombinationsproblem mit Wiederholung und ohne Berücksichtigung der Anordnung (KREYSZIG 1968 S. 103). Die Anzahl der innerhalb einer Planungsperiode j über alle Produkte insgesamt bestehenden Kombinationsmöglichkeiten lässt sich damit berechnen durch

$$\xi_j = \prod_{p \in \mathcal{P}} \binom{I_p + X_{p,j} - 1}{X_{p,j}} \quad (\text{Gl. 32})$$

mit

- ξ_j Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten zur Routenaufteilung in Planungsperiode j
- I_p Zahl der verfügbaren Produktionsrouten für Produkt p

Schon bei einer geringen Zahl von beispielsweise $P = 5$ Produkten in der Menge \mathcal{P} , die jeweils $I_p = 4$ mögliche Produktionsrouten und eine nachgefragte Stückzahl

von $X_{p,j} = 100$ Stück aufweisen, ergeben sich ca. $\xi = 1,73 \cdot 10^{26}$ Kombinationsmöglichkeiten. Eine vollständige Enumeration zum Auffinden des Optimums dieses Auswahlproblems lässt sich aufgrund des Rechenzeitbedarfs nicht durchführen. Da das Auswahlproblem aufgrund der häufigen Durchführung während der Simulation zudem laufzeitkritisch ist, erfordert es vielmehr effiziente Lösungsalgorithmen.

4.3.5.4 Exkurs: Optimierungsverfahren

Das Wissenschaftsgebiet des Operations Research (OR) beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Forschung nach effizienten Verfahren zur Identifikation bestmöglicher Lösungen von mathematisch beschreibbaren Problemen (HILLIER & LIEBERMAN 2001 S. 2 f.). Diese Zielsetzung, die beste aller Lösungen aufzufinden, wird auch als Optimierung bezeichnet (WERNERS 2008 S. 8). Dabei werden in der Regel Algorithmen eingesetzt, die mit Rechnern effizient abgearbeitet werden können und sich somit auch im Rahmen einer Simulation einsetzen lassen.

Optimierungsverfahren versuchen generell, für eine oder mehrere Entscheidungsvariablen Lösungswerte zu finden, die zu einem bestmöglichen Ergebnis einer Zielgröße führen. Die *Entscheidungsvariablen* stellen die einzelnen Dimensionen des Entscheidungsraums dar. Ihre jeweiligen Werte können im Rahmen der Optimierung variiert werden. *Randbedingungen* limitieren dabei die Grenzen der zulässigen Werte und stellen Interdependenzen zwischen den Variablen heraus. Die *Zielfunktion* beschreibt, wie sich die Entscheidungsvariablen auf die *Zielgröße* auswirken, die es im Rahmen der Optimierung zu maximieren oder zu minimieren gilt. Die Zielgröße und Zielfunktion sind wesentlich davon abhängig, welche *Strategie* mit der Entscheidungsfindung verfolgt werden soll (HILLIER & LIEBERMAN 2001 S. 11).

Besonders effiziente Optimierungsalgorithmen stehen für lineare Optimierungsprobleme zur Verfügung. Bei solchen Problemen gilt, dass die Entscheidungsvariablen jeden beliebigen reellen Zahlenwert im Lösungsraum annehmen können. Ein bewährter Lösungsalgorithmus ist dabei z. B. der Simplex-Algorithmus. Die Lösung von ganzzahligen bzw. diskreten Optimierungsproblemen, die in der Realität sehr häufig vorkommen, stellt eine deutlich größere Herausforderung dar, weshalb entsprechende Algorithmen grundsätzlich weniger effizient sind, als solche für lineare Probleme (HILLIER & LIEBERMAN 2001 S. 630).

Vertiefende Ausführungen zu den Grundlagen des OR und Optimierungsverfahren können beispielsweise bei NEUMANN (1996), MICHALEWICZ & FOGEL (2000),

HILLIER & LIEBERMAN (2001), NEUMANN & MORLOCK (2004), WERNERS (2008) oder NAHMIA (2009) nachgelesen werden.

Für die effiziente Durchführung der Routenauswahl im Rahmen der Simulation liegt der Einsatz eines Optimierungsverfahrens aus dem Bereich des OR nahe. Es liegt hier ein diskretes Optimierungsproblem vor, da die Parameter $X_{p,j,i}(t) \forall p, j, i$, deren optimale Werte es zu finden gilt, nur Werte aus der Menge der ganzen Zahlen annehmen können. Zunächst wird eine mathematische Formulierung des Optimierungsproblems benötigt.

4.3.5.5 Formulierung des Optimierungsproblems zur Routenauswahl

Um die Zielfunktion zur Optimierung formulieren zu können, müssen zunächst die Kriterien festgelegt werden, nach denen die Optimierung durchgeführt werden soll. Diese sind anschließend in mathematisch beschreibbare Zielgrößen zu übersetzen. Der Zielsetzung einer optimalen Routenaufteilung innerhalb einer Planungsperiode liegen hier drei Kriterien zugrunde:¹²

1. Der Kapazitätsbedarf muss unterhalb der maximalen Kapazität liegen, damit die Herstellbarkeit sämtliche Produkte gewährleistet werden kann.
2. Der Kapazitätsbedarf sollte möglichst unterhalb der Plankapazität liegen, damit keine zusätzlichen Kapazitätsmaßnahmen in Anspruch genommen werden müssen.
3. Der Kapazitätsbedarf sollte insgesamt möglichst gering sein, um ggf. das Kapazitätsangebot zu reduzieren und niedrigste Kosten zu erzielen.

Die Relevanz der drei Kriterien sinkt absteigend. Sie beziehen sich allesamt auf den Kapazitätsbedarf in den Arbeitssystemen, der somit als zentrale Zielgröße verwendet werden kann. Unter Berücksichtigung von Gl. 31 kann das Optimierungsproblem durch die folgende Zielfunktion Z sowie den darunter aufgeführten Randbedingungen beschrieben werden:

$$Z = \min \left[\sum_n K_{n,j} + M^{Plan} \sum_n R_{n,j}^{Plan} + M^{max} \sum_n R_{n,j}^{max} \right] \quad (\text{Gl. 33})$$

¹² Die hier aufgeführten Optimierungskriterien lassen sich beliebig erweitern. Beispielsweise könnten Kostensätze oder frei gewählte Gewichtungsfaktoren angesetzt werden, um bestimmte Arbeitssysteme stärker auszulasten als andere. Solche Kriterien ließen sich ebenfalls in eine Zielfunktion integrieren, was im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet wird.

Randbedingungen:

$$K_{n,j} - R_{n,j}^{Plan} \leq K_{n,j}^{Plan} \quad (\text{Gl. 34})$$

$$K_{n,j} - R_{n,j}^{max} \leq K_{n,j}^{max} \quad (\text{Gl. 35})$$

$$R_{n,j}^{Plan}, R_{n,j}^{max} \geq 0 \quad \forall n, j \quad (\text{Gl. 36})$$

mit

$K_{n,j}^{Plan}$	Plankapazität von Arbeitssystem n in Planungsperiode j
$K_{n,j}^{max}$	maximale Kapazität von Arbeitssystem n in Planungsperiode j
$R_{n,j}^{Plan}$	Fehlkapazität gegenüber Plankapazität bei Arbeitssystem n in Planungsperiode j
$R_{n,j}^{max}$	Fehlkapazität gegenüber maximaler Kapazität bei Arbeitssystem n in Planungsperiode j
M^{Plan}	Strafkoeffizient für Fehlkapazität gegenüber Plankapazität
M^{max}	Strafkoeffizient für Fehlkapazität gegenüber maximaler Kapazität

Die Fehlkapazitäten werden jeweils mithilfe der Randbedingungen bestimmt.

Der erste Summand in Gl. 33 repräsentiert die benötigte Kapazität, die nach dem dritten Kriterium möglichst gering gehalten werden soll. Der zweite Summand stellt die gesamte Fehlkapazität in den Arbeitssystemen gegenüber der Plankapazität dar. Der Gewichtungsfaktor M^{Plan} sorgt dafür, dass die Minimierung dieser Fehlkapazität höher gewichtet wird als die Minimierung der Gesamtkapazität (zweites Kriterium). Der dritte Summand schließlich gibt die gesamte Fehlkapazität gegenüber der maximal möglichen Kapazität an, die unbedingt zu minimieren ist (erstes Kriterium). Analog zu M^{Plan} repräsentiert M^{max} einen entsprechenden Gewichtungsfaktor für dieses Kriterium. Die Werte der Faktoren M^{Plan} und M^{max} können folgendermaßen interpretiert werden:

Der Wert M^{Plan} gibt das Verhältnis an, mit dem eine Verringerung der Fehlkapazität gegenüber der Plankapazität gleichzeitig mit einer Erhöhung des gesamten Kapazitätsbedarfs einhergehen darf, ohne die Minimierungsbedingung zu verletzen. Gilt zum Beispiel $M^{Plan} = 5$, so bedeutet dies, dass die Verringerung von der Fehlkapazität um eine Kapazitätseinheit eine Erhöhung um maximal 5 Kapazitätseinheiten im Gesamtbedarf mit sich bringen darf.

Analog ist der Gewichtungsfaktor M^{max} zu verstehen: Da eine höhere Fehlkapazität gegenüber der maximalen Kapazität auch eine höhere Fehlkapazität gegenüber der Plankapazität mit sich bringt, bestimmt sich das maximal zulässige „Umtausch-

verhältnis“ zwischen Fehlkapazität gegenüber maximaler Kapazität und gesamtem Kapazitätsbedarf durch die Summe $M^{Plan} + M^{max}$.

4.3.5.6 Implementierte Optimierungsalgorithmen

Die Entscheidungsvariablen der im vorhergehenden Abschnitt definierten Zielfunktion bestehen in den jeder einzelnen Route zugewiesenen Mengen, die mit den Variablen $X_{p,j,i}(t) \forall p, j, i$ beschrieben werden und auf Basis von Gl. 31 indirekt in die Zielfunktion einfließen. Als Algorithmen zur Suche und Zuweisung der jeweiligen Werte wurden im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch zwei Verfahren näher untersucht. Es handelt sich um die *lokale Suche* sowie um eine *Lineare Optimierung* mit dem *Simplex-Algorithmus*.

Lokale Suche

Bei der lokalen Suche werden ausgehend von einem gültigen Punkt im Lösungsraum nach weiteren Lösungen in der Nachbarschaft dieses Punktes gesucht, die zu einer Verbesserung des Ergebnisses der Zielfunktion führen. Ist die Transformationsfunktion, die aus der alten Lösung eine neue erzeugt, geeignet gewählt, findet eine lokale Suche schnell zu einem lokalen Optimum, das jedoch häufig nicht mehr wieder verlassen werden kann (MICHALEWICZ & FOGEL 2000 S. 64 f.). Der Vorteil dieses Verfahrens besteht in seiner sehr kurzen Laufzeit. Da es bei dem vorliegenden Optimierungsproblem weniger darauf ankommt, das globale Optimum zu finden, als vielmehr eine gute Lösung zu erhalten, die bestehende Kapazitäten gut auslastet und geringen Kapazitätsanpassungsbedarf mit sich bringt, ist die lokale Suche für viele Fälle im Rahmen der Simulation als ausreichend zu betrachten.

Für die Anwendung einer lokalen Suche zur Routenauswahl ist es zunächst sinnvoll, die jeweils für ein Produkt verfügbaren Routen nach ihrer Effizienz zu sortieren. Die effizienteste Route, d.h. die Route mit dem insgesamt geringsten Kapazitätsbedarf, wird dabei an die erste, die ineffizienteste an die letzte Stelle gesetzt.

Der Ausgangspunkt für die anschließende Lösungssuche ist der Kapazitätsbedarf, der für die Herstellung sämtlicher Produkte über die effizientesten Routen benötigt wird. Im Sinne des dritten Kriteriums (vgl. S. 112) stellt dieser bereits das Optimum dar, jedoch können noch Fehlkapazitäten vorliegen. Ist dies der Fall, wird zunächst das Arbeitssystem mit der größten $R_{j,n}^{max}$ (bzw. $R_{j,n}^{Plan}$ falls $R_{j,n}^{max} = 0 \forall n$) ermittelt. Anschließend wird sukzessive überprüft, ob die Verschiebung von Produktionsumfängen auf eine der nächsten Routen in der Effizienzrangliste zu einer Reduktion der betrachteten Fehlkapazität führt. Ist eine entsprechende Route gefunden, wird

errechnet, welche Produktionsmenge auf diese Route verschoben werden muss, um die Fehlkapazität zu eliminieren bzw. zu reduzieren. Für den resultierenden neuen Planungsstand für die Routenverteilung wird der Kapazitätsbedarf aller Arbeitssysteme ermittelt und überprüft, ob dadurch eine Verbesserung der Zielfunktion eintritt. Ist dies der Fall, wird die neue Routenverteilung als Ausgangspunkt für weitere Optimierungsschritte gewählt. Es wird also wieder das Arbeitssystem mit der größten $R_{j,n}^{max}$ bzw. $R_{j,n}^{Plan}$ ermittelt usw. Lässt sich die Zielfunktion nicht mehr verbessern oder sind sämtliche Fehlkapazitäten eliminiert, wird der Algorithmus abgebrochen und das Ergebnis für die weiteren Berechnungsschritte übernommen.

Lineare Optimierung

Für die lineare Optimierung stehen sehr effiziente Algorithmen zur Verfügung, die meist in verhältnismäßig kurzer Zeit das globale Optimum innerhalb eines Ergebnisraums finden (NEUMANN & MORLOCK 2004 S. 35). Voraussetzung für die Anwendung einer linearen Optimierung ist jedoch, dass die Entscheidungsvariablen linear sind, d. h. jede reelle Zahl im Entscheidungsraum annehmen können, und dass sie in der Zielfunktion keine Exponenten aufweisen (MICHALEWICZ & FOGEL 2000 S. 76 ff.). Außer der Ganzzahlbedingung, die für alle $X_{p,j,i}$ besteht, erfüllen Gl. 31 sowie Gl. 33 bis Gl. 36 allesamt die notwendigen Voraussetzungen. Für den Einsatz der linearen Optimierung muss die Ganzzahlbedingung also zunächst aufgehoben werden. Die Lösung des Optimierungsproblems kann dann mit Standard-Solvern durchgeführt werden, die von gängigen Softwaresystemen zur Verfügung gestellt werden.

Durch die Aufhebung der Ganzzahlbedingung ist in zahlreichen Fällen zu erwarten, dass die lineare Optimierung gebrochene rationale Zahlen für die Entscheidungsvariablen liefert. Daher müssen die Werte für $X_{p,j,i}$ anschließend gerundet werden, damit sie die Ganzzahlbedingung wieder erfüllen. Es ist darauf zu achten, dass durch das Runden keine Fehlkapazitäten entstehen. In der Regel wird dies jedoch kaum zu verhindern sein, da die lineare Optimierung die im Rahmen von Zielfunktion und Randbedingungen gesteckten Grenzen vollständig ausnutzt (JARRE & STOER 2004 S. 23 ff.). Eine einfache Lösung für dieses Problem besteht darin, geringe Fehlkapazitäten zu tolerieren, die ohnehin in bestehenden Planungsungenauigkeiten untergehen. Eine weitere pragmatische Möglichkeit ist es, vor der Durchführung der linearen Optimierung die Kapazitätsrestriktionen um einen geringen Betrag zu vermindern, um später Rundungsungenauigkeiten wieder abzufangen.

Anmerkung zu den Optimierungsalgorithmen

Im Rahmen der Untersuchungen des hier formulierten Simulationsmodells wurden beide oben beschriebenen Algorithmen anhand verschiedener Szenarien getestet. Die lokale Suche wies dabei deutlich kürzere Laufzeiten auf und konnte in zahlreichen Fällen die ersten beiden Optimierungskriterien vollständig erfüllen. Die lineare Optimierung führt zwar stets zu einem globalen Optimum, dafür ist der Zeitbedarf höher und bei der Wiederherstellung der Ganzzahlbedingung lässt es sich teilweise nicht vermeiden, dass geringe Fehlkapazitäten auftreten. Im Rahmen der weiteren Untersuchungen des Modells wurden die beiden Algorithmen daher kombiniert. Zunächst wurde die lokale Suche eingesetzt und nur in den Fällen, in denen eine Elimination von Fehlkapazitäten gegenüber der maximalen Kapazität nicht möglich war, wurde anschließend noch eine lineare Optimierung durchgeführt. Die Gesamtdauer für die Optimierung im Rahmen der Simulation konnte dadurch wesentlich reduziert werden.

4.3.5.7 Identifikation von Anpassungsbedarf

Nach der Auswahl der Produktionsrouten kann der Kapazitätsbedarf in den einzelnen Arbeitssystemen gemäß Gl. 31 berechnet werden. Anschließend wird die Diskrepanz zwischen der Plankapazität und dem Kapazitätsbedarf ermittelt. Sie gibt Auskunft darüber, ob eine Erhöhung der Plankapazität durch Kapazitätsanpassungsmaßnahmen notwendig ist, oder ob sie ggf. sogar verringert werden kann, um Kosten einzusparen. Die Diskrepanz zwischen benötigter Kapazität und Plankapazität wird an das Modul Kapazitätsanpassung übermittelt, in dem für die Bereitstellung der entsprechenden Kapazität gesorgt wird. Um den Aufwand für die nachfolgenden Berechnungsschritte gering zu halten, empfiehlt es sich, eine Toleranzbandbreite um die verfügbare Kapazität anzunehmen, innerhalb derer eventuelle Diskrepanzen im Rahmen von Planungsungenauigkeiten liegen und somit auch ohne eine Kapazitätsanpassung abgefangen werden können.

4.3.6 Kapazitätsanpassung

4.3.6.1 Aufgabe des Moduls

Im Berechnungsmodul *Kapazitätsanpassung* werden Entscheidungen darüber getroffen, welche Maßnahmen im Rahmen der Simulation zur Anpassung der bereitgestellten Kapazität eingesetzt werden sollen, um die beim Kapazitätsabgleich identifizierte Diskrepanz auszugleichen. Die Information über die Maßnahmen-

verwendung wird in nachfolgenden Simulationsschritten im Rahmen der Kapazitätsangebotsermittlung verwendet, um die aktuelle Plankapazität sowie die Verfügbarkeit von Flexibilitätsmaßnahmen zu ermitteln.

Die einzelnen Arbeitssysteme werden zur Kapazitätsanpassung jeweils unabhängig voneinander betrachtet, da Interdependenzen zwischen den Systemen lediglich durch die Produktionsrouten bestehen, die bereits im Rahmen des Kapazitätsabgleichs festgelegt wurden.

Um den Kapazitätsbedarf in einem Arbeitssystem zu decken oder um Überkapazität zu reduzieren, steht jeweils ein Bündel an Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung zur Verfügung (vgl. 4.2.4). Aus diesem Bündel werden im hier beschriebenen Berechnungsschritt einzelne Maßnahmen ausgewählt und innerhalb des Planungshorizonts eingeplant, die sich zum Ausgleich der vorliegenden Kapazitätsdiskrepanz eignen. In Abbildung 37 ist beispielhaft dargestellt, wie drei verschiedene Maßnahmen für den Ausgleich von Kapazitätsschwankungen vorgesehen werden können.

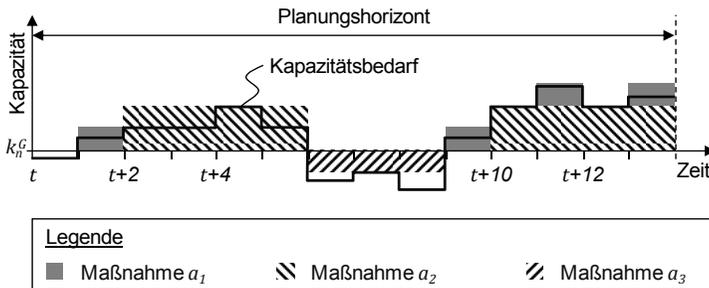


Abbildung 37: Anpassung des Kapazitätsangebots an den Kapazitätsbedarf

Die Entscheidung über den Einsatz von Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung ist ein komplexes Problem, das nicht ohne Grund in der Praxis überwiegend dem Menschen überlassen wird (vgl. auch 2.7). Um die geplante Simulation durchführen zu können, ist es jedoch notwendig, einen Algorithmus zu implementieren, der diese Entscheidung übernimmt. Auch hier wird es als sinnvoll erachtet, auf Optimierungsverfahren zurückzugreifen, da der Mensch bei seiner Entscheidung in der Regel auch eine bestmögliche Lösung anstrebt. Da hier im Gegensatz zur Optimierung in Abschnitt 4.3.5 keine eindeutige Zielgröße identifiziert werden kann, sondern vielfältige Strategien mit unterschiedlichen Zielgrößen denkbar sind, wird im

Folgendes das Optimierungsproblem grundsätzlich analysiert und strukturiert, um darauf aufbauend einen problemspezifisch geeigneten Optimierungsalgorithmus ableiten zu können. Dabei werden die Entscheidungsvariablen, die Randbedingungen und mögliche Strategien mit ihren Zielgrößen aufgezeigt. Schließlich wird die prinzipielle Eignung bestimmter Lösungsverfahren diskutiert. Ein exemplarischer Algorithmus zur Durchführung der Entscheidung wird im Anhang auf Seite 183 vorgestellt.

4.3.6.2 Entscheidungsvariablen und Randbedingungen

Um den Einsatz einer Maßnahme zur Kapazitätsanpassung innerhalb des Planungshorizonts vorzusehen, müssen Entscheidungen über

- den Aktivierungszeitpunkt und
- die Nutzungsdauer

der Maßnahme gefällt werden. Je nach Länge des Planungshorizonts kann auch eine mehrfache Nutzung einer Maßnahme in Frage kommen, so dass diese beiden Entscheidungsvariablen entsprechend oft für die Maßnahme existieren können. Wie oft dies der Fall ist, steht jedoch zu Beginn der Optimierung nicht fest, zumal natürlich auch die Möglichkeit besteht, den Einsatz der Maßnahme gar nicht vorzusehen.

Das zu betrachtende Optimierungsproblem umfasst die Aktivierungszeitpunkte und Nutzungsdauern aller im betrachteten Arbeitssystem verfügbaren Kapazitätsanpassungsmaßnahmen, da nur die Gesamtheit an eingesetzten Maßnahmen zur Bereitstellung der benötigten Kapazität führt und ihr Einsatz daher aufeinander abgestimmt sein sollte. Die Zahl der möglichen Entscheidungsdimensionen wächst daher mit zunehmender Anzahl an verfügbaren Maßnahmen stark an.

Bei der Einplanung der Maßnahmen sind zudem die folgenden Randbedingungen zu beachten, die bereits in vorangehenden Abschnitten erläutert wurden:

- Im vorgesehenen Zeitraum muss Aktivierbarkeit gegeben sein (vgl. 4.3.4.2).
- Bei mehrfachem Einsatz im Planungshorizont sind die Regenerations- und die Aktivierungszeit zu berücksichtigen (vgl. 4.2.4).
- Beim gleichzeitigen Einsatz mehrerer Maßnahmen sind die Abhängigkeitsbeziehungen $b_{k,l}$ für den Zeitraum des Maßnahmeneinsatzes zu prüfen (vgl. 4.2.4).

