



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Jens Bürgin

**Robuste Auftragsplanung in
Produktionsnetzwerken**
Mittelfristige Planung der variantenreichen
Serienproduktion unter Unsicherheit der
Kundenauftragskonfigurationen

Band 218

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken
Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter
Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Jens Bürgin
aus Lörrach

Tag der mündlichen Prüfung: 17.09.2018
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn

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.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6237-3

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik des KIT im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Forschungsprojektes „ProRegio – Customer-driven design of product-services and production networks to adapt to regional market requirements“, des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes „FlexAEM – Multikriteriell optimierte Auftragseinplanung für die variantenreiche Serienproduktion in globalen Netzwerken bei volatilem Kundenkaufverhalten“ und des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projektes „Methodische Entscheidungsunterstützung zur mittelfristigen Auftragsplanung in globalen Produktionsnetzwerken der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen“.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferentin und das mir entgegengebrachte Vertrauen in den vergangenen Jahren. Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn für die Übernahme des Korreferats sowie Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans für den Prüfungsvorsitz.

Großer Dank gilt Dr. Frank Bitte von der Airbus Operations GmbH und Hansjörg Tutsch von der flexis AG für die anregenden Diskussionen. Zudem danke ich insbesondere den Studierenden, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten mit großem Engagement und Durchhaltevermögen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Allen Kolleginnen und Kollegen am wbk im Bereich Produktionssysteme danke ich für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Ausdrücklicher Dank gilt an dieser Stelle Fabio Echsler Minguillon, Sina Helming und Andreas Kuhnle für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Vor allem möchte ich mich bei meiner Frau Heike und meinem Sohn Toni bedanken, die mich bedingungslos unterstützt und mich verständnisvoll zur Erstellung dieser Arbeit entbehrt haben. Umfassender Dank gilt meinem Herrn und Gott, der mich mit seiner Güte und Liebe mein Leben lang begleitet.

Karlsruhe, im September 2018

Jens Bürgin

Abstract

Companies nowadays operating production networks to produce multi-variant products such as aircrafts and automobiles face the challenge to make optimal decisions in medium-term production planning under uncertainty of order configurations. This challenge is addressed by the presented approach for robust order planning in production networks by considering the uncertainty of customer order configurations. The approach has the potential to be applied as software in real industrial environments.

If orders have been received in the medium term, but the flexibility to fix order configurations in terms of product options later is offered to customers, scenarios can be generated to model the uncertainty of customer order configurations. An approach for the generation of scenarios representing the workload in final assembly specifically considering potential order configurations of the customers of the orders and including the maximum workload as a worst-case scenario is presented. If orders have not been received in the medium term, planned orders can be generated based on market forecasts. Therefore, a variant tree is applied modelling merely mandatory options to reduce complexity. Non-mandatory options are added after planned orders have been generated based on the variant tree. Scenarios for customer orders as well as planned orders are used as input for an optimization model for the medium-term assignment of orders to periods and locations in a production network. Robustness with respect to workload in final assembly is considered in terms of flexibility and changeability within the model. Customer orders being received after the medium-term assignment of orders are assigned to planned orders using an optimization model taking the reconfiguration flexibility of planned orders into account in order to make them suitable for an assignment, but minimizing the utilization of flexibility in order to achieve robustness of planning. The buildability of reconfigured orders is ensured by a separate algorithm.

The approach is implemented as a software prototype and validated in two industrial use cases. The generation of scenarios and the medium-term assignment of customer orders is validated taking the Airbus A320 family as a use case. The results demonstrate the benefits of a robust optimization. In the second use case, a rule-based product documentation of an automobile manufacturer with about 4×10^{24} theoretically possible variants is used for the generation of orders, their assignment in a production network and the assignment of customer orders to the planned orders. It is demonstrated that several types of reconfiguration flexibility contribute to the robustness of planning.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen	6
2.1 Produktionsnetzwerke	6
2.2 Hierarchische Produktionsplanung	7
2.2.1 Hierarchisches Produktionsplanungssystem	7
2.2.2 Supply Chain Planning Matrix	10
2.3 Absatzplanung und Auftragsannahme	12
2.4 Produktionsprogrammplanung	16
2.5 Materialbedarfsplanung	18
2.6 Ablaufplanung der Variantenfließfertigung	21
2.7 Planung unter Unsicherheit	24
2.7.1 Ergebnisrobustheit	25
2.7.2 Optimalitätsrobustheit	27
2.7.3 Zulässigkeitsrobustheit	27
2.7.4 Informationsrobustheit	29
2.7.5 Planungsrobustheit	29
3 Stand der Forschung	30
3.1 Ansätze zur Auftragsgenerierung	30
3.2 Ansätze zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk	32
3.3 Ansätze zur Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen	36
4 Eigener Ansatz	39
4.1 Auftragsgenerierung	44

4.1.1	Szenariengenerierung für Kundenaufträge	52
4.1.2	Planauftragsgenerierung	56
4.2	Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk	58
4.2.1	Einzelauftragsbezogene Kosten	63
4.2.2	Auftragsabstandskosten	66
4.2.3	Arbeitslastabweichungskosten	68
4.2.4	Level-Scheduling-Kosten	75
4.2.5	Nebenbedingungen	80
4.3	Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen	82
4.3.1	Planauftragsauswahl	85
4.3.2	Planauftragsrekonfiguration	91
5	Implementierung und Validierung	94
5.1	Prototypische Softwareimplementierung	94
5.2	Validierung im Flugzeugbau mit Kundenaufträgen mit unsicheren Auftragskonfigurationen (Fall I)	96
5.2.1	Szenariengenerierung	100
5.2.2	Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk	104
5.3	Validierung im Automobilbau mit Planaufträgen mit unsicheren Zuordnungen zu Kundenaufträgen (Fall II)	124
5.3.1	Planauftragsgenerierung	125
5.3.2	Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk	131
5.3.3	Kundenauftragszuordnung	135
6	Diskussion und Ausblick	144
6.1	Diskussion	144
6.2	Ausblick	146
7	Zusammenfassung	148
	Literaturverzeichnis	151
	Abbildungsverzeichnis	163
	Tabellenverzeichnis	168

Anhang	170
A1 Variantenbaum zur Auftragsgenerierung	171
A2 Szenariengenerierung	172
A3 Planauftragsgenerierung	174
A4 Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk	175
A5 Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen	179
A6 Grafische Benutzeroberfläche	181
A7 Fall I: Optionen und Arbeitslasten	185
A8 Fall I: Ergebnisse der Szenariengenerierung	188
A9 Fall I: Ergebnisse der Auftragseinplanung	189
A10 Fall II: Optionen	208
A11 Fall II: Ergebnisse der Planauftragsgenerierung	211
A12 Fall II: Ergebnisse der Auftragseinplanung	212
A13 Fall II: Ergebnisse der Kundenauftragszuordnung	214

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung	Menge
a	Abschnitt eines bestimmten Auftragsbestands mit Produktionsende innerhalb eines bestimmten Zeitraums	$\{0, \dots, A\} \in \mathbb{N}_0$
a_{ij} bzw. a_{ji}	Abschnitt des Auftrags i bzw. j zur Produktion an Standort l	$\{0, \dots, A\} \in \mathbb{N}_0$
$A_{lts}(x)$	Arbeitslastabweichung an Standort l in Periode t und Szenario s in Abhängigkeit der Auftragseinsparung x	\mathbb{Q}
b_{io}	Binäre Entscheidungsvariable des ganzzahligen Optimierungsmodells hinsichtlich der Änderung der Option o bei Auswahl des Planauftrags i (0: keine Änderung, 1: Änderung)	$\{0, 1\}$
C_i	Cluster des Auftrags i	C_i
$ C_i $	Anzahl an Clustern des Auftrags i	\mathbb{N}
C_{lt}	Kapazitätsangebot an Standort l in Periode t	\mathbb{Q}^+
C_l^{extern}	Kapazität einer externen vollzeitäquivalenten Stelle an Standort l	\mathbb{Q}^+
C_{ai}^{max}	Obere Flexibilitätsgrenze der Kapazitätsflexibilität der unternehmensinternen Mitarbeiter im Abschnitt a_{ij} des ausgewählten Planauftrags i zur Produktion an Standort l	\mathbb{Q}^+
C_{lt}^{max}	Obere Flexibilitätsgrenze der Kapazitätsflexibilität der unternehmensinternen Mitarbeiter an Standort l in Periode t	\mathbb{Q}^+
$C_{lt}^{maxProzent}$	Prozentuale obere Flexibilitätsgrenze der Kapazitätsflexibilität der unternehmensinternen Mitarbeiter an Standort l in Periode t	\mathbb{Q}^+
C_{lt}^{min}	Untere Flexibilitätsgrenze der Kapazitätsflexibilität der unternehmensinternen Mitarbeiter an Standort l in Periode t	\mathbb{Q}^+
$C_{lt}^{minProzent}$	Prozentuale untere Flexibilitätsgrenze der Kapazitätsflexibilität der unternehmensinternen Mitarbeiter an Standort l in Periode t	\mathbb{Q}^+
C_{ai}^{Slot}	Anzahl an Takten ohne Leertakte und somit Anzahl an Slots in Abschnitt a_{ij}	\mathbb{N}_0
C_{ut}^{Slot}	Anzahl an Takten ohne Leertakte und somit Anzahl an Slots einer Linie u in einer Periode t	\mathbb{N}_0
$C_l^{Wandlung}(A_{lts}(x))$	Vollzeitäquivalente, nicht-ganzzahlige Anzahl der an Standort l zu qualifizierenden externen Mitarbeiter in Abhängigkeit der Arbeitslastabweichung $A_{lts}(x)$	\mathbb{Q}^+

$f(x)$	Zielfunktionswert in Abhängigkeit der Auftragseinplanung x	\mathbb{Q}^+
FA_i	Frühestmögliche Auslieferungsperiode des Auftrags i	T
g	Nummerierte Optionsgruppe mit kundenwählbaren Optionen, die nicht Bestandteil des Produktmodells sind, entsprechend der Ebene im Variantenbaum	$\{1, \dots, G\} \in \mathbb{N}$
$g(y)$	Zielfunktionswert in Abhängigkeit der Kundenauftragszuordnung y	\mathbb{Q}^+
G^{muss}	Menge der Muss-Optionsgruppen	$G^{muss} \subseteq \{1, \dots, G\}$
H_{mlt} / N_{mlt}	Sequenzierungsregel des Car-Sequencing bezüglich des Produktmodells m an Standort l in Periode t	$[0, 1]$
$H_o : N_o$	Sequenzierungsregel des Car-Sequencing, kurz Car-Sequencing-Regel, bezüglich Option o	$[0, 1]$
H_{oa_i} / N_{oa_i}	Sequenzierungsregel des Car-Sequencing bezüglich der Option o in Abschnitt a_{ij}	$[0, 1]$
H_{oglt} / N_{oglt}	Sequenzierungsregel des Car-Sequencing bezüglich der Option o_g an Standort l in Periode t	$[0, 1]$
i	Auftrag, ggf. Kundenauftrag oder Planauftrag	I
$ I $	Anzahl an Aufträgen der Menge an Aufträgen I	\mathbb{N}
I^{a_i}	Aufträge des Abschnitts a_{ij}	$I^{a_i} \subseteq I$
$ I_o^{a_i} $	Anzahl an Aufträgen des Abschnitts a_{ij} mit der Option o	\mathbb{N}
i^*	Im Rahmen der Planauftragsauswahl ausgewählter Planauftrag	I
i'	Planauftrag desselben Abschnitts am selben Standort, desselben Produktmodells und desselben Marktes des ausgewählten Planauftrags i^* und somit potentieller Tauschpartner von i^*	I
j	Kundenauftrag mit komplett spezifizierter Auftragskonfiguration zur Kundenauftragszuordnung	J
k bzw. k_i	Kunde bzw. Kunde des Auftrags i , wobei bei Kundenaufträgen $k_i \in K$ und bei Planaufträgen $k_i \in \bar{L}$	$K \cup \bar{L}$
$K^{Abstand}(x)$	Auftragsabstandskosten in Abhängigkeit der Auftragseinplanung x	\mathbb{Q}^+
$K_i^{Abstand}$	Auftragsabstandskosten bei Zuordnung des Kundenauftrags zu Planauftrag i	\mathbb{Q}^+
$K_{io}^{Änderung}$	Kosten für Änderung der Option o bei Auswahl des Planauftrags i entsprechend dessen Abschnitt a_{ij} und somit Standort l	\mathbb{Q}^+

$K^{Arbeitslast}(x)$	Arbeitslastabweichungskosten in Abhängigkeit der Auftragseinplanung x	Q^+
$K_{lts}^{Bestand}$	Bestandskosten des Auftrags i an Standort l in Periode t und Szenario s	Q^+
$K_k^{Bestand}$	Durchschnittlicher Bestandskostensatz eines Kunden k hinsichtlich aller potentiellen Zuordnungen seiner Aufträge zu Standorten L_i^{pot}	Q^+
$K_{il}^{Distribution}$	Kosten zur Distribution des Auftrags i an Standort l	Q^+
$K_{l\bar{k}_i}^{Distribution}$	Kosten zur Distribution von Standort l zum Markt \bar{l}_{k_i} des Kunden k_i von Auftrag i	Q^+
$K^{Einzel}(x)$	Einzelauftragsbezogene Kosten in Abhängigkeit der Auftragseinplanung x	Q^+
K_{lts}^{Einzel}	Einzelauftragsbezogene Kosten des Auftrags i an Standort l in Periode t und Szenario s	Q^+
$K_{lts}^{Flexibilität}(A_{lts}(x))$	Flexibilitätskosten an Standort l in Periode t und Szenario s in Abhängigkeit der Arbeitslastabweichung $A_{lts}(x)$	Q^+
$K_{m,l}^{Lagerhaltung}$	Lagerhaltungskosten für Produktmodell m_i des Auftrags i an Standort l	Q^+
$K^{LS}(x)$	Level-Scheduling-Kosten in Abhängigkeit der Auftragseinplanung x	Q^+
$K_{(m o_g g)l(t)}^{LS,(L T)}$ $(\Delta_{(m o_g g)l(t)(s)}^{LS,(L T)}(x))$	Level-Scheduling-Kosten für Produktmodell m bzw. einzelne Option o_g bzw. Optionsgruppe g an Standort l (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Standorten L) und ggf. in Periode t (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Perioden T) bei Abweichung $\Delta_{(m o_g g)l(t)(s)}^{LS,(L T)}(x)$	Q^+
$K_G^{LS,L}(x)$	Level-Scheduling-Kosten für Optionsgruppen G hinsichtlich Standorten L	Q^+
$K_M^{LS,L}(x)$	Level-Scheduling-Kosten für Produktmodelle M hinsichtlich Standorten L	Q^+
$K_O^{LS,L}(x)$	Level-Scheduling-Kosten für einzelne Optionen O hinsichtlich Standorten L	Q^+
$K_G^{LS,T}(x)$	Level-Scheduling-Kosten für Optionsgruppen G hinsichtlich Perioden T	Q^+
$K_M^{LS,T}(x)$	Level-Scheduling-Kosten für Produktmodelle M hinsichtlich Perioden T	Q^+
$K_O^{LS,T}(x)$	Level-Scheduling-Kosten für einzelne Optionen O hinsichtlich Perioden T	Q^+
$K_{lts}^{Material}$	Materialbezogene Eingangskosten des Auftrags i an Standort l in Szenario s	Q^+
$K_{m,l}^{Material}$	Materialbezogene Eingangskosten des Produktmodells m_i von Auftrag i an Standort l	Q^+

$K_{O_g l}^{Material}$	Materialbezogene Eingangskosten der Option o_g an Standort l	\mathbb{Q}^+
$K_i^{Rekonfiguration}$	Rekonfigurationskosten bei Zuordnung des Kundenauftrags zu Planauftrag i	\mathbb{Q}^+
K_{ilt}^{Strafe}	Strafkosten des Auftrags i an Standort l in Periode t	\mathbb{Q}^+
$K_i^{Strafe,L}$	Standortabweichungskosten bei Zuordnung des Kundenauftrags zu Planauftrag i	\mathbb{Q}^+
$K_{il}^{Strafe,L}$	Standortabweichungskosten bei Zuordnung des Auftrags i zu Standort l	\mathbb{Q}^+
$K_{k_i}^{Strafe,L}$	Kostensatz für Standortabweichungskosten für Kunde k_i des Auftrags i	\mathbb{Q}^+
$K_i^{Strafe,T}$	Terminverzögerungskosten bei Zuordnung des Kundenauftrags zu Planauftrag i	\mathbb{Q}^+
$K_{it}^{Strafe,T}$	Terminverzögerungskosten bei Zuordnung des Auftrags i zu Periode t	\mathbb{Q}^+
$K_{k_i}^{Strafe,T}$ bzw. $K_{k_j}^{Strafe,T}$	Kostensatz für Terminverzögerungskosten für Kunde k_i bzw. k_j des Auftrags i bzw. j	\mathbb{Q}^+
K_{io}^{Tausch}	Kosten für Tausch der Option o bei Auswahl des Planauftrags i entsprechend dessen Abschnitt a_{il} und somit Standort l	\mathbb{Q}^+
K_{io}^{Umbau}	Kosten für Umbau der Option o bei Auswahl des Planauftrags i entsprechend dessen Abschnitt a_{il} und somit Standort l	\mathbb{Q}^+
$K_i^{Wandlung}$ $(C_i^{Wandlung}(A_{its}(x)))$	Wandlungskosten an Standort l in Abhängigkeit der Anzahl zu qualifizierender externer Mitarbeiter $C_i^{Wandlung}(A_{its}(x))$	\mathbb{Q}^+
l	Standort	L
\bar{l}	Markt bzw. Absatzmarkt	\bar{L}
l_u	Standort der Linie u	L
\bar{l}_{k_i}	Markt des Kunden k_i des Auftrags i	\bar{L}
$ L $	Anzahl an Standorten	\mathbb{N}
L_i	Standorte, an denen die Endmontage von Auftrag i zulässig ist	$L_i \subseteq L$
L_{k_i} bzw. L_{k_j}	Menge präferierter Standorte des Kunden k_i bzw. k_j des Auftrags i bzw. j	$L_{k_i} \subseteq L$ bzw. $L_{k_j} \subseteq L$
\bar{L}_l	Märkte, die von Standort l beliefert werden können	$\bar{L}_l \subseteq \bar{L}$
L_i^{pot}	Menge potentieller Standorte des Auftrags i	$L_i^{pot} \subseteq L$
LS_{gGL}	Indikator, ob Anwendung des Level-Scheduling aggregiert für Optionen der Optionsgruppe g über Standorte (1) oder nicht (0)	$\{0,1\}$

LS_{gGT}	Indikator, ob Anwendung des Level-Scheduling aggregiert für Optionen der Optionsgruppe g über Perioden (1) oder nicht (0)	$\{0,1\}$
LS_{gOL}	Indikator, ob Anwendung des Level-Scheduling für einzelne Optionen der Optionsgruppe g über Standorte (1) oder nicht (0)	$\{0,1\}$
LS_{gOT}	Indikator, ob Anwendung des Level-Scheduling für einzelne Optionen der Optionsgruppe g über Perioden (1) oder nicht (0)	$\{0,1\}$
LS_{mL}	Indikator, ob Anwendung des Level-Scheduling für Produktmodell m über Standorte (1) oder nicht (0)	$\{0,1\}$
LS_{mT}	Indikator, ob Anwendung des Level-Scheduling für Produktmodell m über Perioden (1) oder nicht (0)	$\{0,1\}$
LS_{o_g}	Indikator, ob Anwendung des Level-Scheduling für einzelne Option o_g der Optionsgruppe g (1) oder nicht (0)	$\{0,1\}$
m bzw. m_i	Produktmodell bzw. Produktmodell des Auftrags i , das durch Basis-Optionen definiert ist	M
n_{c_i}	Anzahl der Stichproben des Clusters c_i	\mathbb{N}
$n_{o_g\bar{m}}$	Relative Häufigkeit der Kann-Option o_g , die nicht der Wahl „keine“ entspricht ($o_g \neq 0$), des Marktes \bar{T} und des Produktmodells m	\mathbb{Q}^+
$n_{\omega_{\bar{m}}}$	Relative Häufigkeit der Auftragskonfiguration $\omega_{\bar{m}}$ des Marktes \bar{T} und des Produktmodells m	\mathbb{Q}^+
$N_{o_g\bar{m}}$	Anzahl bzw. absolute Häufigkeit der Planaufträge mit der Kann-Option o_g , die nicht der Wahl „keine“ entspricht ($o_g \neq 0$), des Marktes \bar{T} und des Produktmodells m	\mathbb{Q}^+
$N_{\omega_{\bar{m}}}$	Anzahl bzw. absolute Häufigkeit der Planaufträge der Auftragskonfiguration $\omega_{\bar{m}}$ des Marktes \bar{T} und des Produktmodells m	\mathbb{Q}^+
o	Option mit entsprechender Bezeichnung bzw. entsprechendem Code	O
o_g	Nummerierte Option einer Optionsgruppe, wobei bei Kann-Optionsgruppen „keine“ ($o_g = 0$) als Option betrachtet wird	$\{1, \dots, O_g\} \in \mathbb{N}$ bzw. $\{0, \dots, O_g\}$
\bar{o}_g	Option einer Optionsgruppe, bei der es sich nicht um eine betrachtete Option o_g handelt und die	$\in \mathbb{N}_0$ \bar{O}_g

	unter ω_{g-1} sowie unter allen $\bar{\omega}_{g-1}$ baubar ist (Verwendung zur Darstellung der Verrechnung von Wahrscheinlichkeiten)	
O_{ω_i}	Menge der kundenwählbaren Optionen der Konfiguration ω_i des Planauftrags i	$O_{\omega_i} \subseteq O$
O_{ω_j}	Menge der kundenwählbaren Optionen der Konfiguration ω_j des Kundenauftrags j	$O_{\omega_j} \subseteq O$
$O_{\omega_i} \Delta O_{\omega_j}$	Symmetrische Differenzmenge der kundenwählbaren Optionen des Planauftrags i und des Kundenauftrags j (entspricht $(O_{\omega_i} \setminus O_{\omega_j}) \cup (O_{\omega_j} \setminus O_{\omega_i})$)	$O_{\omega_i} \Delta O_{\omega_j} \subseteq O$
O_i^b	Menge der Optionen, die hinsichtlich Planauftrag i aufgrund ihres Fixierungszeitpunkts im Abschnitt a_{il} und somit an Standort l nicht mehr geändert werden können	$O_i^b \subseteq O_{\omega_i} \Delta O_{\omega_j}$
O^{muss}	Menge der Optionen o , bei denen es sich um Muss-Optionen handelt	$O^{muss} \subseteq O$
O_g^{muss}	Menge der Optionen o der Muss-Optionsgruppe $g \in G^{muss}$	$O_g^{muss} \subseteq O$
O_i^g	Menge der Optionen, die hinsichtlich Planauftrag i aufgrund ihres Fixierungszeitpunkts im Abschnitt a_{il} und somit an Standort l nicht mehr getauscht werden können	$O_i^g \subseteq O_{\omega_i} \Delta O_{\omega_j}$
O_i^u	Menge der Optionen, die hinsichtlich Planauftrag i im Abschnitt a_{il} und somit an Standort l nicht umgebaut werden können	$O_i^u \subseteq O_{\omega_i} \Delta O_{\omega_j}$
O_i^+	Menge der Optionen, die der Konfiguration ω_i des Planauftrags i hinsichtlich der Konfiguration ω_j des Kundenauftrags j fehlen und im Abschnitt a_{il} und somit an Standort l in der Konfiguration keines anderen Planauftrags desselben Marktes \bar{T} und desselben Produktmodells m vorkommen	$O_i^+ \subseteq (O_{\omega_j} \setminus O_{\omega_i})$
O_i^-	Menge der Optionen, die die Konfiguration ω_i des Planauftrags i hinsichtlich der Konfiguration ω_j des Kundenauftrags j zu viel hat und die im Abschnitt a_{il} und somit an Standort l in der Konfiguration jedes anderen Planauftrags desselben Marktes \bar{T} und desselben Produktmodells m vorkommen	$O_i^- \subseteq (O_{\omega_i} \setminus O_{\omega_j})$
p_{c_i}	Wahrscheinlichkeit des Clusters c_i	$[0,1]$
p_{o_g} bzw. $P(o_g)$	Wahrscheinlichkeit der Option o_g	$[0,1]$
$p_{o_{gi}}$	Wahrscheinlichkeit der Option o_g für Kundenauftrag i von Kunde k_i mit Produktmodell m_i	$[0,1]$