Die Prioritäten, die im Rahmen der Abhängigkeitsbeziehungen $b_{k,l}$ bei gegenseitigem Ausschluss von zwei Maßnahmen in Abschnitt 4.2.4 definiert wurden, sind

nicht von Belang. Es ist vielmehr entscheidend, dass der Optimierungsalgorithmus in diesem Fall die jeweils bessere Maßnahme im Sinne der Zielfunktion auswählt.

4.3.6.3 Auswahlstrategien und Zielgrößen

Bei der Auswahl von Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung können verschiedene Strategien verfolgt werden, die sich jeweils auf die Zielgröße(n) und ihre Berechnung mit der Zielfunktion auswirken. Ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, werden nachfolgend einige alternative Strategien vorgestellt und entsprechende Zielgrößen aufgezeigt. Die Strategien können unabhängig voneinander eingesetzt werden. In der Realität ist allerdings damit zu rechnen, dass auch mehrere von ihnen gleichzeitig mit unterschiedlicher Schwerpunktsetzung verfolgt werden.

- Vollständige Bedarfsdeckung bei minimalen Kosten: Die Maßnahmen sollen stets so eingeplant werden, dass der Kapazitätsbedarf vollständig gedeckt wird und die Zielgröße *Kosten* minimal ausfällt.
- Bedarfsdeckung bis zu einer Kostengrenze: Der Kapazitätsbedarf wird nicht vollständig gedeckt, sondern nur soweit eine bestimmte Kostengrenze nicht überschritten wird. Diese könnte z. B. durch maximal tolerierbare zusätzliche Stückkosten gegeben sein. Die Zielgröße wäre in diesem Fall die zu minimierende Fehlkapazität, während die Kostengrenze eine zusätzliche Randbedingung darstellen würde.
- Maximierung der Kapazitätsauslastung: Bei vollständiger Bedarfsdeckung soll die maximal mögliche Kapazitätsauslastung erzielt werden. In diesem Fall ist der Auslastungsgrad als Zielgröße zu sehen.
- Optimierung der kurzfristigen Reaktionsfähigkeit: Bedarfsschwankungen sollten durch langfristig zu planende Maßnahmen abgedeckt werden, damit die kurzfristigen Maßnahmen für schnelle Reaktionen zu Verfügung stehen. In diesem Fall könnte beispielsweise die zu maximierende, kurzfristig verfügbare Breite des Mengenflexibilitätskorridors als Zielgröße dienen.
- Vermeidung reaktionsträger, langfristiger Maßnahmen: Bedarfsschwankungen werden möglichst durch kurzfristige Kapazitätsmaßnahmen ausgeglichen, da langfristig zu planende Maßnahmen reaktionsträge und deshalb zu vermeiden sind. Als Zielgröße käme hier beispielsweise die Zahl der Planungsperioden in Frage, in denen Maßnahmen eingesetzt werden, die als langfristig kategorisiert sind. Die Zielgröße wäre in diesem Fall zu minimieren.

Es ist offensichtlich, dass diese und ggf. weitere Auswahlstrategien nicht nur von der persönlichen Präferenz des Entscheidungsträgers, sondern auch von der jeweiligen Situation des betreffenden Unternehmens abhängen. An den genannten Zielgrößen wird deutlich, dass je nach gewählter Strategie die Zielfunktion der Optimierung sehr unterschiedlich ausfällt, sodass an dieser Stelle keine allgemeingültige Zielfunktion formuliert werden kann.

Zur Übersicht fasst Abbildung 38 alle Aspekte zusammen, die bei der Entscheidung über den Maßnahmenereinsatz zum Kapazitätsabgleich relevant sind und die für die Auswahl des Optimierungsverfahrens berücksichtigt werden müssen.

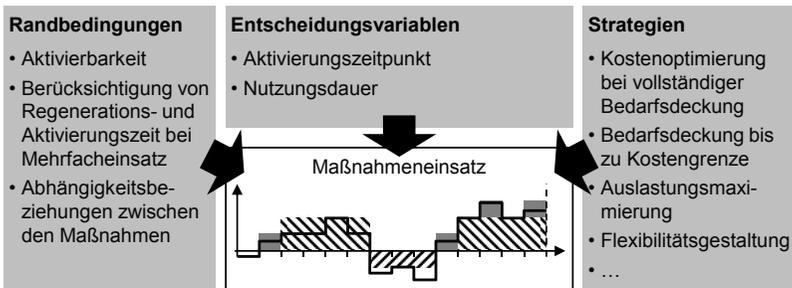


Abbildung 38: Aspekte bei der Entscheidung über den Einsatz von Kapazitätsmaßnahmen

4.3.6.4 Mögliche Optimierungsverfahren

Bei dem hier vorliegenden Optimierungsproblem handelt es sich um eine ganzzahlige oder auch kombinatorische Optimierung, da die Entscheidungsvariablen nur diskrete Werte annehmen können. Eine Aufhebung der Ganzzahlbedingung zum Einsatz einer linearen Optimierung wie im Abschnitt 4.3.5.6 kommt nicht in Frage, da durch die Rundung gebrochen rationaler Optimierungsergebnisse unzulässige Werte erzeugt werden können. Der Einsatz von linearen Optimierungsverfahren ist daher für die vorliegende Problemstellung nicht möglich (vgl. NEUMANN & MORLOCK 2004 S. 35 und S. 380 ff.).

Kombinatorische Optimierungsprobleme sind im Allgemeinen *schwer*, d. h. der Rechenaufwand zur Lösung steigt *exponentiell* im Verhältnis zur Zahl der Lösungsmöglichkeiten (vgl. NEUMANN & MORLOCK 2004 S. 382 und S. S 189 ff.). Da die Optimierung sehr häufig, nämlich bis zu N -mal pro Simulationsschritt

durchzuführen ist, ist sie zeitkritisch für die gesamte Simulation.¹³ Um den Zeitbedarf gering zu halten, kommen vor allem heuristische Verfahren in Betracht, die in der Regel nur einen *polynomialen* Rechenaufwand haben (und damit *leicht* sind), dafür aber im Allgemeinen nur annähernd optimale Lösungen liefern (NEUMANN & MORLOCK 2004 S. 392). Diese Einschränkung ist im vorliegenden Fall jedoch akzeptabel, zumal bei der Entscheidung eines Menschen in der Realität auch eher eine pragmatische und sehr gute Lösung als die global optimale Lösung zu erwarten ist. Ein Vorteil an heuristischen Verfahren ist außerdem, dass auch Kompromisslösungen zwischen verschiedenen Strategien besser berücksichtigt werden können (MÄRZ ET AL. 2011 S. 21).

Heuristische Verfahren suchen unter Verwendung geeigneter Regeln gezielt nur Teilbereiche des Lösungsraumes ab (NEUMANN & MORLOCK 2004 S. 402). Je nachdem, wie gut diese Regeln ausgewählt sind, wird eine entsprechende Ergebnisqualität erreicht. Ein mögliches Verfahren ist der sogenannte *Greedy-Algorithmus*, der die Lösung für die einzelnen Entscheidungsvariablen schrittweise aufbaut und sich dabei jeweils den besten Wert im Sinne der Zielfunktion für die betrachtete Variable herausucht.¹⁴ Aufbauend auf einer ersten, mit dem Greedy-Algorithmus gefundenen Lösung können weitere Verfahren, wie z. B. eine lokale Suche angewandt werden, um die Lösung weiter zu verbessern (NEUMANN & MORLOCK 2004 S. 403 ff.).

Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung besteht im Einsatz sogenannter genetischer Algorithmen, bei denen das biologische Prinzip der Vererbung modelliert wird. Dabei wird meist auf Basis des Zufallsprinzips eine Reihe von Lösungen erzeugt, die als initiale Population oder erste Generation bezeichnet werden. Anhand der Zielfunktion werden aus dieser Generation vornehmlich gute Lösungen ausgewählt und miteinander kombiniert (gekreuzt) oder partiell verändert (mutiert). Dadurch entsteht eine neue Generation an Lösungen, unter der sich in der Regel zahlreiche bessere Lösungen finden. Bei der mehrmalige Durchführung dieses Vorgehens können meist schrittweise Verbesserungen beobachtet und nach einigen Generationen sehr gute Lösungen gefunden werden (vgl. MICHALEWICZ & FOGEL 2000 S. 139 ff.).

Im Rahmen der Untersuchungen zur vorliegenden Arbeit wurden exemplarisch zwei Algorithmen implementiert. Einer basierte auf dem Prinzip des genetischen Algo-

¹³ Liegen in einem Simulationsschritt in allen N Arbeitssystemen Kapazitätsdiskrepanzen vor, wird die Optimierung für jedes einzelne Arbeitssystem einmal durchlaufen.

¹⁴ greedy (engl.) = gierig

rithmus, der zweite orientiert sich am Grundprinzip des Greedy-Algorithmus und versucht auf Basis eines geeigneten Regelwerks, eine sinnvolle und gute Lösung zu generieren. Als Strategie wurde dabei jeweils die vollständige Bedarfsdeckung bei Minimierung der Kosten angesetzt. In Bezug auf das betrachtete Anwendungsszenario (vgl. Kapitel 5) brachte der zweite Algorithmus sowohl hinsichtlich des Zeitbedarfs als auch der Lösungsgüte deutlich bessere Ergebnisse, weshalb nur dieser Ansatz im Rahmen der Untersuchungen weiter verfolgt wurde. Eine Beschreibung des Ansatzes ist im Anhang auf Seite 183 zu finden.

Die Einschränkung auf einen Ansatz bedeutet jedoch nicht, dass dieser der bestgeeignete ist und andere Ansätze wie z. B. ein genetischer Algorithmus grundsätzlich nicht für die vorliegende Optimierung in Frage kommen (vgl. auch MÄRZ ET AL. 2011 S. 26 f.). Da unter anderem sehr viele Möglichkeiten in der Ausgestaltung der Regelwerke innerhalb der heuristischen Methoden zur Optimierung bestehen, sind hier weitere Untersuchungen angebracht, die jedoch den Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit gesprengt hätten. Hier liegt dementsprechend ein Ansatzpunkt für weitere Forschungstätigkeiten vor.

4.3.7 Flexibilitätsauswertung

4.3.7.1 Aufgabe des Moduls

Mittels der folgenden Auswertung wird bestimmt, welche Mengenflexibilität zum Simulationszeitpunkt t für ein zu betrachtendes Produkt p^* in den zukünftigen Planungsperioden jeweils vorliegt. Es werden dafür die Grenzen der Bestellmengenschwankungen errechnet, die für das Produkt p^* bei der jeweils gegebenen Bedarfssituation der übrigen Produkte $p \in \{\mathcal{P} | p \neq p^*\}$ möglich wären. Darüber hinaus werden die Stückkostenveränderungen ermittelt, die sich aufgrund einer Mengenanpassung ergäben.

Die nachfolgenden Erläuterungen gliedern sich wie folgt: Zunächst werden die Grenzen der Mengenflexibilität jeweils auf Basis der Materialflexibilität sowie auf Basis der Kapazitätsflexibilität ermittelt und darauf aufbauend die aus diesen beiden Faktoren resultierenden Mengenflexibilitätskorridore bestimmt. Anschließend wird die Auswertung der Stückkostenveränderungen erläutert.

4.3.7.2 Materialflexibilität als begrenzender Faktor

Anhand der Lieferflexibilität werden die minimalen und maximalen Liefermengen jedes einzelnen Materials ermittelt. Die Differenzen zu den vorliegenden Materialbestellungen $Y_{m,j}$ ergeben jeweils die zulässigen Mengenreduzierungen bzw. -erhöhungen der Bestellmengen des Materials. Die Materialbestände werden nicht in die Flexibilitätsermittlung eingeschlossen, da sie lediglich zu einer Bedarfsverschiebung in andere Planungsperioden führen.

Die von der vorliegenden Materialbestellung $Y_{m,j}$ aus zulässigen Anpassungen werden bestimmt durch:¹⁵

$$\Delta Y_{m,j}^+ = Y_{m,j}^{max} - Y_{m,j} \quad (\text{Gl. 37})$$

$$\Delta Y_{m,j}^- = Y_{m,j} - Y_{m,j}^{min} \quad (\text{Gl. 38})$$

$$\forall m \in \mathcal{M}, j \in \{1, \dots, T\}$$

mit

$\Delta Y_{m,j}^+(t)$ zulässige Bestellmengerhöhung von Material m für Planungsperiode j

$\Delta Y_{m,j}^-(t)$ zulässige Bestellmengenreduzierung von Material m für Planungsperiode j

Hieraus lässt sich wiederum ermitteln, welche Ausbringungsmengenänderungen von p^* mit den zulässigen Materialbestellungenänderungen korrespondieren:

$$\Delta X_{p^*,j,m}^+ = \Delta Y_{m,j}^+ / \mu_{p^*,m} \quad (\text{Gl. 39})$$

$$\Delta X_{p^*,j,m}^- = \Delta Y_{m,j}^- / \mu_{p^*,m} \quad (\text{Gl. 40})$$

mit

$\Delta X_{p^*,j,m}^+(t)$ mögliche Ausbringungsmengerhöhung von p^* in Planungsperiode j aufgrund von Material m

$\Delta X_{p^*,j,m}^-(t)$ mögliche Ausbringungsmengenreduzierung von p^* in Planungsperiode j aufgrund von Material m

¹⁵ Da sich die Ausführungen im Abschnitt 5.3.7 allesamt auf den aktuellen Simulationszeitpunkt t beziehen, wird der Term (t) in den Formeln zur besseren Übersichtlichkeit in diesem Abschnitt weggelassen. Lediglich bei der Definition neuer Variablen erfolgt einmalig ein Hinweis auf den zeitlichen Bezug.

4.3.7.3 Kapazitätsflexibilität als begrenzender Faktor

Das Vorgehen zur Ermittlung der Mengenflexibilität, die sich aufgrund der Kapazitätsflexibilität ergibt, erfolgt analog zur Ermittlung der Materialflexibilität. Besonders bei der Reduzierung von Ausbringungsmengen müssen allerdings noch weitere Kriterien beachtet werden:

- Die minimal realisierbare Kapazität in einem Arbeitssystem limitiert in der Regel nicht die minimale wirtschaftliche Ausbringungsmenge. Auch bei einem Auslastungsgrad unterhalb der Kapazitätsvollaustattung ist meist noch eine wirtschaftliche Produktion möglich.
- Die Routenflexibilität besitzt einen zusätzlichen Einfluss auf die Mengenflexibilität.

Es erscheint daher angebracht, zwischen der Ermittlung der möglichen Produktionsmengenerhöhung und der möglichen -reduzierung zu differenzieren.

Ermittlung der möglichen Mengenerhöhung

Zur Ermittlung der maximalen Mengenerhöhung im Arbeitssystem n wird zunächst die mögliche Kapazitätserhöhung $\Delta K_{n,j}^+$ aus der Differenz der maximalen Kapazität $K_{n,j}^{max}$ und dem vorliegenden Kapazitätsbedarf $K_{n,j}$ errechnet:

$$\Delta K_{n,j}^+ = K_{n,j}^{max} - K_{n,j} \quad (\text{Gl. 41})$$

mit

- $\Delta K_{n,j}^+(t)$ mögliche Kapazitätserhöhung im Arbeitssystem n in Planungsperiode j
- $K_{n,j}^{max}(t)$ maximale Kapazität im Arbeitssystem n in Planungsperiode j

Die maximal mögliche Kapazität $K_{n,j}^{max}$ kann direkt aus der Hüllkurve im Kapazitätsflexibilitätsprofil abgeleitet werden (vgl. 4.3.4.3). Um aus der möglichen Kapazitätserhöhung $\Delta K_{n,j}^+$ die maximale Mengenerhöhung von p^* zu ermitteln, wird die effizienteste Prozessalternative i_p^* herangezogen:

$$\Delta X_{p^*,j,n}^+ = \Delta K_{j,n}^+ / \kappa_{p^*,i_p^*,n} \quad (\text{Gl. 42})$$

mit

- $\Delta X_{p^*,j,n}^+$ mögliche Ausbringungsmengenerhöhung von p^* in Planungsperiode j aufgrund von Arbeitssystem n
- i_p^* effizienteste Prozessalternative zu Herstellung von Produkt p

Ermittlung der möglichen Mengenreduzierung

Bei der Ermittlung der möglichen Mengenreduzierung ist die minimale Kapazität $K_{n,j}^{min}$, die im Arbeitssystem n in Planungsperiode j erreicht werden kann, zugrunde zu legen. Um jedoch dem oben genannten Kriterium gerecht zu werden, dass auch unterhalb der Vollauslastung eine wirtschaftliche Produktion möglich ist, wird weiterhin für das Arbeitssystem ein Mindestauslastungsgrad A_n^{min} festgelegt, unterhalb dessen die Produktion unwirtschaftlich wird. Dieser Mindestauslastungsgrad ist vom Anwender der Bewertungsmethode festzulegen und kann beispielsweise nach einem von ROGALSKI & OVTCHAROVA (2009) beschriebenen Verfahren bestimmt werden. Die Kapazität, die an dieser Wirtschaftlichkeitsgrenze vorherrscht, wird schließlich definiert durch:

$$K_{n,j}^{min,w} = K_{n,j}^{min} \cdot A_n^{min} \quad (\text{Gl. 43})$$

Als maximale Kapazitätsreduzierung ergibt sich damit:

$$\Delta K_{n,j}^- = K_{n,j} - K_{n,j}^{min,w} \quad (\text{Gl. 44})$$

$K_{n,j}^{min,w}$	aus Wirtschaftlichkeitssicht minimal auszulastende Kapazität im Arbeitssystem n in Planungsperiode j
$K_{n,j}^{min}$	minimale Kapazität im Arbeitssystem n in Planungsperiode j
A_n^{min}	Mindestauslastungsgrad im Arbeitssystem n
$\Delta K_{n,j}^-$	mögliche Kapazitätsreduzierung im Arbeitssystem n in Planungsperiode j

Die mit der möglichen Kapazitätsreduzierung $\Delta K_{n,j}^-$ korrespondierende Mengenreduzierung $\Delta X_{p^*,j,n}^-$ wird grundsätzlich analog zu Gl. 42 ermittelt. Hierbei ist jedoch die Auswahl der Produktionsrouten zu beachten, die im Rahmen des Kapazitätsabgleichs getroffen wurde (vgl. 4.3.5). Sofern nicht alle Produkte über die effizienteste Route hergestellt werden, sollten zunächst die ineffizienteren Routen bei der Mengenreduzierung berücksichtigt werden.

In Abbildung 39 ist zusammenfassend die Ermittlung der maximalen Kapazitätserhöhung und -reduzierung in einem Arbeitssystem beispielhaft anhand von Planungsperiode 4 dargestellt.

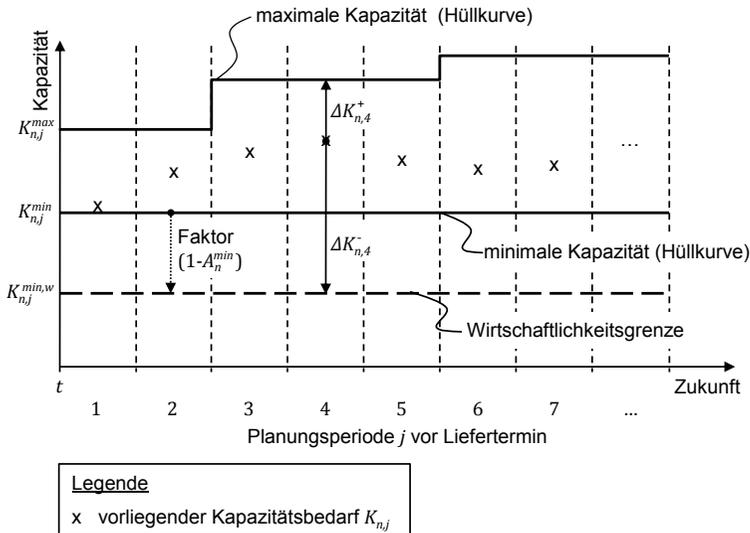


Abbildung 39: Ermittlung der maximalen Kapazitätserhöhung und -verringering in einem Arbeitssystem n .

4.3.7.4 Resultierende Mengenflexibilitätskorridore

Die in den beiden vorangehenden Abschnitten ermittelten möglichen Mengenerhöhungen und -reduzierungen beziehen sich bisher noch auf die einzelnen Materialmengen und Kapazitäten der Arbeitssysteme. Um daraus die resultierende Mengenerhöhungen bzw. -reduzierungen für das Produkt p^* in den jeweiligen Planungsperioden zu ermitteln, müssen jeweils die Werte zugrunde gelegt werden, die die schärfsten Restriktionen setzen:

$$\varphi_{p^*,j}^+ = \min \left[\min [\Delta X_{p^*,j,m}^+]_{m \in \mathcal{M}'}, \min [\Delta X_{p^*,j,n}^+]_{n \in \mathcal{N}} \right] \quad (\text{Gl. 45})$$

$$\varphi_{p^*,j}^- = \min \left[\min [\Delta X_{p^*,j,m}^-]_{m \in \mathcal{M}'}, \min [\Delta X_{p^*,j,n}^-]_{n \in \mathcal{N}} \right] \quad (\text{Gl. 46})$$

$\varphi_{p^*,j}^+(t)$ mögliche Mengenerhöhung von Produkt p^* in Planungsperiode j

$\varphi_{p^*,j}^-(t)$ mögliche Mengenreduzierung von Produkt p^* in Planungsperiode j

$\varphi_{p^*,j}^-$ und $\varphi_{p^*,j}^+$ spannen den innerhalb der Planungsperiode j zum Zeitpunkt t gültigen Flexibilitätskorridor für das Produkt p^* auf.

4.3.7.5 Auswertung der Stückkostenveränderung

Neben der Untersuchung der organisatorisch und technisch möglichen Mengenflexibilitätskorridore sind die Kosten von Interesse, die durch die Inanspruchnahme dieser Mengenflexibilität entstehen. In der Formulierung des Referenzmodells für die Bewertung wurde bereits festgelegt, dass dafür die Veränderungen der Stückkosten des betrachteten Produkts p^* untersucht werden sollen. Der hier vorgestellte Ansatz konzentriert sich auf Stückkostenveränderungen, die von der Kapazitätsflexibilität herrühren. Da Materialienkosten auch bei vorliegenden Preismodellen als Einzelkosten direkt auf die Stückkosten verrechnet werden können, wird eine zusätzliche Betrachtung dieses Aspekts hier nicht für notwendig erachtet (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Die Veränderung von Stückkosten bei variierenden Mengenausbringungen wird in der Betriebswirtschaft durch die Durchschnittskostenfunktion beschrieben (vgl. WÖHE 1973 S. 338 ff.). Ausgehend von einer geplanten Produktionsmenge X_{p^*} kann anhand dieser Funktion ermittelt werden, wie sich die Stückkosten für das Produkt p^* ändern, wenn die Produktionsmenge angepasst wird. In Abbildung 40 wird die Ermittlung der Stückkostenveränderung Δc_{p^*} beispielhaft anhand zweier Mengenanpassungen ε_1 und ε_2 dargestellt.

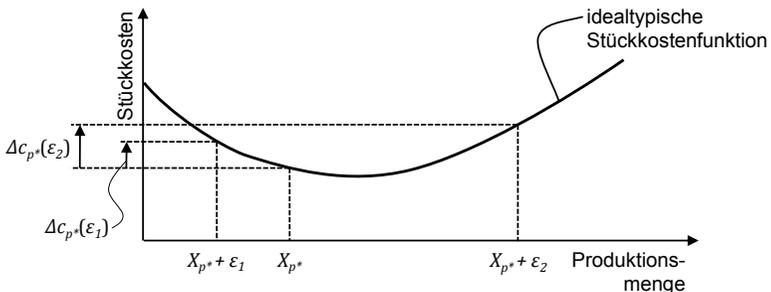


Abbildung 40: Durchschnittskostenfunktion zur Beschreibung von Stückkostenveränderungen

ε	Differenz zwischen angepasster und geplanter Produktionsmenge
$\Delta c_{p^*}(\varepsilon)$	Differenz der Stückkosten von p^* bei einer Änderung der Produktionsmenge um ε

Unter den im Rahmen des vorgestellten Modells gültigen Prämissen, dass

- nicht immer sämtliche Flexibilitätsmaßnahmen zur Verfügung stehen und
- die jeweiligen Stückkosten auch von den Ausbringungsniveaus der übrigen Produkte abhängen

ändert sich jedoch die Durchschnittskostenfunktion von p^* von Simulationsschritt zu Simulationsschritt. Auch in den einzelnen Planungsperioden liegen deshalb unterschiedliche Stückkostenfunktionen vor. Darüber hinaus führt die Aktivierung und Deaktivierung von Maßnahmen in den Arbeitssystemen zu diskreten Anpassungsschritten der Kapazität. Die damit verbundenen sprungfixen Kosten schlagen sich in sprunghaften Veränderungen der Stückkosten nieder, so dass sich in Wirklichkeit unstetige Stückkostenfunktionen ergeben (vgl. Abbildung 41). Die Differenz der Stückkosten ist somit zusätzlich von der Planungsperiode sowie von der Zeit abhängig:

$\Delta c_{p^*,j}(\varepsilon, t)$ Differenz der Stückkosten von p^* bei einer Änderung der Produktionsmenge um ε in Planungsperiode j zum Zeitpunkt t

Um die vollständige Durchschnittskostenfunktion in jedem Simulationsschritt zu ermitteln, müsste zunächst jede Unstetigkeit der Kostenfunktion mit ihrer jeweiligen Kostendifferenz identifiziert werden. Dies wiederum setzt eine Kenntnis darüber voraus, bei welchem Kapazitätsbedarf in den einzelnen Arbeitssystemen welche Maßnahme vorteilhaft ist. Um das im Detail zu ermitteln, bedarf es jedoch zahlreicher Rechenoperationen, die sich in der Simulationszeit deutlich bemerkbar machen würden. Im Hinblick auf die spätere Auswertung der Simulationsergebnisse, bei der eine Mittelwertbildung der in den einzelnen Simulationsschritten beobachteten Stückkostenveränderungen stattfindet, erscheint es als ausreichend und pragmatisch, nur einige Stützwerte der Durchschnittskostenfunktion zu ermitteln, zwischen denen die Funktion durch Interpolation angenähert werden kann. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich Abweichungen aufgrund der ungünstigen Lage vereinzelter Stützwerte später bei der Mittelwertbildung nivellieren.

Zur Ermittlung der Stützwerte wird in jeder Planungsperiode die geplante Menge $X_{p^*,j}$ innerhalb des durch $\varphi_{p^*,j}^-$ und $\varphi_{p^*,j}^+$ aufgespannten Flexibilitätskorridors in gleichmäßigen Schritten erhöht bzw. verringert (vgl. Abbildung 41). Die Schrittweite beträgt dabei $\Delta\varepsilon$, so dass gilt

$$\varepsilon = k\Delta\varepsilon \tag{Gl. 47}$$

mit $k \in \mathbb{Z}$ und $-\varphi_{p^*,j}^- \leq \varepsilon \leq \varphi_{p^*,j}^+$

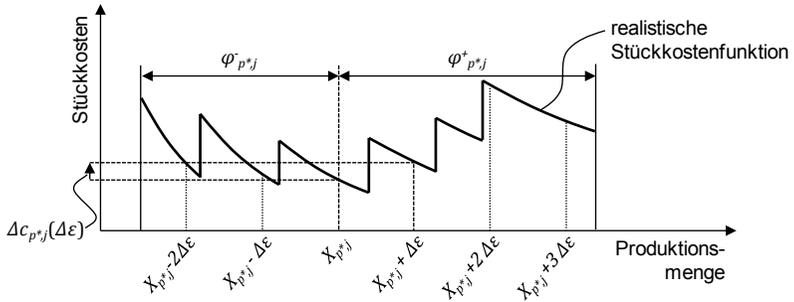


Abbildung 41: Ermittlung von Stützwerten der Durchschnittskostenfunktion

Für jede Mengenänderung ε wird die korrespondierende Differenz der Stückkosten $\Delta c_{p^*,j}(\varepsilon)$ ermittelt. Dafür sind zunächst die Kosten zu bestimmen, die für das Produkt p^* bei der geplanten Produktionsmenge $X_{p^*,j}$ in der betrachteten Periode verbucht werden müssen:

Die im Arbeitssystem n in einer Planungsperiode j anfallenden Kosten setzen sich aus den Grundkosten C_n^G sowie aus den periodenbezogenen Kosten der jeweils vorgesehenen Kapazitätsmaßnahmen C_a^{akt} und C_a^{lauf} zusammen, wobei darauf zu achten ist, dass die Aktivierungskosten C_a^{akt} auf die geplante Nutzungsdauer der Maßnahme zu verteilen sind:

$$C_{n,j} = C_n^G + \sum_a (C_a^{lauf} + C_a^{akt} / t_a^{ND}) \quad (\text{Gl. 48})$$

$C_{n,j}(t)$ im Arbeitssystem n in Planungsperiode j anfallende Kosten
 t_a^{ND} geplante Nutzungsdauer der Maßnahme a

In dieser Formel beschreibt der Parameter a nur die in Planungsperiode j als aktiv geplanten Maßnahmen des Arbeitssystems n .

Mit Gl. 48 lassen sich die Kosten pro genutzter Kapazitätseinheit im Arbeitssystem a bestimmen:

$$\tilde{c}_{n,j} = C_{n,j} / K_{n,j} \quad (\text{Gl. 49})$$

$\tilde{c}_{n,j}(t)$ anfallende Kosten pro genutzter Kapazitätseinheit im Arbeitssystem n in Planungsperiode j

Anhand der Routenbelegung und der spezifischen Kapazitätsbedarfe lassen sich nun die auf die Produktionsmenge von p^* insgesamt entfallenden Kapazitätskosten sowie die Stückkosten von p^* bestimmen:

$$C_{p^*,j}^K = \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{i \in \mathcal{I}_p} X_{p^*,j,i} \kappa_{p^*,i,n} \tilde{c}_{n,j} \quad (\text{Gl. 50})$$

$$c_{p^*,j} = C_{p^*,j}^K / X_{p^*,j} \quad (\text{Gl. 51})$$

mit

$C_{p^*,j}^K(t)$ auf die geplante Produktionsmenge $X_{p^*,j}(t)$ anteilmäßig entfallende Kapazitätskosten
 $c_{p^*,j}(t)$ Stückkosten von p^* in Planungsperiode j

Im nächsten Schritt muss die Differenz der Kapazitätskosten $\Delta C^K(\varepsilon)$ errechnet werden, die mit der Mengenänderung ε korrespondiert. Dafür ist zu bestimmen, welche Maßnahmen im Zuge der Mengenänderung zusätzlich bzw. nicht mehr benötigt werden. Hierfür wird der nach einer Mengenänderung um ε benötigte Kapazitätsbedarf in allen Arbeitssystemen ermittelt, wobei hinsichtlich der Routenauswahl auf die Ausführungen in Abschnitt 4.3.7.3 verwiesen wird. Anschließend ist zu prüfen, ob sich die Zusammensetzung der genutzten Kapazitätsanpassungsmaßnahmen durch den neuen Kapazitätsbedarf ändert. Bei der Auswahl der Maßnahmen, die hierfür getroffen werden muss, ist eine Berücksichtigung von Kapazitätsbedarfen in anderen Planungsperioden (vgl. 4.3.6) nicht sinnvoll, da nur hypothetische Mengenerhöhungen in einzelnen Planungsperioden betrachtet werden. Als pragmatischer Ansatz wird daher vorgesehen, von den verfügbaren Maßnahmen in der betrachteten Planungsperiode diejenigen auszuwählen, die bei der geforderten Kapazität die geringsten zusätzlichen Kosten mit sich bringen.

Die Kostendifferenz $\Delta C^K(\varepsilon)$ setzt sich schließlich aus der Differenz der Kosten für zusätzliche Maßnahmen und der Kosten für nicht mehr benötigte Maßnahmen zusammen.¹⁶

Die Differenz der Stückkosten ergibt sich schließlich aus nachstehender Gleichung:

$$\Delta c_{p^*,j}(\varepsilon) = (C_{p^*,j}^K + \Delta C^K(\varepsilon)) / (X_{p^*,j} + \varepsilon) - c_{p^*,j} \quad (\text{Gl. 52})$$

$\Delta C^K(\varepsilon)$ Differenz der Kapazitätskosten durch die Mengenänderung um ε

¹⁶ Hierbei sind wieder jeweils laufende Kosten und anteilige Aktivierungskosten zu berücksichtigen. Da die Nutzungsdauer für die Verrechnung in diesem Fall nicht feststeht, sollte für sie ein durchschnittlicher Wert angenommen werden.

Der Klammerterm vor dem Bruchstrich in Gl. 52 stellt die Summe der vor der Stückzahländerung auf das Produkt p^* entfallenden Kosten und aller durch die Änderung verursachten Kosten dar. Diese Summe wird durch den Bruch auf die neue Produktionsstückzahl umgelegt. Um die Differenz der Stückkosten zu erhalten, werden die vor der Mengenänderung ermittelten Stückkosten $c_{p^*,j}$ subtrahiert.

4.4 Auswertung der Simulationsergebnisse

4.4.1 Ermittlung der Flexibilitätsgrenzen

Nachdem sämtliche Simulationsläufe abgearbeitet wurden, liegen zahlreiche Daten über die Mengenflexibilität in den einzelnen Planungsperioden bei verschiedenen Bedarfsszenarien vor. Eine allgemeine Aussage über die kundenspezifische verfügbare Mengenflexibilität kann aus einer aggregierten Betrachtung der einzelnen Simulationsergebnisse abgeleitet werden. Ein Histogramm stellt eine geeignete Darstellungsform für eine derartige Datenaggregation dar (vgl. SMIRNOW & DUNIN-BARKOWSKI 1963 S. 100). Es zeigt, wie häufig konkrete Werte für die Mengenflexibilität während der Simulation aufgetreten sind. Die möglichen Mengenerhöhungen und -reduzierungen sind dabei getrennt voneinander zu betrachten.

Das in Abbildung 42 dargestellte Histogramm zeigt beispielhaft, mit welcher diskreten Häufigkeit bestimmte maximale Mengenerhöhungen während der Simulation in einer ausgewählten Planungsperiode j beobachtet wurden.

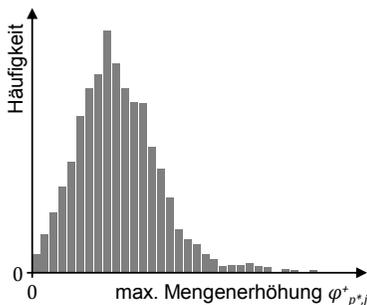


Abbildung 42: Histogramm der erhobenen maximalen Mengenerhöhungen in einer Planungsperiode j

Die Häufigkeiten diskreter Werte allein sind hier jedoch wenig aussagekräftig, da eine maximale Mengenerhöhung von $\varphi_{p^*,j}^+$ stets alle Mengenerhöhungen ε einschließt, für die gilt:

$$0 \leq \varepsilon \leq \varphi_{p^*,j}^+ \quad (\text{Gl. 53})$$

Aus diesem Grund wird für die Flexibilitätsauswertung eine inverse kumulative Häufigkeitsverteilung gewählt, bei der die Häufigkeiten maximaler Mengenflexibilitätswerte absteigend aufsummiert sind. Werden diese kumulativen Häufigkeiten mit der Anzahl aller Ergebnisse ins Verhältnis gesetzt, stellt die vertikale Achse den Häufigkeitsanteil dar, mit dem die entsprechende Mengenflexibilität während der Simulation aufgetreten ist. Bei einer hinreichend großen Anzahl an Simulationsläufen kann der Häufigkeitsanteil als Wahrscheinlichkeit interpretiert werden, mit der ein bestimmtes Maß an Mengenflexibilität in der Realität erzielt werden kann.

Wird vom Anwender der Bewertungsmethode ein bestimmtes Sicherheitsniveau λ gefordert, das die Mindestwahrscheinlichkeit für das rahmenvertraglich festzulegende Maß an Mengenflexibilität bestimmt, kann die korrespondierende maximal mögliche Mengenerhöhung $\alpha_{p^*,j}(\lambda)$ für das untersuchte Produkt p^* direkt aus der Darstellung ermittelt werden. In Abbildung 43 ist dies beispielhaft anhand einer Wahrscheinlichkeit von $\lambda = 0,8$ aufgezeigt.

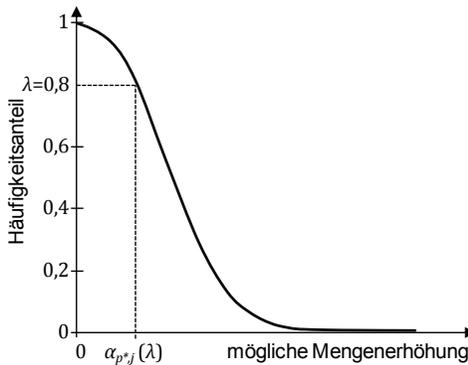


Abbildung 43: Inverse kumulierte Häufigkeitsverteilung der möglichen Mengenerhöhung in Planungsperiode j

Das Beispiel in Abbildung 43 zeigt die maximale Mengenerhöhung. Soll die maximale Mengenreduzierung untersucht werden, so ist eine analoge Darstellung für $\varphi_{p^*,j}^-$ zu wählen und anstelle von $\alpha_{p^*,j}(\lambda)$ der Wert für $\omega_{p^*,j}(\lambda)$ abzulesen.

Derartige Auswertungen lassen sich für sämtliche Planungsperioden $j \in [1, \dots, T]$ über alle Betrachtungszeitpunkte und Simulationsläufe hinweg jeweils sowohl für die maximale Mengenerhöhung, als auch für die maximale Mengenreduzierung getrennt voneinander durchführen. Die ermittelten Werte für $\alpha_{p^*,j}(\lambda)$ und $\omega_{p^*,j}(\lambda)$ ergeben schließlich das produkt- und kundenspezifische Mengenflexibilitätsprofil bei einem Sicherheitsniveau von λ , wie es beispielhaft in Abbildung 44 dargestellt ist. Es stellt aus Angebotssicht dar, welche Mengenflexibilität für das betrachtete Produkt p^* bei einem Sicherheitsniveau von λ in den einzelnen Planungsperioden möglich ist. Dem Referenzmodell entsprechend beziehen sich die Flexibilitätskorridore stets auf die Bestellmenge, die zu Beginn der jeweiligen Planungsperiode vorliegt.

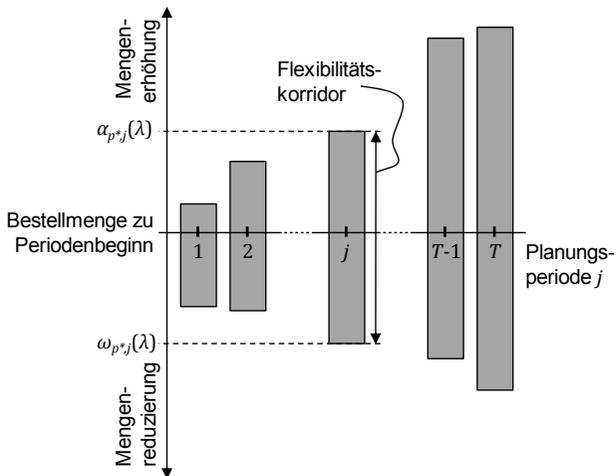


Abbildung 44: Kundenspezifisches Mengenflexibilitätsprofil bei einem Sicherheitsniveau von λ

4.4.2 Auswertung der Flexibilitätskosten

Die Auswertung der Stückkostenveränderung durch die Inanspruchnahme von Mengenflexibilität erfolgt ebenfalls mittels deskriptiver statistischer Methoden: Die Stückkostenveränderungen $\Delta c_{p^*,j}(\varepsilon, t)$, die in jedem Simulationsschritt aufgenommen wurden, können für jede Planungsperiode j und jedes analysierte ε ebenfalls in einem Histogramm dargestellt werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 45 zu finden.

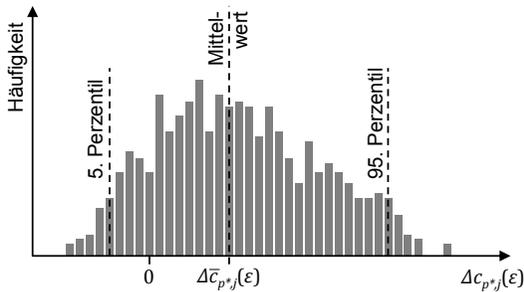


Abbildung 45: Histogramm der im Rahmen der Simulation ermittelten Änderung der Durchschnittskosten bei einer Mengenänderung von ε

Für die weiterführende Auswertung der Stückkostenveränderung ist von Interesse, welche Stückkostenveränderungen für eine Mengenanpassung von ε im Mittel aufgetreten sind und in welchem Bereich sich die Schwankungen um diesen Mittelwert bewegen. Neben dem Mittelwert $\Delta \bar{c}_{p^*,j}(\varepsilon)$ der Stückkostendifferenz wird vorgeschlagen, den Wert des 5. und des 95. Perzentils als Schwankungsmaß heranzuziehen. Auf diese Weise werden die wesentlichen Abweichungen vom Mittelwert erfasst und selten auftretende Extremwerte herausgefiltert. Der Vorteil bei der Verwendung von Perzentilen liegt darin, dass das Spektrum aufgezeigt wird, in dem die Abweichungen typischerweise auftreten. Würde etwa die Standardabweichung herangezogen werden, die als Streuungsmaß häufig Verwendung findet, wäre eine entsprechende Aussage aufgrund der Symmetrie der Standardabweichung nicht möglich. Da die Untersuchung der Abweichungen von den mittleren Stückkostenveränderungen in erster Linie einer Risikoabschätzung dient, kommt die Betrachtung von Perzentilen einer best-case- bzw. worst-case-Untersuchung gleich. Das gewählte Vorgehen entspricht auch dem Prinzip des Value-at-Risk-Ansatzes (vgl. WOLF & RUNZHEIMER 2009 S. 144).

Die beschriebene Auswertung wird für alle betrachteten Mengenanpassungen ε durchgeführt, die innerhalb des ermittelten Flexibilitätskorridors der betrachteten Planungsperiode j liegen. Auf Basis dessen kann der mittlere Stückkostenverlauf für die Inanspruchnahme der Mengenflexibilität in diesem Korridor approximiert werden (vgl. Abschnitt 3.5). Abbildung 46 zeigt eine entsprechende Darstellung.

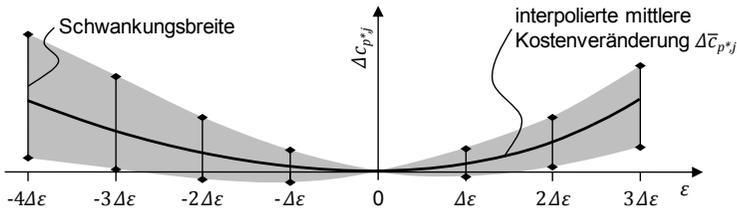


Abbildung 46: *Approximierte Stückkostenänderung durch Inanspruchnahme der Mengenflexibilität innerhalb einer Planungsperiode*

Wird diese Art von Auswertung für sämtliche Planungsperioden durchgeführt, können Aussagen abgeleitet werden, welche Kostenveränderungen mit einer Mengenänderung in Zusammenhang stehen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt im Planungshorizont in die Produktionsplanung eingesteuert wird. Anhand dieser Kurve lassen sich somit Anhaltspunkte für ein Kostenmodell in Zusammenhang mit der Flexibilität gewinnen. Die Schwankungsbreite ist dabei ein Indikator, welche Unsicherheiten bei der Ermittlung des Kostenmodells bestehen. Hieraus können ggf. Risikoaufschläge für das Kostenmodell abgeleitet werden.

Ein weiterer aufschlussreicher Aspekt für eine nähere Untersuchung ist die durch eine Mengenänderung ε anfallende Stückkostenänderung im Verlauf des Planungshorizonts. In diesem Fall wird die Mengenänderung ε konstant gehalten und die Planungsperiode j variiert. Daher wird die mittlere Stückkostenänderung hier als $\Delta\bar{c}_{p^*,\varepsilon}(j)$ bezeichnet, wobei grundsätzlich gilt:

$$\Delta\bar{c}_{p^*,\varepsilon}(j) = \Delta\bar{c}_{p^*,j}(\varepsilon) \quad (\text{Gl. 54})$$

Abbildung 47 zeigt eine derartige Auswertung schematisch. Die Auswertung lässt Rückschlüsse darauf zu, zu welchem Zeitpunkt eine Mengenänderung eingesteuert werden sollte, um eine damit verbundene Stückkostenerhöhung gering zu halten.

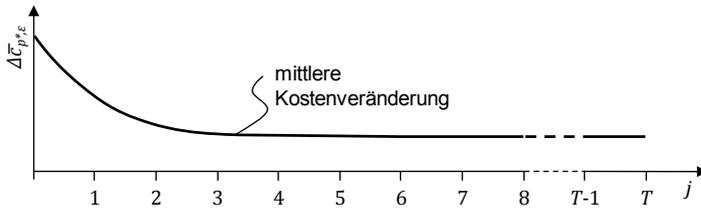


Abbildung 47: Approximierte Stückkostenänderungsfunktion bei einer definierten Mengenanpassung innerhalb des Planungshorizonts.

4.4.3 Interpretation der Ergebnisse

Das Konzept des Rahmenvertrags nach TSAY & LOVEJOY (1999) sieht vor, dass einem Kunden in einer bestimmten Planungsperiode unabhängig von seiner aktuellen Bedarfsprognose ein definiertes Maß an Mengenflexibilität zugesichert wird. Die hier dargelegte Art der Auswertung von Simulationsdaten zielt auf diese Prämisse ab. Durch die Aggregation der Mengenflexibilität verschiedener Bedarfsszenarien kann die unter Annahme eines Sicherheitsniveaus zur Verfügung stehende Mengenflexibilität unabhängig von einer zugrunde liegenden Prognose ermittelt werden. Abbildung 44 stellt das Ergebnis dieser Untersuchung dar. Es kann direkt verwendet werden, um einen entsprechenden Rahmenvertrag zu parametrieren.

Das Ergebnis liefert jedoch nicht nur Anhaltspunkte zu Parametrierung des Rahmenvertrags. Besteht kundenseitig der Wunsch nach einer höheren Mengenflexibilität, können erste Anhaltspunkte für Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden. So ist es z. B. möglich abzulesen, ob die gewünschte Mengenflexibilität grundsätzlich zur Verfügung steht und nur die Zeit bis zu ihrer Verfügbarkeit verkürzt werden sollte. In diesem Fall ist es denkbar, bestimmte Anpassungsmaßnahmen der Kapazitätsflexibilität kurzfristiger verfügbar zu machen, oder mit Lieferanten die Bereitstellung einer kurzfristig höheren Mengenflexibilität auszuhandeln. Kann die gewünschte Flexibilität auch mit längeren Vorlaufzeiten nicht zur Verfügung gestellt werden, so ist darüber nachzudenken, zusätzliche Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität zu konzipieren.