$p_{o_g i s}$	Wahrscheinlichkeit der Option o_g des Auftrags i in Szenario s	[0,1]
$p_{o_g \bar{m}}$	Wahrscheinlichkeit der Option o_g für Markt \bar{T} und Produktmodell m	[0,1]
p_s	Szenariowahrscheinlichkeit des Szenarios s	[0,1]
$p_{\bar{s}}$	Szenariowahrscheinlichkeit des Szenarios \bar{s}	[0,1]
$p_{\bar{s}_i}$	Wahrscheinlichkeit des Kundenauftragsszenarios \bar{s}_i	[0,1]
p_{ω} bzw. $P(\omega)$	Wahrscheinlichkeit der Auftragskonfiguration ω	[0,1]
p_{ω_i}	Wahrscheinlichkeit der Auftragskonfiguration ω_i für Kundenauftrag i von Kunde k_i und Produktmodell m_i	[0,1]
$p_{\omega_{\bar{m}}}$	Wahrscheinlichkeit der Auftragskonfiguration ω für Markt \bar{T} und Produktmodell m	[0,1]
$P(o_g \omega_{g-1})$	Wahrscheinlichkeit der Option o_g bedingt zum Pfad ω_{g-1}	[0,1]
$P'(o_g \omega_{g-1})$	Korrigierte Wahrscheinlichkeit der Option o_g bedingt zum Pfad ω_{g-1}	[0,1]
P_{lt}^{extern}	Kostensatz für Leiharbeitsstunden	Q^+
$P_{lt}^{intern,add}$	Kostensatz für ausbezahlte Überstunden	Q^+
$P_{lt}^{intern,sub1}$	Kostensatz für Lohnkosteneinsparungen durch Kurzarbeit	Q^+
$P_{lt}^{intern,sub2}$	Kostensatz für Lohnkosteneinsparungen durch Entlassungen, wobei $P_{lt}^{intern,sub2} = 0$ betrachtet wird	Q^+
$P_{1(m o_g g)l(t)}^{LS,(L T)}$	Erster Kostensatz der Level-Scheduling-Kosten für Produktmodell m bzw. einzelne Option o_g bzw. Optionsgruppe g an Standort l (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Standorten L) und ggf. in Periode t (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Perioden T)	Q^+
$P_{2(m o_g g)l(t)}^{LS,(L T)}$	Zweiter Kostensatz der Level-Scheduling-Kosten für Produktmodell m bzw. einzelne Option o_g bzw. Optionsgruppe g an Standort l (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Standorten L) und ggf. in Periode t (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Perioden T)	Q^+
$P_{3(m o_g g)l(t)}^{LS,(L T)}$	Dritter Kostensatz der Level-Scheduling-Kosten für Produktmodell m bzw. einzelne Option o_g bzw. Optionsgruppe g an Standort l (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Standorten L) und ggf. in Periode t (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Perioden T)	Q^+

$P_{4(m o_g g)l(t)}^{LS,(LT)}$	Vierter Kostensatz der Level-Scheduling-Kosten für Produktmodell m bzw. einzelne Option o_g bzw. Optionsgruppe g an Standort l (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Standorten L) und ggf. in Periode t (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Perioden T)	\mathbb{Q}^+
$P_l^{Wandlung}$	Wandlungs- bzw. Qualifizierungskosten für einen externen Mitarbeiter an Standort l	\mathbb{Q}^+
q_{io}	Binäre Entscheidungsvariable des ganzzahligen Optimierungsmodells hinsichtlich des Tauschs der Option o bei Auswahl des Planauftrags i (0: kein Tausch, 1: Tausch)	$\{0,1\}$
r	Kalkulatorischer Zinssatz pro Periode für durchschnittliche Periodenlänge	\mathbb{Q}^+
s	Szenario, das durch eine mögliche Auftragskonfiguration je Auftrag eines Betrachtungszeitraums definiert ist, dessen Wahrscheinlichkeit positiv ist und das zur reduzierten Szenarienzahl gehört (generiertes Szenario)	$S \subseteq \bar{S}$
\bar{s}	Szenario, das durch eine mögliche Auftragskonfiguration für jeden Auftrag eines Betrachtungszeitraums definiert ist	\bar{S}
\bar{s}_i	Kundenauftragsszenario, das der Auftragskonfiguration ω_i entspricht	\bar{S}_i
S^{a_i}	Menge an Szenarien, die durch eine zum Zeitpunkt der Kundenauftragszuordnung mögliche Auftragskonfiguration je Auftrag des Abschnitts a_i definiert ist	
$ S $	Anzahl an zu generierenden Szenarien der Menge an zu generierenden Szenarien S	\mathbb{N}
$ \bar{S} $	Anzahl an Szenarien der Menge an Szenarien \bar{S}	\mathbb{N}
$ \bar{S}_i $	Anzahl an Kundenauftragsszenarien der Menge an Kundenauftragsszenarien \bar{S}_i	\mathbb{N}
SA_i	Spätestmögliche Auslieferungsperiode des Auftrags i	T
t	Periode	$T \in \mathbb{N}$
u	Linie zur Endmontage	U
u_{io}	Binäre Entscheidungsvariable des ganzzahligen Optimierungsmodells hinsichtlich des Umbaus der Option o bei Auswahl des Planauftrags i (0: kein Umbau, 1: Umbau)	$\{0,1\}$
U_g	Menge an Linien, auf denen alle Optionen o_g der Optionsgruppe g montiert werden können	$U_g \subseteq U$
U_m	Menge an Linien, auf denen das Produktmodell m montiert werden kann	$U_m \subseteq U$

U_{o_g}	Menge an Linien, auf denen die Option o_g montiert werden kann	$U_{o_g} \subseteq U$
V_{io}	Binäre Entscheidungsvariable des ganzzahligen Optimierungsmodells hinsichtlich der Abweichung der Option o bei Auswahl des Planauftrags i (0: keine Abweichung, 1: Abweichung)	$\{0,1\}$
$V_o^{\text{Akzeptanz}}$	Akzeptanzwert hinsichtlich der Abweichung der Option o	$[0,1]$
W_o	Arbeitslast der Option o in der Endmontage in einer Zeiteinheit	\mathbb{Q}^+
W_ω	Arbeitslast der Auftragskonfiguration ω in der Endmontage in einer Zeiteinheit	$W_\omega \in \mathbb{Q}^+$
W_{ω_s}	Arbeitslast der Auftragskonfiguration ω_{is} des Auftrags i in Szenario s in der Endmontage in einer Zeiteinheit	\mathbb{Q}^+
$ W_\omega $	Anzahl an Arbeitslasten der Auftragskonfiguration ω	\mathbb{N}
x	Vektor aller Entscheidungsvariablen x_{ilt}	
x_{ilt}	Binäre Entscheidungsvariable des ganzzahligen Optimierungsmodells zur Einplanung von Auftrag i an Standort l in Periode t (0: nicht zugeordnet, 1: zugeordnet)	$\{0,1\}$
y	Vektor aller Entscheidungsvariablen y_i	
y_i	Binäre Entscheidungsvariable des ganzzahligen Optimierungsmodells zur Zuordnung eines Kundenauftrags zum Planauftrag i des Auftragsbestands (0: nicht zugeordnet, 1: zugeordnet)	$\{0,1\}$
Z_g	Indikator, ob Optionsgruppe g und deren Optionen als unsicher betrachtet werden (1) oder nicht und somit als sicher gelten (0)	$\{0,1\}$
α	Faktor zur Skalierung der Antizipation von Sequenzierungsregeln	\mathbb{Q}^+
β	Faktor zur Skalierung des gleichmäßigen Bedarfs	\mathbb{Q}^+
$\delta_{1(m o_g g)l(t)}^{LS,(LT)}$	Untere Flexibilitätsgrenze des Level-Scheduling für Produktmodell m bzw. einzelne Option o_g bzw. Optionsgruppe g an Standort l (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Standorten L) und ggf. in Periode t (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Perioden T)	\mathbb{Q}^+
$\delta_{2(m o_g g)l(t)}^{LS,(LT)}$	Untere Grenze der kostenlosen Flexibilität des Level-Scheduling für Produktmodell m bzw. einzelne Option o_g bzw. Optionsgruppe g an Standort l (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Standorten L) und ggf. in Periode t (bei	\mathbb{Q}^+

$\delta_{3(m o_g g)l(t)}^{LS,(L T)}$	<p>anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Perioden T) Obere Grenze der kostenlosen Flexibilität des Level-Scheduling für Produktmodell m bzw. einzelne Option o_g bzw. Optionsgruppe g an Standort l (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Standorten L) und ggf. in Periode t (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Perioden T)</p>	\mathbb{Q}^+
$\delta_{4(m o_g g)l(t)}^{LS,(L T)}$	<p>Obere Flexibilitätsgrenze des Level-Scheduling für Produktmodell m bzw. einzelne Option o_g bzw. Optionsgruppe g an Standort l (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Standorten L) und ggf. in Periode t (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Perioden T)</p>	\mathbb{Q}^+
Δ_k	<p>Erforderlicher zeitlicher Abstand zwischen den Auslieferungen von je zwei Aufträgen eines Kunden k in der Zeiteinheit der Sub-Periode</p>	\mathbb{N}_0
$\Delta_{kt}^{Abstand}$	<p>Anzahl an Aufträgen des Kunden k, die zu einer Periode t zu viel zugeordnet werden</p>	\mathbb{Q}
$\Delta_{(m o_g g)l(t)(s)}^{LS,(L T)}(\mathbf{x})$	<p>Abweichungen von der anteilig gleichmäßigen Verteilung von Produktmodell m bzw. der einzelnen Option o_g bzw. der Optionsgruppe g an Standort l (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Standorten L) und ggf. in Periode t (bei anteilig gleichmäßiger Verteilung zwischen Perioden T) sowie ggf. in Szenario s in Abhängigkeit der Auftragseinplanung \mathbf{x} (gesamtheitliche Darstellung für $\Delta_{ml}^{LS,L}(\mathbf{x})$, $\Delta_{mlt}^{LS,T}(\mathbf{x})$, $\Delta_{o_g s}^{LS,L}(\mathbf{x})$, $\Delta_{o_g ts}^{LS,T}(\mathbf{x})$, $\Delta_{g s}^{LS,L}(\mathbf{x})$, $\Delta_{g ts}^{LS,T}(\mathbf{x})$)</p>	\mathbb{Q}
ε	<p>Kleine positive rationale Zahl</p>	\mathbb{Q}^+
λ_{it}	<p>Untere Grenze der kostenlosen Kapazitätsflexibilität der unternehmensinternen Mitarbeiter an Standort l in Periode t</p>	\mathbb{Q}^+
$\lambda_{it}^{Prozent}$	<p>Prozentuale untere Grenze der kostenlosen Kapazitätsflexibilität der unternehmensinternen Mitarbeiter an Standort l in Periode t</p>	\mathbb{Q}^+
μ_{it}	<p>Obere Grenze der kostenlosen Kapazitätsflexibilität der unternehmensinternen Mitarbeiter an Standort l in Periode t</p>	\mathbb{Q}^+
$\mu_{it}^{Prozent}$	<p>Prozentuale obere Grenze der kostenlosen Kapazitätsflexibilität der unternehmensinternen Mitarbeiter an Standort l in Periode t</p>	\mathbb{Q}^+

σ_{o_g}	Anzahl des Auftretens der identischen Option innerhalb der Optionsgruppe g bezüglich o_g , wobei bei additiven im Gegensatz zu individuellen Optionsgruppen eine Option je nach o_g mehr als einmal auftritt (für $o_g = 0$ gilt $\sigma_{o_g} = 0$)	\mathbb{N}_0
τ_a	Zeitraum eines Abschnitts a in einer einheitlichen Zeiteinheit für sämtliche Abschnitte	\mathbb{N}_0
τ_t	Anzahl an potentiellen Sub-Perioden zur Auslieferung einer Periode t in der Zeiteinheit der Sub-Periode	\mathbb{N}_0
Φ_g	Indikator, ob es sich bei Optionsgruppe g um eine additive Optionsgruppe mit identischen Optionen in unterschiedlicher Anzahl handelt (1) oder nicht und somit um eine individuelle Optionsgruppe mit unterschiedlichen Optionen (0)	$\{0,1\}$
ω	Anhand eines Produktmodells und kundenwählbarer Optionen komplett bzw. voll spezifizierte, baubare Auftragskonfiguration	Ω
ω_{g-1}	Teilweise spezifizierte, baubare Auftragskonfiguration bis zur Ebene $g-1$ im Variantenbaum	Ω_{g-1}
$\bar{\omega}_{g-1}$	Pfad der Ebene $g-1$ mit demselben Vorgängerpfad ω_{g-2} wie ω_{g-1} , bei dem es sich jedoch nicht um ω_{g-1} handelt und bei dem o_g im Gegensatz zu ω_{g-1} baubar ist	$\bar{\Omega}_{g-1}$
ω_i bzw. ω_j	Komplett bzw. voll spezifizierte, baubare Auftragskonfiguration, die für den Auftrag i bzw. j möglich ist	Ω_i
ω_{i^*}	Konfiguration des ausgewählten Planauftrags i^*	Ω
$\omega_{i'}$	Konfiguration des Planauftrags i' (potentieller Tauschpartner)	Ω
ω_{i^*}	Geänderte Konfiguration des ausgewählten Planauftrags i^*	Ω
ω_j^{\cdot}	Für Kundenauftrag j zur Auslieferung anzubietende Konfiguration	Ω
$\omega_j^{\prime\prime}$	Für Kundenauftrag j zu produzierende Konfiguration	Ω
$\omega_{\bar{m}}$	Komplett bzw. voll spezifizierte, baubare Auftragskonfiguration, die für den Markt \bar{m} und Produktmodell m möglich ist	$\Omega_{\bar{m}}$
$ \Omega_i $	Anzahl an Auftragskonfigurationen der Menge an Auftragskonfigurationen Ω_i	\mathbb{N}

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Trend der Kundennachfrage nach individualisierten Produkten führt zu einer steigenden Anzahl an Produktvarianten mit jeweils geringeren Mengen und wird durch ein kompetitives Marktumfeld angetrieben. Die sogenannte „Mass Customization“, die kundenindividuelle Massenproduktion, ermöglicht es Kunden, eine Produktvariante unter vielen entsprechend ihrer Präferenzen auszuwählen. Dagegen bietet die klassische Massenproduktion keine oder nur sehr geringe Wahlmöglichkeiten hinsichtlich Produktvarianten. Die höhere Variantenanzahl der kundenindividuellen Massenproduktion erhöht somit die Anzahl potentieller Kunden, erfordert jedoch zur kostengünstigen Produktion eine modulare Produktarchitektur sowie entsprechend flexible Produktionssysteme. (vgl. Koren 2010, S. 32 ff., S. 126, S. 128)

Hinsichtlich des Produktionssystems ermöglicht die Variantenfließfertigung die wirtschaftlich effiziente Umsetzung der kundenindividuellen Massenproduktion (vgl. Boysen 2005, S. 11, S. 18 ff.). So können variantenreiche Produkte bis zu einer bestimmten Stückzahl entsprechend einer Auflagengröße in Serie produziert werden (vgl. Buzacott et al. 2010, S. 9 f.; vgl. Ellinger 1959, S. 76 f.; vgl. Schneeweiß 2002, S. 10 f.; vgl. Volling 2009, S. 18 ff.). Die Produktion erfolgt im Zuge der Globalisierung vermehrt in Produktionsnetzwerken, sodass Unternehmen internationale Märkte durch die Produktion an global verteilten Standorten bedienen (vgl. Rudberg & Olhager 2003, S. 29). Als Motiv für Produktionsverlagerungen ins Ausland gilt neben der Markterschließung vor Ort und der Nähe zu Kunden unter anderem auch die Reduktion der Personalkosten (Zanker, Kinkel & Maloca 2013, S. 9).

Die Herausforderung besteht für global agierende Unternehmen darin, die Serienproduktion variantenreicher Produkte in einem Produktionsnetzwerk optimal zu planen. Zur variantenreichen Serienproduktion sind bereits mittelfristig mit einem Vorlauf von mehreren Monaten Teile von Lieferanten zu bestellen oder es ist eine Vorschau bezüglich der voraussichtlichen Bestellungen abzugeben. Dies ist notwendig, damit die Lieferanten ihre Produktion planen und wiederum Vorprodukte beschaffen können. Bevor jedoch Teile bestellt werden können, muss entschieden werden, welche Produktvariante als Auftragskonfiguration an welchem Endmontagestandort, in welcher Periode und in welcher Anzahl produziert werden soll. Hierbei sind die Kapazitäten der Endmontagestandorte in den einzelnen Perioden zu berücksichtigen. Ein detaillierter Abgleich des

Kapazitäts- und Materialbedarfs mit dem Kapazitäts- und Materialangebot kann zur variantenreichen Serienproduktion somit lediglich durch eine mittelfristige Planung unter Berücksichtigung von Auftragskonfigurationen erfolgen. Auch wenn mittelfristig in der Regel nicht sämtliche Kundenaufträge mit spezifizierten Auftragskonfigurationen vorliegen, kann durch die explizite Antizipation der Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen eine mittelfristige Auftragsplanung robust und somit möglichst optimal trotz der Unsicherheit durchgeführt werden.

Durch ein besseres Verständnis der Kundennachfrage hinsichtlich der Auftragskonfigurationen können neben einem optimierten Abgleich mit dem Angebot an Kapazitäten und Materialien auch kurze Lieferzeiten erreicht werden (vgl. McKinsey & Company 2015, S. 26, S. 31 f.). Indem besser auf Kundenwünsche reagiert werden kann, kann die kundenindividuelle Massenproduktion verbessert werden (vgl. The Boston Consulting Group 2015, S. 12). Dies kann im Rahmen von Industrie 4.0 durch die Integration von IT-Systemen entlang der Supply Chain erreicht werden, sodass unternehmensinterne Bereiche sowohl untereinander als auch mit Lieferanten und Kunden stärker interagieren können (vgl. The Boston Consulting Group 2015, S. 5 f., S. 9 f.).

Zur mittelfristigen Planung werden im Rahmen dieser Arbeit folgende Informationsstände hinsichtlich der Unsicherheit der zu produzierenden Kundenauftragskonfigurationen unterschieden:

- a) Sichere Kundenaufträge mit unsicheren Auftragskonfigurationen
- b) Keine Kundenaufträge und somit auch unsichere Auftragskonfigurationen

Obwohl unter Informationsstand a) Kundenaufträge vorliegen, besteht aufgrund der unsicheren Auftragskonfigurationen dennoch Planungsunsicherheit, die bei der Auftragsplanung zu berücksichtigen und somit je Kundenauftrag entsprechend zu antizipieren ist. Unsichere Auftragskonfigurationen sicherer Aufträge können darin begründet sein, dass Kunden die Flexibilität der Wahl von Produktoptionen mit einem möglichst kurzfristigen, spätestmöglichen Fixierungszeitpunkt je Option als Just-in-Time-Spezifikation angeboten wird (vgl. Lanza et al. 2015, S. 97; vgl. Colledani et al. 2016, S. 128 f.; vgl. Belkadi et al. 2016, S. 593; vgl. Buergin et al. 2018, S. 61 ff.).

Unter Informationsstand b) besteht aufgrund noch nicht vorliegender Kundenaufträge noch größere Planungsunsicherheit. In diesem Fall können mittelfristig im Sinne einer auftragsbasierten Planung Planaufträge zur Antizipation kurzfristig eingehender Kundenaufträge generiert werden. Durch eine mittelfristige Auftragsplanung in Form von

Planaufträgen kann eine Durchgängigkeit zwischen dem mittel- und kurzfristigen Planungshorizont erreicht werden, sodass nicht erst kurzfristig mit Aufträgen geplant wird (vgl. Liebler 2013, S. 54, S. 94 f., S. 170). Die mittelfristige Planungsunsicherheit kann aus Beschaffungs- und Produktionssicht durch Planaufträge je stärker reduziert werden, desto ähnlicher die Auftragskonfigurationen der mittelfristig generierten Planaufträge den tatsächlich gebauten Auftragskonfigurationen sind. Jedoch kann im Rahmen der Kapazitäten der Endmontagestandorte und der Lieferanten Flexibilität zur Rekonfiguration der Planaufträge bestehen, um diese an eingehende Kundenaufträge anzupassen. Hinsichtlich des Absatzes besteht zudem Rekonfigurationsflexibilität durch die Kunden, wenn Kompromisse bezüglich der gewünschten Konfiguration zugunsten einer besseren Einhaltung des gewünschten Liefertermins eingegangen werden.

Die **mittelfristige Auftragsplanung unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen** lässt sich somit entsprechend der Informationsstände a) und b) wie folgt unterscheiden:

- I. **Kundenaufträge mit unsicheren Auftragskonfigurationen**
- II. **Planaufträge mit unsicheren Kundenauftragszuordnungen**

Fall I entspricht der Planung unter Informationsstand a) mit sicheren Kundenaufträgen unter Unsicherheit ihrer Konfigurationen. Fall II betrachtet die Möglichkeit einer mittelfristig auftragsbasierten Planung durch Planaufträge unter Informationsstand b) mit unsicheren Kundenaufträgen und somit unsicheren Zuordnungen eingehender Kundenaufträge zu Planaufträgen.

Entsprechend der Zeitpunkte, zu denen Kundenaufträge eingehen, können die Informationsstände a) und b) bei der mittelfristigen Planung gleichzeitig vorliegen, sodass sowohl mit Kundenaufträgen (Fall I) als auch mit Planaufträgen (Fall II) geplant werden kann. Zur Validierung in industriellen Anwendungsfällen werden im Rahmen dieser Arbeit die beiden Extremfälle betrachtet, wobei in Fall I 100 % Kundenaufträge im Flugzeugbau vorliegen und in Fall II 100 % Planaufträge im Automobilbau generiert werden.

Im Flugzeugbau bietet Airbus mit den Modellen A318, A319, A320 und A321 der A320-Familie und jeweils entsprechenden Konfigurationsmöglichkeiten ein breites Produktvariantenspektrum an (vgl. A_Hupays 2016, S. 49 ff.; vgl. A_Molzahn 2017, S. 15 ff.). Hinsichtlich der Produktion der A320-Familie bestehen massive Auftragsrückstände, sodass Ende 2017 nach der derzeitigen Produktionsrate Kundenaufträge für die nächs-

ten elf Jahre vorliegen (Airbus 2017). Auftragskonfigurationen können mittelfristig dennoch nicht als sicher betrachtet werden, da diese auch kurzfristig noch geändert werden können (vgl. Buergin et al. 2018, S. 61, S. 67 ff.).