Interessante Eigenschaften hinsichtlich der Mengenflexibilität ergeben sich aus den Verläufen mittleren der Stückkostenveränderungen $\Delta\bar{c}_{p^*,j}(\epsilon)$ (vgl. Abbildung 48): Ein flacher Verlauf dieser Kurven spricht für eine hohe Kostenelastizität innerhalb der ermittelten Flexibilitätskorridore. Trotz wesentlicher Änderungen der Bestell-

menge verändern sich die Stückkosten in diesem Fall nur geringfügig. Eine hohe Kostenelastizität ist somit als positive Eigenschaft im Sinne der Mengenflexibilität des Unternehmens zu werten, da vor allem geringe Stückkostenerhöhungen die Bereitschaft erhöhen, auf Bedarfsmengenänderungen der Kunden einzugehen.

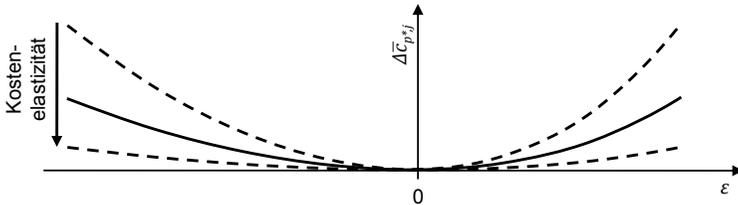


Abbildung 48: Kostenelastizität bei verschiedenen Verläufen der durchschnittlichen Kostenveränderung

Eine geringe Kostenelastizität innerhalb eines Flexibilitätskorridors spricht hingegen für eine geringe Bereitschaft, dem Kunden diese Mengenflexibilität zur Verfügung zu stellen. Bei einer geringen Kostenelastizität sind drei verschiedene Schlussfolgerungen denkbar:

1. Sofern möglich können die Kosten der Kapazitätsflexibilitätsmaßnahmen gesenkt werden, um die Kostenelastizität zu verbessern.
2. Überschreiten die Stückkostenveränderungen innerhalb des Mengenflexibilitätskorridors ein tolerierbares Maß, kann der Korridor auf Basis dieser Auswertung zusätzlich beschränkt werden. Dadurch werden nur Bestellmengenänderungen zugelassen, bei denen die Aufrechterhaltung der Wirtschaftlichkeit in Bezug auf das betrachtete Produkt gewahrt bleibt.
3. Preismodelle bieten die Möglichkeit, Veränderungen der Stückkosten an den Kunden weiterzugeben. Der Verlauf der Stückkostenveränderung liefert direkt Anhaltspunkte für die Preisfunktion. Die ermittelten Schwankungen der Kostenfunktion können darüber hinaus für die Bestimmung von Risikoaufschlägen herangezogen werden.

Auch der Verlauf der Anpassungskosten innerhalb des Planungshorizonts $\Delta\bar{c}_{p^*,\varepsilon}(j)$ liefert Aufschlüsse, die für die Vertragsgestaltung von Bedeutung sein können (vgl. Abbildung 47). Liegt hier ein nahezu waagerechter Verlauf vor, bringt eine Mengenänderung von ε zu jedem Zeitpunkt etwa die gleichen Kostenveränderungen

mit sich. Aus Kostensicht ist somit die verfügbare Flexibilität im gesamten Planungshorizont als gleichwertig zu betrachten. Fällt der Kostenverlauf mit zunehmendem j hingegen stark ab, ist mit niedrigeren Zusatzkosten zu rechnen, je früher die Bedarfsmengenänderung vom Kunden mitgeteilt wird. Als Konsequenz können die kurzfristig bereitgestellten Mengenflexibilitätskorridore bei der Gestaltung des Rahmenvertrags (trotz grundsätzlicher organisatorischer Verfügbarkeit) stärker beschränkt werden. Auf diese Weise lassen sich hohe Zusatzkosten durch kurzfristige Mengenanpassungen durch den Kunden verhindern. Eine andere Schlussfolgerung könnte jedoch auch sein, dass Preismodelle nur bei Bestellmengenänderungen kurz vor dem Liefertermin zum Tragen kommen, um dem Kunden einen Anreiz für eine frühzeitige Festlegung zu schaffen.

5 Beispielhaftes Anwendungsszenario

5.1 Kapitelüberblick

In diesem Kapitel wird ein beispielhaftes Anwendungsszenario für die vorgestellte Bewertungsmethode beschrieben, um das Vorgehen und die Auswertung zu illustrieren. Dabei wird anhand eines Modellunternehmens erläutert, welche Daten in welcher Form für die Durchführung der Methode benötigt werden. Weiterhin werden die Bewertungsergebnisse sowie exemplarische Einzelauswertungen vorgestellt und interpretiert. Schließlich erfolgt eine qualitative Bewertung von Aufwand und Nutzen der Methode aus Anwendungssicht.

5.2 Betrachtungsrahmen

5.2.1 Beschreibung des Modellunternehmens

Betrachtet wird ein blechverarbeitendes Unternehmen, das zwei industrielle Kunden jeweils mit einem spezifischen Produkttyp beliefert. Bei diesen Produkttypen handelt es sich um Schweißbaugruppen, die von dem Kundenunternehmen weiterverarbeitet werden und bereits endkundenspezifische Merkmale aufweisen. Aufgrund der hohen Varianz bei diesen Merkmalen erfolgt die Produktion der Baugruppen rein auftragsbezogen, eine Bevorratung von fertigen Schweißbaugruppen zum Ausgleich von Bedarfsschwankungen ist nicht vorgesehen.

Der Herstellungsprozess der beiden Produkttypen ist folgendermaßen gegliedert: Als Halbzeuge werden Blechzuschnitte von einem Lieferanten bezogen, der über entsprechende Laserschneidanlagen und Stanzmaschinen verfügt. Es existieren zwei Typen von Halbzeugen, die bereits beim Zuschnitt auf den Endkunden abgestimmt werden müssen und daher auftragsbezogen zu beschaffen sind. Für alle übrigen Zuschnitte werden ausreichende Sicherheitsbestände vorgehalten. Es werden daher nur die beiden zuerst genannten Typen von Halbzeugen in die Bewertungsmethode integriert. In dem betrachteten Unternehmen werden die Blechteile zunächst mithilfe von Abkantmaschinen umgeformt. Danach werden einige Kleinteile im Bereich einer Kleinteileschweißerei zusammengefügt und sämtliche Bauteile für die Endfertigung vorbereitet, die in der Baugruppenschweißerei stattfindet. Im Anschluss an das Schweißen werden die Baugruppen schließlich noch in einer Lackie-

rerei beschichtet, bevor sie an den Kunden ausgeliefert werden können. Die Lieferabrufe des Kunden beziehen sich jeweils auf den Wochenbedarf.

Mit einem der beiden Kunden sollen die Konditionen der Flexibilitätsvereinbarung für das kommende Geschäftsjahr bestimmt werden. Bisher besteht nur mit dem anderen Kunden eine Vereinbarung, die dem Referenzmodell in Abschnitt 3.5 entspricht. Um die bisherigen Flexibilitätskonditionen zu überprüfen, wird die in dieser Arbeit vorgestellte Bewertungsmethode eingesetzt. Zunächst sind dafür die beschriebenen Parameter der einzelnen Systemelemente zu bestimmen.

5.2.2 Allgemeine Parameter

Das Unternehmen führt eine Kapazitäts- und Materialbedarfsplanung auf Basis von Wochenbedarfen durch, weshalb die Periodenlänge auf eine Arbeitswoche (5 Arbeitstage) festgelegt wird. Der Planungshorizont umfasst $T = 10$ Wochen. Da die Flexibilitätsvereinbarung sich auf das vollständige kommende Geschäftsjahr beziehen soll, wird es für sinnvoll erachtet, Bedarfsszenarien (also Simulationsläufe) mit einem Umfang von $U = 52$ Wochen zu betrachten. Um eine ausreichende Datenbasis für die spätere statistische Auswertung zu bekommen, wird vorgesehen $E = 200$ Simulationsläufe anzusetzen. Die für jede Planungsperiode $j \in \{1, \dots, T\}$ zur späteren Auswertung generierten Werte belaufen sich damit auf $E \cdot U = 10\,400$.

Das von dem Unternehmen angestrebte Sicherheitsniveau bei der Flexibilitätsbewertung beträgt grundsätzlich 80%. Zu Vergleichszwecken sollen jedoch zusätzlich die Flexibilitätskorridore ausgegeben werden, die bei einem Sicherheitsniveau von 65% erzielbar sind. Folgende Tabelle 3 fasst diese Werte noch einmal zusammen:

Tabelle 3: Allgemeine Parameter der Bewertung

Parameter	Einheit	Wert
T	Wochen	10
U	Wochen	52
E	-	200
λ	-	80% (65%)

5.2.3 Bestimmung der Produktparameter

Im Folgenden wird die Zusammensetzung der beschreibenden Parameter für die *Schweißbaugruppe 1* erläutert, für die auch im Rahmen der Untersuchung die verfügbare Flexibilität zu bestimmen ist. Die Parameter des zweiten Produktes sind analog dazu strukturiert und in Tabelle 4 zu finden.

Die *Schweißbaugruppe 1*, nachfolgend mit dem Produktindex p_1 gekennzeichnet, wird regelmäßig vom Kunden bezogen. Der durchschnittliche Bedarf beträgt $X_{p_1}^{Trend}(t) = 240 \frac{\text{Stück}}{\text{Woche}}$, ein zeitlich sich verändernder Trend ist also nicht zu verzeichnen. Der Bedarf unterliegt jedoch saisonalen Schwankungen von $\pm 20\%$, die näherungsweise durch eine Sinusfunktion beschrieben werden können. Eine vollständige Sinusschwingung tritt dabei im Verlauf eines Geschäftsjahres auf, sodass sich $X_{p_1}^{Sais}(t) = 240 \frac{\text{Stück}}{\text{Woche}} \cdot 0,2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{52 \text{ Wochen}}\right)$ als Saisonalität ergibt. Als initiale Prognose in Planungsperiode $j = 10$ wird stets der durch diese beiden Funktionen zu erwartende Wert angenommen, d. h. es gilt $X_{p_1}^{Irr}(t) = 0$. Als Gesamtfunktion zur Erzeugung der initialen Bedarfsprognosen gilt somit

$$X_{p_1,10}(t) = 240 + 240 \cdot 0,2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{52 \text{ Wochen}}\right) \quad (\text{Gl. 55})$$

Irreguläre Bedarfsschwankungen werden darauf aufbauend während der rollierenden Revision der Bedarfsmenge innerhalb des Planungshorizontes eingebracht. Erfahrungsgemäß nimmt der Kunde stets (also mit 100% Wahrscheinlichkeit) innerhalb der zehnten Planungsperiode eine Korrektur der Bedarfsmenge vor. Weitere Bedarfsanpassungen mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% erfolgen innerhalb der achten Planungsperiode sowie jeweils mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% innerhalb der sechsten und der vierten Planungsperiode. Für alle übrigen Planungsperioden wurde geschätzt, dass Bedarfsanpassungen nur etwa in 10% aller Fälle vorkommen. In den letzten beiden Planungsperioden vor Auslieferung besteht eine gefrorene Zone, in der gemäß einer Vertragsvereinbarung keine Änderungen am Bedarf mehr vorgenommen werden dürfen. Dies führt zu folgendem Wahrscheinlichkeitsvektor für Anpassungen innerhalb des Planungshorizonts:

$$\vec{\tau}_{p_1} = [0 \ 0 \ 0,1 \ 0,5 \ 0,1 \ 0,5 \ 0,1 \ 0,8 \ 0,1 \ 1] \quad (\text{Gl. 56})$$

Zur Bestimmung der betragsmäßigen Änderungen, die bei der Bedarfskorrektur auftreten, konnten aus Erfahrungen der Vergangenheit folgende Standardabweichungen ermittelt bzw. abgeschätzt werden:

$$\vec{\sigma}_{p_1} = [0 \ 0 \ 3 \ 6,2 \ 10 \ 12,7 \ 20 \ 26,4 \ 30 \ 30,3] \quad (\text{Gl. 57})$$

Das bedeutet also, dass die innerhalb von Planungsperiode 10 auftretenden Abweichungen von der Prognose eine Standardabweichung von $\sigma_{p_1,10} = 30.3$ Stück aufweisen, während in Planungsperiode 6 beispielsweise nur noch eine Standardabweichung von $\sigma_{p_1,6} = 12.7$ Stück vorliegt.

Von den beiden betrachteten Halbzeugen wird nur eines, das *Strukturbauteil* m_1 (vgl. auch 5.2.4), zur Herstellung der Schweißbaugruppe 1 verwendet. Hiervon werden drei Stück pro Produkteinheit benötigt. Daraus folgt:

$$\vec{\mu}_{p_1} = [3 \ 0] \quad (\text{Gl. 58})$$

Das Produktionssystem des Unternehmens wird in die vier Arbeitssysteme *Blechbearbeitung*, *Kleinteileschweißerei*, *Baugruppenschweißerei* und *Beschichtung* gegliedert. Zur Herstellung einer Einheit der Schweißbaugruppe 1 werden an Kapazität standardmäßig 10 Minuten im Bereich Blechbearbeitung, 15 Minuten in der Kleinteileschweißerei, 13 Minuten in der Baugruppenschweißerei und 8 Minuten in der Beschichtung benötigt. Da in der Baugruppenschweißerei manchmal Engpässe auftreten, können manche Tätigkeiten auch kurzfristig in die Kleinteileschweißerei verlagert werden, wodurch sich der Kapazitätsbedarf dort auf 22 Minuten erhöht, während in der Baugruppenschweißerei nur noch 9 Minuten benötigt werden. Es ergeben sich somit zwei Produktionsrouten die folgendermaßen modelliert werden (vgl. Gl. 19):

$$\vec{\kappa}_{p_1,i_1} = [10 \ 15 \ 13 \ 8] \quad (\text{Gl. 59})$$

$$\vec{\kappa}_{p_1,i_2} = [10 \ 22 \ 9 \ 8] \quad (\text{Gl. 60})$$

Somit sind alle benötigten Produktparameter für die Simulation bestimmt. Nachfolgende Tabelle 4 fasst diese noch einmal übersichtlich zusammen und gibt weiterhin die Parameter für das zweite Produkt, die *Schweißbaugruppe 2*, an.

Abweichend zur Schweißbaugruppe 1 liegt für Schweißbaugruppe 2 eine Flexibilitätsvereinbarung zwischen dem Unternehmen und seinem Kunden vor, die durch die Vektoren $\vec{\alpha}_2$ und $\vec{\omega}_2$ charakterisiert wird. Sie besagt beispielsweise, dass in Planungsperiode zehn der Bedarf um ± 190 Stück variiert werden darf, während in Planungsperiode fünf nur noch ± 30 Stück möglich sind. In den Perioden eins bis drei liegt eine *gefrorene Zone* vor, in der keine Variation der Bestellmenge mehr möglich ist.

Tabelle 4: Beschreibende Parameter der Produkte

Parameter	Schweißbaugruppe 1	Schweißbaugruppe 2
p	p_1	p_2
$X_p^{Trend}(t)$	240	470
$X_p^{Sais}(t)$	$240 \cdot 0,2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{52}\right)$	0
$X_p^{irr}(t)$	0	0
$\vec{\alpha}_p$	keine bestehende Vereinbarung	[0 0 0 20 30 4060 80 120 190]
$\vec{\omega}_p$	keine bestehende Vereinbarung	[0 0 0 20 30 4060 80 120 190]
$\vec{\tau}_p$	[0 0 0,1 0,5 0,10,5 0,1 0,8 0,1 1]	[0 0 0 0,3 0,30,1 0,8 0,1 0,5 1]
$\vec{\sigma}_p$	[0 0 3 6,2 10 12,720 26,4 30 30,3]	[0 0 0 4,2 9,5 1321,1 30 41,3 66,9]
$\vec{\mu}_p$	[3 0]	[1 2]
$\vec{\kappa}_{p,i}$	$\vec{\kappa}_{p_1,i_1} = [10 \ 15 \ 13 \ 8]$ $\vec{\kappa}_{p_1,i_2} = [10 \ 22 \ 9 \ 8]$	$\vec{\kappa}_{p_2,i_1} = [4 \ 8 \ 12 \ 10]$

5.2.4 Bestimmung der Materialparameter

Bei den beiden auftragsbezogen zu beschaffenden Materialien handelt es sich zum einen um ein *Strukturbauteil* (m_1), das in beiden Produkten verwendet wird und zum anderen um ein *Seitenblech* (m_2), von dem zwei Stück für die Schweißbaugruppe 2 benötigt werden. Für diese beiden Materialien gilt es, die Flexibilität zu bestimmen, mit der sie beschafft werden können. Da mit den Lieferanten für beide Materialien eine Flexibilitätsvereinbarung besteht, können die entsprechenden Werte für $\vec{\alpha}_m$ und $\vec{\omega}_m$ dieser direkt entnommen werden. Die genaue Parametrierung ist Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Beschreibende Parameter der Materialien

Parameter	Schweißbaugruppe 1	Schweißbaugruppe 2
m	m_1	m_2
\vec{a}_m	[0 100 200 300 400 550700 850 1000 1200]	[0 0 50 100 200 300400 500 600 700]
$\vec{\omega}_m$	[0 100 200 300 400 550700 850 1000 1200]	[0 0 50 100 200 300400 500 600 700]

5.2.5 Bestimmung der Arbeitssystemparameter

Wie bereits erwähnt gliedert sich das Produktionssystem in die vier Arbeitssysteme *Blecbearbeitung* (n_1), *Kleinteileschweißerei* (n_2), *Baugruppenschweißerei* (n_3) und *Beschichtung* (n_4). Regulär wird in allen Arbeitssystemen im Zweischicht-Betrieb gearbeitet, in der Beschichtung ist die zweite Schicht jedoch nur halb besetzt.

Die reguläre Wochenarbeitszeit der Mitarbeiter beträgt 35 Stunden. Eine Arbeitsstunde der Mitarbeiter wird mit einem Kostensatz von 35 € pro Stunde angesetzt. Tabelle 6 listet daraus resultierenden beschreibenden Parameter der Arbeitssysteme auf. Die drei letzten Zeilen sind dabei lediglich für eine bessere Nachvollziehbarkeit aufgeführt, sie werden für die Modellierung nicht benötigt.

Tabelle 6: Allgemeine beschreibende Parameter der Arbeitssysteme

Parameter	Einheit	Blecbearbeitung	Kleinteileschweißerei	Baugruppenschweißerei	Beschichtung
n	-	n_1	n_2	n_3	n_4
K_n^G	min	4200	8400	8400	6300
C_n^G	€	2450	4900	4900	3675
A_n^{min}	-	0,6	0,6	0,6	0,6
Schichten	-	2	2	2	2
MA 1. Schicht	-	1	2	2	2
MA 2. Schicht	-	1	2	2	1

MA = Mitarbeiter

In jedem Arbeitssystem existieren darüber hinaus Maßnahmen zu Kapazitätsanpassung. In den Arbeitssystemen n_1 , n_2 und n_3 können dafür beide Schichten durch Überstunden um zwei Arbeitsstunden pro Tag verlängert werden. Da sie dann in die Nachtzeit hinein reichen, sind für die Schichtverlängerungen jeweils Nachtzulagen von 25% auf den Stundensatz einzukalkulieren. Reicht die Kapazität dann nach wie vor nicht aus, kann auch eine zusätzliche Nachschicht eingeführt werden, was jedoch voraussetzt, dass gleichzeitig keine Schichtverlängerung vorgesehen wird. Obwohl die Nachschicht den gleichen Umfang an Arbeitsstunden wie die Tagsschichten hat, ist aufgrund einer um 25% niedrigeren Produktivität in der Nacht der Kapazitätsbeitrag geringer. Bei den laufenden Kosten für die Nachtschicht sind ebenfalls Zulagen von 25% pro Arbeitsstunde anzusetzen. Im Arbeitssystem vier ist neben der Schichtverlängerung der beiden Tagschichten nur eine Verstärkung der zweiten Schicht mit einem Mitarbeiter vorgesehen.

Die einzelnen Parameter der in den Arbeitssystemen vorgesehenen Maßnahmen sind nachfolgend Tabelle 7 bis Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 7: Kapazitätsanpassungsmaßnahmen in der Blechbearbeitung (n_1)

Parameter	Einheit	Verlängerung 1. Schicht	Verlängerung 2. Schicht	Nachtschicht
$a(n_i)$	-	a_1	a_2	a_3
ΔK_a	min	600	600	1575
t_a^{akt}	Wochen	1	1	5
$t_a^{ND,max}$	Wochen	6	6	∞
$t_a^{ND,min}$	Wochen	1	1	5
t_a^{reg}	Wochen	4	4	5
C_a^{akt}	€	0	0	2000
C_a^{lauf}	€/Woche	437,5	437,5	1531,25
$b_{k,l}$	-	$b_{a_3,a_1} = b_{a_3,a_2} = 1 \Rightarrow b_{a_1,a_3} = b_{a_2,a_3} = 2$ alle übrigen $b_{k,l} = 0$		

Tabelle 8: Kapazitätsanpassungsmaßnahmen in der Kleinteile- und in der Baugruppenschweißerei (n_2 und n_3)

Parameter	Einheit	Verlängerung 1. Schicht	Verlängerung 2. Schicht	Nachtschicht
$a(n_2) = a(n_3)$	-	a_1	a_2	a_3
ΔK_a	min	1200	1200	3150
t_a^{akt}	Wochen	1	1	5
$t_a^{ND,max}$	Wochen	6	6	∞
$t_a^{ND,min}$	Wochen	1	1	5
t_a^{reg}	Wochen	4	4	5
C_a^{akt}	€	0	0	4000
C_a^{lauf}	€/Woche	875	875	3062,5
$b_{k,l}$	-	$b_{a_3,a_1} = b_{a_3,a_2} = 1 \Rightarrow b_{a_1,a_3} = b_{a_2,a_3} = 2$ alle übrigen $b_{k,l} = 0$		

Tabelle 9: Kapazitätsanpassungsmaßnahmen in der Beschichtung

Parameter	Einheit	Verlängerung 1. Schicht	Verlängerung 2. Schicht	Verstärkung 2. Schicht
$a(n_4)$	-	a_1	a_2	a_3
ΔK_a	min	1200	600	2100
t_a^{akt}	Wochen	1	1	5
$t_a^{ND,max}$	Wochen	6	6	∞
$t_a^{ND,min}$	Wochen	1	1	5
t_a^{reg}	Wochen	4	4	5
C_a^{akt}	€	0	0	2000
C_a^{lauf}	€/Woche	875	437,5	1312,5
$b_{k,l}$	-	$b_{k,l} = 0 \forall k, l \in \mathcal{A}_{n_4}$		

5.3 Ergebnisse und Interpretation

Die Auswertung der Simulationsergebnisse wird nachfolgend exemplarisch anhand der Daten einer einzelnen Planungsperiode aufgezeigt: Abbildung 49 a) zeigt das Histogramm der während der Simulation ausgewerteten maximalen Mengenerhöhungen, die in Planungsperiode 7 (also stets sieben Perioden vor dem Liefertermin) möglich gewesen wären. In Abbildung 49 b) wurde die inverse kumulative Häufigkeitsverteilung daraus abgeleitet. Wie im Abschnitt 4.4.1 beschrieben, kann diese Darstellung derart interpretiert werden, dass sie die möglichen Mengenerhöhungen bei verschiedenen Sicherheitsniveaus abbildet. Mit den für die Bewertung vorgegebenen Sicherheitsniveaus von 80% und 65% können die korrespondierenden Mengenerhöhungen abgelesen werden.

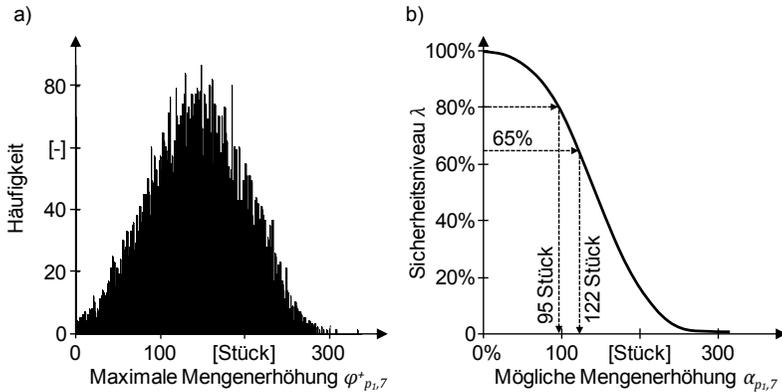


Abbildung 49: Exemplarische Flexibilitätsauswertung für Planungsperiode 7

Die Auswertung der Daten sämtlicher Planungsperioden ergibt die folgenden Flexibilitätsvektoren $\vec{\alpha}_{p_1}$ und $\vec{\omega}_{p_1}$. Die in Abbildung 49 ermittelten Werte sind fett vorgehoben:

$$\vec{\alpha}_{p_1}(0,8) = [0 \ 28 \ 34 \ 38 \ 78 \ 94 \ \mathbf{95} \ 100 \ 103 \ 109] \quad (\text{Gl. 61})$$

$$\vec{\omega}_{p_1}(0,8) = [0 \ 33 \ 57 \ 65 \ 65 \ 72 \ 78 \ 88 \ 97 \ 114] \quad (\text{Gl. 62})$$

$$\vec{\alpha}_{p_1}(0,65) = [0 \ 33 \ 59 \ 74 \ 103 \ 121 \ \mathbf{122} \ 125 \ 126 \ 127] \quad (\text{Gl. 63})$$

$$\vec{\omega}_{p_1}(0,65) = [0 \ 33 \ 64 \ 96 \ 102 \ 108 \ 113 \ 119 \ 126 \ 132] \quad (\text{Gl. 64})$$

Das mit diesen Vektoren korrespondierende Mengenflexibilitätsprofil ist in Abbildung 50 dargestellt. Auch hier sind die beiden in Abbildung 49 ermittelten Werte gekennzeichnet.

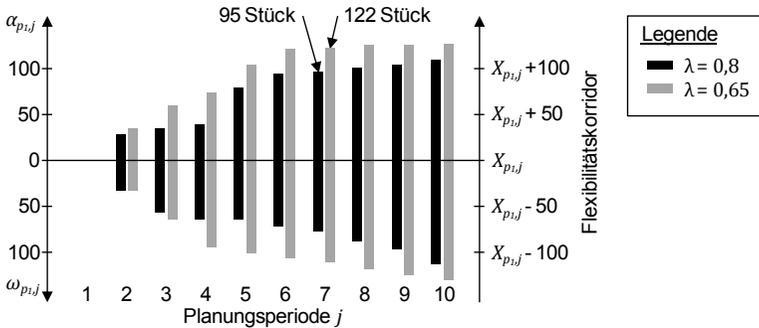


Abbildung 50: Flexibilitätsprofil der Schweißbaugruppe 1(p_1)

Diese Bewertungsergebnisse zeigen, dass das betrachtete Unternehmen zwei Wochen vor der Auslieferung eines Auftrags an den Kunden mit einer Sicherheit von 80% noch eine Bestellmengenerhöhung um 28 Stück und eine Bestellmengenreduzierung um 33 Stück realisieren kann. Bezogen auf die durchschnittliche Bestellmenge von 240 Stück entspricht dies Anpassungen von etwa +12% bzw. -14%. Werden Bestellmengenänderungen bereits zehn Wochen vor der Auslieferung vorgenommen, lassen sich Mengenerhöhungen um 109 Stück und -reduzierungen um 114 Stück realisieren. In Bezug auf die durchschnittliche Bestellmenge sind das in diesem Fall etwa 45% bzw. -48%. Sowohl an den Vektoren $\vec{\alpha}_{p_1}$ und $\vec{\omega}_{p_1}$ als auch am Flexibilitätsprofil in Abbildung 50 ist deutlich zu sehen, dass die Mengenflexibilität mit abnehmender Frist bis zur Auslieferung sinkt. Dies liegt vor allem daran, dass die zusätzlichen Nachtschichten eine Aktivierungszeit von fünf Perioden aufweisen und somit nur bei entsprechender Vorplanungszeit genutzt werden können. Ein weiterer Grund für die abnehmende Mengenflexibilität ist, dass die Verteilungen der Bestellmengen mit näherrückendem Liefertermin immer größere Streuungen aufweisen. Dies liegt vor allem an der Aggregation von mehreren Mengenänderungen im Zuge der rollierenden Bestellmengenanpassung (vgl. Abschnitt 2.4.2). Die größeren Streuungen führen dazu, dass bestimmte Korridorbreiten seltener erzielt werden können. Deutlich wird dieser Aspekt daran, dass sich die Flexibilitätskorridore mit abnehmendem j bei einem Sicherheitsniveau von 65% stärker aufwei-

ten, als bei einem solchen von 80%. In den Perioden $j = 2$ und $j = 3$ gilt diese Beobachtung nicht mehr, was allerdings darauf zurückzuführen ist, dass hier die Grenzen der Materialflexibilität maßgeblich für das Flexibilitätsprofil werden.

Die Auswertung der Stückkostenveränderung, die bei der Nutzung der Flexibilität auftritt, ist exemplarisch für Planungsperiode 7 in Abbildung 51 dargestellt.

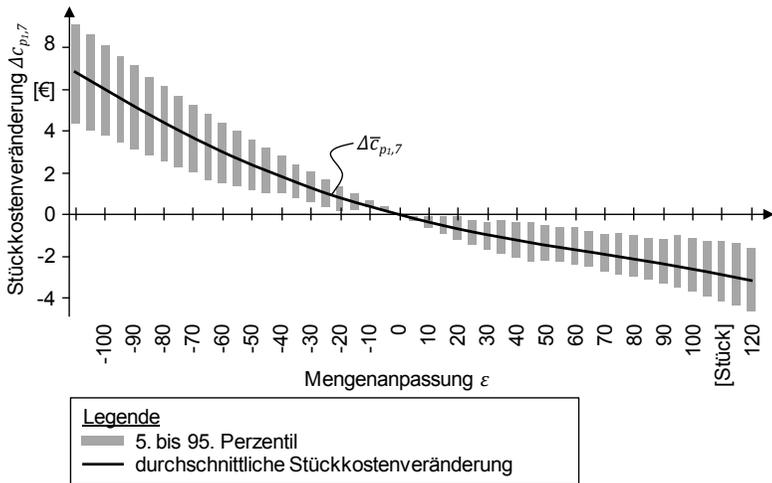


Abbildung 51: Stückkostenveränderung durch Mengenanpassungen in Planungsperiode 7

Es wird deutlich, dass Verringerungen von Bestellmengen zu einer Erhöhung von Stückkosten führen. Dies ist damit zu erklären, dass keine Kapazitätsanpassungsmaßnahmen vorgesehen sind, um das Kapazitätsangebot ausgehend von der Grundkapazität zu verringern. Da eine Mindestkapazitätsauslastung von 60% für die untere Grenze der Mengenflexibilität maßgeblich ist, geht die Reduzierung von Bestellmengen meist mit einer schlechteren Kapazitätsauslastung einher, die zu höheren Stückkosten führt.

Bestellmengerhöhungen führen gemäß der Auswertung stets zu geringeren Stückkosten. Das spricht dafür, dass sie im Wesentlichen durch überschüssige Kapazität abgedeckt werden können. Der flachere Verlauf der Kurve im rechten Teil der Abbildung deutet aber auch an, dass die Variabilisierung der Kapazitätskosten bei

Mengenänderungen in diesem Stückzahlbereich besser ausgeprägt ist, was auf die verfügbaren Maßnahmen zur schrittweisen Erhöhung der Kapazität zurückzuführen ist.

In der nachfolgenden Abbildung 52 sind schließlich die Stückkostenveränderungen dargestellt, die sich innerhalb des Planungshorizonts für festgelegte Bestellmengenänderungen ergeben. Der weitestgehend waagerechte Verlauf der Kurven spricht dafür, dass der Zeitpunkt, zu dem eine Mengenanpassung vorgenommen wird, eher unerheblich ist.

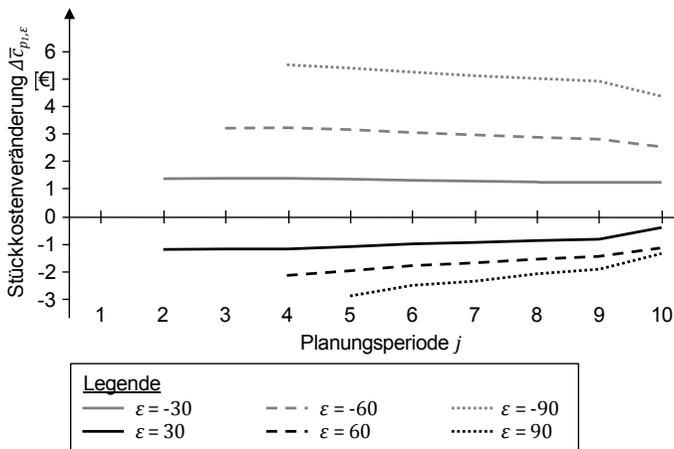


Abbildung 52: Stückkostenveränderung im Planungshorizont bei verschiedenen Bestellmengenanpassungen

Bei Bestellmengerenerhöhungen sind sogar etwas höhere Einsparungen bei den Stückkosten zu verzeichnen, je später diese Mengenanpassungen auftreten. Dieses Phänomen ist darauf zurückzuführen, dass bei der Aktivierung der Nachtschicht für einen längeren Zeitraum unwiderruflich ein großes Maß an zusätzlicher Kapazität geschaffen wird. Jede Verbesserung der Auslastung dieser Kapazität durch Mengenerhöhungen führt entsprechend zu einer deutlichen Verringerung der Stückkosten. Ist die Vorplanungszeit jedoch groß genug, besteht die Möglichkeit eine nicht benötigte Nachtschicht wieder abzusagen und stattdessen nur eine Schichtverlängerung zu planen. Aufgrund des geringeren Kapazitätsüberschusses fallen bei der Schichtverlängerung die möglichen Stückkostenreduzierungen geringer aus.

5.4 Bewertung der Methode

In diesem Abschnitt wird eine zusammenfassende Bewertung der entwickelten Methode durchgeführt. Dafür werden die in Abschnitt 3.2 formulierten Anforderungen an die Methode herangezogen und auf Erfahrungen mit dem der implementierten Simulation zurückgegriffen. Schließlich folgt eine kurze Gegenüberstellung von Nutzen und Aufwand der Methode. Der Nutzen wird dabei anhand von auf dem Anwendungsszenario aufbauenden Beispielen veranschaulicht.

Anforderungen an die Methode

Die Anforderungen an die Bewertungsmethode leiteten sich zum Teil aus der übergeordneten Zielsetzung – der Gestaltung von Flexibilitätsvereinbarungen in Rahmenverträgen – ab (vgl. Abbildung 14 auf S. 57). Dieser Teil der Anforderungen kann als vollständig erfüllt betrachtet werden:

Der Kundenbezug der Bewertungsergebnisse kann durch die Einbeziehung sämtlicher Kunden mit ihren jeweiligen Bestellverhaltensweisen realisiert werden. Die Modellierung von Kunden und Produkten als eine Einheit führt dabei zu einer eindeutigen Zuordnung der produktbezogenen Mengenflexibilität zum entsprechenden Kunden. In Abschnitt 3.4.2 wurde aufgezeigt, dass diese Art der Modellierung nicht der Tatsache entgegensteht, dass in der Realität häufig keine 1:1-Beziehungen zwischen Kunden und Produkten vorliegen.

Die Forderung nach einer quantitativen und dimensionsbezogenen Bewertung der Mengenflexibilität wird ebenfalls von der Methode erfüllt. Durch die Wahl des Referenzmodells werden alle drei Dimensionen der Flexibilität nach SLACK (1983) – Spielraum, Zeit und Kosten – berücksichtigt. Sie werden im Rahmen der Bewertung jeweils mit konkreten Zahlenwerten hinterlegt, die die Grenzen und Möglichkeiten des untersuchten Unternehmens in Bezug auf die Mengenflexibilität gegenüber dem betrachteten Kunden widerspiegeln. Werden diese quantitativen Bewertungsergebnisse entsprechend in eine Flexibilitätsvereinbarung übernommen, ist auch die Nachvollziehbarkeit und juristische Durchsetzbarkeit der Vereinbarung gewährleistet. Die Bewertungsergebnisse sind also durchgehend für die Parametrierung solcher Vereinbarungen geeignet.

Der andere Teil der in Abschnitt 3.2 definierten Anforderungen an die Bewertungsmethode bezieht sich auf das Umfeld, in dem die Bewertung stattfindet. Diesbezüglich wird gefordert, dass sämtliche Einflussfaktoren auf die Mengenflexibilität und ihre gegenseitigen Wirkbeziehungen einbezogen werden, damit eine Bewertung des vollständigen Umfangs der Flexibilität erfolgen kann. Durch die Diskussion,

Klassifizierung und Aggregation der einzelnen Flexibilitätsfaktoren (vgl. 2.5 und 3.3) wurde deutlich, dass wesentliche Flexibilitätspotentiale in einigen wenigen Faktoren zusammengefasst werden können. Auf diese Weise werden fast alle im Abschnitt 2.5 identifizierten Einflussfaktoren berücksichtigt. Faktoren, die hierbei vernachlässigt bleiben, dienen überwiegend der Feinabstimmung von Kapazität in der Produktion, so dass sie hinsichtlich des vorliegenden Mengenflexibilitätspotentials nur einen geringen Beitrag leisten. Die Anforderung zur Berücksichtigung von Wirkbeziehungen zwischen den Flexibilitätsfaktoren ist wegen der Annahme der effizientesten Route für die Flexibilitätsauswertung nur eingeschränkt erfüllt. Diese Einschränkung ist notwendig, damit die Auswertung mit angemessenem Aufwand möglich ist. Die damit implizierte Annahme eines bevorzugten Herstellprozessablaufs entspricht jedoch auch der Realität vieler Unternehmen.

Bestehende betriebliche Planungsabläufe werden einerseits in der Modellierung der einzelnen Modellelemente berücksichtigt, bei der nach Möglichkeit auf gängige betriebliche Planungsvorgehen (z. B. die Zeitreihenanalyse nach dem Holt-Winters-Verfahren) und Planungsunterlagen (z. B. Arbeitspläne und Stücklisten) zurückgegriffen wird. Das Vorgehen im Rahmen der Simulation lehnt sich zudem an verfügbare PPS-Konzepte an, bei dem ebenfalls Material- und Kapazitätsbedarfsplanungen vorgesehen sind (vgl. 2.7). Hinweise, wie ein weiterer Angleich zwischen der Simulation und PPS-Systemen durchgeführt werden können, sind in Abschnitt 3.7 zu finden. Die Anforderung zur Berücksichtigung betrieblicher Planungsabläufe kann damit ebenfalls als erfüllt betrachtet werden.

Aufwand zur Datenakquise und Parametrisierung

Die Menge der in die Simulation einzupflegenden Daten steigt mit zunehmendem Umfang des Untersuchungsbereichs beträchtlich an. Insbesondere für Kunden bzw. Produkte und Arbeitssysteme sind zahlreiche Parameter zu ermitteln. Der überwiegende Teil dieser Informationen liegt jedoch in gängigen PPS- bzw. ERP-Systemen vor und muss daher lediglich in die Simulationsumgebung übertragen werden. Bei entsprechender Implementierung der Simulation kann dies auch mittels geeigneter Schnittstellen zur PPS- oder ERP-Software automatisch geschehen. Möglichkeiten dazu wurden jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher untersucht und sind im Einzelnen zu prüfen.

Nach dem vorliegenden Kenntnisstand sind lediglich die Verhaltensweisen der Kunden bei Bestellmengenänderungen innerhalb des Planungshorizonts sowie die Kapazitätsanpassungsmaßnahmen in den Arbeitssystemen nicht in PPS- oder ERP-Systemen hinterlegt. Die Methode zur Analyse des Bestellverhaltens nach BARTHEL

(2006, vgl. 2.6.2), die hier zur Analyse des Bestellverhaltens vorgeschlagen wird, lässt sich jedoch mit geringem Aufwand in einer Tabellenkalkulation implementieren und weitgehend automatisiert durchführen. Über die Parameter von verfügbaren Kapazitätsanpassungsmaßnahmen kann erfahrungsgemäß ein versierter Werkstattmeister Auskunft geben. Der Aufwand zur Datenakquise kann also trotz des Datenumfanges insgesamt als gering betrachtet werden. Sofern die benötigten Rohdaten über vergangene Bedarfsmengen und Bestellungen vorliegen, wird er auf wenige Arbeitsstunden geschätzt.

Deutlich größer ist hingegen derzeit noch der Aufwand, das im Rahmen der Simulation einzusetzende Optimierungsverfahren zur Kapazitätsanpassung auszuwählen und zu parametrieren. Hier ist vor allem die Forschung gefragt, eine geeignete Vorgehensweise zu entwickeln, die einen Nutzer in wenigen Schritten zu einer passenden Methode mit einer individuellen Zielfunktion führt.

Simulationsaufwand

Die Simulation zum oben beschriebenen Anwendungsbeispiel wurde auf einem Simulationsrechner mit 8 Intel®-Xeon®-Prozessoren mit jeweils 2,66 GHz durchgeführt, auf denen die einzelnen Simulationsläufe parallel abgearbeitet werden konnten. Der Zeitbedarf betrug dabei etwa 12 Minuten. Auf heutigen Standard-PCs, die regelmäßig mit 2 Prozessoren ausgestattet sind, ist etwa eine vierfache Rechenzeit zu erwarten.

Der Zeitbedarf bei der Simulation resultiert im Wesentlichen aus den Optimierungsläufen zur Kapazitätsanpassung in den einzelnen Arbeitssystemen (vgl. 4.3.6). Mit einer steigenden Zahl an betrachteten Arbeitssystemen nimmt die Simulationszeit entsprechend zu, da pro System in jedem Simulationslauf eine Optimierung durchgeführt wird (vgl. 4.3.6.4). Ausschlaggebend für den Zeitbedarf der Simulation ist jedoch vor allem der eingesetzte Optimierungsalgorithmus. Wie bereits im vorangehenden Abschnitt erläutert wurde, besteht diesbezüglich weiterer Forschungsbedarf dahingehend, wie ein effizientes Optimierungsverfahren für die vorliegende Problemstellung ausgewählt und geeignet parametrieren werden kann.

Nutzen der Methode

Der Nutzen der vorliegenden Methode besteht in der Bewertung des Mengenflexibilitätspotentials eines Unternehmens in einer Form, die für die Vereinbarung von Mengenflexibilität in Rahmenverträgen mit einem Kunden direkt herangezogen werden kann. Durch den Einsatz der Bewertungsmethode kann das Unternehmen somit sein eigenes Flexibilitätspotential erkennen und sich davor absichern, dass es

sich auf vertragliche Konditionen einlässt, die es anschließend nicht einhalten kann. In diesem Fall kann sich ein monetärer Nutzen aus der Bewertungsmethode ergeben, wenn mit einer Verletzung der Vertragskonditionen z. B. Strafzahlungen oder Umsatzeinbußen einhergehen. Um diesen Aspekt zu veranschaulichen wird das Anwendungsszenario folgendermaßen erweitert:

Im Rahmen der Vertragsverhandlungen wünscht sich der Kunde der Schweißbaugruppe 1, zukünftig die Bestellmenge bis zur sechsten Woche vor dem Liefertermin um + 80 Stück und ab der fünften Woche noch um + 50 Stück variieren zu können. In der letzten Periode sollen die Bestellmengen nicht mehr geändert werden. Er fordert, dass eine Verletzung der Vertragsbedingungen pro nicht geliefertem Stück der Schweißbaugruppe 1 zu einer Pönale von 500 € führen soll. Anhand der Gleichungen Gl. 61 und Gl. 63 ist zu erkennen, dass der Flexibilitätswunsch in den Planungsperioden 2 bis 4 bei 80% Sicherheit nicht erfüllt werden kann. Bei 65% Sicherheit ist eine Erfüllung lediglich in Periode 2 ausgeschlossen. Wird nun beispielsweise eine einmalige vollständige Ausnutzung der Flexibilität durch den Kunden in Planungsperiode 2 angenommen und das Sicherheitsniveau von 80% zugrunde gelegt, ist mit einer Fehlmenge von $50 - 28 = 22$ Stück somit mit einer gesamten Pönale von 11000 € zu rechnen. Tritt eine solche Situation häufiger auf, können sich die resultierenden Pönalen schnell zu beträchtlichen Beträgen summieren. Das betrachtete Unternehmen sollte sich daher nicht auf die Wunschbedingungen des Kunden einlassen.

Ein weiterer Nutzen besteht für das Unternehmen darin, dass es auf Basis der Stückkostenauswertung die wirtschaftlichen Grenzen der Mengenflexibilität erkennen kann: Selbst wenn aus technischer und organisatorischer Sicht ein bestimmter Mengenflexibilitätskorridor verfügbar ist, können die Stückkostenveränderungen des einzelnen Produkts dazu führen, dass die vertragliche Zusicherung der vollständigen Mengenflexibilität potentielle wirtschaftliche Nachteile für das Unternehmen mit sich bringt. In diesem Fall ist zu überlegen, wie der Kunde an diesen Nachteilen beteiligt werden kann. Das Bewertungsergebnis gibt damit Anhaltspunkte für eine zielgerichtete Gestaltung der Vertragsklauseln beispielsweise durch Preismodelle.

Auch dieser Aspekt soll mithilfe des Anwendungsszenarios veranschaulicht werden: Anhand von Abbildung 51 ist zu erkennen, dass eine Mengenverringerung der Schweißbaugruppe 1 um 100 Stück in Planungsperiode 7 zu einer durchschnittlichen Stückkostenerhöhung um etwa 7,75 € führt. Angenommen die ursprüngliche Mengenprognose entsprach dem mittleren Stückzahlbedarf von 240 Stück und der Deckungsbeitrag der Schweißbaugruppe 1 beträgt 110 €, so ist bei einer Mengen-

reduzierung um 100 Stück mit einem Ergebnismrückgang zu rechnen, der sich aus folgenden beiden Komponenten zusammensetzt:

- Der Verringerung der Stückzahl führt zu einem entgangenen Deckungsbeitrag von $100 \cdot 110\text{€} = 11000\text{€}$.
- Die Stückkosten der übrigen 140 Stück erhöhen sich um jeweils 7,75 €, so dass sich weitere Ergebniseinbußen auf $140 \cdot 7,75\text{€} = 1085\text{€}$ belaufen.