In der Automobilindustrie werden in Deutschland 38 % und in den USA sogar 94 % der Fahrzeuge ohne Kundenauftragsbezug produziert (Holweg & Pil 2004, S. 12). Dies ist der Fall, obwohl die Variantenanzahl eines Produktmodells eines deutschen Automobilherstellers in der Größenordnung 10^{24} liegt (vgl. Staeblein & Aoki 2015, S. 271). Grund hierfür ist, dass Kunden für auftragsbezogen produzierte Autos mit einer Wartezeit von Auftragseingang bis Auslieferung von 20 bis hin zu mehr als 80 Tagen rechnen müssen (vgl. Holweg & Pil 2001, S. 77; vgl. Holweg & Pil 2004, S. 43 ff.; vgl. Staeblein & Aoki 2015, S. 265).

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines **Lösungsansatzes zur mittelfristigen Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen**. Hierbei wurden bereits zur Unterscheidung, ob neben den Kundenauftragskonfigurationen ebenfalls die Kunden als unsicher zu betrachten sind, zwei Fälle eingeführt. Die zur Adressierung der Zielsetzung **relevanten Planungsaufgaben** mit entsprechenden **forschungsleitenden Fragestellungen** lauten:

- 1) **Auftragsgenerierung:** Wie können mittelfristig Aufträge mit Auftragskonfigurationen generiert werden, sodass in Fall I Szenarien hinsichtlich Auftragskonfigurationen von Kundenaufträgen und in Fall II Planaufträge zur Auftragseinplanung vorliegen?
- 2) **Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk:** Wie können mittelfristig Kundenaufträge mit unsicheren Auftragskonfigurationen und Planaufträge robust in ein Produktionsnetzwerk eingeplant werden?
- 3) **Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen:** Wie können eingehende Kundenaufträge eingeplanten Planaufträgen robust zugeordnet werden?

Die relevanten Planungsaufgaben sind in Bezug zu den beiden Fällen in Abbildung 1.1 dargestellt. Für Fall I mit Kundenaufträgen mit unsicheren Auftragskonfigurationen ist sowohl die Auftragsgenerierung zur Abbildung unsicherer Konfigurationen mittels Szenarien (1) als auch die Auftragseinplanung (2) relevant. Für Fall II sind alle drei Planungsaufgaben relevant, wobei die Auftragskonfigurationen generierter Planaufträge

(1) bei der Auftragseinplanung (2) als sicher und somit nicht als unsicher betrachtet werden, sodass die Unsicherheit bei der Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen (3) adressiert wird. Durch die zusätzliche Planungsaufgabe der Kundenauftragszuordnung in Fall II im Vergleich zu Fall I wird der größeren Unsicherheit hinsichtlich der Kundenauftragskonfigurationen, nämlich der zusätzlichen Unsicherheit bezüglich der Kunden, Rechnung getragen.

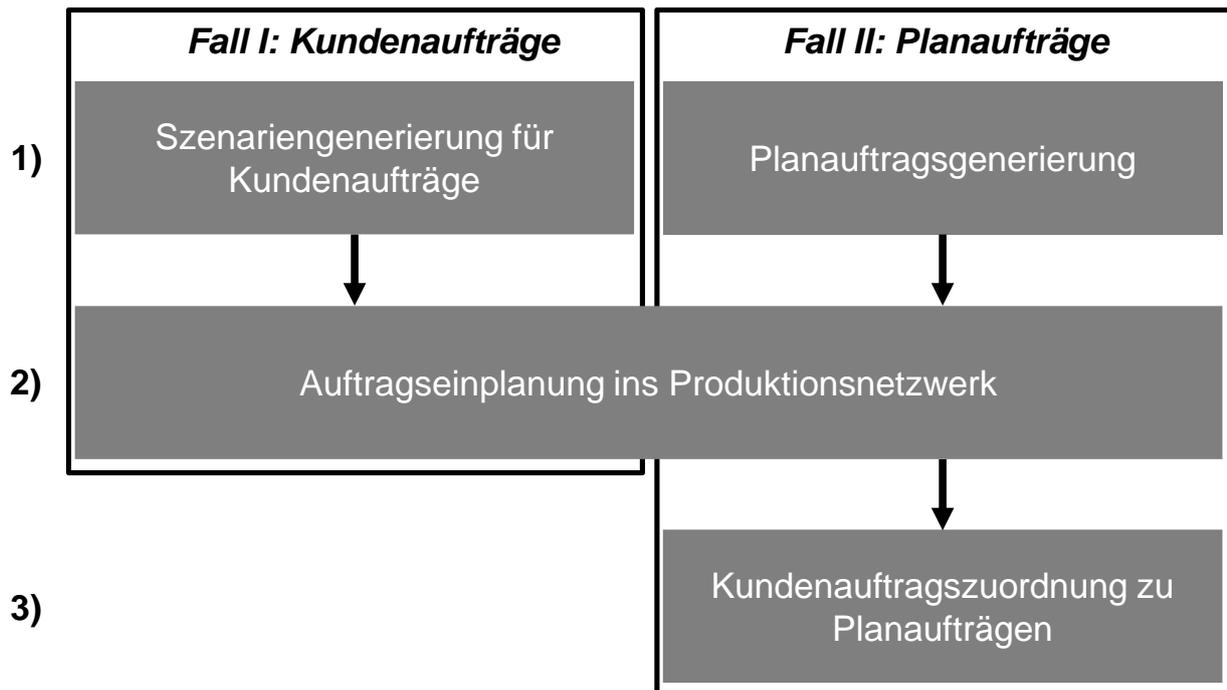


Abbildung 1.1: Planungsaufgaben der mittelfristigen Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen

1.3 Aufbau der Arbeit

Nachdem bereits die Motivation dargelegt und die Zielsetzung abgeleitet wurde, wird an dieser Stelle der weitere Aufbau dieser Arbeit zur Erreichung der Zielsetzung beschrieben. Kapitel 2 dient der Darstellung der zur Erarbeitung des eigenen Lösungsansatzes notwendigen Grundlagen. In Kapitel 3 werden in der Literatur bestehende Forschungsansätze vorgestellt, die die für diese Arbeit relevanten Planungsaufgaben betreffen. Dabei werden anhand von Bewertungskriterien Forschungsdefizite abgeleitet. In Kapitel 4 wird ein eigener Lösungsansatz zur Erreichung der Zielsetzung nach Abbildung 1.1 vorgestellt. Dessen prototypische Softwareimplementierung und Validierung in den beiden Anwendungsfällen, dem Flugzeugbau und dem Automobilbau, erfolgt in Kapitel 5. In Kapitel 6 folgen eine Diskussion des Ansatzes und ein Ausblick. In Kapitel 7 wird abschließend eine Zusammenfassung der Arbeit gegeben.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zum eigenen Lösungsansatz und somit zur Erreichung der Zielsetzung dargelegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Produktion von Unternehmen in Produktionsnetzwerken betrachtet, weshalb zunächst Produktionsnetzwerke eingeführt werden. Da ein Ansatz zur mittelfristigen Auftragsplanung das Ziel dieser Arbeit ist, wird diese in das Konzept der hierarchischen Produktionsplanung eingeordnet. Aufgrund der Betrachtung von Aufträgen mit Auftragskonfigurationen bei der Planung werden die Absatzplanung und die Auftragsannahme näher dargestellt. Danach wird die darauf basierende Produktionsprogrammplanung erläutert, woraufhin schließlich auf die Materialbedarfsplanung und die Ablaufplanung der Variantenfließfertigung eingegangen wird. Da die Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen entsprechend der Zielsetzung im eigenen Ansatz zu berücksichtigen ist, werden zudem Grundlagen zur Planung unter Unsicherheit dargelegt.

2.1 Produktionsnetzwerke

Produktionsnetzwerke sind unternehmensinterne Wertschöpfungsnetzwerke, deren Produktionsstandorte finanziell vollständig zu einem einzigen Unternehmen gehören. Davon abgrenzen lassen sich Supply Chains, die externe Netzwerke mit Standorten verschiedener Unternehmen darstellen. (Rudberg & Olhager 2003, S. 29 f., S. 33)

Bezüglich der Standorte eines Produktionsnetzwerks kann zwischen inländischer, regionaler, multinationaler und globaler geographischer Verteilung unterschieden werden. So kann eine rein inländische Produktion neben dem inländischen Markt auch Exportmärkte bedienen. Ist das Produktionsnetzwerk auf eine geographische Region wie z. B. Europa beschränkt, so ist es regional, wogegen in einem multinationalen Produktionsnetzwerk Standorte transregional verteilt sind. Ein globales Produktionsnetzwerk umfasst weltweit verteilte Produktionsstandorte. (Shi & Gregory 1998, S. 202)

Basierend auf der geographischen Verteilung der Produktionsstandorte ist deren Koordination untereinander von Bedeutung. So kann zwischen einer schwachen Koordination nach dem multi-inländischen Ansatz und einer starken Koordination nach dem globalen Ansatz unterschieden werden. Nach dem multi-inländischen Ansatz liegen die Standorte eines Produktionsnetzwerks geographisch nahe der Absatzmärkte und sind weitgehend autonom. Der globale Ansatz verfolgt dagegen eine starke Koordination eines verteilten Produktionssystems. (Shi & Gregory 1998, S. 202 f.)

Für die Koordination nach dem globalen Ansatz spielt der Umfang an Wertschöpfungsschritten, die innerhalb eines Produktionsnetzwerks durchgeführt werden, eine Rolle und wird als vertikale Integration bezeichnet (vgl. Hayes & Wheelwright 1984, S. 275 f.). Sind mehrere unternehmensinterne Wertschöpfungsschritte multinational verteilt, indem jeder Wertschöpfungsschritt an einem Standort zur optimalen Nutzung von Ressourcen zentralisiert ist, so erfolgt nach dem globalen Ansatz eine vertikale Koordination des Produktionsnetzwerks (Shi & Gregory 1998, S. 201 ff., S. 210). Sind die unternehmensinternen Wertschöpfungsschritte dagegen an jedem Standort des Produktionsnetzwerks integriert, so erfolgt nach dem globalen Ansatz eine horizontale Koordination zur Produktion globaler Produkte (Shi & Gregory 1998, S. 201 ff., S. 205 f., S. 210 f.).

Die horizontale Koordination eines Produktionsnetzwerks kann im Rahmen der Produktionsprogrammplanung erfolgen, indem die Nachfrage den Produktionsstandorten entsprechend ihrer Kapazitäten zugeteilt wird, sodass die Kapazitäten der Produktionsstandorte synergetisch genutzt werden (Flaherty 1986, S. 95 f.; Shi & Gregory 1998, S. 211). Eine solche Koordination eines Produktionsnetzwerks kann durch Optimierung erfolgen (Rudberg & Olhager 2003, S. 33 ff.).

Im Rahmen dieser Arbeit wird im Speziellen die horizontale Koordination von Produktionsnetzwerken mit Standorten zur Endmontage globaler Produkte ohne Lieferbeziehungen untereinander betrachtet (vgl. A_Thoma 2015, S. 53). Da die Koordination im Rahmen der Produktionsprogrammplanung erfolgt, wird diese im folgenden Kapitel im Kontext der hierarchischen Produktionsplanung betrachtet.

2.2 Hierarchische Produktionsplanung

In diesem Kapitel wird zunächst auf die grundlegenden Aspekte des hierarchischen Produktionsplanungssystems und darauf folgend auf die Supply Chain Planning Matrix eingegangen.

2.2.1 Hierarchisches Produktionsplanungssystem

In einem hierarchischen Planungssystem werden Entscheidungen nacheinander getroffen, sodass Entscheidungen auf einer aggregierten Ebene Beschränkungen für Entscheidungen auf einer detaillierteren Ebene darstellen. Ein hierarchisches System ermöglicht im Gegensatz zu einem integrierten System eine Reduktion der Komplexität sowie eine Integration der entsprechenden Managementebene in die einzelnen Schritte

eines Entscheidungsprozesses. Jede Ebene hat ihre eigenen Ziele und Beschränkungen. Je niedriger die Hierarchieebene der Planung ist, desto niedriger ist die involvierte Managementebene, desto kürzer ist der Planungshorizont und desto detailliertere Informationen werden benötigt. (Hax & Meal 1973, S. 3 f.)

Bei der Planung bestehen sowohl sachlich-horizontale als auch zeitlich-vertikale Interdependenzen zwischen den Entscheidungen zu einem Zeitpunkt bzw. zwischen Entscheidungen aufeinanderfolgender Zeitpunkte. Die Integration der Interdependenzen bei der Planung wird durch den Integrationsgrad angegeben, der den Sachumfang der Planung und die Koordination des Entscheidungsprozesses umfasst. Eine hohe Integration hinsichtlich des Sachumfangs erfolgt durch Totalmodelle, die alle relevanten Interdependenzen explizit berücksichtigen, wogegen sich Partialmodelle lediglich auf die Abbildung eines Teilaspekts beschränken. Hinsichtlich des Entscheidungsprozesses werden bei der Simultanplanung Entscheidungen gemeinsam und somit integriert getroffen, wogegen bei der Sukzessivplanung Teilprobleme nacheinander in einer festgelegten Reihenfolge separat gelöst werden. (Steven 1994, S. 9 ff)

Zwei aufeinanderfolgende Teilaufgaben der hierarchischen Planung können als Top-Ebene und Basis-Ebene betrachtet werden, wobei sich deren Entscheidungsumfang, deren Entscheidungskriterien, deren Fristigkeit der Entscheidung und somit auch der Informationsstand zum Entscheidungszeitpunkt unterscheiden. Die Koordination der beiden Ebenen erfolgt durch Instruktion von oben nach unten und durch Antizipation von unten nach oben. Auf der Top-Ebene kann somit die Reaktion der Basis-Ebene antizipiert werden, bevor eine Instruktion gegeben wird. Hierzu sind das Entscheidungsmodell der Basis-Ebene und dessen Lösung auf der Top-Ebene zu antizipieren. Dabei kann zwischen verschiedenen Graden der Antizipation unterschieden werden. Bei der perfekten Antizipation wird das Modell der Basis-Ebene komplett zum vorliegenden Informationsstand berücksichtigt. Bei der impliziten Antizipation wird lediglich ein Teil des Modells der Basis-Ebene antizipiert. (Schneeweiss 2003, S. 241, S. 243)

Bei der hierarchischen Produktionsplanung wird die Gesamtplanungsaufgabe in Teilaufgaben zerlegt, die durch Schnittstellen gekoppelt sind. Sie stellt einen Kompromiss der Integration der Planung dar, indem die Partialmodelle durch ein übergeordnetes Totalmodell koordiniert werden. Auf der obersten Ebene wird das Gesamtproblem simultan auf aggregiertem Niveau angegangen, woraufhin Teilaufgaben sukzessive geplant werden. Die partielle Aufschiebung der Teilprobleme ergibt sich dabei durch die zeitliche Struktur bzw. Reichweite der entsprechend zu treffenden Entscheidungen und

bestimmt somit den Planungshorizont. Die Länge der Planungsperioden sind umso kürzer, desto detaillierter die Planung ist. (Steven 1994, S. 16 f., S. 28 ff., S. 58 f.)

Die Planungsebenen der hierarchischen Produktionsplanung gehen auf Anthony (1965) zurück (Bitran & Tirupati 1989, S. 1; Dauzère-Péres & Lasserre 1994, S. 3 ff.; Steven 1994, S. 6 f.). Dieser entwickelte ein Rahmenwerk mit drei Ebenen zur Planung und Steuerung von Systemen, wobei er die Ebenen vor allem anhand der Art und des Umfangs von Aufgaben sowie anhand der Art und der Zuständigkeiten bei der Entscheidungsfindung und nicht strikt durch den Planungshorizont unterscheidet (Anthony 1965, S. 15 ff., 26 f., 57 f., 67 f., 92 f.). Daran anknüpfend stellen Hax & Candea (1984) und Bitran & Tirupati (1989) die strategische Planung, die taktische Planung und die operative Planung als Entscheidungsebenen bzw. Hierarchiestufen der hierarchischen Produktionsplanung mit entsprechend lang-, mittel- und kurzfristigen Planungshorizonten vor (Bitran & Tirupati 1989, S. 1 ff.; Hax & Candea 1984, S. 3ff.). Der Planungshorizont der strategischen Planung beträgt mehrere Jahre, der der taktischen Planung in der Regel 3 bis 18 Monate und der der operativen Planung bis zu mehreren Wochen (Dauzère-Péres & Lasserre 1994, S. 3 ff.).

Die strategische Planung betrifft die generelle Unternehmensstrategie, umfasst Aufgaben wie die Planung neuer Produktionsstandorte und erfolgt durch das Management auf höchster Ebene. Die taktische Planung umfasst die Ressourcennutzung und somit die Zuordnung von Produktionsressourcen zu Produkten. Durch die operative Planung erfolgt eine Ablaufplanung, durch die der Einsatz der Produktionsressourcen detailliert geplant wird. (Bitran & Tirupati 1989; Dauzère-Péres & Lasserre 1994, S. 3 ff.)

Die Aggregation dient in der hierarchischen Planung der Problemvereinfachung, wobei auf die Konsistenz zwischen aggregierter und detaillierter Planung zu achten ist (Steven 1994, S. 43, S. 51 ff.). Der Aggregationsgrad der Informationen nimmt ebenso wie der Grad an Unsicherheit, bspw. bezüglich der Nachfrage, von der strategischen über die taktische bis zur operativen Planung ab (Hax & Candea 1984, S. 5, 69 ff.). Zudem ist er vom betrachteten Planungssystem abhängig (Hax & Candea 1984, S. 69). Bspw. spielt zur Aggregation von Produkten eine Rolle, ob sie die gleichen Produktionsressourcen nutzen (Hax & Meal 1973, S. 2, 4 f.). Die niedrigste Ebene der Aggregation von Produkten sind Aufträge, bei der eine Produktvariante einem Kunden und einem Liefertermin zugeordnet ist (Boysen, Fliedner & Scholl 2007b, S. 777). Neben Produkten können ebenso Maschinen, Mitarbeiter verschiedener Qualifikationen und Kunden aggregiert werden (Hax & Candea 1984, S. 69).

2.2.2 Supply Chain Planning Matrix

Eine zweidimensionale Unterteilung zur strukturierten Darstellung der Planungsaufgaben eines Unternehmens ist die in Abbildung 2.1 dargestellte Supply Chain Planning Matrix. Dabei werden Planungsaufgaben als Planungsmodul zusammengefasst und sowohl nach deren zeitlichen Fristigkeiten in vertikale und somit hierarchische Planungsebenen als auch in die horizontalen Planungsebenen Beschaffung, Produktion, Distribution und Absatz eingeteilt (vgl. Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 10, S. 15). Die horizontalen Planungsebenen umfassen somit die Supply Chain eines Unternehmens mit der Schnittstelle zu den Lieferanten auf der Beschaffungsseite und der Schnittstelle zu den Kunden auf der Absatzseite (vgl. Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 15; vgl. Fleischmann, Meyr & Wagner 2015, S. 74).

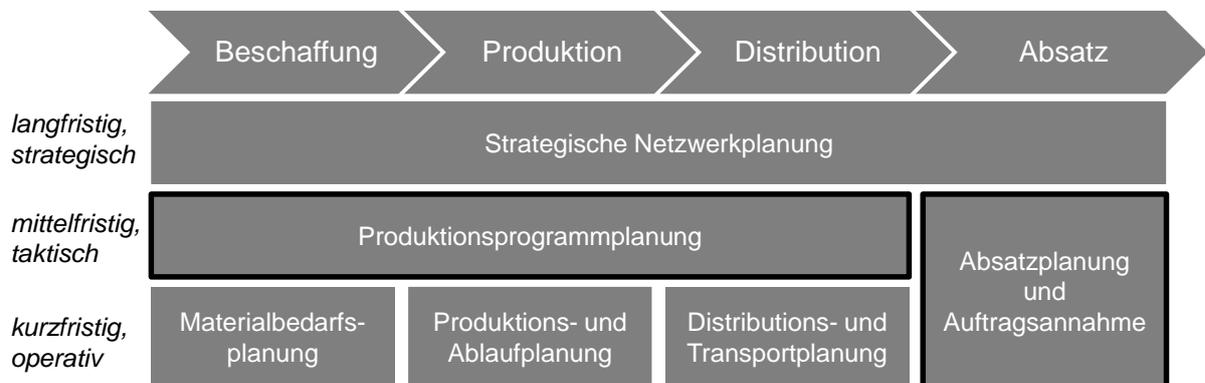


Abbildung 2.1: Supply Chain Planning Matrix (vgl. Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 10; vgl. Volling 2009, S. 58; vgl. Dörmer 2013, S. 32)

Ergebnis der strategischen Netzwerkplanung ist eine Netzwerkkonfiguration, die neben Produktionsstandorten auch Zulieferer, Distributionszentren und Endkunden umfasst. Sie ist somit die Grundlage für alle Planungsaufgaben der darauf folgenden taktischen und operativen Ebene. (Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 10)

Die Aufgabe der Absatzplanung besteht in der Prognose von Absatzmengen und im Fall konfigurierbarer Produkte auch in der Prognose von Produktoptionen (Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 10; Volling 2009, S. 58 f.). Die Auftragsannahme ermöglicht die Konfiguration von Produkten und die Abgabe von Lieferterminzusagen unter Berücksichtigung der Auslastung der Produktionskapazitäten, wobei ggf. Substitutionsprodukte angeboten werden können (Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 11; Dörmer 2013, S. 37). Da der Übergang von der Absatzplanung zur Auftragsannahme von den Zeitpunkten der Auftragseingänge abhängt, sind beide Planungsaufgaben in Abbildung 2.1 zusammen als ein Planungsmodul dargestellt.

Die Hauptaufgabe der Produktionsprogrammplanung ist basierend auf der Absatzplanung und ggf. Auftragsannahme der kostenoptimale, standortübergreifende Abgleich der Nachfrage mit den Kapazitäten der Planungsebenen Beschaffung, Produktion und Distribution (vgl. Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 12; vgl. Volling 2009, S. 59). Im Rahmen der Materialbedarfsplanung (Material Requirements Planning, MRP) werden Bestellungen bei Lieferanten aufgegeben (Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 14). Die Produktions- und Ablaufplanung dient der detaillierten Planung der Produktion für die einzelnen Standorte und kann somit dezentral vorgenommen werden (Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 12). Die anfallenden Planungsaufgaben und deren Integration richten sich nach den vorliegenden Produktionsformen (siehe z. B. Variantenfließfertigung in Kapitel 2.6), weshalb im Allgemeinen keine klare Trennung zwischen den Aufgaben der Produktionsplanung und der Ablaufplanung möglich ist (Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 12 f.). Ggf. sind Aufträge in Wochen- und Tagesbestände einzuplanen bevor eine Ablaufplanung erfolgt (Decker 1993, S. 19 f.). Da es sich hierbei um eine rein zeitliche Einplanung handelt, wird diese als Terminplanung bezeichnet (vgl. A_Kramer 2016, S. 40; vgl. Dörmer 2013, S. 36). Die Distributions- und Transportplanung umfasst einerseits mit der Distributionsplanung die Bestimmung der kostenminimalen Belieferung auf Basis des Produktionsprogramms und der vorhandenen Transport- sowie Lagerkapazitäten (Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 13). Andererseits wird durch die Transportplanung die konkrete Umsetzung der Distributionsplanung in Form der Touren- und Beladungsplanung vorgenommen (Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 13).

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Produktionsprogrammplanung sowie der Absatzplanung und Auftragsannahme als Schnittstelle zu den Kunden (siehe Abbildung 2.1). Die Planungsaufgabe der Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk erfolgt im Sinne der Produktionsprogrammplanung, da diese eine Koordination im Produktionsnetzwerk zum Ausgleich von Nachfrage und Kapazitäten ermöglicht. Sie ist somit eine taktische, mittelfristige Planungsaufgabe. Hierfür ist die Auftragsgenerierung als ebenso mittelfristige Planungsaufgabe im Rahmen der Absatzplanung erforderlich. Die Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen erfolgt schließlich im Rahmen der Auftragsannahme und reicht vom mittel- in den kurzfristigen Planungshorizont.

Im Folgenden wird genauer auf die Absatzplanung und Auftragsannahme, die Produktionsprogrammplanung und die darauf basierenden Planungsebenen der Materialbedarfsplanung und der Ablaufplanung speziell für die Variantenfließfertigung eingegangen. Hinsichtlich der Distributions- und Transportplanung wird im Rahmen dieser Arbeit

auf eine Darstellung der Struktur des Distributionssystems mit Lagern, deren Standorten und Beziehungen untereinander sowie der Transportvorgänge zur Belieferung der Lager und der Kunden (vgl. Koenen 1985, S. 43, S. 55) verzichtet, indem Distributionskosten betrachtet werden und von ausreichender Kapazität des Distributionssystems ausgegangen wird.

2.3 Absatzplanung und Auftragsannahme

In der kundenindividuellen Massenproduktion wird es Kunden auf Basis einer modularen Produktarchitektur ermöglicht, ihre Aufträge anhand von Optionen zu konfigurieren (Koenen 2010, S. 33, S. 37). Auftragskonfigurationen lassen sich als konfigurierbare Produktvarianten durch bestimmte Kombinationen von Optionen eindeutig definieren (vgl. Herlyn 1990, S. 25 f.; vgl. Herlyn 2012, S. 80 f.). Sich paarweise gegenseitig ausschließende Optionen bilden eine Optionsgruppe (vgl. Herlyn 1990, S. 34). Diesbezüglich kann zwischen Muss-Optionsgruppen und Kann-Optionsgruppen unterschieden werden, wobei innerhalb einer Muss-Optionsgruppe genau eine Muss-Option gewählt werden muss, wohingegen in einer Kann-Optionsgruppe auch die Option besteht, keine der Kann-Optionen zu wählen (vgl. Dichtl et al. 1982, S. 4; vgl. Ohl 2000, S. 40 f., S. 118; vgl. Rosenberg 1996, S. 2120).

Durch die Wahl eines Produktmodells werden sogenannte Basis-Optionen festgelegt, bei denen es sich um Muss-Optionen handelt (Herlyn 1990, S. 31 f., S. 38, S. 43; Ohl 2000, S. 116 ff.). Darauf basierend müssen weitere Muss-Optionen und können zusätzlich Kann-Optionen ausgewählt werden (Herlyn 1990, S. 34, S. 37; Ohl 2000, S. 40 f., S. 118). Um die Auswahl von Optionen durch die Kunden zu erleichtern, werden ggf. mehrere Optionen zu Optionspaketen zusammengefasst (Herlyn 1990, S. 43). Basierend auf den ausgewählten Optionen können weitere Optionen durch Auswertung von Zusteuerungsregeln bzw. -bedingungen hinzugefügt werden, die zur unternehmensinternen Auftragsverarbeitung erforderlich sind (Sinz 2003, S. 29 f.; Stäblein 2008, S. 64). Hinsichtlich der Zulässigkeit der Kombination von Optionen in einem Auftrag lassen sich Baubarkeitsregeln auswerten, die als Baubarkeitsbedingungen je Option formuliert werden können (Sinz 2003, S. 26). Sowohl Zusteuerungsregeln als auch Baubarkeitsregeln lassen sich im Rahmen einer regelbasierten Produktdokumentation in Form von aussagelogischen Formeln der booleschen Algebra beschreiben (Sinz 2003, S. 26; Stäblein 2008, S. 67). Hierzu können Optionen verschlüsselt als Codes dargestellt werden (Herlyn 1990, S. 30; Sinz 2003, S. 25). Die aussagelogischen Formeln enthalten

somit die Codes als Variablen sowie die logischen Operatoren „nicht“, „und“ sowie „oder“ zu deren Verknüpfung (Sinz 2003, S. 26; Stäblein 2008, S. 67). Die Belegung der Variablen als „wahr“ oder „falsch“ erfolgt entsprechend der Optionen eines Auftrags (Sinz 2003, S. 26).

Die Absatzplanung erfolgt zeitlich vor der mittelfristigen Produktionsprogrammplanung und basiert unter anderem auf historischen Verkaufsdaten und auf bereits eingegangenen Kundenaufträgen (Meyr 2004, S. 349). Ergebnis der Absatzplanung können Prognosen bzw. Planungen je Markt und je Monat bezüglich der Menge je Produktmodell und der relativen Anteile der kundenwählbaren Optionen, die auch als Einbauraten bezeichnet werden, sein (Liebler 2013, S. 2, S. 12; Meyr 2004, S. 349 f.; Stäblein 2008, S. 5). Durch eine Unterscheidung in Absatzmärkte lassen sich das entsprechende Käuferverhalten oder gesetzliche Rahmenbedingungen differenziert abbilden (vgl. Herlyn 2012, S. 145).

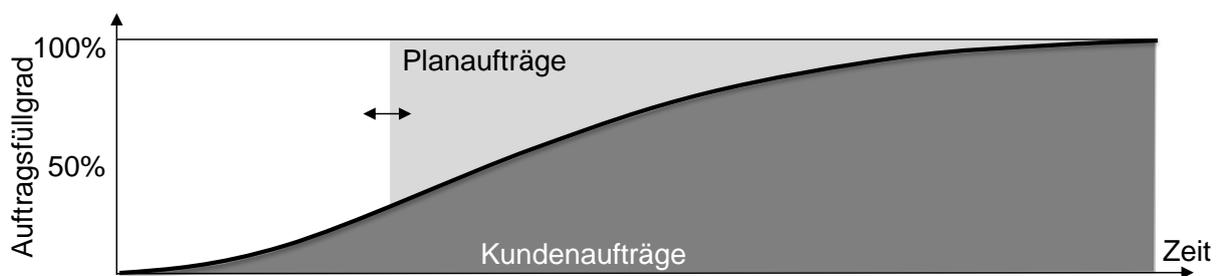


Abbildung 2.2: Auftragsfüllgrad durch angenommene Kundenaufträge und Planaufträge (vgl. Meyr 2004, S. 347; vgl. Volling et al. 2013, S. 243)

Der Auftragsfüllgrad ist beispielhaft in Abbildung 2.2 dargestellt und gibt in Abhängigkeit der Zeit an, welcher Anteil an zu produzierenden Aufträgen durch vollspezifizierte Kundenaufträge belegt ist (Meyr 2004, S. 346; Volling 2009, S. 71; Volling et al. 2013, S. 242). Wird eine Planungsaufgabe wie die mittelfristige Produktionsprogrammplanung, die kurzfristige Materialbedarfsplanung oder die kurzfristige Produktions- und Ablaufplanung auftragsbasiert durchgeführt, so können zum entsprechenden Planungszeitpunkt bei einem Auftragsfüllgrad von weniger als 100% Planaufträge mit spezifizierten Optionen generiert werden (vgl. Meyr 2004, S. 346 f., S. 351 f.; vgl. Volling et al. 2013, S. 242 f.). Planaufträge können somit zur Kapazitätsauslastung platziert werden, wenn dies aufgrund hoher Fixkosten für die Rentabilität erforderlich ist (Stautner 2001, S. 43 f.). Durch Planaufträge können lange Lieferzeiten vermieden werden, was vor allem dann relevant ist, wenn Kunden zugunsten einer kurzen Lieferzeit dazu bereit sind, einen Kompromiss hinsichtlich der Auftragskonfiguration einzugehen (vgl. Brabazon & MacCarthy 2006, S. 515; vgl. Elias 2002, S. 11 f., S. 14 f., S. 17). Bei Bereitstellung von

Produkten zu nicht marktüblichen Lieferzeiten besteht dagegen das Risiko des Verlusts von Kunden an konkurrierende Unternehmen (Kappler 2010, S. 3 f.).

Planaufträge können je Markt entsprechend der Menge des Produktmodells und ggf. der Einbauraten generiert werden (Ohl 2000, S. 91 ff.; Stäblein 2008, S. 85 f.). Jedoch werden Planaufträge durch die Mengen und Einbauraten nicht eindeutig beschrieben, sodass die Planauftragsgenerierung zu unterschiedlichen Planaufträgen führen kann (Kappler 2010, S. 11 f.). Zudem kann es vorkommen, dass die Planaufträge aufgrund der Baubarkeitsregeln die Einbauraten gar nicht einhalten können (Kappler 2010, S. 10). Außerdem ist zu beachten, dass die Prognosen der Einbauraten „scheingenau“ sind, da die Wahrscheinlichkeit des tatsächlichen Eintretens einer punktgenauen Prognose gering ist und somit Abweichungen vorherbestimmt sind (Kappler 2010, S. 9, 16).

Zur Planauftragsgenerierung können entweder reale oder künstliche repräsentative Varianten gebildet oder Aufträge aus der Vergangenheit selektiert und ggf. angepasst werden (Ohl 2000, S. 94, S. 101 ff.; Stäblein 2008, S. 85). Außerdem ist es möglich, dass Aufträge entsprechend der Produktdokumentation komplett neu konstruiert werden (Liebler 2013, S. 68). Die Ermittlung repräsentativer Varianten ist bei sehr hoher Variantenanzahl problematisch, da die Variantenvielfalt durch einzelne Varianten nicht abgebildet werden kann (Ohl 2000, S. 98 ff.; Liebler 2013, S. 68). Zudem bleiben Einbauraten bei der Bildung repräsentativer Varianten unberücksichtigt (Stäblein 2008, S. 86). Die Selektion von Aufträgen aus der Vergangenheit erfordert, dass Referenzaufträge mit derselben Produktdokumentation bzw. denselben Baubarkeitsregeln vorliegen, weshalb diese bei Änderungen der Produktdokumentation problematisch ist (Liebler 2013, S. 68). Die Berechnungskomplexität ist vor allem bei der Konstruktion von Planaufträgen hoch (Liebler 2013, S. 68, S. 71).

Basierend auf der Produktionsprogrammplanung kann die weitere Auftragsannahme mit Lieferterminbestätigung nur dann zuverlässig erfolgen, wenn sie den durch die Produktionsprogrammplanung ermittelten Material- und Kapazitätsbedarf berücksichtigt, der als *Available-to-Promise* bezeichnet wird (Ball, Chen & Zhao 2004, S. 449 f.; Meyr 2004, S. 351 f.; Kilger & Meyr 2015, S. 178 ff.). Sind bereits Planaufträge eingeplant, so sind eingehende Kundenaufträge den Planaufträgen zuzuordnen, sodass kein direkter Abgleich mit dem Material- und Kapazitätsangebot notwendig ist (Ball, Chen & Zhao 2004, S. 469 ff.). Die Auftragsannahme kann in Echtzeit erfolgen, indem einzelne Aufträge mit Liefertermin direkt im Rahmen der Transaktion der Auftragseingabe bestätigt werden (Ball, Chen & Zhao 2004, S. 456 f., S. 470; Kilger & Meyr 2015, S. 190).

Auch wenn Auftragskonfiguratoren bspw. auf den Webseiten von Automobilherstellern bereits zur Verfügung stehen, bedeutet dies jedoch nicht, dass darüber auch Bestellungen möglich sind (vgl. Staeblein & Aoki 2015, S. 265 f.).

Entsprechend der Auftragsannahme können die kurzfristigen Planungsaufgaben der Supply Chain eines Unternehmens von den Lieferanten bis zu den Kunden in prognosebasierte und kundenauftragsbezogene Aufgaben unterteilt werden. Diese werden durch den Entkopplungspunkt getrennt, der angibt, wie tief Kundenaufträge in die unternehmerische Grundstruktur, die unter anderem die horizontalen Planungsebenen Beschaffung, Produktion, Distribution und Absatz umfasst, eindringen. Vom Entkopplungspunkt aus, der zugleich dem letzten Hauptlager mit Sicherheitsbeständen entspricht, werden Kundenaufträge erfüllt. Zur Wahl des Entkopplungspunktes muss zwischen erforderlichen Lieferzeiten einerseits und Durchlaufzeiten in der Beschaffung, Produktion und Distribution andererseits abgewogen werden. (Hoekstra & Romme 1992, S. 2, S. 4, S. 6 ff., 66 ff., S. 72, S. 76)

Wird zwischen den Prozessen Beschaffung, Teilefertigung, Montage und Distribution unterschieden, so kann der Entkopplungspunkt auf einer der folgenden fünf Positionen liegen (Hoekstra & Romme 1992, S. 7, 65 ff.):

1. *Make-and-ship-to-stock*: Produkte werden produziert und die Distribution erfolgt zu Lagern in Kundennähe.
2. *Make-to-stock*: Produkte werden am Ende der Produktion auf Lager gehalten und von dort aus an Kunden ausgeliefert.
3. *Assemble-to-order*: Gefertigte Teile werden auf Lager gehalten und auf Basis von spezifischen Kundenaufträgen montiert.
4. *Make-to-order*: Bestellte Materialien werden auf Lager gehalten, sodass die Teilefertigung und Montage kundenauftragsspezifisch erfolgt.
5. *Purchase-and-make-to-order*: Es werden keine Lager gehalten, sodass die Beschaffung auf Basis spezifischer Kundenaufträge erfolgt.

Wird der Entkopplungspunkt weit vorne angesetzt (z. B. *Purchase-and-make-to-order*), besteht das Risiko darin, dass Kundenaufträge nicht in der erforderlichen Lieferzeit erfüllt werden können. Das Risiko kann jedoch reduziert werden, indem Durchlaufzeiten verkürzt, deren Zuverlässigkeit erhöht und Verträge mit externen Lieferanten entsprechend gestaltet werden. Liegt der Entkopplungspunkt weit hinten (z. B. *Make-and-ship-to-stock*), so fallen Kapitalbindungskosten an und das Risiko besteht darin, dass die

gelagerten Teile bzw. Endprodukte an Wert verlieren. Dieses Risiko kann reduziert werden, indem Prognosemethoden verbessert werden oder die Zuverlässigkeit von Teileprognosen durch eine modulare Produktarchitektur erhöht wird. Im Allgemeinen erfordern kurze Lieferzeiten im Vergleich zu den Durchlaufzeiten einen eher beim Kunden gelegenen und kundenindividuelle Auftragskonfigurationen variantenreicher Produkte einen eher beim Lieferanten gelegenen Entkopplungspunkt. (Hoekstra & Romme 1992, S. 8 f., 68)

Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen von Kunden an die Lieferzeit und eine unterschiedliche Kompromissbereitschaft hinsichtlich der gewünschten Auftragskonfiguration, kann der Entkopplungspunkt an einer je Kundenauftrag individuellen Position der Supply Chain eines Unternehmens liegen, indem ein Kundenauftrag bspw. aus einem Lager nach der Produktion bedient oder kundenauftragsspezifisch produziert werden kann. Ein solches Auftragserfüllungssystem wird als *Virtual-build-to-order* bezeichnet und durch Planaufträge ermöglicht. (Brabazon & MacCarthy 2004, S. 155 ff.)

2.4 Produktionsprogrammplanung

Im Rahmen der Produktionsprogrammplanung wird ein Produktionsprogramm erstellt, das die zu produzierende Menge je Produktvariante und je Planungsperiode, also den Netto-Primärbedarf, angibt. Das Produktionsprogramm basiert auf dem Brutto-Primärbedarf des Absatzplans. Bei Absatzschwankungen kann das Produktionsprogramm einerseits zur gleichmäßigeren Auslastung nivelliert werden oder andererseits dem Absatzverlauf im Rahmen flexibler Mitarbeiterkapazitäten und entsprechender Betriebsmittelkapazitäten folgen. Die Kapazitätsflexibilität ergibt sich aus dem Minimum der Mitarbeiter- und Betriebsmittelflexibilität. Durch das Produktionsprogramm wird der Kapazitätsbedarf festgelegt, der sich aus dem Kapazitätsbedarf je Produktvariante an allen Arbeitssystemen bzw. -stationen multipliziert mit der Menge der entsprechenden Produktvariante ergibt. Kurzfristig kann die Kapazität bzw. das Kapazitätsangebot im Rahmen der bestehenden Kapazitätsflexibilität der Mitarbeiter und der Betriebsmittel bis zu einer Flexibilitätsgrenze bzw. der Maximalkapazität angepasst werden, wobei die im Rahmen der mittelfristigen Produktionsprogrammplanung bereits genutzte Flexibilität nicht mehr zur Verfügung steht. Mitarbeiterflexibilität kann z. B. durch Arbeitszeitflexibilität bestehen, indem die Standardarbeitszeit durch Überstunden und Wochenendschichten erhöht wird. Ebenso ist eine Mitarbeiterflexibilität durch Einstellung und Ent-

lassung möglich, wobei jedoch die erforderlichen Zeit- und Kostenaufwände zu berücksichtigen sind. Bei Einstellungen müssen ggf. Zeit und Kosten für die Qualifizierung der Mitarbeiter aufgewendet werden, wogegen bei Entlassungen gesetzliche Bestimmungen einzuhalten sind. Die Flexibilität der Einstellung und Entlassung kann durch den Einsatz von Leiharbeitern für begrenzte Zeiträume erhöht werden. Kapazitätsflexibilität von Betriebsmitteln besteht bspw. durch deren Kauf und Verkauf. (Lödding 2008, S. 81 ff., S. 467 f., S. 470 f., S. 473)

Um die Möglichkeiten der Kapazitätsflexibilität hinsichtlich deren Zeit- und Kostenaufwände voneinander abzugrenzen, kann, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, grundsätzlich zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit unterschieden werden. Während unter Flexibilität die schnelle und kostengünstige Reaktionsfähigkeit auf Veränderungen innerhalb einer unteren und oberen Grenze bzw. eines Flexibilitätskorridors eines konstanten Systems verstanden werden kann (Slack 1983, S. 7; Heger 2007, S. 20 f.; Möller 2008, S. 15), ist mit Wandlungsfähigkeit die Fähigkeit gemeint, die Flexibilitäts Grenzen über die Zeit anzupassen (Zaeh, Moeller & Vogl 2005, S. 2, S. 4). Die Wandlungsfähigkeit umfasst hierzu technische, organisatorische und räumliche Aspekte (Hernández Morales 2003, S. 57; Zaeh, Moeller & Vogl 2005, S. 4; Heger 2007, S. 2 f.). Ein Wandlungsprozess zur Umsetzung einer Wandlungsmaßnahme kann reaktiv oder proaktiv unter Nutzung von Wandlungsbefähigern in einem angemessenen Zeitraum erfolgen (Hernández Morales 2003, S. 49 ff.). Zur Wandlung sind neben Zeit auch entsprechende Kosten erforderlich (Möller 2008, S. 18, S. 20). Im Rahmen dieser Arbeit werden die Einstellung und Entlassung von unternehmensinternen Mitarbeitern sowie der Kauf und Verkauf von Betriebsmitteln als Wandlungsfähigkeit im langfristigen Planungshorizont, die Einstellung und Entlassung von unternehmensexternen Mitarbeitern bzw. Leiharbeitern als Wandlungsfähigkeit im mittelfristigen Planungshorizont und die Arbeitszeitflexibilität als Flexibilität im kurzfristigen Planungshorizont angesehen.

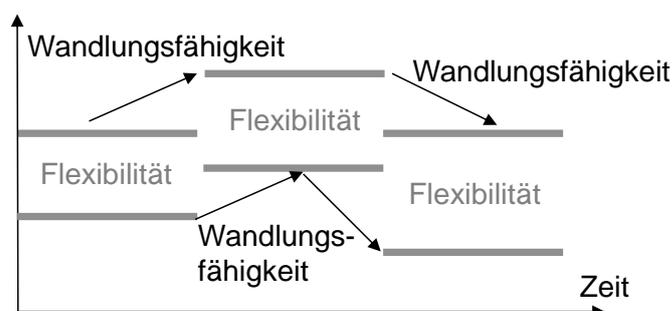


Abbildung 2.3: Unterscheidung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (vgl. Zaeh, Moeller & Vogl 2005, S. 2)

Neben dem Kapazitätsbedarf lässt sich aus dem Produktionsprogramm auch der Materialbedarf ermitteln, indem je Produktvariante die erforderlichen Teile über die entsprechende Stückliste als Brutto-Sekundärbedarf durch eine Stücklistenauflösung errechnet und ggf. durch Berücksichtigung von Lagerbeständen in den Netto-Sekundärbedarf überführt werden. Hinsichtlich des Sekundärbedarfs ist zu berücksichtigen, dass dieser eine Vorlaufzeit benötigt, da er zeitlich vor dem Primärbedarf anfällt. (Lödding 2008, S. 83 ff.)

Im Rahmen der mittelfristigen, zentralen Produktionsprogrammplanung können Produktvarianten aggregiert und zwar durch die Menge je Produktmodell und die relativen Anteile der kundenwählbaren Optionen betrachtet werden, sodass Produktvarianten bzw. Auftragskonfigurationen erst im Rahmen der kurzfristigen, dezentralen Produktions- und Ablaufplanung berücksichtigt werden (vgl. Boysen 2005, S. 153 f.; vgl. Dörmer 2013, S. 34 ff.; vgl. Meyr 2004, S. 348 ff.; vgl. Volling 2009, S. 59 f.). Bei einer solchen mittelfristigen Produktionsprogrammplanung kann der Kapazitäts- und Materialbedarf zur variantenreichen Serienproduktion an den einzelnen Standorten des Produktionsnetzwerks jedoch nur bedingt ermittelt und mit den vorhandenen Kapazitäten abgeglichen werden. Auf eine detaillierte Betrachtung wird hinsichtlich des Materialbedarfs in Kapitel 2.5 und hinsichtlich des Kapazitäts- und Materialbedarfs im Rahmen der Ablaufplanung in Kapitel 2.6 eingegangen. Im Rahmen dieser Arbeit wird zugunsten eines detaillierten Kapazitätsabgleichs ein Ansatz zur mittelfristigen Produktionsprogrammplanung basierend auf Auftragskonfigurationen und somit ein Ansatz zur mittelfristigen Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk vorgestellt. Dieser bietet darüber hinaus den Vorteil, dass durch die bereits mittelfristige Betrachtung von Aufträgen in der Planung Diskontinuitäten durch unterschiedliche Konzepte und IT-Planungssysteme zwischen der mittelfristigen und kurzfristigen Planung vermieden werden und somit eine zeitliche Durchgängigkeit der Planung erreicht wird (vgl. Auer, Mayrhofer & Sihm 2012, S. 43 f., S. 48; vgl. Liebler 2013, S. 54).