Insgesamt ergibt sich bei einer vollständigen Ausnutzung der möglichen Mengenreduzierung in Planungsperiode 7 also ein Ergebnismrückgang von 12085 €. Die Ergebniseinbußen aufgrund der Stückkostenerhöhung können direkt kompensiert werden, indem die Preisfunktion die Veränderung der Stückkosten 1:1 abbildet. Darüber hinaus ist auch eine teilweise Kompensationen der entgangenen Deckungsbeiträge möglich. Da hierfür komplexere Überlegungen anzustellen sind, sei an dieser Stelle jedoch auf die Arbeit von MÜLLER (2011) verwiesen, in der dieser Aspekt thematisiert wird.

Neben der Absicherung von Vertragskonditionen ist schließlich für die Gestaltung der Mengenflexibilität ein wesentlicher Nutzen aus der Methode zu ziehen: Durch das Aufzeigen der Grenzen des Flexibilitätspotentials können gezielte Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden, um einem Kunden die benötigte Mengenflexibilität zu angemessenen Konditionen bereitzustellen. Insbesondere ermöglicht die Bewertung eine proaktive Flexibilitätsgestaltung, da die Grenzen der Mengenflexibilität aufgedeckt werden, bevor sie in der Realität tatsächlich erreicht werden und zu Missmut beim Kunden führen.

Auch dieser Punkt kann anhand des Anwendungsszenarios plausibilisiert werden, wobei auf den bereits oben vorgestellten Kundenwunsch hinsichtlich der geforderten Mengenerhöhungen zurückgegriffen wird: Besteht der Kunde auf die genannten Flexibilitätsanforderungen, so muss die verfügbare Flexibilität in den Planungsperioden 2 bis 4 gezielt erhöht werden (vgl. Gl. 61), damit in diesen Perioden Mengenanpassungen von +50 Stück mit einer Sicherheit von 80% realisiert werden können. Mithilfe der Simulation lassen sich dabei bestimmte Systemparameter gezielt verändern, um zu überprüfen, ob diese Änderungen zu dem gewünschten Ergebnis führen. Auf diese Weise kann die Flexibilitätsplanung abgesichert und Auswirkungen auf die Stückkosten antizipiert werden. Ein monetärer Nutzen ergibt sich durch die Einsparung von Kosten, die aus eventuellen Planungsfehlern resultieren. Dies sind zum einen die Kosten für die Implementierung überflüssiger

Flexibilitätsmaßnahmen, sowie zum anderen Kosten wie z. B. Pönalen, die von einer nach wie vor unzureichenden Flexibilität herrühren.

Abschließend sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Kosten- bzw. Ergebnisauswirkungen, die mithilfe der Bewertungsmethode erzielt werden können, in den vorstehenden Beispielen zwar betragsmäßig relativ gering ausfallen, dies jedoch auf das bewusst einfach gehaltene Anwendungsszenario zurückzuführen ist. Das in dem Szenario dargestellte Unternehmen verfügt darüber hinaus bereits über ein verhältnismäßig ausgewogenes Maß an Flexibilität, so dass sich ein monetärer Nutzen aus der Methodenanwendung in Grenzen hält. Anstelle einer Bewertung, wie hoch der Nutzen der Methode ausfällt, dienen die gezeigten Beispiele zur Veranschaulichung des Nutzens vielmehr der Orientierung, wie der Nutzen der Methode in einem konkreten Anwendungsfall bestimmt werden kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Produzierende Unternehmen sind bei der Produktionsplanung zahlreichen Unsicherheiten aus dem Unternehmensumfeld ausgesetzt, die sich unter anderem in kurzfristigen Änderungen des Mengenbedarfs, der Liefertermine oder der nachgefragten Produktvarianten äußern. Flexibilität als Möglichkeit, kurzfristig und reversibel Anpassungen als Reaktion auf geänderte Randbedingungen vorzunehmen, ist für diese Unternehmen ein wesentlicher Erfolgsfaktor für effizientes Wirtschaften. Da Unternehmen nicht den vollen Umfang der Wertschöpfung an einem Produkt selbst tragen, sondern über zahlreiche Kunden-Lieferanten-Beziehungen in Wertschöpfungsnetze eingebunden sind, ist es nicht ausreichend, wenn die Unternehmen für sich genommen flexibel sind. Vielmehr müssen Lieferketten einzelner Produkte innerhalb der Wertschöpfungsnetze hinsichtlich ihrer Flexibilität abgestimmt werden. Ein zunehmend genutztes Instrument dafür ist die Vereinbarung von Flexibilität in Rahmenverträgen mit Kunden und Lieferanten.

Gegenstand der Rahmenverträge ist häufig die Mengenflexibilität, die einem Kunden beim Abruf von benötigten Produkten zugestanden wird. Obwohl solche Vereinbarungen bereits üblich sind, fehlen bisher Ansätze, um die Mengenflexibilität zu bestimmen, die ein lieferndes Unternehmen seinem Kunden unter Berücksichtigung von Restriktionen aus dem Wertschöpfungsnetz zur Verfügung stellen kann. In der vorliegenden Arbeit wurde daher eine Methode entwickelt, mit der sich Mengenflexibilitätskorridore für verschiedene Planungszeitpunkte ermitteln lassen, die dem Kunden für ein bestimmtes Produkt unter der Annahme eines definierten Sicherheitsniveaus vertraglich zugesichert werden können. Darüber hinaus liefert die Bewertungsmethode Anhaltspunkte dafür, mit welchen Stückkostenänderungen in der Produktion bei Inanspruchnahme der Mengenflexibilität zu den jeweiligen Planungszeitpunkten zu rechnen ist.

Nach der Definition wesentlicher Begrifflichkeiten und der Erläuterung des Untersuchungsfelds der Flexibilität in Wertschöpfungsnetzen erfolgte in der vorliegenden Arbeit zunächst eine Darstellung von geläufigen Modellen zur Vereinbarung von Flexibilität in Rahmenverträgen. Daran anschließend wurden Gestaltungsfaktoren mengenflexibler Produktionssysteme vorgestellt und systematisiert. Hierbei wurden die Gestaltungsfaktoren in zwei Kategorien – Hilfsfaktoren und Stellfaktoren – eingeteilt, wobei lediglich Stellfaktoren im Rahmen flexiblen Handelns Spielräume für Entscheidungen eröffnen. Weiterhin fand eine Vorstellung und Diskussion von bestehenden Methoden zur Flexibilitätsbewertung statt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die meisten Methoden auf Kennzahlen für flexible Produktionssys-

teme abzielen, die für den Vergleich von Planungsalternativen oder für Benchmarking-Zwecke herangezogen werden können. Der wesentliche Teil dieser Methoden ist zudem auf langfristige Betrachtungen ausgelegt und vernachlässigt zeitliche Randbedingungen der Flexibilität. Nur wenige eignen sich für die Quantifizierung konkreter Mengenspielräume unter Berücksichtigung kurzfristiger zeitlicher Restriktionen, diese sind aber auf bestimmte Anwendungsfälle beschränkt. Die Notwendigkeit nach einer Methode zur Bestimmung der kundenspezifisch möglichen Mengenflexibilität wurde offensichtlich.

Aufbauend auf den wissenschaftlichen Grundlagen wurden Anforderungen an eine entsprechende Methode formuliert, die sich insbesondere auf die übergeordnete Zielsetzung der Rahmenvertragsgestaltung aber auch auf die Realitätsnähe und die Anwendbarkeit der Methode beziehen. Anschließend wurde ein Simulationskonzept für die Durchführung der Bewertung entworfen. Es basiert auf der Simulation von verschiedenen zufällig erzeugten Bedarfsszenarien, für die jeweils die bestehende Mengenflexibilität ermittelt wird. Als Endergebnis werden schließlich die beobachteten Mengenflexibilitätsspielräume über alle Szenarien hinweg mit Methoden der deskriptiven Statistik ausgewertet. Die Darstellung der Bewertungsergebnisse orientiert sich dabei an einem Referenzmodell für eine idealtypische Rahmenvertragsvereinbarung. Im Rahmen der Konzeption zeigte sich, dass die Flexibilitätsarten *Kapazitätsflexibilität*, *Routenflexibilität* und *Materialflexibilität* sowie das Bestellverhalten der Kunden die entscheidenden Faktoren sind, die in eine derartige Simulation eingebunden werden müssen.

Das Bewertungskonzept wurde im weiteren Verlauf der Arbeit detailliert. Dabei wurden zunächst generische Modelle zur Beschreibung der Flexibilitätsfaktoren im Kontext eines flexiblen Produktionssystems entwickelt bzw. aus der Literatur adaptiert. Darauf aufbauend erfolgt eine Erläuterung der Berechnungsschritte, die im Rahmen der Simulation durchzuführen sind. Es zeigte sich, dass dabei Kernaspekte in der Umsetzung von Entscheidungen liegen, die während der Simulation über Anpassungsmaßnahmen im Rahmen der Flexibilität zu treffen sind. Hierfür wurden exemplarische Algorithmen aufgezeigt. Die Ausformulierung der Methode endete mit einer detaillierten Erklärung der Auswertung und Interpretation der Simulationsergebnisse.

Anhand einer beispielhaften Anwendung der Bewertungsmethode wurden schließlich die Vorgehensweise bei einer praktischen Implementierung und mögliche Bewertungsergebnisse samt ihrer Interpretation aufgezeigt. In Form einer Aufwands-

Nutzen-Abschätzung erfolgte schließlich die Bewertung der Methode hinsichtlich ihres Einsatzes in der Praxis.

Weitere Forschungsarbeiten, die auf der beschriebenen Methode zur Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilitätsprofile aufbauen, könnten in zwei Richtungen führen. Zum einen sollte untersucht werden, wie die bestehende Simulationssystematik dahingehend genutzt werden kann, gezielte Verbesserungsansätze zur Gestaltung der Mengenflexibilität des betrachteten Unternehmens abzuleiten. Denkbar ist dabei z. B. die Untersuchung der während der Simulation auftretenden Flexibilitätsengpässe, also derjenigen Elemente, die für eine Beschränkung der Mengenflexibilität verantwortlich sind. Hierdurch ließe sich ableiten und simulativ validieren, welche zusätzlichen Maßnahmen zur Anpassung der Mengenausbringung zusätzlich zu den bestehenden vorgenommen werden sollten.

Zum zweiten sind weitere Untersuchungen notwendig, um die beschriebene Methode für einen breiteren Einsatz in der Praxis zu qualifizieren. Eine wesentliche Voraussetzung dafür besteht darin, die Implementierung von Entscheidungsalgorithmen derart zu unterstützen, dass eine Umsetzung der in einem Unternehmen vorherrschenden Entscheidungsstrategien für einen Mitarbeiter mit vertretbarem Aufwand zu realisieren ist. Bisher sind für die Erstellung eines effizienten Algorithmus je nach Komplexität des Entscheidungsproblems mehr oder weniger umfangreiche Kenntnisse aus dem Bereich des Operations Research notwendig. Um die Geschwindigkeit der Entscheidungen während der Simulation weiter zu beschleunigen, sollten weitere Optimierungs- und Suchverfahren hinsichtlich ihrer Eignung überprüft werden. Denkbar ist hierbei auch der Einsatz von wissensbasierten Systemen.

Ein weiterer Punkt zur Qualifizierung der Methode für den Praxiseinsatz setzt an den in Abschnitt 3.7 getroffenen Annahmen und Vereinfachungen an. Die sukzessive Auflösung dieser Restriktionen ist für den Einsatz unter verschiedenen Randbedingungen notwendig, wobei darauf geachtet werden muss, dass der rechentechnische Aufwand bei einem höheren Detaillierungsgrad nicht unverhältnismäßig ansteigt. Ferner kann untersucht werden, wie die für die Bewertung notwendigen Daten, die zum großen Teil bereits in gängigen PPS- oder ERP-Systemen vorliegen, aus diesen Systemen gewonnen und in ein für die Simulation notwendiges Format transformiert werden können. In diesem Zusammenhang ist es auch denkbar, die Methode als Funktion in ERP-Systemen zu implementieren.

7 Literaturverzeichnis

ABELE ET AL. 2006

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. 2008A

Abele, E.; Kuhn, S. M.; Hueske, B.: Overall Equipment Flexibility. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* 103 (2008) 5, S. 322-327.

ABELE ET AL. 2008B

Abele, E.; Rumpel, G.; Kuhn, S. M.: Flexible Produktionskonzepte für die saisonale Produktion. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* 103 (2008) 9, S. 585-588.

ABELE ET AL. 2010

Abele, E.; Wiegel, F.; Kuske, P.; Hueske, B.: Kleine Schritte für große Flexibilität. *wt Werkstatttechnik online* 100 (2010) 4, S. 291-297.

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: *Zukunft der Produktion*. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

ALICKE 2002

Alicke, K.: Engpässe vermeiden. *MM MaschinenMarkt* 17 (2002), S. 38-41.

APICS 2008

Blackstone, John H. (Hrsg.): *APICS Dictionary*. Athens: APICS 2008. ISBN: 1-55822-199-9.

ARNOLDS ET AL. 2010

Arnolds, H.; Heege, F.; Röh, C.; Tussing, W.: *Materialwirtschaft und Einkauf*. 11. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2010. ISBN: 978-3-8349-0809-4.

AURICH ET AL. 2003

Aurich, J.; Barbian, P.; Wagenknecht, C.: Prozessmodule zur Gestaltung flexibilitätsgerechter Produktionssysteme. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* 98 (2003) 5, S. 214-218.

BARTHEL 2006

Barthel, H.: *Modell zur Analyse und Gestaltung des Bestellverhaltens für die variantenreiche Serienproduktion*. Diss. Universität Stuttgart (2006). Heimsheim: Jost-Jetter 2006. ISBN: 3-939890-02-2. (IPA-IAO Forschung und Praxis 449).

BASSOK & ANUPINDI 1997

Bassok, Y.; Anupindi, R.: Analysis of supply contracts with total minimum commitment. *IIE Transactions* 29 (1997) 5, S. 373-381.

BASSOK & ANUPINDI 2008

Bassok, Y.; Anupindi, R.: Analysis of Supply Contracts with Commitments and Flexibility. *Naval Research Logistics* 55 (2008) 5, S. 459-477.

BEACH ET AL. 2000

Beach, R.; Muhlemann, A. P.; Price, D. H.; Paterson, A.; Sharp, J. A.: A review of manufacturing flexibility. *European Journal of Operational Research* 122 (2000), S. 41-57.

BETGE 1996

Betge, P.: Kapazität und Beschäftigung. In: Kern, W. et al. (Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1996, S. 852-861. ISBN: 3-7910-8044-X.

BLECHER 2006

Blecher, T.: *Status quo des Supply-Chain-Management*. Saarbrücken: VDM Müller 2006. ISBN: 3-86550-253-9.

BRANKAMP ET AL. 1996

Brankamp, K.; Eversheim, W.; Klevers, T.; Krause, F. L.; Massberg, W.; Pritschow, G.; Tönshoff, H. K.: *Produktentstehung*. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): *Betriebshütte*. Berlin: Springer 1996. ISBN: 3-540-59360-8.

BROCKWELL & DAVIS 2002

Brockwell, P. J.; Davis, R. A.: *Introduction to time series and forecasting*. 2. Aufl. New York: Springer 2002. ISBN: 978-0-387-95351-9. (Springer texts in statistics).

BROWNE ET AL. 1984

Browne, J.; Dubois, D.; Rathmill, K.; Sethi, S. P.; Stecke, K. E.: *Classification of flexible manufacturing systems*. *The FMS Magazine* (1984), S. 114-117.

BUNGARTZ ET AL. 2009

Bungartz, H.-J.; Buchholz, M.; Pflüger, D.; Zimmer, S.: *Modellbildung und Simulation*. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-79809-5. (eXamen.press).

CAKANYILDIRIM & ROUNDY 2002

Cakanyildirim, M.; Roundy, R. O.: SeDFAM: Semiconductor Demand Forecast Accuracy Model. *IIE Transactions* 34 (2002) 5, S. 449-465.

CHAND ET AL. 2002

Chand, S.; Hsu, V. N.; Sethi, S.: Forecast, Solution, and Rolling Horizons in Operations Management Problems. *Manufacturing & Service Operations Management* 4 (2002) 1, S. 25-43.

CHRYSSOLOURIS 1996

Chryssolouris, G.: *Flexibility and Its Measurement*. *Annals of the CIRP* 45 (1996) 2, S. 581-587.

CHRYSSOLOURIS 2006

Chryssolouris, G.: *Manufacturing Systems*. New York: Springer 2006. ISBN: 978-0-387-25683-2. (Mechanical Engineering Series).

COTTIN & DÖHLER 2009

Cottin, C.; Döhler, S.: *Risikoanalyse*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage 2009. ISBN: 978-3-8348-0594-2.

COX 1989

Cox, T.: Toward the measurement of manufacturing flexibility. *Production and Inventory Management Journal* 30 (1989) 1, S. 68-72.

COYLE 1996

Coyle, R. G.: *System Dynamics Modelling*. London: Chapman & Hall 1996. ISBN: 0-412-61710-2.

DAS 1996

Das, S. K.: The Measurement of Flexibility in Manufacturing Systems. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 8 (1996) 1, S. 67-93.

DAS & ABDEL-MALEK 2003

Das, S. K.; Abdel-Malek, L.: Modeling the flexibility of order quantities and lead-times in supply chains. *International Journal of Production Economics* 85 (2003) 2, S. 171-181.

DIDEHKHANI ET AL. 2009

Didekhani, H.; Jassbi, J.; Pilevari, N.: Assessing Flexibility in Supply Chain Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. In: Hongyi Sun et al. (Hrsg.): *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2009 (IEEM 2009)*. Piscataway: IEEE 2009, S. 513-517. ISBN: 978-1-4244-4869-2.

DUDEN 2010

Scholze-Stubenrecht, W.; Schoch, M.; Wermke, M. (Hrsg.): *Duden*. Mannheim: Dudenverlag 2010. ISBN: 978-3-411-04015-5. (Der Duden Bd. 1).

ELMARAGHI 1993

ElMaraghy, H. A.: Evolution and Future Perspectives of CAPP. *Annals of the CIRP* 42 (1993) 2, S. 739-751.

ERLACH 2007

Erlach, K.: *Wertstromdesign*. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-37178-6. (VDI-Buch).

EVERSHEIM 2002

Eversheim, W.: *Organisation in der Produktionstechnik*. 4. Aufl. Berlin: Springer 2002. ISBN: 3-540-42016-9. (Organisation in der Produktionstechnik 3).

FALKENHAUSEN 2011

Falkenhausen, F.: *Operational Excellence. Das Fitnessprogramm für Ihr Unternehmen*. 3. VDMA-Kongress Intelligenter Produzieren. Würzburg, 10. Mai 2011.

FANDEL ET AL. 1994

Fandel, G.; François, P.; Gubitz, K.-M.: *PPS-Systeme*. Berlin: Springer 1994. ISBN: 3-540-58393-9.

FANDEL & GUBITZ 2008

Fandel, G.; Gubitz, K.-M.: ERP-Systeme für Industrie-, Handels- und Dienstleistungsunternehmen (111 ERP-Systeme im direkten Vergleich). Hagen: AIP-Institut 2008. ISBN: 3-9805756-2-4.

FELDMANN & SLAMA 2001

Feldmann, K.; Slama, S.: Highly flexible Assembly – Scope and Justification. Annals of the CIRP 50 (2001) 2, S. 489-498.

FRIESE 2008

Friese, M.: Planung von Flexibilitäts- und Kapazitätsstrategien für Produktionsnetzwerke der Automobilindustrie. Diss. Leibniz Universität Hannover (2008). Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum 2008. ISBN: 978-3-939026-83-9. (Berichte aus dem IFA).

GERWIN 1987

Gerwin, D.: An Agenda For Research on the Flexibility of Manufacturing Processes. International Journal of Operations & Production Management 7 (1987) 1, S. 38-49.

GERWIN 1989

Gerwin, D.: Manufacturing Flexibility in the CAM Era. Business Horizons 32 (1989) 1, S. 78-84.

GÖBEL 2005

Göbel, C.: Flexible interorganisatorische Kopplung von Geschäftsprozessen: Simulative Flexibilitätsanalyse am Beispiel einer Automotive Supply Chain. Diss. Universität Bayreuth (2004). Berlin: Logos 2005. ISBN: 3-8325-0785-X.

GOMEZ-PADILLA ET AL. 2005

Gomez-Padilla, A.; Duvallat, J.; Llerena, D.: Contract Typology as a Research Method in Supply Chain Management. In: Kotzab, H. et al. (Hrsg.): Research Methodologies in Supply Chain Management. Heidelberg: Physica 2005, S. 525-538. ISBN: 978-3-7908-1583-2.

GOTTSCHALK 2007

Gottschalk, L. L.: Flexibilitätsprofile. Diss. ETH-Zürich (2005). Zürich: vdf Hochschulverlag 2007. ISBN: 978-3-7281-3135-5.

GRONAU 2010

Gronau, N.: Enterprise Resource Planning. 2. Aufl. München: Oldenbourg 2010. ISBN: 978-3-486-53050-0.

GROOTE 1994

Groote, X. de: The Flexibility of Production Processes: A General Framework. Management Science 40 (1994) 7, S. 933-945.

GUPTA & GOYAL 1989

Gupta, Y. P.; Goyal, S.: Flexibility of manufacturing systems. European Journal of Operational Research 43 (1989) 2, S. 119-135.

HABICHT 2009

Habicht, C.: Einsatz und Auslegung zeitfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten. Diss. Technische Universität München (2008). München: Utz 2009. ISBN: 978-3831608911. (Forschungsberichte IWB 232).

HAGEMANN 2009

Hagemann, F.: Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen. Diss. Technische Universität München (2008). München: Utz 2009. ISBN: 978-3-8316-0861-4. (Forschungsberichte IWB 226).

HILLIER & LIEBERMAN 2001

Hillier, F. S.; Lieberman, G. J.: Introduction to operations research. 7. Aufl. Boston: McGraw-Hill 2001. ISBN: 0-07-232169-5. (McGraw-Hill series in industrial engineering and management science).

HOLT 2004

Holt, C. C.: Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. International Journal of Forecasting 20 (2004) 1, S. 5-10.

ILIEV 2007

Iliev, N.: Flexibilität in Rahmenverträgen. Diss. ETH-Zürich (2007). Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2007. ISBN: 978-3-8350-0902-8.

JACK & RATURI 2002

Jack, E. P.; Raturi, A.: Sources of volume flexibility and their impact on performance. Journal of Operations Management 20 (2002) 5, S. 519-548.

JACK & RATURI 2003

Jack, E. P.; Raturi, A. S.: Measuring and comparing volume flexibility in the capital goods industry. Production and Operations Management 12 (2003) 4, S. 480-501.

JACOB 1990

Jacob, H.: Flexibilität und ihre Bedeutung für die Betriebspolitik. In: Adam, D. et al. (Hrsg.): Integration und Flexibilität. Wiesbaden: Gabler 1990, S. 15-60. ISBN: 3-409-13210-4.

JARRE & STOER 2004

Jarre, F.; Stoer, J.: Optimierung. Berlin: Springer 2004. ISBN: 3-540-43575-1.