2.5 Materialbedarfsplanung

In Abbildung 2.4 sind die in Kapitel 2.3 eingeführten Optionen und Baubarkeitsregeln zur Auftragskonfiguration auf der Optionenebene sowie der Zusammenhang zum Materialbedarf auf der Teileebene beispielhaft dargestellt. Die Stücklistenauflösung zur Ermittlung des Materialbedarfs variantenreicher Produkte erfolgt bei regelbasierter Pro-

duktdokumentation durch die Auswertung von Einbauregeln, die sich ebenso wie Zusteuerungsregeln und Baubarkeitsregeln in Form von aussagelogischen Formeln der booleschen Algebra beschreiben lassen. Die Einbauregeln stehen im Zusammenhang mit einer Positionsvariantenstückliste, bei der jede Position einem geometrischen Ort entspricht, an dem alternative Teile als Positionsvarianten verbaut werden können. Jede Positionsvariante entspricht somit einer Teilenummer und enthält als Einbaubedingung eine Einbauregel, die anhand der Optionen eines Auftrags auszuwerten ist. (Sinz 2003, S. 25 f., S. 31 f.; Stäblein 2008, S. 62, S. 65 ff.)

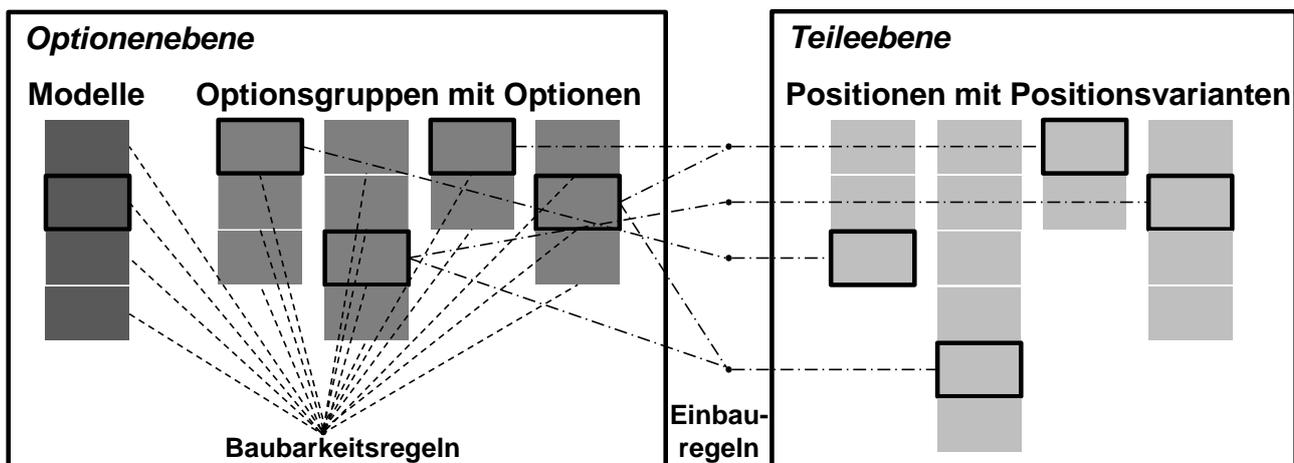


Abbildung 2.4: Regelbasierte Produktdokumentation auf Optionen- und Teileebene (vgl. Bracht & Eisenhart Rothe 2000, S. 617; vgl. Stäblein 2008, S. 62)

Die regelbasierte Produktdokumentation mit der regelbasierten Positionsvariantenstückliste ist vor allem für variantenreiche Produkte geeignet, da Stücklisten nicht für alle Produktvarianten explizit definiert werden (Zagel 2006, S. 28 f., S. 32 f.). Da sich Teile durch Optionskombinationen entsprechend der Einbauregeln ergeben, ist es zur Stücklistenauflösung erforderlich, dass diese bekannt sind (Stäblein 2008, S. 6, S. 65).

Der erforderliche Zeitpunkt zur Stücklistenauflösung hängt von der Belieferung ab. Erfolgt die Belieferung nach dem Just-in-Time-Prinzip (JIT) oder reihenfolgeabhängig nach dem Just-in-Sequence-Prinzip (JIS) im Rahmen von langfristigen Lieferverträgen mit Lieferanten, so sind Liefermengen und -zeitpunkte über Lieferabrufe festzulegen (Stäblein 2008, S. 56 ff.). Bereits mittelfristig ist die Ermittlung von Materialbedarfen auf Basis der mittelfristigen Produktionsprogrammplanung von Bedeutung (Stäblein 2008, S. 58 f.). So erfolgt bspw. in der Automobilindustrie mittelfristig ein Lieferabruf (LAB) nach VDA4905, der kurzfristig durch den Feinabruf (FAB) nach VDA4915 und ggf. den produktionssynchronen Abruf (PAB) entsprechend der Sequenz verfeinert wird (Klug

2010, S. 292 ff.; Stäblein 2008, S. 57). Beim mittelfristigen Lieferabruf handelt es sich um eine unverbindliche, erwartete Liefervorschau (Klug 2010, S. 292 f.). Basiert der Lieferabruf über eine Stücklistenauflösung auf dem Produktionsprogramm, so handelt es sich um einen programmorientierten bzw. bedarfsorientierten Abruf (Klug 2010, S. 177, S. 291). Er unterscheidet sich vom verbrauchsorientierten Abruf, der nicht zentral, sondern dezentral durch den Materialverbrauch vor Ort gesteuert wird und durch ein Kanban-System umgesetzt werden kann (Klug 2010, 178 f.). Der programmorientierte Abruf ist insbesondere für Teile mit hoher Wertigkeit (A-Teile) und ggf. auch Teile mit mittlerer Wertigkeit (B-Teile) geeignet (Buzacott et al. 2010, S. 63 ff.).

Liegen mittelfristig aus der Absatzplanung Mengen je Produktmodell und Einbauraten der Optionen vor, so lässt sich bei regelbasierter Produktdokumentation der Materialbedarf für den Abruf nicht direkt daraus ableiten (Stäblein 2008, S. 47). Um eine Stücklistenauflösung zu ermöglichen, können, wie in Kapitel 2.3 vorgestellt, Planaufträge generiert werden (Ohl 2000, S. 91 ff.; Stäblein 2008, S. 85 f.). Ohne Planauftragsgenerierung kann die Materialbedarfsplanung direkt auf der Teileebene erfolgen, indem zukünftige Teilebedarfe auf Basis vergangener Bedarfe über Zeitreihen prognostiziert werden, wobei die Absatzplanung nicht berücksichtigt und die Konsistenz zwischen den Mengen verschiedener Teile nicht garantiert wird (Liebler 2013, S. 68; Ohl 2000, S. 79 ff., S. 89 f.). Die Materialbedarfsplanung kann ebenso ohne Planaufträge durch Verfahren erfolgen, die die regelbasierte Produktdokumentation einbeziehen, indem sie Prognosen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeiten von Einbauregeln treffen und somit teilerelevante Optionen und Optionskombinationen berücksichtigen (Ohl 2000, S. 147 ff.; Stäblein 2008, S. 89 f.). Als Ergebnis solcher Verfahren mit Betrachtung von Einbauregeln bzw. Optionskombinationen für alle möglichen Teile liegen Bandbreiten bzw. Intervalle für den Mengenbedarf je Teil vor, die ggf. bis zu 100% betragen können (vgl. Kappler et al. 2010, S. 74; vgl. Liebler 2013, S. 69; vgl. Ohl 2000, S. 106 f., S. 147). In bestehenden Ansätzen wird dabei entweder vorausgesetzt, dass die prognostizierten Einbauraten hinsichtlich der Optionen in baubaren Aufträgen kombiniert werden können (Stäblein 2008, S. 105) oder es werden zur Produktdokumentation konsistente Intervalle der Einbauraten berechnet (Kappler et al. 2010, S. 72 f.).

Wird bei nicht vorliegenden Kundenaufträgen nicht nur die Materialbedarfsplanung, sondern auch die Produktionsprogrammplanung ohne Planaufträge durchgeführt, so kann lediglich ein Kapazitätsabgleich der Optionen oder Teile erfolgen (vgl. Ohl 2000,

S. 205 f.). Es kann jedoch nicht ohne Weiteres garantiert werden, dass diese zu bau-
baren Aufträgen entsprechend der regelbasierten Produktdokumentation kombiniert
werden können, weshalb im Rahmen dieser Arbeit die Generierung von Planaufträgen
verfolgt wird. Entsprechend wird im folgenden Kapitel 2.6 zur Ablaufplanung der Vari-
antenfließfertigung auf die Antizipation der Materialbedarfsplanung im Rahmen der auf-
tragsbasierten Produktionsprogrammplanung eingegangen, da die Materialbedarfspla-
nung auch bei der Ablaufplanung berücksichtigt werden kann.

2.6 Ablaufplanung der Variantenfließfertigung

Als Organisationsform der kundenindividuellen Massenproduktion wird im Rahmen die-
ser Arbeit die Variantenfließfertigung betrachtet. Bei der Fließfertigung sind die Be-
triebsmittel nach dem Flussprinzip entsprechend der Reihenfolge der Arbeitsgänge als
Stationen angeordnet und die Produkte bzw. Werkstücke werden nach einer dispositiv
festgelegten maximalen Bearbeitungszeit, der Taktzeit, an die nachfolgende Station
weitergegeben (Boysen 2005, S. 6 ff.). Die Weitergabe kann durch eine Transportein-
richtung bzw. ein Fließband erfolgen, wobei das Werkstück entweder mit kontinuierli-
cher Geschwindigkeit auch während der Bearbeitung in Bewegung ist oder eine Bewe-
gung lediglich nach Ablauf der Taktzeit vollzogen wird (Boysen 2005, S. 7, S. 9). Bei
einer Fließfertigung handelt es sich insbesondere dann um Variantenfließfertigung,
wenn diese unterschiedliche Produkte bzw. Produktvarianten in beliebiger Reihenfolge
in der Losgröße eins ökonomisch sinnvoll, z. B. ohne oder mit geringem Umrüsten,
produzieren kann (Boysen 2005, S. 10 f.). Hierzu ist es in der Regel erforderlich, dass
sich die Produkte produktionstechnisch ähneln und es sich somit um Varianten eines
Produktes handelt (Boysen 2005, S. 11 f.).

Langfristig erfolgt im Rahmen der Fließbandabstimmung die Planung der Mitarbeiter-
und Betriebsmittelausstattung des Variantenfließfertigungssystems, indem Arbeits-
gänge und entsprechend auch Mitarbeiter und Betriebsmittel Stationen zugeordnet
werden (Boysen 2005, S. 22 f., S. 51; Bard, Shtub & Joshi 1994, S. 2431). Hieraus
ergeben sich die Anzahl an Stationen, die Taktzeit und somit die maximale Produkti-
onsmenge innerhalb eines Zeitraums (Boysen 2005, S. 23, S. 154). Anpassungen der
Fließbandabstimmung sind prinzipiell auch basierend auf dem Produktionsprogramm
denkbar und können unter anderem durch Anpassungen der Mitarbeiterkapazitäten an
den Stationen erfolgen (Boysen, Fliedner & Scholl 2007b, S. 761 f., S. 769).

Im Rahmen der Ablaufplanung der Variantenfließfertigung wird jede Variante einem Takt zugeordnet, wodurch eine Festlegung der Produktionsreihenfolge, also eine Reihenfolgeplanung, erfolgt (vgl. Boysen 2005, S. 24; vgl. Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 12 f.). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die unterschiedlichen Varianten einerseits zu unterschiedlichen Belastungen an den Stationen führen und andererseits unterschiedliche Materialbedarfe erfordern (Boysen 2005, S. 24). Hinsichtlich der Arbeitslast können Überlasten durch eine solche Reihenfolge bzw. Sequenz vermieden werden, bei der Varianten, die hohe Arbeitslasten an derselben Station erfordern, nicht mehrfach aufeinander folgen (Boysen 2005, S. 24, S. 206; Boysen, Fliedner & Scholl 2009, S. 350). Hinsichtlich der Materialbedarfe kann bei der Reihenfolgebildung der Varianten ein gleichmäßiger Bedarfsverlauf nach dem Just-in-Time-Prinzip angestrebt werden, indem Optionen und somit die entsprechenden Teile, die Just-in-Time bereitgestellt werden sollen, gleichmäßig verteilt werden (Boysen 2005, S. 24, S. 206; Boysen, Fliedner & Scholl 2009, S. 350; Bard, Shtub & Joshi 1994, S. 2431 f.). Entsprechend lassen sich arbeitslastorientierte und materialbedarfsorientierte Ansätze zur Reihenfolgeplanung unterscheiden (Boysen, Fliedner & Scholl 2009, S. 350, S. 365 f.; Bard, Shtub & Joshi 1994, S. 2431 f.).

Es bestehen folgende arbeitslastorientierte Ansätze mit abnehmendem Detaillierungsgrad (Boysen, Fliedner & Scholl 2009, S. 366):

- *Mixed-Model-Sequencing*: Bei diesem Ansatz wird ein detaillierter Ablaufplan aufgestellt, der Arbeitslasten aller zu sequenzierenden Varianten an allen Stationen sowie Stationeigenschaften und die Taktzeit berücksichtigt. Durch die Betrachtung von unterlastenden und überlastenden Varianten sollen Überlasten durch eine entsprechende Reihenfolge vermieden werden. (Boysen 2005, S. 213; Boysen, Fliedner & Scholl 2009, S. 350; Dörmer 2013, S. 41 f.)
- *Car-Sequencing*: Bei diesem Ansatz werden Arbeitslasten lediglich implizit bzw. indirekt betrachtet, indem Sequenzierungsregeln der Form $H_o : N_o$ angewendet werden, um Überlasten durch einzelne arbeitsintensive Optionen o zu vermeiden. Eine solche Regel besagt, dass in einer Sequenz von N_o aufeinanderfolgenden Varianten höchstens H_o mit der Option o auftreten dürfen. Bspw. darf eine Option wie ein Schiebedach mit einer Sequenzierungsregel von 3:5 in höchstens drei von fünf aufeinanderfolgenden Varianten vorkommen. (Boysen, Fliedner & Scholl 2009, S. 350, S. 356 f., S. 366; Drexel & Kimms 2001, S. 482)

- *Arbeitslastorientiertes Level-Scheduling*: Dieser Ansatz berücksichtigt im Gegensatz zu den anderen beiden keine Kapazitätsbeschränkungen, sondern strebt eine gleichmäßige Verteilung der Arbeitslasten an den einzelnen Stationen an, um eine gleichmäßige Auslastung zu erreichen und Überlasten zu vermeiden. (Boysen, Fliedner & Scholl 2009, S. 366; Boysen, Fliedner & Scholl 2007a, S. 40, S. 42 f., S. 54 f.)

Folgende materialbedarfsorientierte Ansätze bestehen mit abnehmendem Detaillierungsgrad (Boysen, Fliedner & Scholl 2009, S. 366):

- *Teileorientiertes Level-Scheduling*: Bei diesem Ansatz wird die Menge je Teil, das in die Varianten eingeht, durch eine entsprechende Reihenfolge der zu sequenzierenden Varianten möglichst gleichmäßig verteilt. (Boysen, Fliedner & Scholl 2007a, S. 52; Boysen, Fliedner & Scholl 2009, S. 350, S. 366)
- *Variantenorientiertes Level-Scheduling*: Bei diesem Ansatz wird das teileorientierte Level-Scheduling aufgrund dessen hohen Problemkomplexität bei tausenden von Teilen approximiert, indem Varianten und somit indirekt entsprechende Teile möglichst gleichmäßig verteilt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass identische Varianten mehrfach auftreten. (Boysen, Fliedner & Scholl 2007a, S. 42, S. 46, S. 58 f.; Boysen, Fliedner & Scholl 2009, S. 361, S. 366)

Da die Entscheidungen der Produktionsprogrammplanung den Entscheidungsrahmen der Reihenfolgeplanung vorgeben, ist es sinnvoll, die entsprechenden Ansätze der Reihenfolgeplanung bereits im Rahmen der Produktionsprogrammplanung zu berücksichtigen bzw. zu antizipieren (Boysen 2005, S. 162 f.; Boysen, Fliedner & Scholl 2007b, S. 782; Dörmer 2013, S. 49 f.). Entsprechende Modellformulierungen von Boysen (2005, S. 170 f.) und Boysen, Fliedner & Scholl (2007b, S. 782 ff.) werden im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen und erweitert. Bei diesen handelt es sich aufgrund der Problemkomplexität der Reihenfolgeplanung um hinreichende und nicht um notwendige Bedingungen zur Lösbarkeit der Reihenfolgeplanung (vgl. Boysen 2005, S. 170), womit eine implizite Antizipation der Reihenfolgeplanung erfolgt (siehe Kapitel 2.2.1) (Buergin et al. 2016, S. 332). Hierzu werden im Rahmen dieser Arbeit Aufträge betrachtet, sodass für Optionen und Teile garantiert ist, dass diese vor und nach der Produktionsprogrammplanung zu baubaren Aufträgen entsprechend der regelbasierten Produktdokumentation kombiniert werden können.

2.7 Planung unter Unsicherheit

Planungsentscheidungen unter Unsicherheit bestehen in Entscheidungssituationen, in denen mögliche Szenarien bekannt sind, jedoch unsicher ist, welches Szenario eintritt (Scholl 2001, S. 42 f.). Entscheidungen, bei denen die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien bekannt sind, werden als Entscheidungen unter Risiko bezeichnet, wogegen solche, bei denen sie nicht bekannt sind, als Entscheidungen unter Ungewissheit deklariert werden (Scholl 2001, S. 43; Gebhard 2009, S. 57, S. 60). Ein robuster Plan zeichnet sich dadurch aus, dass er unter jedem möglichen Szenario zu einem genügend hohen Maß an Optimalität hinsichtlich der verfolgten Ziele führt und somit stabil ist (Scholl 2001, S. 93 ff.). Jedoch ist ein Plan auch dann robust, wenn er selbst oder das planausführende Produktionssystem ergänzend über ein ausreichendes Maß an Flexibilität verfügt, um Anpassungen hinsichtlich eingetretener ggf. bei der Planung nicht betrachteter Szenarien mit einem hohen Maß an Optimalität durchzuführen (Scholl 2001, S. 93 ff.). Die Robustheit eines Produktionssystems stellt somit einen Kompromiss zwischen einer hohen und einer stabilen Zielerreichung bzw. Performance dar, sodass trotz Unsicherheit eine stabile und möglichst hohe Performance erreicht wird (Stricker & Lanza 2014a, S. 461 f.; Stricker & Lanza 2014b, S. 87 f.; Stricker 2016, S. 19). Es ist somit auch im Sinne der Robustheit sinnvoll, die bestehende Flexibilität bei der Planausführung zu nutzen, da ansonsten Robustheit nur durch sehr hohe Kosten erreicht werden könnte (King & Wallace 2012, S. 30). Zur robusten Planung ist also im Rahmen der prädiktiven Planung (vgl. Sauer 2002, S. 4) ein möglichst stabiler Plan zu erstellen, sodass im Rahmen der reaktiven Planung nur geringfügige Anpassungen des Plans selbst (vgl. Sauer 2002, S. 4) oder des Produktionssystems unter Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Flexibilität erforderlich sind bzw. ganz vermieden werden können. Die robuste Planung entspricht einer risikoscheuen bzw. risikoaversen Entscheidungshaltung unter Unsicherheit, bei der Kosten zur Absicherung gegen ein ungünstiges Szenario ggf. durch Aufbau von Flexibilitätspotentialen getragen werden, die die erwarteten Kosten des ungünstigen Szenarios übersteigen (vgl. Scholl 2001, S. 51 f., S. 97 f., S. 173; vgl. King & Wallace 2012, S. 14).

Eine robuste Planung kann durch den Einsatz robuster Optimierungsmodelle erfolgen (Mulvey, Vanderbei & Zenios 1995, S. 264 f.). Allgemein lassen sich Optimierungsprobleme im Rahmen des Operations Research als Optimierungsmodelle mit einer zu maximierenden oder minimierenden Zielfunktion und Nebenbedingungen bzw. Restriktionen formulieren (Neumann & Morlock 2002, S. 5; Nickel, Stein & Waldmann 2014, S.

1, S. 8 f., S. 13, S. 173). Erfolgt eine Optimierung unter Unsicherheit, so wird zwischen einwertigen bzw. indirekten und mehrwertigen bzw. direkten Ansätzen zur Berücksichtigung der Unsicherheit unterschieden (Scholl 2001, S. 119 f.).

Bei einwertigen Ansätzen werden stochastische, mehrwertige Parameter indirekt durch einen deterministischen Ersatzwert berücksichtigt, sodass genau ein Szenario betrachtet wird. Entsprechende Modelle werden als deterministische Ersatzwertmodelle bezeichnet. Werden als Ersatzwerte der Parameter deren Erwartungswerte verwendet, so handelt es sich um ein deterministisches Erwartungswertmodell. Bei mehrwertigen Ansätzen können mehrere Werte der stochastischen Parameter durch diskrete Szenarien und ggf. deren Wahrscheinlichkeiten direkt im Optimierungsmodell berücksichtigt werden. Der Vorteil der Abbildung der Unsicherheit in Form von diskreten Szenarien besteht darin, dass Datensätze verwendet werden können. Eine optimale Lösung eines szenarienbasierten Optimierungsmodells stellt hinsichtlich des Zielfunktionswerts eine Kompromisslösung zwischen den betrachteten Szenarien dar und muss hinsichtlich der Nebenbedingungen für jedes einzelne Szenario zulässig sein, weshalb die Menge an zulässigen Lösungen sehr klein oder sogar leer sein kann. Daher ist ein deterministisches Ersatzmodell als deterministisches Äquivalent des stochastischen Modells aufzustellen (Kall & Wallace 1994, S. 15, S. 25 f.). Zur Formulierung einer deterministischen Ersatzzielfunktion können verschiedene Entscheidungskriterien verwendet werden. Hinsichtlich der Nebenbedingungen sind aufgrund der Zulässigkeit deterministische Ersatzrestriktionen zu formulieren. (Scholl 2001, S. 71 ff., S. 119 ff., S. 186 ff., S. 206 f.)

Zur Bewertung der Robustheit von Lösungen von Optimierungsmodellen lassen sich die Ergebnisrobustheit, die Optimalitätsrobustheit, die Informationsrobustheit, die Zulässigkeitsrobustheit und die Planungsrobustheit als Robustheitskriterien unterscheiden (Scholl 2001, S. 98 f.). Im Folgenden wird auf die Robustheitskriterien sowie deren Bezug zu entsprechenden Entscheidungskriterien der Zielfunktion und zu dem Aspekt der Zulässigkeit von Nebenbedingungen eingegangen.