KALUZA 1994

Kaluza, B.: Rahmenentscheidung zu Kapazität und Flexibilität produktionswirtschaftlicher Systeme. In: Corsten, H. (Hrsg.): Handbuch Produktionsmanagement. Wiesbaden: Gabler 1994, S. 51-72. ISBN: 3409199594.

KALUZA 2007

Kaluza, B.: Flexibilität in Produktionssystemen und Produktionsnetzwerken. In: Hausladen, I. et al. (Hrsg.): Management am Puls der Zeit. München: TCW Transfer-Centrum-Verlag 2007, S. 873-882. ISBN: 978-3-937236-62-7.

KALUZA & BLECKER 2005

Kaluza, B.; Blecker, T.: Flexibilität. In: Kaluza, B. et al. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Flexibilität. Berlin: Schmidt 2005, S. 1-25. ISBN: 3-503-08367-7.

KALUZA ET AL. 2005

Kaluza, B.; Blecker, T.; Behrens, S. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Flexibilität. Berlin: Schmidt 2005. ISBN: 3-503-08367-7.

KESSINGER & PIEPER 2005

Kessinger, C.; Pieper, H.: Managing Risk with Structured Supply Agreements. In: An, C. et al. (Hrsg.): Supply Chain Management on Demand. Berlin: Springer 2005, S. 143-165. ISBN: 978-3-540-24423-3.

KINKEL ET AL. 2007

Kinkel, S.; Lay, G.; Jäger A.: Mehr Flexibilität durch Organisation. Karlsruhe: Fraunhofer ISI 2007. (Mitteilungen aus der ISI-Erhebung zur Modernisierung der Produktion 42).

KINKEL & SPOMENKA 2010

Kinkel, S.; Spomenka, M.: Flexibilitäts- und Stabilitätsstrategien in der deutschen Industrie. Karlsruhe: Fraunhofer ISI 2010. (Mitteilungen aus der ISI-Erhebung zur Modernisierung der Produktion 54).

KORVES & KREBS 2009

Korves, B.; Krebs, P.: Bewertung von Flexibilität in Fabrikplanungsprojekten. MB-Revue (2009) Jahreshauptausgabe, S. 92–94.

KREBS ET AL. 2009

Krebs, P.; Müller, N.; Reinhardt, S.; Schellmann, H.; Bredow, M. von; Reinhart, G.: Ganzheitliche Risikobewertung für produzierende Unternehmen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 104 (2009) 4, S. 174-181.

KREYSZIG 1968

Kreyszig, E.: Statistische Methoden und ihre Anwendungen. 3. Aufl. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht 1968.

KURBEL 2005

Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management. 6. Aufl. München: Oldenbourg 2005. ISBN: 3-486-57578-3.

LANZA ET AL. 2010

Lanza, G.; Rühl, J.; Peters, S.: Monetäre Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen. wt Werkstatttechnik online 100 (2010) 6, S. 530-534.

LAY ET AL. 2003

Lay, G.; Meier, H.; Schramm, J.; Werding, A.: Betreiben statt Verkaufen. Industrie Management 19 (2003) 4, S. 9-13.

LEE ET AL. 1997

Lee, H. L.; Padmanabham, V.; Whang, S.: The Bullwhip Effect in Supply Chains. Sloan Management Review (1997) Spring, S. 93-102.

LIAN & DESHMUKH 2009

Lian, Z.; Deshmukh, A.: Analysis of supply contracts with quantity flexibility. *European Journal of Operational Research* 196 (2009) 2, S. 526-533.

LÖDDING 2008

Lödding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung*. 2. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-76859-3.

LUDEWIG 2005

Ludewig, D.: Personalkapazitäten effizient planen und nutzen. *PPS Management* 10 (2005) 3, S. 53-55.

LUMMUS & VOKURKA 1999

Lummus, R. R.; Vokurka, R. J.: Defining supply chain Management. *Industrial Management and Data Systems* 99 (1999) 1, S. 11-17.

MAKRIDAKIS ET AL. 1998

Makridakis, S. G.; Wheelwright, S. C.; Hyndman, R. J.: *Forecasting*. 3. Aufl. New York: Wiley 1998. ISBN: 0-471-53233-9.

MARSCHAK & NELSON 1962

Marschak, T.; Nelson, R.: Flexibility, Uncertainty and Economic Theory. *Metroeconomica* 14 (1962) 1, S. 42-58.

MÄRZ ET AL. 2011

März, L.; Rose, O.; Weigert, G.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-14536-0.

MEIER ET AL. 2008

Meier, H.; Golembiewski, M.; Quade, N.: Design concept for a transparent supply chain. *Production Engineering* 2 (2008) 3, S. 311-315.

MICHALEWICZ & FOGEL 2000

Michalewicz, Z.; Fogel, D. B.: *How to solve it*. Berlin: Springer 2000. ISBN: 978-3-540-22494-5.

MÖLLER 2006

Möller, K.: *Wertschöpfung in Netzwerken*. Habil. Universität Stuttgart (2006). München: Vahlen 2006. ISBN: 978-3-8006-3326-5. (Controlling).

MÖLLER 2008

Möller, N.: *Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme*. Diss. Technische Universität München (2008). München: Utz 2008. ISBN: 978-3-8316-0778-5. (Forschungsberichte IWB 212).

MÜLLER 2011

Müller, N.: *Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen*. Diss. Technische Universität München (2009). München: Utz 2011. ISBN: 978-3-8316-0992-5.

MUN 2006

Mun, J.: *Modeling risk*. Hoboken: Wiley 2006. ISBN: 0-471-78900-3. (Wiley finance series).

NAHMIAS 2009

Nahmias, S.: Production and operations analysis. 6. Aufl. New York: McGraw-Hill 2009. ISBN: 978-007-126370-2.

NARAIN ET AL. 2000

Narain, R.; Yadav, R. C.; Sarkis, J.; Cordeiro, J. J.: The strategic implications of flexibility in manufacturing systems. International Journal of Agile Management Systems 2 (2000) 3, S. 202-213.

NEISE & BREDOW 2006

Neise, P.; Bredow, M. von: Gestaltung von Wertschöpfungsnetzen. In: Hoffmann, H. et al. (Hrsg.): münchener kolloquium. München, 9.-10. März 2006. München: Utz 2006, S. 214-215. ISBN: 3-8316-0575-0.

NEUMANN 1996

Neumann, K.: Produktions- und Operations-Management. Berlin: Springer 1996. ISBN: 3-540-60929-6.

NEUMANN & MORLOCK 2004

Neumann, K.; Morlock, M.: Operations Research. 2. Aufl. München: Hanser 2004. ISBN: 3-446-22140-9.

NYHUIS ET AL. 2008A

Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; Abele, E.; Wörn, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme: Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 1-2, S. 85-91.

NYHUIS ET AL. 2008B

Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2008. ISBN: 978-3-939026-96-9.

OHNO 1993

Ohno, T.: Das Toyota-Produktionssystem. Frankfurt: Campus 1993. ISBN:3-593-37801-9.

PIBERNIK 2001

Pibernik, R.: Flexibilitätsplanung in Wertschöpfungsnetzwerken. Diss. Universität Frankfurt(Main) (2001). Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2001. ISBN: 3-8244-7482-4. (Gabler Edition Wissenschaft).

RATURI & JACK 2004

Raturi, A. S.; Jack, E. P.: Creating a volume-flexible firm. Business Horizons 47 (2004) 6, S. 69-78.

REFA 1997

REFA-Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e.V (Hrsg.): Datenermittlung. München: Hanser 1997. ISBN: 3-446-19059-7. (Methodenlehre der Betriebsorganisation).

REINHART 2000

Reinhart, G.: Im Denken und Handeln wandeln. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Münchner Kolloquium ... nur der Wandel bleibt. München, 16.-17. März 2000. München: Utz 2000, S. 17-40. ISBN: 3-89675-923-X.

REINHART ET AL. 2007

Reinhart, G.; Krebs, P.; Rimpau, C.; Czechowski, D.: Flexibilitätsbewertung in der Praxis. wt Werkstattstechnik online 97 (2007) 4, S. 211-217.

REINHART ET AL. 2008A

Reinhart, G.; Krebs, P.; Schellmann, H.: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit - das richtige Maß finden. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): münchener kolloquium: Innovationen für die Produktion. München, 9. Oktober 2008. München: Utz 2008, S. 45-55. ISBN: 978-3831608447.

REINHART ET AL. 2008B

Reinhart, G.; Rimpau, C.; Nyhuis, P.; Heinen, T.; Abele, E.; Wörn, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 1/2, S. 85-91.

REINHART ET AL. 2010

Reinhart, G.; Spillner, R.; Egbers, J.; Schilp, J.: Individualisierung an Montagearbeitsplätzen. wt Werkstattstechnik online 100 (2010) 9, S. 665-669.

REINHART ET AL. 2008C

Reinhart, G.; Schellmann, H.; Bredow, M. von: Flexibilitätsprofile im Wertschöpfungsnetz. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 4, S. 230-235.

REINHART & SCHELLMANN 2009

Reinhart, G.; Schellmann, H.: Vorgehen zur Ermittlung kundenspezifischer Mengenflexibilitätspotentiale im Wertschöpfungsnetz. In: Müller, E. et al. (Hrsg.): Vernetzt Planen und Produzieren VPP2009. Chemnitz, 17. September 2009. Chemnitz: Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme 2009, S. 171-180.

REINHART & SCHELLMANN 2011

Reinhart, G.; Schellmann, H.: A simulation based approach to evaluate customer-specific volume flexibility of a manufacturing company. In: Hollweg, M. et al. (Hrsg.): 18th International Annual EurOMA Conference. Cambridge, 3. - 6. Juli 2011. Cambridge: University of Cambridge, Institute for Manufacturing 2011. ISBN: 978-1-902546-93-3.

REN ET AL. 2006

Ren, Z. J.; Cohen, M. A.; Ho, T. H.; Terwiesch, C.: Sharing Forecast Information in a Long-term Supply Chain Relationship.
<<http://faculty.haas.berkeley.edu/hoteck/papers/Ren.pdf>> - 15.07.2010.

ROGALSKI 2009

Rogalski, S.: Entwicklung einer Methodik zur Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen. Diss. Universität Karlsruhe (2009). Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe 2009. ISBN: 978-3-86644-383-9. (Reihe Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe 2-2009).

ROGALSKI & OVTCHAROVA 2009

Rogalski, S.; Ovtcharova, J.: Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 104 (2009) 1-2, S. 64-70.

ROSCHER 2008

Roscher, J.: Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie. Diss. Universität Stuttgart (2007). Stuttgart: Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb 2008.

RÜHL 2010

Rühl, J.: Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2010). Aachen: Shaker 2010. ISBN: 978-3-8322-9518-9. (Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 159).

RYAN 2003

Ryan, S. M.: Capacity Expansion with Lead Times and Correlated Random Demand. Naval Research Logistics 50 (2003) 2, S. 167-183.

SADLER 2007

Sadler, I.: Logistics and supply chain integration. Los Angeles: SAGE Publications 2007. ISBN: 978-1-4129-2979-0.

SALVADOR ET AL. 2007

Salvador, F.; Rungtusanatham, M.; Forza, C.; Trentin, A.: Mix flexibility and volume flexibility in a build-to-order environment. International Journal of Operations & Production Management 27 (2007) 11, S. 1173-1191.

SHELLMANN & REINHART 2009

Schellmann, H.; Reinhart, G.: Modelling Flexible Production Systems to Determine Customer-Specific Volume Flexibility. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). München, 5.-7. Oktober 2009. München: Utz 2009, S. 193-202. ISBN: 978-3-8316-0933-8.

SCHERF 2004

Scherf, B.: Ganzheitliches Ressourcenmanagement erfordert Zusammenspiel von PPS und Personaleinsatzplanung. PPS Management 9 (2004) 4, S. 27-30.

SCHIEFERDECKER 2006

Schieferdecker, R.: Produktionsplanung und -steuerung bei flexiblen Arbeitszeiten. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Berlin: Springer 2006, S. 809-832. ISBN: 978-3-540-40306-7.

SCHNETZLER ET AL. 2006

Schnetzler, M.; Nölle, A.; Hasenfuss, K.; Iliev, N.; Ziegenbein, A.: Supply Chain Management und Unternehmenserfolg: Trends und Herausforderungen. Zürich: BWI ETH Zürich 2006.

SCHÖNSLEBEN 2007

Schönsleben, P.: *Integriertes Logistikmanagement*. 5. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-68179-3.

SCHUH ET AL. 2004

Schuh, G.; Gulden, A.; Wemhöner, N.; Kampker, A.: Bewertung der Flexibilität von Produktionssystemen. *wt Werkstattstechnik online* 94 (2004) 6, S. 299-304.

SCHUH 2006

Schuh, G. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-40306-7.

SCHUHR 2005

Schuhr, R.: Einführung in die Prognose saisonaler Zeitreihen mithilfe exponentieller Glättungstechniken und Vergleich der Verfahren von Winters und Harrison. In: Mertens, P. et al. (Hrsg.): *Prognoserechnung*. Heidelberg: Physica-Verlag Heidelberg 2005, S. 39-60. ISBN: 3-7908-0216-6.

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: Flexibility in Manufacturing. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 2 (1990) 4, S. 289-328.

SHEWCHUK & MOODIE 1998

Shewchuk, J. P.; Moodie, C. L.: Definition and Classification of Manufacturing Flexibility Types and Measures. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 10 (1998) 4, S. 325-349.

SHONKWILER & MENDIVIL 2009

Shonkwiler, R. W.; Mendivil, F.: *Explorations in Monte Carlo Methods*. Dordrecht: Springer 2009. ISBN: 978-0-387-87949-9. (Undergraduate Texts in Mathematics).

SIMCHI-LEVI ET AL. 2003

Simchi-Levi, D.; Kaminsky, P.; Simchi-Levi, E.: *Designing and managing the supply chain*. 2. Aufl. Boston: McGraw-Hill/Irwin 2003. ISBN: 0-07-249256-2. (The McGraw-Hill/Irwin series in operations and decision sciences).

SLACK 1983

Slack, N.: Flexibility as a Manufacturing Objective. *International Journal of Operations and Production Management* 3 (1983) 3, S. 4-13.

SMIRNOW & DUNIN-BARKOWSKI 1963

Smirnow, N. W.; Dunin-Barkowski, I. W.: *Mathematische Statistik in der Technik*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1963. (Mathematik für Naturwissenschaft und Technik 9).

SPATH ET AL. 2001

Spath, D.; Sternemann, K.-H.; Lanza, G.: Unternehmensübergreifende Simulation von Geschäftsprozessen. *Industrie Management* 17 (2001) 5, S. 41-44.

STENGEL 1999

Stengel, R. v.: Gestaltung von Wertschöpfungsnetzwerken. Diss. Universität Koblenz (1999). Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1999. ISBN: 3-8244-6906-5. (Gabler Edition Wissenschaft Unternehmensführung & Controlling).

STEVENSON & SPRING 2007

Stevenson, M.; Spring, M.: Flexibility from a supply chain perspective: definition and review. *International Journal of Operations & Production Management* 27 (2007) 7, S. 685-713.

STIGLER 1939

Stigler, G.: Production and Distribution in the Short Run. *The Journal of Political Economy* 47 (1939) 3, S. 305-327.

STOWASSER ET AL. 1994

Stowasser, J. M.; Petschenig, M.; Skutsch, F.; Pichl, R.; Christ, A.; Losek, F.: Stowasser. München: Oldenbourg 1994. ISBN: 3-486-13405-1.

SUAREZ ET AL. 1991

Suarez, F. F.; Cusumano, M. A.; Fine, C. H.: Flexibility and Performance. Working Paper, International Center for Research on the Management of Technology MIT, Cambridge, Massachusetts (1991).

SUAREZ ET AL. 1995

Suarez, F. F.; Cusumano, M. A.; Fine, C. H.: An Empirical Study of Flexibility in Manufacturing. *Sloan Management Review* 37 (1995) 1, S. 25-32.

SUAREZ ET AL. 1996

Suarez, F. F.; Cusumano, M. A.; Fine, C. H.: An Empirical Study of Manufacturing Flexibility in Printed Circuit Board Assembly. *Operations Research* 44 (1996) 1, S. 223-240.

SUDHOFF 2008

Sudhoff, W.: Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion. Diss. Technische Universität München (2007). München: Utz 2008. ISBN: 978-3-8316-0749-5. (Forschungsberichte IWB 208).

SWAMINATHAN & TAYUR 2003

Swaminathan, J. M.; Tayur, S. R.: Stochastic Programming Models for Managing Product Variety. In: Tayur, S. R. et al. (Hrsg.): *Quantitative models for supply chain management*. Boston: Kluwer Academic Publishers 2003, S. 585-624. ISBN: 0-7923-8344-3.

TEMPELMEIER & KUHN 1993

Tempelmeier, H.; Kuhn, H.: *Flexible Fertigungssysteme*. Berlin: Springer 1993. ISBN: 3-540-56905-7.

TERPEND ET AL. 2008

Terpend, R.; Tyler, B. B.; Krause, D. R.; Handfield, R. B.: Buyer-Supplier Relationships: Derived Value over Two Decades. *Journal of Supply Chain Management* 44 (2008) 2, S. 28-55.

TONI & TONCHIA 1998

Toni, A. de; Tonchia, S.: Manufacturing flexibility. *International Journal of Production Research* 36 (1998) 6, S. 1587-1617.

TOUTENBURG & HEUMANN 2008

Toutenburg, H.; Heumann, C.: *Deskriptive Statistik*. 6. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-77787-8. (Springer-Lehrbuch).

TSAY & LOVEJOY 1999

Tsay, A. A.; Lovejoy, W. S.: Quantity Flexibility Contracts and Supply Chain Performance. *Manufacturing & Service Operations Management* 1 (1999) 2, S. 89-111.

TSAY ET AL. 2003

Tsay, A. A.; Nahmias, S.; Agrawal, N.: Modelling Supply Chain Contracts. In: Tayur, S. R. et al. (Hrsg.): *Quantitative models for supply chain management*. Boston: Kluwer Academic Publishers 2003, S. 299-336. ISBN: 0-7923-8344-3.

UPTON 1994

Upton, D. M.: *The Management of Manufacturing Flexibility*. California Management Review 36 (1994) 2, S. 72-89.

VDI 3423

VDI 3423: *Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen*. Berlin: Beuth 2002.

VOSE 1996

Vose, D.: *Quantitative risk analysis*. Chichester: Wiley 1996. ISBN: 0-471-95803-4.

WANG 2008

Wang, Y.-C.: Evaluating flexibility on order quantity and delivery lead time for a supply chain system. *International Journal of Systems Science* 39 (2008) 12, S. 1193-1202.

WANGER 2006

Wanger, S.: *Flexible Arbeitszeitmodelle*. Hamburg: Dashöfer 2006. ISBN: 3-938553-37-5.

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).

WERNER 2008

Werner, H.: *Supply Chain Management*. 3. Aufl. Wiesbaden: Gabler / GWV 2008. ISBN: 978-3-8349-0504-8.

WERNERS 2008

Werners, B.: *Grundlagen des Operations Research*. 2. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-79973-3. (Springer-Lehrbuch).

WESTKÄMPER ET AL. 2000

Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. *wt Werkstattstechnik online* 90 (2000) 1-2, S. 22-26.

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit. wt Werkstattstechnik online 92 (2002) 4, S. 122-127.

WIENDAHL 2009

Wiendahl, H.-P.: Veränderungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 104 (2009) 1-2, S. 32-37.

WIENDAHL ET AL. 1996

Wiendahl, H.-P.; Mertens, P.; Eversheim, W.: Produktionsplanung und -steuerung. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Betriebshütte. Berlin: Springer 1996. ISBN: 3-540-59360-8.

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Kolakowski, M.: Changeable Manufacturing. Annals of the CIRP 56 (2007) 2, S. 783-809.

WIENDAHL ET AL. 2008

Wiendahl, H.-P.; Selaouti, A.; Nickel R.: Proactive supply chain management in the forging industry. Production Engineering 2 (2008) 4, S. 425-430.

WIENDAHL & BREITHAUPT 1998

Wiendahl, H.-P.; Breithaupt, J. W.: Kapazitätshüllkurven - Darstellung flexibler Kapazitäten mit einem einfachen Beschreibungsmodell. Industrie Management 14 (1998) 4, S. 34-37.

WIENDAHL & HEGENSCHIEDT 2006

Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.: Verfügbarkeit von Montagesystemen. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin: Springer 2006, S. 369-406. ISBN: 3-540-36669-5.

WIESE 2010

Wiese, H.: Mikroökonomik. Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-11600-1. (Springer-Lehrbuch).

WILDEMANN 2003

Wildemann, H.: Supply-Chain-Management. München: TCW Transfer-Centrum-Verlag 2003. ISBN: 3-934155-13-8.

WILDEMANN 2010

Wildemann, H.: Logistik Prozeßmanagement. 5. Aufl. München: TCW Transfer-Centrum-Verlag 2010. ISBN: 978-3-934155-61-9.

WINDT 2001

Windt, K.: Engpaßorientierte Fremdvergabe in Produktionsnetzen. Diss. Universität Hannover (2000). Düsseldorf: VDI-Verlag 2001. ISBN: 3-18-357902-2. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 579).

WINKLER ET AL. 2007

Winkler, H.; Sobernig, G.; Kaluza, B.: Flexibilitätsorientierte Lieferantenbewertung. PPS Management 12 (2007) 1, S. 20-23.

WINTERS 1960

Winters, P. R.: Forecasting Sales by Exponentially Weighted Moving Averages. Management Science 6 (1960) 3, S. 324-342.

WÖHE 1973

Wöhe, G.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 11. Aufl. München: Vahlen 1973. ISBN: 3-8006-0404-3.

WOLF & RUNZHEIMER 2009

Wolf, K.; Runzheimer, B.: Risikomanagement und KonTraG. 5. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-8349-1503-0.

ZÄH ET AL. 2005

Zäh, M. F.; Möller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production - The Emperor's New Clothes or Key Factor for Future Success. In: Zäh, 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.

ZÄH & MÜLLER 2007A

Zäh, M. F.; Müller, N.: A modeling approach for evaluating capacity flexibilities in uncertain markets. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 19 (2007) 3, S. 151-172.

ZÄH & MÜLLER 2007B

Zäh, M. F.; Müller, N.: On Planning and Evaluating Capacity Flexibilities in Uncertain Markets. In: ElMaraghy, H.A. et al. (Hrsg.): 2nd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2007). Toronto, 22.-24. Juli 2007 Windsor 2007. ISBN: 978-0-9783187-0-3.

ZAHN ET AL. 2007

Zahn, E.; Hülsmann, O.; Kapmeier, F.; Tilebein, M.: Management von Wechselwirkungen in Supply Chain-Systemen. In: Hausladen, I. et al. (Hrsg.): Management am Puls der Zeit. München: TCW Transfer-Centrum-Verlag 2007, S. 1183-1203. ISBN: 978-3-937236-62-7.

ZEIGLER ET AL. 2000

Zeigler, B. P.; Praehofer, H.; Kim, T. G.: Theorie of Modeling and Simulation. 2. Aufl. San Diego: Academic Press 2000. ISBN: 0-12-778455-1.