2.7.1 Ergebnisrobustheit

Die Ergebnisrobustheit bezieht sich einerseits auf die Ergebnishöhen bzw. die Zielfunktionswerte der einzelnen Szenarien und andererseits auf die Ergebnisstabilität, da die Ergebnishöhen in den verschiedenen einzelnen Szenarien voneinander abweichen können und daher einen Zielkonflikt darstellen. Hinsichtlich der einzelnen Szenarien

kann hierzu ein Anspruchsniveau formuliert werden, das nur bis zu einem gewissen Wert oder einer gewissen Wahrscheinlichkeit unter- oder überschritten werden darf. Eine ergebnisstabile Lösung bietet unter Unsicherheit eine hohe Sicherheit bezüglich der Planung und des entsprechenden Ergebnisses. Zur Betrachtung der Ergebnishöhe in der Ersatzzielfunktion ist das Erwartungswertkriterium, das die mit den Szenario-wahrscheinlichkeiten gewichtete Summe der Ergebnishöhen der einzelnen Szenarien bildet und somit eine risikoneutrale Entscheidungshaltung widerspiegelt, von Bedeutung. Dagegen können hinsichtlich der Ergebnisstabilität Streuungsmaße wie die Varianz oder das Maximum bei einem Minimierungsproblem als Minimax-Kriterium im Fall einer risikoaversen Haltung betrachtet werden. Um sowohl Ergebnishöhe als auch -stabilität im Sinne der Ergebnisrobustheit zu berücksichtigen, können entsprechende Entscheidungskriterien in der Ersatzzielfunktion des szenarienbasierten Optimierungsmodells miteinander kombiniert werden. Beispiele hierzu sind das Erwartungswert-Varianz-Kriterium und das Hodges-Lehmann-Kriterium. Das Hodges-Lehmann-Kriterium umfasst sowohl den Erwartungswert als auch das Maximum bei einem Minimierungsproblem und ermöglicht eine Gewichtung der beiden Werte entsprechend der Risikoaversion (Hodges & Lehmann 1952, S. 396 ff.). (Scholl 2001, S. 52, S. 54, S. 99 ff., S. 124 ff.)

Anhand der dargelegten Entscheidungskriterien lassen sich robuste Optimierungsmodelle von stochastischen Optimierungsmodellen unterscheiden. Stochastische Optimierungsmodelle berücksichtigen lediglich das Erwartungswertkriterium in der Zielfunktion und vernachlässigen dadurch die Variabilität bzw. Stabilität des Ergebnisses und somit eine risikoaverse Entscheidungshaltung. In der robusten Optimierung wird eine höhere Ergebnisstabilität angestrebt, wofür höhere Kosten in Form einer höheren Ergebnishöhe bei einem Minimierungsproblem im Vergleich zur stochastischen Optimierung in Kauf genommen werden. Dennoch besteht die Gemeinsamkeit der stochastischen und der robusten Optimierungsmodelle darin, dass sie durch den proaktiven Einbezug stochastischer Parameter in das Modell deterministischen Ersatzwertmodellen überlegen sind. Bei letzteren können lediglich deren Lösungen durch postoptimale Analysen wie bspw. durch die Sensitivitätsanalyse auf stochastische Parameter getestet werden. (Mulvey, Vanderbei & Zenios 1995, S. 264 ff.)

Um den Mehrwert eines stochastischen bzw. robusten Optimierungsmodells gegenüber dem entsprechenden deterministischen Erwartungswertmodell aufzuzeigen und somit den zusätzlichen Aufwand der Berücksichtigung mehrwertiger Parameter durch

Szenarien zu rechtfertigen, können deren optimalen Ergebnisse miteinander verglichen werden. Zur Vergleichbarkeit wird der Erwartungswert des deterministischen Erwartungswertmodells verwendet, indem das *erwartete Ergebnis der Lösung des deterministischen Erwartungswertmodells (expected result of using the expected value solution, EEV)* unter den stochastischen Parametern bzw. den entsprechenden Szenarien ermittelt wird. Der *Wert der stochastischen Lösung (value of the stochastic solution, VSS)* ergibt sich durch die Differenz des Ergebnisses des stochastischen bzw. robusten Optimierungsmodells und dem erwarteten Ergebnis der Lösung des deterministischen Erwartungswertmodells (EEV). Jedoch ist die Vergleichbarkeit der beiden Modelle durch den Wert der stochastischen Lösung eingeschränkt, da die Modelle an sich grundlegend verschieden sind. (Kall & Wallace 1994, S. 137 f.; Birge & Louveaux 2011, S. 165; Scholl 2001, S. 79 f., S. 121)

2.7.2 Optimalitätsrobustheit

Die Optimalitätsrobustheit strebt eine möglichst geringe Abweichung des Ergebnisses des stochastischen bzw. robusten Optimierungsmodells von den szenariooptimalen Zielfunktionswerten bzw. Ergebnissen der einzelnen Szenarien, also möglichst geringe Regretwerte, an. Hierzu kann im Gegensatz zur Ergebnisrobustheit anstelle eines Anspruchsniveaus für alle Szenarien ein Anspruchsniveau für jedes einzelne Szenario definiert werden. Als entsprechendes Entscheidungskriterium kann in der Zielfunktion das Regret-Erwartungswert-Kriterium berücksichtigt werden, bei dem der Erwartungswert des absoluten oder relativen Regrets betrachtet wird. (Scholl 2001, S. 102 ff.)

Das absolute Regret-Erwartungswert-Kriterium entspricht den Ergebniseinbußen aufgrund der Unsicherheit und somit dem *erwarteten Wert der vollständigen Information (expected value of perfect information, EVPI)*. Würde keine Unsicherheit bestehen, so könnte nämlich das tatsächlich eintretende Szenario einzeln optimiert werden. Der *erwartete Wert der vollständigen Information* könnte somit eingespart werden, wenn die Information über das einzutretende Szenario bekannt wäre. (Kall & Wallace 1994, S. 140 f.; Birge & Louveaux 2011, S. 163; Scholl 2001, S. 102, S. 121, S. 195)

2.7.3 Zulässigkeitsrobustheit

Die Zulässigkeitsrobustheit meint, dass die Lösung des Optimierungsmodells für jedes Szenario zulässig ist. Die Lösung ist somit stabil und lässt sich durch Anpassungen im

Rahmen der zur Verfügung stehenden Flexibilität ausführen. Werden Anpassungsmaßnahmen wie bspw. Überstundenkosten bei Kapazitätsüberschreitungen in der Zielfunktion berücksichtigt, so wird die Zulässigkeitsrobustheit bei der Ergebnisrobustheit und der Optimalitätsrobustheit betrachtet. Da es in der industriellen Anwendung erforderlich ist, einen Plan auszuführen und somit einen unzulässigen Plan durch entsprechende Kosten realisierbar zu machen, besteht im strengen Sinne in der Regel keine Unzulässigkeit. Hinsichtlich des Optimierungsmodells ist die Unzulässigkeit jedoch von Bedeutung, da Lösungen, die gegen Nebenbedingungen verstoßen, als unzulässig gelten. Entsprechend sind Ersatzrestriktionen für unsichere Nebenbedingungen zu formulieren, wozu entweder Chance-Constrained-Modelle oder Kompensationsmodelle eingesetzt werden können. (Scholl 2001, S. 73 f., S. 104 f., S. 207)

Chance-Constrained-Modelle fordern die Einhaltung von Nebenbedingungen mit einer gewissen Zulässigkeitswahrscheinlichkeit (Scholl 2001, S. 74). Somit ist eine Lösung mit einer entsprechenden Wahrscheinlichkeit unzulässig, wobei die Auswirkungen der Unzulässigkeit bei der Planausführung nicht betrachtet werden (Scholl 2001, S. 74). Da bei Chance-Constrained-Modellen keine Auswirkungen des Auftretens unzulässiger Szenarien in Form von Kosten erfasst werden, kann es vorkommen, dass für eine Lösung für unzulässige Szenarien ein sehr schlechtes Ergebnis erzielt wird (King & Wallace 2012).

Kompensationsmodelle berücksichtigen dagegen, dass in einzelnen Szenarien, in denen Nebenbedingungen verletzt werden, Maßnahmen bestehen, um diese Verletzungen auszugleichen bzw. zu kompensieren. Die Kosten für diese Kompensationsmaßnahmen werden abhängig vom Ausmaß der Verletzung in der Zielfunktion berücksichtigt und hierzu zum Zeitpunkt der Planung antizipiert. Für Verletzungen, die nicht kompensiert werden können, können extrem hohe Kosten berücksichtigt werden, sodass diese vermieden werden. (Scholl 2001, S. 74 f.)

Bei Kompensationsmodellen kann grundlegend zwischen Entscheidungen unterschieden werden, die zum Zeitpunkt der Planung getroffen werden müssen (Entscheidungen auf erster Stufe), und Entscheidungen, die zu einem späteren Zeitpunkt getroffen werden, zu dem das eingetretene Szenario mit den entsprechenden Parametern bekannt ist (Entscheidungen auf zweiter Stufe) (Birge & Louveaux 2011, S. 57 f.). Die Entscheidungen auf erster Stufe erfolgen somit unter Unsicherheit szenariounabhängig (Scholl 2001, S. 209, S. 212). Die Entscheidungen auf zweiter Stufe werden dagegen nicht nur

szenariospezifisch getroffen, sondern hängen zudem von den auf erster Stufe getroffenen Entscheidungen ab (Birge & Louveaux 2011, S. 57 f.).

2.7.4 Informationsrobustheit

Die Informationsrobustheit trägt dem Aspekt Rechnung, dass bei der Optimierung womöglich ein Informationsstand durch Szenarien berücksichtigt wird, der nicht dem gesamten verfügbaren Informationsstand entspricht. Grund hierfür kann sein, dass die Berücksichtigung des verfügbaren Informationsstands zu einer zu hohen Rechenlaufzeit zur Lösung des Optimierungsmodells führen würde. Eine Lösung ist hinsichtlich eines Informationsstandes informationsrobust, wenn sie gegenüber einem anderen Informationsstand genauso oder annähernd so ergebnis-, optimalitäts- bzw. zulässigkeitsrobust ist. Die Informationsrobustheit dient somit nicht dazu, verschiedene Lösungen und deren Ergebnisse miteinander zu vergleichen, sondern eine Lösung unter verschiedenen Informationsständen zu betrachten. (Scholl 2001, S. 105 ff., S. 309)

2.7.5 Planungsrobustheit

Planungsrobustheit bezieht sich auf Anpassungen von zu einem Planungszeitpunkt für mehrere Perioden getroffenen, vorläufigen Entscheidungen an veränderte Umweltbedingungen bzw. an ein eingetretenes Szenario. Plananpassungen können somit aufgrund verbesserter Informationen als Folge von mangelnder Stabilität bzw. mangelnder Unabhängigkeit von dem eingetretenen Szenario oder als Folge von Prognosefehlern notwendig sein. Gerade bei der Realisierung von Plänen, die Vorlaufzeiten benötigen (siehe z. B. Sekundärbedarf in Kapitel 2.4), entsteht durch die Anpassung der Pläne durch Ausnutzung von Flexibilitätspotentialen Planungs nervosität. Planungs nervosität kann bspw. im Rahmen der Beschaffung zu einer verstärkter Planungs nervosität bei Lieferanten und bei weiter vorgelagerten Stufen der Supply Chain nach dem Bullwhip-Effekt führen (vgl. Blackburn, Kropp & Millen 1986, S. 413 f.). (Scholl 2001, S. 108 ff.)

Planungsrobustheit bedeutet somit, dass die zur Verfügung stehende Flexibilität für Plananpassungen lediglich zu einem Teil genutzt wird bzw. auf einen Teil der zur Verfügung stehenden Flexibilität verzichtet wird, um die Minderung der Ergebnishöhe durch Nutzung der Flexibilität möglichst gering zu halten. Die Planungsrobustheit ist je höher, desto geringer das Ausmaß der Anpassungen in Bezug auf die Ergebnishöhe aufgrund entsprechender Aufwände bzw. Zusatzkosten ist. (vgl. Scholl 2001, S. 97, S. 108 ff.)

3 Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden bestehende Forschungsansätze in der Literatur dargestellt, die die für diese Arbeit relevanten Planungsaufgaben und die damit verbundenen forschungsleitenden Fragestellungen, die in Kapitel 1.2 dargelegt wurden, adressieren. Dabei wird eine Auswahl relevanter Ansätze als Überblick dargestellt, ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

Zunächst werden Ansätze zur Auftragsgenerierung und darauf folgend Ansätze zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk und Ansätze zur Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen vorgestellt. Es ist vorweg anzumerken, dass keiner der betrachteten Ansätze weder alle drei Planungsaufgaben adressiert noch diese integriert betrachtet.

3.1 Ansätze zur Auftragsgenerierung

Zur Szenariengenerierung hinsichtlich Kundenauftragskonfigurationen ist es erforderlich, dass Auftragskonfigurationen auf der Optionenebene betrachtet, Baubarkeitsregeln berücksichtigt und Auftragskonfigurationen je Kundenauftrag repräsentativ abgebildet werden. Die Optionenebene ist von Bedeutung, da dadurch Auftragskonfigurationen abgebildet und Teile sowie Kapazitätsbedarfe bzw. Arbeitslasten daraus abgeleitet werden können. Die Literatur zur Szenariotechnik beschäftigt sich mit Szenarien zur Beschreibung möglicher zukünftiger Situationen beruhend auf unsicheren, voneinander abhängigen Einflussfaktoren (Gausemeier & Plass 2014, S. 44 ff.). Sie findet hauptsächlich in der strategischen Planung Anwendung und ist prinzipiell zur Szenariengenerierung für robuste Optimierungsmodelle geeignet (Scholl 2001, S. 215 f.). Spezielle Ansätze zur Generierung von Szenarien hinsichtlich unsicheren Auftragskonfigurationen sind dem Verfasser dieser Arbeit jedoch keine bekannt.

Im Folgenden werden daher ausschließlich Ansätze zur Auftragsgenerierung vorgestellt, die die Generierung von Planaufträgen betreffen. Die Ansätze werden daraufhin untersucht, ob sie Aufträge auf der Optionenebene betrachten, Baubarkeitsregeln und Einbauraten berücksichtigen und auf die Verwendung von Referenzaufträgen verzichten. Die Bewertung der Ansätze hinsichtlich der genannten Kriterien ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

	Betrachtung der Optionenebene	Berücksichtigung von Baubarkeitsregeln	Berücksichtigung von Einbauraten	Keine Verwendung von Referenzaufträgen
○ nicht erfüllt				
◐ teilweise erfüllt				
● voll erfüllt				
Hayler (1999)	◐	●	◐	○
Stautner (2001)	●	○	◐	○
Wagenitz (2007)	●	●	◐	●
Liebler (2013)	●	●	◐	●

Abbildung 3.1: Bewertung von Ansätzen zur Planauftragsgenerierung

Hayler (1999) präsentiert einen Auftragsgenerator zur Unterstützung der Spezifikation marktgerechter Lagerfahrzeuge für die Automobilindustrie. Aufträge werden auf der Optionenebene betrachtet, jedoch wird die Komplexität reduziert, indem nicht sämtliche Optionen einbezogen werden. Zur Generierung von bis zu zehn Konfigurationsvorschlägen werden Kundenaufträge mit repräsentativen Optionskombinationen selektiert, hinsichtlich Expertenmeinungen der Händler angepasst und auf Baubarkeit geprüft. Expertenwissen wird durch eine empirische Studie mittels Fragebögen gewonnen und in Form von Regeln abgebildet, die einzelne Optionen gesondert weglassen oder hinzufügen, sowie Konfigurationen für Zielgruppen und beliebte Optionskombinationen angeben. (Hayler 1999, S. 11, S. 24, S. 61, S. 71 ff., S. 108 f., S. 173, S. 175 f.)

Stautner (2001) entwickelte einen modularen Baukasten zur Unterstützung beim Konfigurationsprozess für Planaufträge im Automobilvertrieb. Hierzu werden Referenzaufträge verwendet, um zunächst mittels einer Clusteranalyse Repräsentanten häufig gewählter Konfigurationen zu identifizieren. Prognosen hinsichtlich der Repräsentanten werden schließlich verwendet, um dezentralen Vertriebspartnern, die die Verantwortung für ihr Lager und den Verkauf tragen und daher die Konfigurationen nach eigenen Wünschen anpassen können, Konfigurationen vorzuschlagen. (Stautner 2001, S. 95, S. 115 f., S. 119 ff., S. 129 f., S. 141, S. 175 f.)

Wagenitz (2007) stellt einen Ansatz zur modellgestützten Prozessgestaltung der Auftragsabwicklung in der Automobilindustrie vor. Hierzu werden Planaufträge nacheinander konstruiert, indem einem Auftrag aus jeder Optionsgruppe nacheinander jeweils eine hinsichtlich der Baubarkeitsregeln zulässige Option hinzugefügt wird. Zur Einhaltung von Einbauraten werden durch eine Heuristik bereits erzeugte Aufträge mit einer

Option, deren Einbauraten um mehr als einen Toleranzwert abweicht, ausgewählt und gelöscht. Die Erreichung von Einbauraten unter Berücksichtigung von Baubarkeitsregeln stellt für das vorgestellte Verfahren eine Herausforderung dar. In einfachen Fällen kann diese durch zusätzliche Regeln für das Hinzufügen von Optionen unterstützt werden. (Wagenitz 2007, S. 1, S. 108 ff., S. 111 f., S. 226)

Liebler (2013) entwickelte ein Prozesskonzept und IT-System zur Auftragsabwicklung in einem Produktionsnetzwerk der variantenreichen Serienproduktion zur Anwendung in der Automobilindustrie. Die Generierung von hinsichtlich aller Optionen vollständig definierten Planaufträgen bildet die Basis für eine zeitlich durchgängige Planung zwischen mittel- und kurzfristigem Planungshorizont und ermöglicht eine direkte Einplanung von Aufträgen ins Produktionsnetzwerk. Planaufträge werden durch einen Algorithmus konstruiert, der zunächst entsprechend der Stückzahl je Markt Auftragsrümpfe generiert, die nacheinander durchgegangen werden, um ihnen Optionen unter Beachtung derer aktualisierten Einbauraten hinzuzufügen. Beim Hinzufügen einer Option wird anhand Baubarkeitsregeln überprüft, ob eine Konfiguration noch zu einer zulässigen vollständigen Konfiguration erweitert werden kann. Durch den Algorithmus lassen sich mehrere Tausend baubare Planaufträge je Sekunde generieren, jedoch weichen ca. 5 % der Einbauraten um mehr als 5 % ab. (Liebler 2013, S. 2 f., S. 5, S. 54, S. 86, S. 90 f., S. 94 f., S. 120 ff., S. 153, S. 156)

Keiner der Ansätze zur Planauftragsgenerierung erfüllt somit sämtliche Kriterien. Insbesondere besteht ein Forschungsdefizit in der Hinsicht, dass Einbauraten auch unter Berücksichtigung von Baubarkeitsregeln zu einem hohen Maße eingehalten werden.

3.2 Ansätze zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk

In diesem Kapitel werden Ansätze zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk vorgestellt. Diese werden hinsichtlich der Betrachtung der Optionenebene, der Antizipation unsicherer Kundenauftragskonfigurationen, der Auftragszuordnung zu Standorten und zu Perioden, der Antizipation der Materialbedarfsplanung, der Antizipation der Ablaufplanung, der Antizipation der Distributionsplanung, der Berücksichtigung der Absatzplanung sowie der Robustheitsbetrachtung hinsichtlich der Auftragskonfigurationen und deren Auswirkungen bewertet. Die Bewertung der vorgestellten Ansätze hinsichtlich der genannten Kriterien ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

	Betrachtung der Optionenebene	Antizipation unsicherer Kundenauftragskonfigurationen	Auftragszuordnung zu Standorten	Auftragszuordnung zu Perioden	Antizipation der Materialbedarfsplanung	Antizipation der Ablaufplanung	Antizipation der Distributionsplanung	Berücksichtigung der Absatzplanung	Robustheitsbetrachtung hinsichtlich Auftragskonfigurationen
Thierry et al. (1994, 1995)	○	○	◐	◐	●	●	○	●	○
Wittek (2013)	○	○	◐	◐	○	◐	○	●	◐
Boysen (2005), Boysen, Fliedner & Scholl (2007)	◐	○	●	●	●	●	●	●	◐
Yang et al. (2010)	○	○	●	●	○	●	●	●	○
Sauer (2002)	○	○	●	○	◐	●	○	●	◐
Guo, Wong & Leung (2013), Guo et al. (2013)	○	○	●	○	◐	●	◐	●	◐
Chen & Hung (2014)	○	○	●	○	●	●	●	●	○
Bish, Muriel & Biller (2005)	○	◐	●	○	●	○	◐	●	◐
Volling (2009)	●	○	○	●	○	●	○	●	○
Dörmer (2013)	○	○	○	●	●	●	○	●	○
Liebler (2013)	●	○	○	●	●	●	●	●	◐

Abbildung 3.2: Bewertung von Ansätzen zur Auftragseinplanung

Thierry et al. (1994) und Thierry et al. (1995) stellen Modelle zur Bestimmung der Menge der zu produzierenden Produkte in Perioden an Produktionsstandorten dar. Hierbei berücksichtigen sie standort- und periodenspezifische Kapazitätsbeschränkungen hinsichtlich der Arbeitslasten der zu produzierenden Produkte und anfallende Rüstzeiten sowie die Verfügbarkeit von eingehenden Teilen. Neben der Endmontage werden auch vorgelagerte Produktionsschritte mit Transporten zwischen Standorten und Lagermengen betrachtet. Zudem wird die termingerechte Auslieferung von Kundenaufträgen bezüglich der Produkte mit vorgegebenen Perioden und Standorten modellseitig abgebildet. (Thierry et al. 1994, S. 609 ff.; Thierry et al. 1995, S. 262 ff.)

Wittek (2013) entwickelte ein Optimierungsmodell zur mittelfristigen, zentralen und standortübergreifenden Programmplanung in flexiblen Produktionsnetzwerken der Automobilindustrie. Unter Beachtung von Kapazitätsgrenzen der Standorte und unter Nutzung der gegebenen Flexibilität zur Zuordnung von Produktmodellen zu Standorten, zur Vor- und Nachproduktion sowie zur Kapazitätserweiterung durch Zusatzschichten wird für eine gegebene Nachfragemenge je Produktmodell und Periode die Entscheidung getroffen, welches Produktmodell in welcher Menge in welcher Periode an welchem Standort produziert werden soll. Hierzu wird der Deckungsbeitrag als Differenz der Erlöse und der relevanten variablen Kosten in einer monetären Zielfunktion maximiert. Zur Robustheit wird Unsicherheit bezüglich der Fahrzeugmenge je Modell nicht

im Optimierungsmodell, sondern indirekt durch eine Sensitivitäts- und Szenarioanalyse nach der Optimierung betrachtet. (Wittek 2013, S. 3 ff., S. 77 ff., S. 117 ff., S. 126 f.)

Boysen (2005) und Boysen, Fliedner & Scholl (2007b) stellen ein Optimierungsmodell zur Zuordnung von Aufträgen zu Perioden und als Erweiterung auch zu Standorten auf. Dabei werden in der Zielfunktion Kosten für Terminabweichungen mit Lagerkosten für zu früh und Verspätungskosten für zu spät fertiggestellte Aufträge sowie ggf. Kosten zur Produktion an den verschiedenen Standorten und zur Distribution zu den Auslieferungsorten der Aufträge minimiert. Das Überschreiten der maximal verfügbaren Menge eines Teils oder einer Option in einer Periode und ggf. an einem Standort durch die Menge entsprechender Aufträge wird durch eine Nebenbedingung vermieden. Weitere Nebenbedingungen ermöglichen eine Antizipation der Reihenfolgeplanung nach dem Mixed-Model-Sequencing basierend auf Arbeitslasten, dem Car-Sequencing basierend auf Optionen und dem Level-Scheduling basierend auf Teilen oder Optionen, wobei auf die zusammenhängende Modellierung von Arbeitslasten, Optionen und Teilen von Aufträgen nicht weiter eingegangen wird. Kapazitätsanpassungen werden zur Robustheit bezüglich der Anzahl der zu produzierenden Aufträge berücksichtigt, indem bspw. Zusatzschichten mit entsprechenden zusätzlichen Kosten im Modell abgebildet werden. (Boysen 2005, S. 167 ff.; Boysen, Fliedner & Scholl 2007b, S. 767 ff., S. 782 f.)