ZHANG ET AL. 2003

Zhang, Q.; Vonderembse, M. A.; Lim, J.-S.: Manufacturing flexibility: defining and analyzing relationships among competence, capability, and customer satisfaction. Journal of Operations Management 21 (2003) 2, S. 173-191.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mengenflexibilitätskorridore bei einer rollierenden Planung der Bestellmenge	4
Abbildung 2: Struktur der vorliegenden Arbeit	6
Abbildung 3: Definition von Flexibilität (REINHART ET AL. 2008A)	12
Abbildung 4: Modellierung der Lieferkette nach dem SCOR-Modell (LÖDDING 2008)	15
Abbildung 5: Mengenflexibilität beim Vertragskonzept nach TSAY & LOVEJOY (1999)	24
Abbildung 6: Resultierende Flexibilitätskorridore beim Vertragskonzept nach TSAY & LOVEJOY (1999)	25
Abbildung 7: Anreiz zur Reduzierung der Nachfrageschwankung durch ein Preismodell nach MÜLLER (2011)	28
Abbildung 8: Zusammensetzung der Kapazität eines Arbeitssystems in Anlehnung an KALUZA (1994)	31
Abbildung 9: Bestimmung des Flexibilitätskorridors nach ROGALSKI & OVTCHAROVA (2009)	42
Abbildung 10: Fixkosten-Kapazitätsdiagramm zur Beschreibung der Kostenveränderung bei sich änderndem Kapazitätsbedarf	43
Abbildung 11: Beispiel für ein Kapazitätsflexibilitätsprofil (GOTTSCHALK 2007)	44
Abbildung 12: Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Gewinn eines Produktionssystems und der Standardabweichung der Nachfrage nach MÜLLER (2011)	49
Abbildung 13: Möglichkeiten zur Kapazitätsabstimmung nach SCHUH (2006, S. 49)	51
Abbildung 14: Anforderungen an die Methode zur Mengenflexibilitätsbewertung	57
Abbildung 15: Zusammenhang zwischen Flexibilitätsfaktoren	60

Abbildung 16: Betrachtungsumfang der Untersuchung	65
Abbildung 17: Zulässige Bestellmengenänderungen im Referenzmodell	67
Abbildung 18: Mittlere Stückkostendifferenz durch Bestellmengenanpassungen innerhalb einer Planungsperiode j im Referenzmodell	69
Abbildung 19: Planungshorizont des produzierenden Unternehmens	70
Abbildung 20: Zusammenhang der Flexibilitätskorridore aus Nachfrage- und aus Angebotssicht	71
Abbildung 21: Prinzip der Zeitdiskreten Simulation (in Anlehnung an ZEIGLER ET AL. 2000)	73
Abbildung 22: Prinzip der Monte-Carlo-Methode	75
Abbildung 23: Konzept zum Ablauf der Gesamtsimulation	77
Abbildung 24: Fortschreibung eines Szenarios während eines zeitdiskreten Simulationslaufs	78
Abbildung 25: Vorgehen zur Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilitätsprofile	79
Abbildung 26: Beschreibungsmodell für das Kundenbestellverhalten	85
Abbildung 27: Beschreibungsmodell für das Kundenbestellverhalten bei bestehender Flexibilitätsvereinbarung	88
Abbildung 28: Routenflexibilität durch Prozessalternativen	89
Abbildung 29: Parameter zur Beschreibung der Kapazitätsmaßnahmen	93
Abbildung 30: Modell der Berechnungsschritte während der Simulation	95
Abbildung 31: Algorithmus zur Überschussreduktion von Materialien	101
Abbildung 32: Ablauf zur Vorbestellung von Materialien	102
Abbildung 33: Statusbestimmung bei einer bereits definitiv eingeplanten Maßnahme	106
Abbildung 34: Statusbestimmung bei einer nicht definitiv eingeplanten Maßnahme	106

Abbildung 35: Beispielhafte Ermittlung der Kapazitätshüllkurven	108
Abbildung 36: Verschiebung von Kapazitäten zwischen Arbeitssystemen	110
Abbildung 37: Anpassung des Kapazitätsangebots an den Kapazitätsbedarf	117
Abbildung 38: Aspekte bei der Entscheidung über den Einsatz von Kapazitätsmaßnahmen	120
Abbildung 39: Ermittlung der maximalen Kapazitätserhöhung und -verringering in einem Arbeitssystem n.	126
Abbildung 40: Durchschnittskostenfunktion zur Beschreibung von Stückkostenveränderungen	127
Abbildung 41: Ermittlung von Stützwerten der Durchschnittskostenfunktion	129
Abbildung 42: Histogramm der erhobenen maximalen Mengenerhöhungen in einer Planungsperiode j	131
Abbildung 43: Inverse kumulierte Häufigkeitsverteilung der möglichen Mengenerhöhung in Planungsperiode j	132
Abbildung 44: Kundenspezifisches Mengenflexibilitätsprofil bei einem Sicherheitsniveau von λ	133
Abbildung 45: Histogramm der im Rahmen der Simulation ermittelten Änderung der Durchschnittskosten bei einer Mengenänderung von ε	134
Abbildung 46: Approximierte Stückkostenänderung durch Inanspruchnahme der Mengenflexibilität innerhalb einer Planungsperiode	135
Abbildung 47: Approximierte Stückkostenänderungsfunktion bei einer definierten Mengenanpassung innerhalb des Planungshorizonts.	136
Abbildung 48: Kostenelastizität bei verschiedenen Verläufen der durchschnittlichen Kostenveränderung	137
Abbildung 49: Exemplarische Flexibilitätsauswertung für Planungsperiode 7	147
Abbildung 50: Flexibilitätsprofil der Schweißbaugruppe 1(p_1)	148

Abbildung 51: Stückkostenveränderung durch Mengenanpassungen in Planungsperiode 7	149
Abbildung 52: Stückkostenveränderung im Planungshorizont bei verschiedenen Bestellmengenanpassungen	150
Abbildung 53: Vorgehensschritte bei der Auswahl von Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung	184
Abbildung 54: Mögliche Anwendungszeiträume einer Maßnahmenvariante	185
Abbildung 55: Algorithmus zur Einplanung von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen mit positivem Kapazitätsbeitrag	186
Abbildung 56: Algorithmus zur Einplanung von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen mit negativem Kapazitätsbeitrag	187

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Faktoren zur Erzielung von Mengenflexibilität (REINHART & SCHELLMANN 2011)	36
Tabelle 2:	Unternehmenstypologische Morphologie zur Eingrenzung des Betrachtungsumfangs	63
Tabelle 3:	Allgemeine Parameter der Bewertung	140
Tabelle 4:	Beschreibende Parameter der Produkte	143
Tabelle 5:	Beschreibende Parameter der Materialien	144
Tabelle 6:	Allgemeine beschreibende Parameter der Arbeitssysteme	144
Tabelle 7:	Kapazitätsanpassungsmaßnahmen in der Blechbearbeitung (n ₁)	145
Tabelle 8:	Kapazitätsanpassungsmaßnahmen in der Kleinteile- und in der Baugruppenschweißerei (n ₂ und n ₃)	146
Tabelle 9:	Kapazitätsanpassungsmaßnahmen in der Beschichtung	146

10 Anhang

Algorithmus zur Maßnahmenauswahl

Zur Auswahl von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit der nachfolgend beschriebene Algorithmus umgesetzt und bei der Simulation angewandt. Er baut auf dem Grundprinzip des Greedy-Algorithmus auf (vgl. 4.3.6.4). Bei dem Algorithmus handelt es sich lediglich um eine denkbare Lösung für das in Abschnitt 4.3.6 dargelegte Entscheidungsproblem.

Überblick über die Funktionsweise

Wie in Abschnitt 4.2.4 beschrieben, zeichnen sich die zur Anpassung der Produktionskapazität verfügbaren Maßnahmen unter anderem dadurch aus, dass ihre Nutzungsdauer zwischen einer minimalen und einer maximalen Zeitspanne frei gewählt werden kann. In einem ersten Schritt werden von den grundsätzlich zur Verfügung stehenden Maßnahmen mögliche Varianten abgeleitet, die jeweils eine feste Nutzungsdauer aufweisen. Auf diese Weise wird der Entscheidungsraum pro Maßnahme um eine Dimension reduziert. Die Maßnahmenvarianten werden weiterhin in eine Rangfolge gebracht, nach der die Verwendung der Maßnahmenvarianten zur Kapazitätsanpassung der Rangfolge überprüft wird.

Im zweiten Schritt werden die Maßnahmenvarianten sukzessive ausgewählt und es werden jeweils alle für die Anwendung der Maßnahmenvariante in Frage kommenden Zeiträume im Planungshorizont dahingehend geprüft, ob eine Anwendung sinnvoll und aufgrund der Randbedingungen zulässig ist. Ist dies für einen Zeitraum der Fall, wird die Maßnahmenvariante entsprechend vorgemerkt und so Schritt für Schritt eine Maßnahmenkombination zur Kapazitätsanpassung erzeugt. Bei der Prüfung der Sinnhaftigkeit einer Maßnahmenvariante wird ein Mindestauslastungsgrad der Maßnahme zugrunde gelegt, der bestimmt, welcher Anteil der zusätzlich bereitgestellten Kapazität mindestens genutzt werden muss. Durch die Prüfung verschiedener Mindestauslastungsgrade können verschiedene Maßnahmenkombinationen erzeugt werden.

In einem dritten Schritt werden schließlich unterschiedliche Maßnahmenkombinationen, die zur Erfüllung der Kapazitätsanforderungen führen, anhand der jeweils auftretenden Kosten miteinander verglichen und die kostengünstigste von ihnen ausgewählt. Sollte keine der Maßnahmenkombinationen zur Erfüllung der Anforderungen führen, wird diejenige gewählt, die der vollständigen Erfüllung der Anforderungen am nächsten kommt.

Die drei Vorgehensschritte sind in Abbildung 53 dargestellt. Sie werden nachfolgend detailliert erläutert.

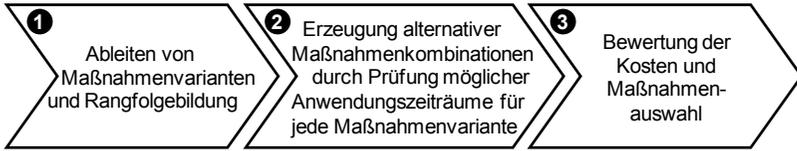


Abbildung 53: Vorgehensschritte bei der Auswahl von Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung

Ableitung von Maßnahmenvarianten und Rangfolgebildung

Zur Reduktion der Entscheidungsdimensionen werden in diesem Schritt alle Varianten einer Maßnahme a mit unterschiedlicher Nutzungsdauer abgeleitet, die innerhalb des Planungshorizonts möglich wären. Die Nutzungsdauer der kürzesten Variante entspricht dabei $t_a^{ND,min}$. Die Nutzungsdauer der längsten entspricht entweder $t_a^{ND,max}$ oder der Periodenanzahl T des Planungshorizonts, die ggf. um eine noch einzuhaltende Aktivierungs- und Regenerationszeit vermindert wird. Dies wird für alle Maßnahmen $a \in \mathcal{A}_n$ des betrachteten Arbeitssystems n durchgeführt.

Anschließend werden sämtliche Maßnahmenvarianten getrennt nach dem Vorzeichen ihres Kapazitätsbeitrags jeweils in eine Rangfolge gebracht, wobei folgende Ordnungsprinzipien zugrunde gelegt werden:

1. Die Ordnung erfolgt absteigend nach der Länge der Nutzungsdauer. Langfristige Maßnahmen stehen somit oben, kurzfristige Maßnahmen unten in der Rangliste.
2. Bei gleicher Nutzungsdauer werden die Maßnahmen aufsteigend nach den Kosten pro Nutzungsperiode geordnet. Die Aktivierungskosten C_a^{akt} werden dafür auf die Nutzungsdauer der Maßnahmenvariante umgelegt.

Die Rangfolge legt fest, nach welcher Reihenfolge die Einplanung der Maßnahmenvarianten geprüft werden soll. Im vorliegenden Fall sollen zunächst langfristige Kapazitätsdiskrepanzen ausgeglichen werden. Dafür sollen jeweils die kostengünstigsten Maßnahmen herangezogen werden.

Erzeugung alternativer Maßnahmenkombinationen durch Prüfung möglicher Einplanungszeiträume für jede Maßnahmenvariante

Zur Erzeugung von Maßnahmenkombinationen werden die in Abbildung 55 und Abbildung 56 dargestellten Algorithmen durchlaufen. Dabei wird zunächst versucht, fehlende Kapazität durch die Einplanung von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen mit positivem Kapazitätsbeitrag bereitzustellen (Algorithmus in Abbildung 55). Hierfür wird sukzessive nach der Rangliste die Anwendbarkeit der Maßnahmenvarianten mit positivem Vorzeichen von ΔK_a folgendermaßen geprüft:

Für den Einsatz einer Maßnahmenvariante kommen meist mehrere Anwendungszeiträume innerhalb des Planungshorizonts in Frage. Der frühestmögliche Einsatz kann in der Regel nach der Aktivierungszeit (und einer ggf. einzuhaltenden Regenerierungszeit) beginnen, der spätestmögliche Einsatz endet am Ende des Planungshorizonts. In Abbildung 54 sind beispielhaft die möglichen Anwendungszeiträume einer Maßnahmenvariante aufgezeigt, die eine Nutzungszeit von vier Perioden und eine Aktivierungszeit von drei Perioden aufweist. Der Planungshorizont umfasst in diesem Beispiel zehn Perioden.

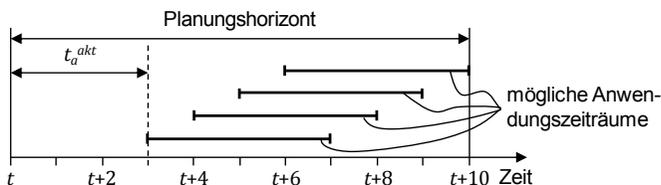


Abbildung 54: Mögliche Anwendungszeiträume einer Maßnahmenvariante

Für jeden möglichen Anwendungszeitraum wird zuerst der durchschnittliche Bedarf an zusätzlicher Kapazität ermittelt. Anschließend werden die Anwendungszeiträume absteigend nach diesem durchschnittlichen Kapazitätsbedarf geordnet. Auf diese Weise entsteht die Rangliste der Anwendungszeiträume, die dazu dient, eine Einplanung der Maßnahmenvariante zunächst in demjenigen Zeitraum vorzusehen, in dem am meisten zusätzliche Kapazität bereitgestellt werden muss.

Die möglichen Anwendungszeiträume werden nun nach und nach dahingehend geprüft, ob die Maßnahmenvariante auch angewandt werden kann. Dies ist der Fall, wenn der Mindestauslastungsgrad der zusätzlichen Kapazität und außerdem alle weiteren Randbedingungen des Maßnahmeneinsatzes erfüllt sind (vgl. 4.3.6.2). Die

Maßnahmenvariante wird dann entsprechend eingeplant und es folgt die Prüfung weiterer Anwendungszeiträume bzw. Maßnahmenvarianten, sofern noch nicht sämtliche Kapazitätsanforderungen erfüllt wurden.

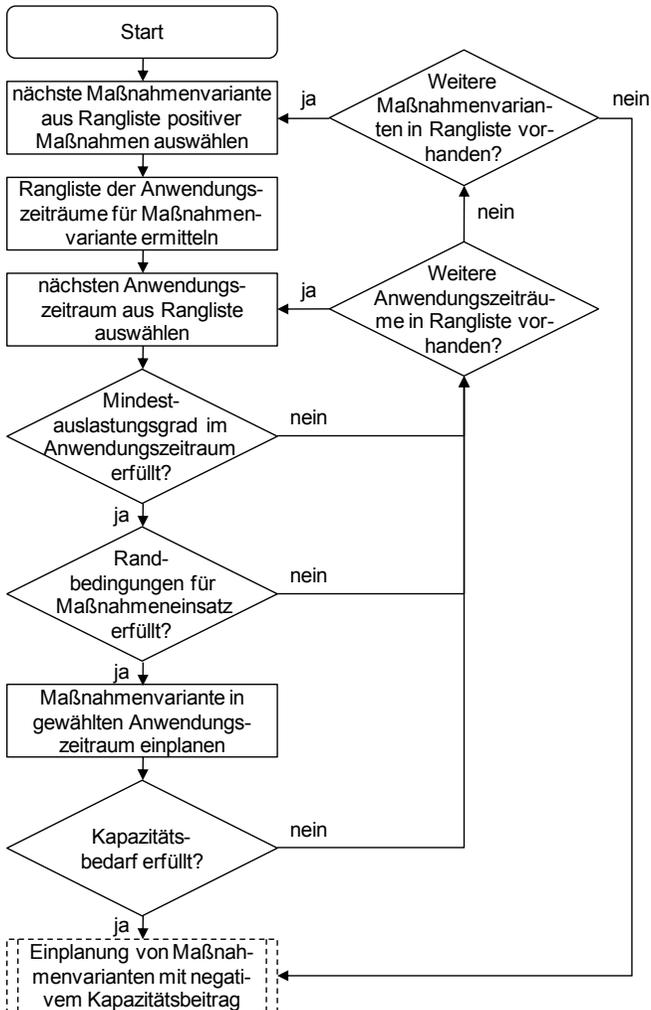


Abbildung 55: Algorithmus zur Einplanung von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen mit positivem Kapazitätsbeitrag

Nach dem Durchlauf zur Einplanung von Maßnahmen mit positivem Kapazitätsbeitrag können weitere Anpassungsmaßnahmen mit negativem Beitrag zur Kapazitätsreduzierung vorgesehen werden, um ggf. Überkapazitäten zu verringern und somit Leerkosten einzusparen. Der Ablauf dafür ist analog zum obigen Ablauf, wobei hier anstelle eines Mindestauslastungsgrads die Bedingung besteht, dass das Kapazitätsangebot den Bedarf nicht unterschreiten darf. Der Algorithmus dafür ist in Abbildung 56 dargestellt.

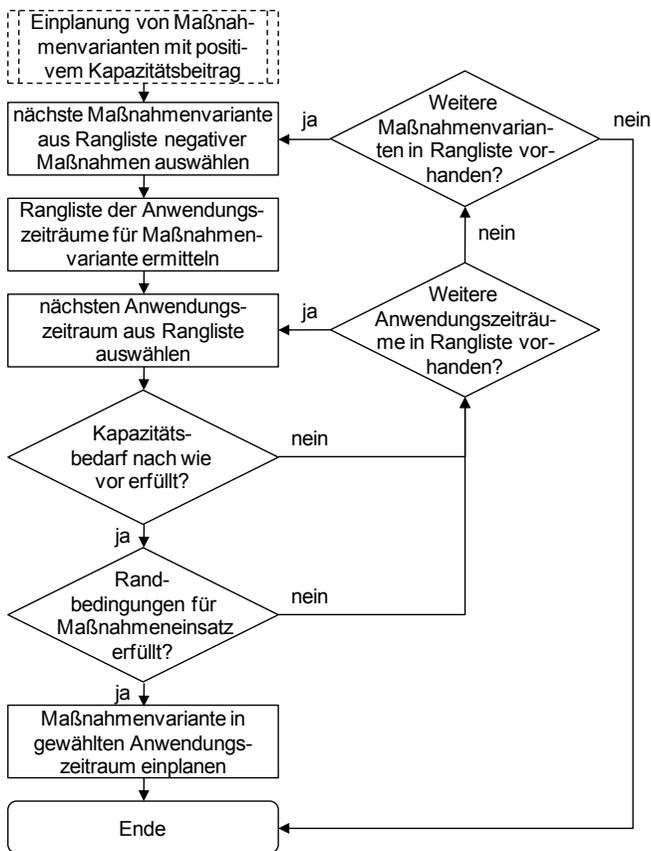


Abbildung 56: Algorithmus zur Einplanung von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen mit negativem Kapazitätsbeitrag

Um beim Einsatz des vorgestellten Algorithmus nicht nur eine einzelne Maßnahmenkombination zu erhalten und das Risiko zu reduzieren, dass keine Kombination gefunden wird, die die notwendige Kapazität bereitstellen kann, wird der beschriebene Algorithmus mehrfach durchlaufen, wobei bei jedem Durchlauf der Mindestauslastungsgrad schrittweise reduziert wird.

Bewertung der Kosten und Maßnahmenauswahl

Die bei den verschiedenen Durchläufen erzeugten Maßnahmenkombinationen werden abschließend miteinander verglichen. Zunächst wird dabei geprüft, welche Kombinationen in der Lage sind, den Kapazitätsbedarf zu erfüllen. Sollte dies bei keinem Ergebnis der Fall sein, wird die Kombination mit dem höchsten Erfüllungsgrad ausgewählt. Führen hingegen mehrere Kombinationen zur Bedarfserfüllung, werden für diese die jeweils damit verbundenen Kosten berechnet und die günstigste Maßnahmenkombination ausgewählt. Diese wird dann als Entscheidungsergebnis für weitere Rechenoperationen innerhalb der Simulation zugrunde gelegt.

Forschungsberichte iwB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwB 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 Moßmer, 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 Kugelman, 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 Schöffebacher, 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 Höhn, 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 Teilerstellung
 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
Ganzheitliche 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 telepräsenster 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 Breiting
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 · 87 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 Berlek
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 Schlickerrieder
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 Verfahrensbewegungen
 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 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold
Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage
 2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis
Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
 2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl
Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
 2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig
Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
 2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck
Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
 2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier
Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
 2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthäus Sigl
Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns
 2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller
Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
 2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner
Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
 2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann
Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
 2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy
Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
 2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 Wolfgang Vogl
Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
 2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 Sonja Schedl
Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
 2009 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 Andreas Trautmann
Bifocal Hybrid Laser Welding – A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
 2009 · 268 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 Patrick Neise
Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
 2009 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 Christian Habicht
Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
 2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 Michael Spitzweg
Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
 2009 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 Ulrich Munzert
Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
 2010 · 176 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 Georg Völlner
Rührreischweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
 2010 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0955-0
- 236 Nils Müller
Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
 2010 · 270 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0992-5
- 237 Franz Decker
Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
 2010 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0996-3
- 238 Christian Lau
Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
 2010 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4012-6
- 239 Christoph Rimpau
Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
 2010 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4015-7
- 240 Michael Loy
Modulare Vibrationswendelförderer zur flexiblen Teilezuführung
 2010 · 169 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4027-0
- 241 Andreas Eursch
Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
 2010 · 205 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4029-4

- 242 Florian Schwarz
Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
 2010 · 256 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4030-0
- 243 Martin Georg Prasch
Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
 2010 · 261 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4033-1
- 244 Johannes Schilp
Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
 2011 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4063-8
- 245 Stefan Lutzmann
Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
 2011 · 222 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4070-6
- 246 Gregor Branner
Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
 2011 · 230 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4071-3
- 247 Josef Ludwig Zimmermann
Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
 2011 · 184 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4091-1
- 248 Clemens Pörnbacher
Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
 2011 · 280 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4108-6
- 249 Alexander Lindworsky
Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
 2011 · 300 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4125-3
- 250 Michael Mauderer
Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
 2011 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4126-0
- 251 Roland Mork
Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
 2011 · 228 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4127-7
- 252 Florian Reichl
Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
 2011 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4128-4
- 253 Paul Gebhard
Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen
 2011 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4129-1
- 254 Michael Heinz
Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
 2012 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4147-5
- 255 Pascal Krebs
Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
 2012 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4156-7
- 256 Gerhard Straßer
Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
 2012 · 290 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4161-1
- 257 Frédéric-Felix Lacour
Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen
 2012 · 222 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4162-8
- 258 Thomas Hensel
Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
 2012 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4167-3

259 Sherif Zaidan

A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots

2012 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4175-8

260 Hendrik Schellmann

Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz

2012 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4189-5