Yang et al. (2010) präsentieren ein Optimierungsmodell zur Zuordnung von Aufträgen zu Standorten und Perioden unter Minimierung von Gesamtkosten und unter Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen der Standorte in den Perioden. Als Teil der Gesamtkosten werden Produktions- und Distributionskosten, sowie Strafkosten für verspätete Aufträge und Rüstkosten betrachtet. (Yang et al. 2010, S. 1251 ff.)

Sauer (2002) entwickelte einen Ansatz zur Ablaufplanung bei mehreren Standorten und deren Koordination zwischen der globalen Planung und der darunter liegenden Hierarchieebene der lokalen Planung. Durch die globale Planung werden Aufträge bezüglich Zwischen- und Endprodukten prädiktiv auf Standorte verteilt, woraufhin durch die lokale Planung prädiktiv Ablaufpläne an den Standorten und für Transporte zwischen den Standorten erstellt werden. Im Rahmen der globalen Planung werden die Termineinhaltung und die Kostenminimierung als Ziele angestrebt und Kapazitätsbedarfe der Zwischen- bzw. Endprodukte mit den Kapazitäten der Standorte abgeglichen. Hierbei wird eine gleichmäßige Belastung der Standorte angestrebt und der Planungsspielraum für die lokale Planung als Robustheit der globalen Planung betrachtet. Der Planungsspielraum kann genutzt werden, um lokale Störungen durch eine lokal reaktive Planung

zu adressieren. Ist dies nicht möglich oder treten globale Störungen bzw. Ereignisse wie bspw. Auftragsänderungen auf, so erfolgt eine global reaktive Planung. (Sauer 2002, S. 3, S. 9 f., S. 17, S. 81 ff., S. 87 ff., S. 104, S. 107 f., S. 115 ff.)

Guo, Wong & Leung (2013) und Guo et al. (2013) stellen ein multikriterielles Optimierungsmodell zur Zuordnung von Prozessen zur Produktion konkreter Aufträgen zu Standorten mit gleichzeitiger Ablaufplanung an den Standorten vor. Aufträge können dabei mehrere Produktionsprozesse erfordern und Standorte können nicht unbedingt alle Produktionsprozesse durchführen. Die Prozesszeiten ergeben sich aus den Arbeitslasten der Aufträge und den Kapazitäten für die Prozesse. Zeiten für den Transport von Zwischenprodukten zwischen den Standorten und von Fertigprodukten zu einem Zentrallager werden berücksichtigt. Als Ziele werden die gesamte Verspätungszeit und die gesamte Prozesszeit aller Aufträge sowie die gesamte Wartezeit der Prozesskapazitäten minimiert. Unsicherheit wird indirekt nach der Optimierung dahingehend betrachtet, dass Aufträge nach deren Einplanung storniert werden können. (Guo, Wong & Leung 2013, S. 1376 ff.; Guo et al. 2013, S. 972 ff.)

Chen & Hung (2014) entwickelten ein multikriterielles Optimierungsmodell zur Zuordnung von Aufträgen zu Standorten unter Minimierung von Gesamtkosten und der gesamten Produktionszeit. Die Gesamtkosten umfassen Materialkosten (inklusive Steuern und Transportkosten), Produktionskosten (inklusive Lohnkosten), Distributionskosten (inklusive Transportkosten und Zöllen) sowie Auftragsverspätungskosten. Zudem wird beachtet, dass die Kapazitäten der Standorte nicht durch den Kapazitätsbedarf der ihnen zugeordneten Aufträge überschritten werden. (Chen & Hung 2014, S. 1 ff.)

Bish, Muriel & Biller (2005) untersuchen Allokationsmechanismen zur Zuordnung von Aufträgen hinsichtlich zweier Produkte zu verfügbaren Kapazitäten zweier Standorte. Dabei wird Kapazitätsflexibilität hinsichtlich der Menge je Produkt je Standort sowie der daraus resultierende Materialbedarf, der eine Lagerhaltung von Teilen für die an den Standorten zu produzierenden Produkte erfordert, betrachtet. Besteht volle Flexibilität der Zuordnung der Produkte zu den Standorten, so werden Prioritätsregeln zur Allokation basierend auf den Produkten bezüglich der Standorte, den Kundenstandorten in Bezug auf die Produktionsstandorte, der gleichmäßigen Verteilung der Produkte und der Deckungsbeiträge der Produkte untersucht. Die Nachfragemenge nach einem Produkt in einer Periode wird dabei als unsicher betrachtet, worauf basierend die Lagerhaltung der Teile im Sinne der Robustheit erfolgt. (Bish, Muriel & Biller 2005, S. 167 ff.)

Volling (2009) konzeptionierte eine modellbasierte Entscheidungsunterstützung zur auftragsbezogenen Planung der variantenreichen Serienproduktion mit Fokussierung auf die Automobilindustrie. Hierzu wird ein Modell zur Auftragsannahme unter Minimierung von Terminabweichungskosten auf der Top-Ebene unter Antizipation eines Modells zur Produktionsprogrammplanung zur finalen Terminierung von Aufträgen unter Beachtung von Ressourcenrestriktionen auf der Basis-Ebene aufgestellt. So werden bei der Zuordnung eines Auftrags zu einer vorläufigen Periode im Rahmen der Auftragsannahme die Optionen einer Auftragskonfiguration im Vergleich zu den nicht belegten Kapazitäten der Ressourcen bezüglich der Optionen berücksichtigt. (Volling 2009, S. 4 f., S. 160 ff., S. 204 f.)

Dörmer (2013) betrachtet verschiedene Optimierungsmodelle und entsprechende heuristische Verfahren zur Antizipation der Reihenfolgeplanung bei der Produktionsprogrammplanung mit detaillierter Betrachtung der Kapazitäten von Arbeitsstationen und der Kapazitätsbedarfe von Aufträgen durch das Mixed-Model-Sequencing. So werden Aufträge mit entsprechenden Arbeitslasten und Teilebedarfen unter Berücksichtigung der Auslieferungszeiträume, der Materialkapazitäten und der Produktionskapazitäten Perioden zugeordnet. (Dörmer 2013, S. 3 ff., S. 27 ff., S. 36 f., S. 49, S. 52 ff., S. 61, S. 63, S. 68, S. 98)

Liebler (2013) stellt im Rahmen seines Prozesskonzeptes neben der Methode zur optionsbasierten Planauftragsgenerierung eine Heuristik zur Terminplanung vor. Diese ordnet iterativ einzelne Aufträge Perioden unter Berücksichtigung von Lieferterminen zu und berücksichtigt dabei einerseits den auftragsabhängigen Ressourcenbedarf und andererseits Kapazitätsrestriktionen der Zulieferer bzw. des Materialbedarfs, der Produktion und der Distribution. Hierbei werden Flexibilitätspotentiale genutzt und ggf. Anpassungsmaßnahmen bezüglich der Kapazitäten aber auch bezüglich des Kundenverhaltens dargelegt. (Liebler 2013, S. 5, S. 86, S. 90 f., S. 127 ff., S. 138 ff.)

Demnach erfüllt keiner der Ansätze sämtliche Kriterien. Insbesondere besteht ein Forschungsdefizit bezüglich der Antizipation der Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen und der entsprechenden Betrachtung der Robustheit.

3.3 Ansätze zur Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen

Im Folgenden werden Ansätze zur Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen hinsichtlich der Betrachtung der Optionenebene, der Berücksichtigung von Baubarkeitsregeln und von optionsbasierten Fixierungszeitpunkten zur Auftragskonfiguration bzw.

-rekonfiguration, der Berücksichtigung der Materialbedarfsplanung, der Ablaufplanung, der Distributionsplanung und der Absatzplanung sowie der Robustheitsbetrachtung hinsichtlich der Auftragskonfigurationen und deren Auswirkungen bewertet. Die Bewertung der Ansätze ist in Abbildung 3.3 anhand der vorgestellten Kriterien aufgeführt.

	Betrachtung der Optionenebene	Berücksichtigung von Baubarkeitsregeln	Optionsbasierte Fixierungszeitpunkte zur Auftragskonfiguration	Berücksichtigung der Materialbedarfsplanung	Berücksichtigung der Ablaufplanung	Berücksichtigung der Distributionsplanung	Berücksichtigung der Absatzplanung	Robustheitsbetrachtung hinsichtlich Auftragskonfigurationen
Brabazon & MacCarthy (2004)	●	○	◐	◐	◐	◐	●	◐
Meredith & Akinc (2007)	○	○	○	○	◐	◐	●	◐
Meyr (2009), Kilger & Meyr (2015)	○	○	○	○	○	○	●	◐

Abbildung 3.3: Bewertung von Ansätzen zur Kundenauftragszuordnung

Brabazon & MacCarthy (2004) präsentieren einen Ansatz zur Zuordnung von Kunden- zu Planaufträgen eines teilweise virtuellen und teilweise physischen Auftragsbestands. Hierbei wird die Rekonfigurationsflexibilität zur Anpassung von Optionen von Planaufträgen an Kundenaufträge durch Rekonfigurationskostenfunktionen betrachtet. Diese geben abhängig von der zeitlichen Position eines Planauftrags im Auftragsbestand für eine Option die Kosten der erforderlichen Änderung der Materialbedarfsplanung, des Produktionsplans oder von Teilen nach der Endmontage im Rahmen der Distribution durch Umbau aggregiert an. Neben den Rekonfigurationskosten wird eine zusätzliche Funktion zur Abbildung der Aversion gegenüber Wartezeiten verwendet, wobei angenommen wird, dass lediglich für Produkte auf Lager keine Wartezeit anfällt und die Aversion gegenüber Wartezeiten mit zunehmender Wartezeit ansteigt. In einer Simulationsstudie werden einzelne Kundenaufträge mit vier Optionsgruppen mit jeweils vier Optionen ohne Baubarkeitsbeschränkungen und somit 256 Produktvarianten unter Minimierung der Rekonfigurationskosten und Wartezeiten Planaufträgen zugeordnet. Zudem wird ein Fixierungszeitpunkt für alle Optionen ab einem gewissen Zeitpunkt im Auftragsbestand abgebildet, sodass insofern hinsichtlich Rekonfigurationen Planungsrobustheit angestrebt wird ohne jedoch die Flexibilitätspotentiale hinsichtlich der Optionen weiter zu differenzieren. (Brabazon & MacCarthy 2004, S. 155 ff.)

Meredith & Akinc (2007) untersuchen Entscheidungsregeln zur Zuordnung eingehender Kundenaufträge zu konfigurierten Planaufträgen im Auftragsbestand durch ein Si-

mulationsmodell. Dabei werden Aufträge mit gewünschten Lieferzeiten auf der Teileebene betrachtet, wobei bereits montierte Teile eines Planauftrags nachträglich angepasst werden können, sodass eine Kundenauftragszuordnung möglich ist. Hierzu werden Kosten zur Anpassung hinsichtlich gewünschter Teile oder zur Kundenakzeptanz alternativer Teile minimiert, womit Planungsrobustheit hinsichtlich bereits montierter Teile, aber nicht von noch zu montierenden Teilen angestrebt wird. Je nachdem, ob Teile auch nach der Endmontage im Rahmen der Distribution umgebaut werden können, können der dazu notwendige Kapazitätsbedarf und die dazu zur Verfügung zu stellende Kapazitätsflexibilität unabhängig von der Ablaufplanung der Endmontage betrachtet werden. (Meredith & Akinc 2007, S. 623 ff., S. 628 f., S. 631)

Meyr (2009) und Kilger & Meyr (2015) stellen Suchregeln und Optimierungsmodelle zur Zuordnung von Kundenaufträgen zu gefertigten Produkten (*Make-to-stock*) mit den Dimensionen Kunde, Zeit und Produkt vor. Die Kundendimension kann bspw. Kunden verschiedener Märkte oder Kundensegmente unterscheiden, für die Produktmengen vorbehalten sind. Durch Kundensegmente können Produkte für Kunden mit höherer Priorität aufgrund eines höheren erwarteten Gewinns im Sinne des Revenue Managements zurückgehalten werden. Die Zuordnung eines eingehenden Kundenauftrags zu einem Produkt erfolgt unter Berücksichtigung des Marktes bzw. Kundensegments, der Abweichung von der gewünschten Auslieferungszeit und des gewünschten Produktes. Je nach Suchregel können, wenn nicht anders möglich, auch Zuordnungen zu Produkten anderer Kunden oder zu anderen Produkten zugelassen werden. (Meyr 2009, S. 118 f., S. 127 f., S. 130 ff.; Kilger & Meyr 2015, S. 187, S. 189 ff.)

Insgesamt ist ersichtlich, dass keiner der Ansätze zur Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen sämtliche Kriterien erfüllt, wobei insbesondere ein Forschungsdefizit hinsichtlich der Berücksichtigung von Baubarkeitsregeln der regelbasierten Produktdokumentation besteht. Zudem werden die Materialbedarfs-, die Ablauf- und die Distributionsplanung bei der Kundenauftragszuordnung in Produktionsnetzwerken nicht explizit betrachtet und somit nicht differenziert im Rahmen der Robustheitsbetrachtung berücksichtigt. Dabei besteht das Potential, die zur Verfügung stehende Flexibilität durch optionsspezifische Rekonfigurationsaufwände bzw. -kosten hinsichtlich der Materialbedarfs-, der Ablauf- und der Distributionsplanung mit entsprechenden optionsspezifischen Fixierungszeitpunkten zur Auftragskonfiguration bzw. -rekonfiguration differenziert abzubilden.

4 Eigener Ansatz

In diesem Kapitel wird ein Lösungsansatz zur mittelfristigen Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken der variantenreichen Serienproduktion vorgestellt, der die horizontalen Planungsebenen Beschaffung, Produktion, Distribution und Absatz integriert berücksichtigt. Der Ansatz verfolgt zudem eine vertikale Durchgängigkeit zwischen mittel- und kurzfristiger Planung, indem er mittelfristig eine robuste Auftragsplanung unter Unsicherheit noch nicht vorliegender Kundenauftragskonfigurationen ermöglicht. Hierzu werden Kundenauftragskonfigurationen jeweils als eine Menge gewählter Optionen betrachtet, aus der sich Teile hinsichtlich der Beschaffung und Arbeitslasten hinsichtlich der Produktion ableiten lassen.

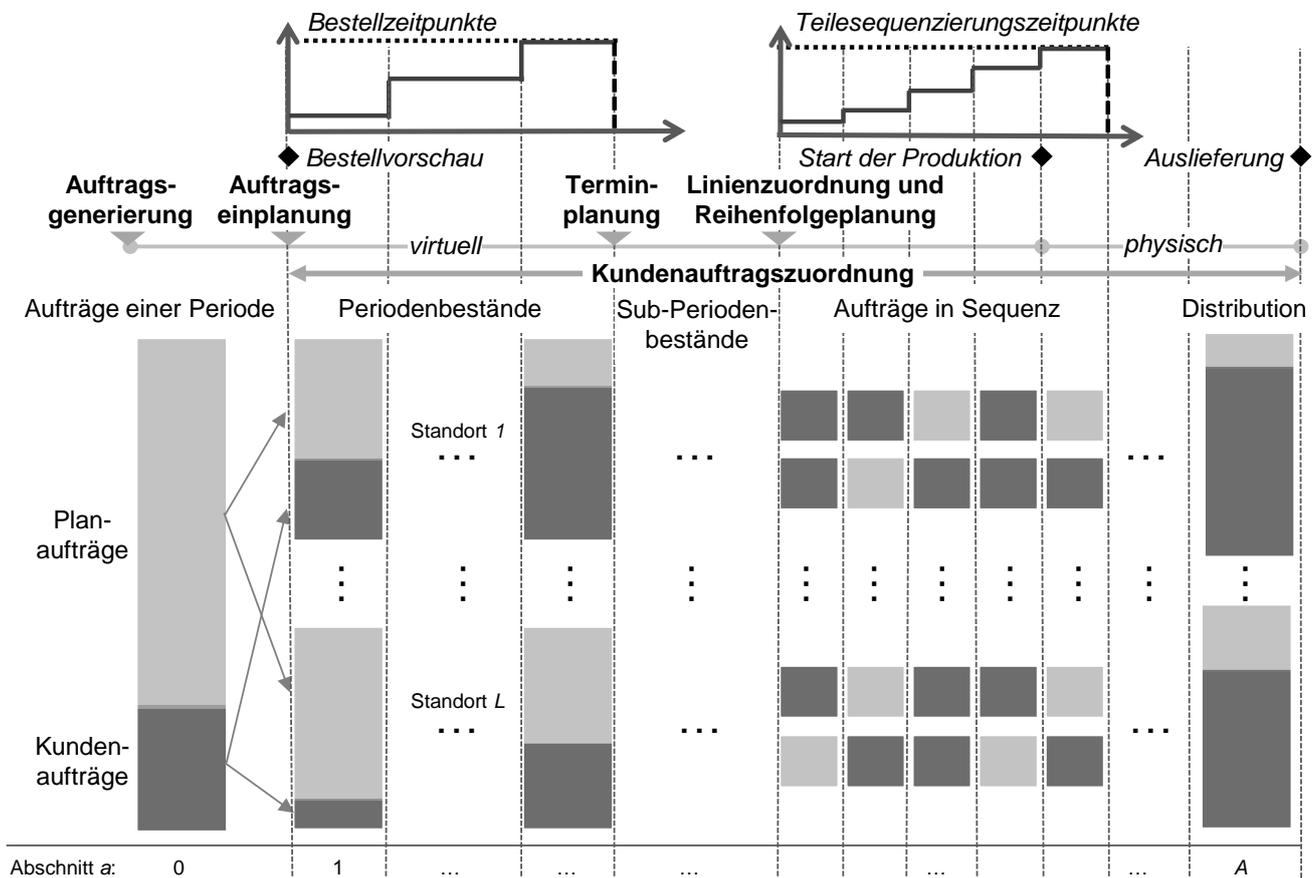


Abbildung 4.1: Auftragsbestand an Kunden- und Planaufträgen in einem Produktionsnetzwerk zu einem diskreten Zeitpunkt (vgl. Buergin et al. 2017, S. 503)

Abbildung 4.1 stellt den Auftragsbestand an Kunden- und Planaufträgen in einem Produktionsnetzwerk mit Standorten $l \in L$ zu einem diskreten Zeitpunkt dar. Die Perioden sowie ggf. Sub-Perioden und Takte können als fortlaufende Abschnitte $a \in \{0, \dots, A\}$ (Brabazon & MacCarthy 2004, S. 156) aneinandergereiht werden. Die Aufträge sind ab

Abschnitt 1 jeweils einem Standort und somit standortspezifischen Abschnitten zugeordnet. Die Zeiträume der standortspezifischen Abschnitte können sich ggf. je Standort unterscheiden, worauf im Rahmen der Auftragseinplanung (Kapitel 4.2, Abbildung 4.6) eingegangen wird. Da nach und nach Kundenaufträge mit gewünschten Lieferzeiten eingehen, ist der Auftragsfüllgrad in Abschnitten, die näher am Start der Produktion liegen, höher, was in Abbildung 4.1 beispielhaft durch den zunehmenden Anteil an Kundenaufträgen in weiter rechts liegenden Abschnitten angedeutet wird.

Die Zeitpunkte der globalen Planungsaufgaben der Auftragsgenerierung und der Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk sowie der Zeitrahmen der Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen sind ebenso wie die Zeitpunkte der lokalen Planungsaufgaben der Terminplanung, der Linienzuordnung an den Standorten und der Reihenfolgeplanung in Bezug auf die Abschnitte des Auftragsbestands dargestellt. Eine Terminplanung bezüglich Sub-Perioden kann kurzfristig lokal nach der mittelfristigen Einplanung erfolgen. Je nach Anwendung können bspw. Monatsbestände weiter in Wochenbestände und ggf. auch noch weiter in Tagesbestände verfeinert werden. Eine Zuordnung zu Linien an den Standorten kann zeitgleich mit der Reihenfolgeplanung auf den Linien ebenso kurzfristig und lokal erfolgen (Buergin et al. 2016, S. 331). Im Rahmen des Lösungsansatzes werden ausschließlich die globalen Planungsaufgaben der mittelfristigen Auftragsgenerierung (Kapitel 4.1), der mittelfristigen Auftragseinplanung als Produktionsprogrammplanung (Kapitel 4.2) und der mittel- bis kurzfristigen Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen (Kapitel 4.3) näher betrachtet, da durch diese die mittelfristige Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen berücksichtigt werden.

Durch die Auftragsgenerierung erfolgt die Abbildung des Auftragsbestands mit Auftragskonfigurationen für die Auftragseinplanung. Entsprechend dem Auftragsfüllgrad werden einerseits für Kundenaufträge Szenarien hinsichtlich ihrer unsicheren Auftragskonfigurationen (Kapitel 4.1.1) und andererseits Planaufträge (Kapitel 4.1.2) generiert. Dazu wird eine konsistente Produktdokumentation vorausgesetzt, die im Betrachtungszeitraum als statisch angesehen wird (vgl. Sinz 2003, S. 7, S. 109 f.). Durch Planaufträge wird auch für Produktionsmengen mit noch nicht eingegangenen Kundenaufträgen erreicht, dass die je Periode zu produzierenden Produktmodelle und Optionen nicht nur als Menge aggregiert, sondern auftragsbezogen und somit in Form von Auftragskonfigurationen betrachtet werden. Kunden- und Planaufträge können schließlich in ein im betrachteten Zeitraum als statisch angesehenes Produktionsnetzwerk eingeplant

werden, indem diese den Standorten und ggf. auch verschiedenen Perioden zugeordnet werden. Zur Sicherstellung der Robustheit der Einplanung ist die Unsicherheit der Auftragskonfigurationen von Kundenaufträgen explizit zu berücksichtigen, wogegen generierte Planaufträge aufgrund des fehlenden Bezugs zu Kunden und deren gewünschten Auftragskonfigurationen zunächst als sicher betrachtet werden. Erst mit dem Eingang von Kundenaufträgen und deren Zuordnung zu Planaufträgen wird ein Abgleich mit den Auftragskonfigurationen der Planaufträge ermöglicht. Durch die mit jeder Zuordnung verbundene Auflösung der Unsicherheit über den Kunden und die Auftragskonfiguration eines Planauftrags erfolgt der Übergang von einer scheinbaren Sicherheit zu einer tatsächlichen Sicherheit. Eine Zuordnung kann potentiell zu einem der Planaufträge aus dem Auftragsbestand erfolgen. Wird für einen Kundenauftrag im Auftragsbestand kein Planauftrag mit identischen Optionen gefunden, so ist es erforderlich, dass der Planauftrag entsprechend im Rahmen der zur Verfügung stehenden Flexibilität rekonfiguriert wird. Die Rekonfigurationen hinsichtlich Optionen des Planauftrags sind im Sinne der Planungsrobustheit möglichst gering zu halten, um eine Planungsnervosität in der Beschaffung und Produktion möglichst zu vermeiden.

Die Entkopplungspunkte der Kundenaufträge werden somit als individuell betrachtet und liegen daher sowohl vor als auch nach der Auftragseinplanung (Buergin et al. 2017, S. 502; vgl. Brabazon & MacCarthy 2004, S. 155 ff.). Durch die mittelfristige Generierung und Einplanung von Planaufträgen wird neben den kundenauftragsbezogenen Entkopplungspunkten der Kundenaufträge ein planauftragsbezogener Entkopplungspunkt geschaffen (Buergin et al. 2017, S. 502), der eine robuste Planung ermöglicht. Somit ist die mittel- im Vergleich zur kurzfristigen Generierung von Planaufträgen (vgl. Meyr 2004, S. 346 f.; vgl. Volling et al. 2013, S. 242 f.) zur Kapazitätsauslastung vorteilhaft. Eine Lagerhaltung von fertiggestellten Planaufträgen nach der Produktion kann jedoch aufgrund der scheinbaren Sicherheit nicht ausgeschlossen werden.

Auf Basis der Einplanung der Aufträge können sowohl für Kunden- als auch für Planaufträge Materialbedarfe je Standort und Periode abgeleitet und den Lieferanten als mittelfristige Liefervorschau bzw. Bestellvorschau übermittelt werden. Diese werden für Kunden- und Planaufträge jedoch erst zu den spätestmöglichen Bestellzeitpunkten der Teile im Sinne des Feinabrufs bei den Lieferanten als fix betrachtet (vgl. Lanza et al. 2015, S. 97; vgl. Buergin et al. 2017, S. 503). Für Kundenaufträge wird dabei eine Just-in-Time-Spezifikation ermöglicht, bei der Konfigurationen hinsichtlich der Optionen bis zu den entsprechenden Bestellzeitpunkten festgelegt werden können (vgl. Colledani et

al. 2016, S. 128 f.; vgl. Belkadi et al. 2016, S. 593; vgl. Buergin et al. 2018, S. 65 ff.). Somit können für Kundenaufträge mit als unsicher betrachteten Konfigurationen mittelfristig lediglich erwartete Bestellmengen zur Bestellvorschau abgeleitet werden. Für Planaufträge können aufgrund der als sicher betrachteten Konfigurationen zwar deterministische Bestellmengen ermittelt werden, jedoch werden Änderungen im Rahmen der Kundenauftragszuordnung entsprechend der zur Verfügung stehenden Flexibilität ermöglicht. Teilmengen können bis zu ihren Bestellzeitpunkten und die Zuordnungen der Teile zu Aufträgen bis zu ihren Teilesequenzierungszeitpunkten entsprechend der produktionssynchronen Abrufe geändert werden (vgl. Buergin et al. 2017, S. 503). Hierzu sind jedoch für eingehende Kundenaufträge mit gewünschten Lieferterminen, die in einem Abschnitt nach der Auftragseinplanung und somit nach Abschnitt 0 liegen, sämtliche Optionen komplett zu spezifizieren, damit eine Zuordnung zu einem eingeplanten Planauftrag unabhängig von einem Abschnitt und den entsprechend bereits fixierten Optionen bzw. Teilen eines Abschnitts erfolgen kann.

Im Fokus der Betrachtung der Abrufe liegen A-Teile und auch B-Teile, die programmorientiert beschaffen werden. Für Kundenaufträge liegt dabei der kundenauftragsbezogene Entkopplungspunkt so weit vor der Endmontage, dass entsprechende Teile entweder extern (*Purchase-to-order*) oder intern (*Assemble-to-order*, *Make-to-order* oder *Purchase-and-make-to-order*) für die Endmontage basierend auf den Kundenauftragskonfigurationen beschaffen werden (vgl. Klug 2010, S. 291; Salvador et al. 2001, S. 462; vgl. Buergin et al. 2018, S. 66). Erfolgen Abrufe basierend auf Auftragskonfigurationen von Planaufträgen, so werden diese nach einem entsprechenden planauftragsbezogenen Entkopplungspunkt anstelle des kundenauftragsbezogenen Entkopplungspunktes ausgeführt (vgl. Buergin et al. 2017, S. 502). Bei Planaufträgen ist jedoch eine Änderung der Zuordnung der Teile zu den Aufträgen und somit ein Tausch von Teilen zwischen den Aufträgen unter Berücksichtigung von Baubarkeitsregeln bis zu den Teilesequenzierungszeitpunkten möglich (vgl. Buergin et al. 2017, S. 503). Dabei wird jedoch durch die auftragsbasierte Planung zu jedem Zeitpunkt sichergestellt, dass jedes Teil einem Planauftrag zugeordnet ist und somit auch verbaut werden kann. Somit besteht eine konsistente, transparente und integrierte Planungsbasis für die Planungsebenen Beschaffung, Produktion, Distribution und Absatz.

Die Auftragseinplanung sollte spätestmöglich durchgeführt werden, sodass möglichst viele Optionen der Auftragskonfigurationen bekannt sind. Der spätestmögliche Zeitpunkt für die Auftragseinplanung richtet sich jedoch nach dem Zeitpunkt für die früheste

Bestellvorschau oder, falls diese nicht erforderlich ist, nach dem Zeitpunkt für die früheste Bestellung an einem der Standorte im Produktionsnetzwerk (vgl. Buergin et al. 2018, S. 67). Würde eine Änderung der Einplanung nach erfolgter Einplanung ermöglicht werden, so wäre diese lediglich unter Einhaltung der bereits erfolgten Bestellungen, unter Berücksichtigung weiterer Planungen der Produktion und unter Einhaltung von gegenüber den Kunden bestätigten Lieferterminen und ggf. Endmontagestandorten möglich. Aufgrund dieser Beschränkungen wird im Folgenden keine Änderungsmöglichkeit für eine bereits erfolgte Auftragseinplanung vorgesehen, sodass diese ausschließlich prädiktiv zum spätestmöglichen Zeitpunkt erfolgt und somit Planungsrobustheit hinsichtlich der Auftragseinplanung gegeben ist. Aufgrund unsicherer Auftragskonfigurationen von Kundenaufträgen sind jedoch Szenarien hinsichtlich der Auftragskonfigurationen zu generieren und bei der Auftragseinplanung insbesondere die Robustheitskriterien Ergebnisrobustheit, Optimalitätsrobustheit, Zulässigkeitsrobustheit und Informationsrobustheit zu betrachten.

Ebenso wie die Auftragseinplanung sollte die Reihenfolgeplanung zum spätestmöglichen Zeitpunkt und somit nicht simultan zur Auftragseinplanung durchgeführt werden, sondern erst dann, wenn Informationen hinsichtlich der Reihenfolge der Aufträge und deren Teile ggf. entsprechend dem frühesten Teilesequenzierungszeitpunkt benötigt werden (vgl. Buergin et al. 2018, S. 67). Bei der Auftragseinplanung, die den Lösungsraum der Reihenfolgeplanung bestimmt, wird die Reihenfolgeplanung implizit antizipiert (vgl. Buergin et al. 2016, S. 331).

Zur robusten Auftragsplanung unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen, also zur robusten Auftragseinplanung und zur robusten Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen, kann die zur Verfügung stehende Flexibilität der Planungsebenen Beschaffung, Produktion, Distribution und Absatz unter Berücksichtigung der Produktdokumentation in Anspruch genommen werden. Die Flexibilität wird als kurzfristige Anpassungsfähigkeit im Rahmen der Robustheit (vgl. Stricker 2016, S. 22) mit entsprechenden Flexibilitätskosten betrachtet. In den folgenden Unterkapiteln wird auf die Flexibilität der Planungsebenen und an den entsprechenden Stellen auch auf die mittelfristige Erweiterung von Flexibilitätsgrenzen durch Wandlung mit entsprechenden Wandlungskosten eingegangen. Hierzu werden die Lösungsansätze der Planungsaufgaben der Auftragsgenerierung, der Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk und der Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen im Einzelnen dargestellt.

4.1 Auftragsgenerierung

Zur Auftragsgenerierung wird im Rahmen dieser Arbeit ein Variantenbaum zur auftragsbasierten Modellierung von Produktvarianten verwendet (A_Beisecker 2015, S. 68 f.). In einem Variantenbaum werden Produktvarianten als Pfade dargestellt, indem je Ebene die Optionen einer Optionsgruppe abgebildet werden (vgl. Ehinger et al. 2002, S. 113; vgl. Rosenberg 1996, S. 2121 f.). Die kombinatorische Baubarkeit zwischen Optionen verschiedener Optionsgruppen kann entsprechend der Baubarkeitsregeln der Produktdokumentation berücksichtigt werden, indem nur baubare Kombinationen als Pfade im Variantenbaum abgebildet werden (vgl. Ehinger et al. 2002, S. 113; vgl. Rosenberg 1996, S. 2121 f.; vgl. Zagel 2006, S. 47). Dabei kann die Reihenfolge der Optionsgruppen im Baum beliebig gewählt werden (Zagel 2006, S. 47).

Zur Modellierung der Produktvarianten durch einen Variantenbaum wird zunächst das Produktmodell $m \in M$ mit den entsprechenden Basis-Optionen als Wurzel des Variantenbaums betrachtet (Buergin et al. 2017, S. 502). Auf jeder weiteren Ebene des Variantenbaums ist, wie in Abbildung 4.2 dargestellt, jeweils eine Optionsgruppe $g \in \{1, \dots, G\}$ mit kundenwählbaren Optionen abzubilden, die nicht bereits Bestandteil des Produktmodells ist (A_Beisecker 2015, S. 73 f.; Buergin et al. 2017, S. 502). Hierzu sind Optionsgruppen analog zu deren Darstellung in der Form eines Produktkonfigurator zu bilden (A_Beisecker 2015, S. 87), sofern diese nicht bereits im Rahmen der Produktdokumentation vorliegen. Bei Kann-Optionsgruppen ($o_g \in \{0, \dots, O_g\}$) wird im Gegensatz zu Muss-Optionsgruppen ($o_g \in \{1, \dots, O_g\}$) die Auswahl „keine“ ($o_g = 0$) als Option der Gruppe betrachtet (vgl. A_Hao 2017, S. 59; vgl. Zagel 2006, S. 47).

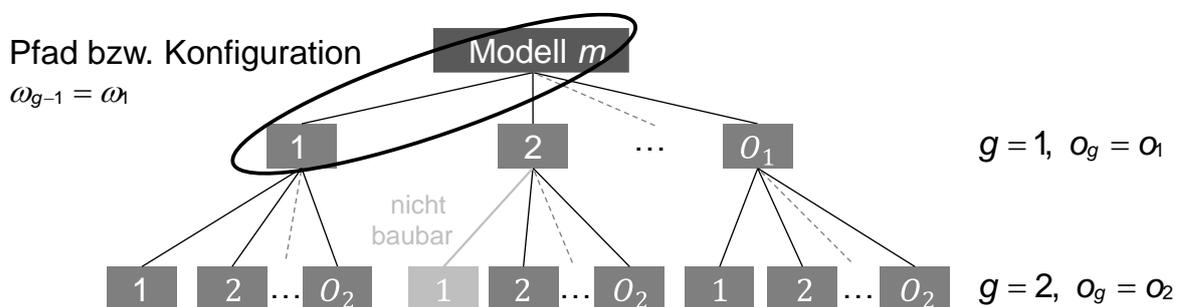


Abbildung 4.2: Variantenbaum mit bekannten Optionen bis zur Ebene $g=2$

Beim Aufbau des Variantenbaums können Baubarkeitsregeln hinsichtlich der Kombierbarkeit von Optionen verschiedener Optionsgruppen Ebene für Ebene berücksichtigt werden (A_Geier 2016, S. 53). Somit kann auf einer Ebene g eine Option einer

Optionsgruppe nur einem Pfad bzw. einer teilweise spezifizierten Konfiguration $\omega_{g-1} \in \Omega_{g-1}$ der darüber liegenden Ebene $g-1$ hinzugefügt werden, wenn diese zusammen mit sämtlichen Optionen von ω_{g-1} baubar ist (Buergin et al. 2017, S. 502). Zum Beispiel kann eine Option der Ebene 2 nur dann einer Konfiguration ω_1 nach Abbildung 4.2 hinzugefügt werden, wenn diese zusammen mit dem Produktmodell und der entsprechenden Option auf der Ebene 1 verbaut werden kann. Somit erfolgt je Option eine Baubarkeitsprüfung anhand der Baubarkeitsregeln der Optionen eines Pfades bestehend aus der teilweise spezifizierten Konfiguration und der hinzuzufügenden Option, wobei die Optionen entsprechende boolesche Werte annehmen (vgl. A_Geier 2016, S. 56 ff.; vgl. A_Hao 2017, S. 50 ff.):

1. Basis-Optionen des Produktmodells sind als „wahr“ bekannt.
2. Sämtliche Optionen aus Optionsgruppen darüber liegender Ebenen sind bekannt, wobei diejenigen, die im Pfad einer Konfiguration enthalten sind, als „wahr“ und alle anderen als „falsch“ bekannt gelten.
3. Die hinzuzufügende Option wird als „wahr“ bekannt angenommen und alle anderen Optionen derselben Optionsgruppe können ggf. zusätzlich als „falsch“ bekannt angenommen werden.
4. Alle Optionen, die keine Basis-Optionen sind und nicht Teil einer Optionsgruppe einer darüber liegenden oder derselben Ebene sind, gelten als unbekannt.

Ist eine Baubarkeitsregel als Konjunktion von Optionen formuliert, so kann diese nicht mehr erfüllt werden, sobald eine Option der Regel als „falsch“ bekannt ist. Dagegen ist eine Regel als Disjunktion von Optionen sicher erfüllt, bei der eine Option der Regel als „wahr“ bekannt ist. Ist eine Regel nicht sicher erfüllt und kann aber noch erfüllt werden, so wird sie als erfüllt angenommen. Aufgrund dieser Annahme ist es von Bedeutung, beim Hinzufügen einer Option nicht nur die Baubarkeitsregeln der hinzuzufügenden Option, sondern auch diejenigen aller Optionen des entsprechenden Pfades zu überprüfen, um zu vermeiden, dass Regeln, die zuvor noch erfüllt werden konnten, nicht erfüllt werden. Somit kann eine Option zum Variantenbaum hinzugefügt werden, wenn alle Baubarkeitsregeln der Optionen des entsprechenden Pfades erfüllt werden. (vgl. A_Geier 2016, S. 57 f.; vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 44; vgl. A_Hao 2017, S. 52 f.)

Werden das Produktmodell und sämtliche anderen kundenwählbaren Optionen im Variantenbaum abgebildet, so lassen sich nichtkundenwählbare Optionen zusteuern und daraufhin sämtliche Teilebedarfe ableiten. Hierzu wird vorausgesetzt, dass Produkte,

die durch die Wahl eines Produktmodells und weiterer wählbarer Optionen baubar sind, auch nach der Zusteuerung baubar sind (vgl. Sinz 2003, S. 25 f., S. 30). Eine komplett spezifizierte Auftragskonfiguration ω ergibt sich somit durch die Wahl eines Produktmodells und die Wahl einer Option je Optionsgruppe unter Berücksichtigung der Baubarkeitsregeln. Die Anzahl möglicher Auftragskonfigurationen und somit Produktvarianten kann ohne Berücksichtigung von Baubarkeitsregeln je Produktmodell durch Multiplikation der Anzahl an Optionen der Optionsgruppen berechnet werden (Rosenberg 1996, S. 2120; vgl. A_Almagro 2016, S. 33 f.; vgl. A_Strunz 2017, S. 90).

Hinsichtlich der Optionsgruppen kann sowohl für Muss-Optionen als auch Kann-Optionen noch spezifischer zwischen individuellen ($\Phi_g = 0$) und additiven ($\Phi_g = 1$) Optionsgruppen unterschieden werden. Individuelle Optionsgruppen setzen sich aus unterschiedlichen Optionen zusammen, wogegen Optionen additiver Optionsgruppen identisch sind oder als identisch betrachtet werden können und sich lediglich in ihrer Anzahl σ_{ω} unterscheiden, sodass dieselbe Option mehrfach gewählt werden kann. (vgl. A_Blättchen 2016, S. 69)

Basierend auf dem Produktmodell und den kundenwählbaren sowie ggf. zugesteuerten Optionen ergibt sich die Arbeitslast w_{ω} einer Auftragskonfiguration in der Endmontage. Sollten sich die Arbeitslasten zwischen Standorten bspw. aufgrund unterschiedlicher Betriebsmittel oder Qualifikationen der Mitarbeiter unterscheiden, so können diese zur Auftragseinplanung standortunabhängig formuliert werden, indem Arbeitszeiten eines Referenzstandortes als Referenzwerte verwendet werden. Für die Arbeitszeiten an allen anderen Standorten ist eine Skalierung zu den Referenzwerten zu bestimmen, wobei ggf. zur vereinfachten Betrachtung davon ausgegangen werden kann, dass für alle Optionen und somit für alle Arbeitszeiten derselbe Skalierungsfaktor verwendet werden kann. (vgl. A_Blättchen 2016, S. 69; vgl. A_Strunz 2017, S. 71)

Werden Aufträge $i \in I$ zur Einplanung ins Produktionsnetzwerk generiert, so sind Kunden- von Planaufträgen hinsichtlich ihrer Unsicherheit bezüglich der Kunden und Auftragskonfigurationen zu unterscheiden und entsprechend zu modellieren. Bei Kundenaufträgen werden neben den Kunden $k_i \in K$ auch die gewählten Produktmodelle als bekannt und sicher angenommen. Kundenaufträge sind aufgrund der Kundenzugehörigkeiten einzeln zu betrachten. Je nachdem, ob die Fixierungszeitpunkte der Optionen einer Optionsgruppe vor oder nach dem Zeitpunkt der Auftragseinplanung liegen, wird

eine Optionsgruppe und somit auch deren Optionen als sicher ($Z_g = 0$) oder unsicher ($Z_g = 1$) betrachtet. Aufgrund der unsicheren Optionen stellt ein Szenario eine mögliche Auftragskonfiguration für jeden Kundenauftrag des Betrachtungszeitraums dar (vgl. A_Blättchen 2016, S. 74 ff., S. 80). In einem Szenariobaum entspricht jede Ebene des Baums einer Entscheidungsstufe (vgl. Heitsch 2005, S. 65 f.; vgl. Scholl 2001, S. 56 f.), wodurch je Ebene die Optionenwahl innerhalb einer Optionsgruppe eines Kundenauftrags dargestellt werden kann (vgl. A_Almagro 2016, S. 14). Alle möglichen Szenarien können somit, wie in Abbildung 4.3 beispielhaft mit je drei Optionen je Optionsgruppe dargestellt, durch die Aneinanderreihung von je einem Variantenbaum des entsprechenden Produktmodells je Kundenauftrag in einem Szenariobaum abgebildet werden (vgl. A_Almagro 2016, S. 14, S. 41 ff.).

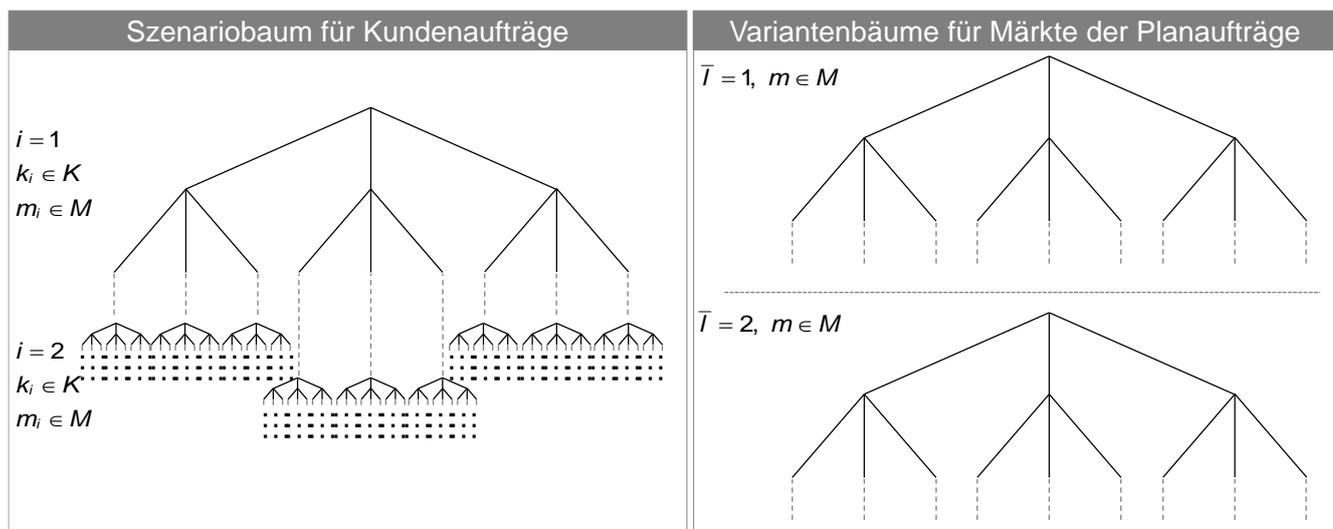


Abbildung 4.3: Variantenbäume aneinandergereiht als Szenariobaum für Kundenaufträge und einzeln je Markt für Planaufträge

Im Gegensatz zu den Kundenaufträgen können Planaufträge, aufgrund des fehlenden Bezugs zu Kunden und der damit verbunden höheren Unsicherheit, auf der Ebene der Märkte $\bar{T} \in \bar{L}$ aggregiert betrachtet werden. Somit werden zunächst Märkte als Kunden $k_i \in \bar{L}$ der Planaufträge betrachtet. Entsprechend kann die aggregierte Abbildung aller Aufträge eines Marktes und eines Produktmodells in einem einzigen Variantenbaum, wie in Abbildung 4.3 beispielhaft dargestellt, erfolgen (vgl. A_Beisecker 2015, S. 70 ff.). Wahrscheinlichkeiten für die Optionenwahl bzw. prognostizierte Einbauraten bezüglich der unsicheren Auftragskonfigurationen können somit bei der Szenariengenerierung für

Kundenaufträge kundenspezifisch betrachtet werden, wohingegen diese bei der Planauftragsgenerierung marktspezifisch berücksichtigt werden können. Prognosen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeiten der im Variantenbaum je Produktmodell abgebildeten kundenwählbaren, unsicheren Optionen je Kunde bzw. je Markt werden im Rahmen dieser Arbeit als gegeben betrachtet und können rein auf den relativen Häufigkeiten historischer Daten beruhen oder aktuelle Trends berücksichtigen (vgl. Buergin et al. 2016, S. 333 ff.; vgl. Buergin et al. 2017, S. 502; A_Molzahn 2017, S. 148).

Generell können Wahrscheinlichkeiten von Optionen p_{o_g} bzw. $P(o_g)$ im Variantenbaum abgebildet werden, sodass durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten der Optionen entlang eines Pfades Wahrscheinlichkeiten von Auftragskonfigurationen p_{ω} bzw. $P(\omega)$ berechnet werden können (vgl. Ehinger et al. 2002, S. 107, S. 113; vgl. Zagel 2006, S. 48 f., 112 ff.). In einem Szenariobaum können durch die Aneinanderreihung von Variantenbäumen die Wahrscheinlichkeiten einer jeden Kombination an Auftragskonfigurationen der Kundenaufträge als Szenariowahrscheinlichkeiten abgebildet werden.

Wahrscheinlichkeiten hinsichtlich Optionen können entweder als unabhängige Wahrscheinlichkeiten für einzelne Optionen oder als abhängige Wahrscheinlichkeiten in Form von bedingten Wahrscheinlichkeiten oder Verbundwahrscheinlichkeiten vorliegen. Im Folgenden werden stochastische Abhängigkeiten lediglich zwischen sämtlichen im Variantenbaum abgebildeten Optionen, also kompletten Auftragskonfigurationen, berücksichtigt. Somit wird die Optionenwahl mit einer Wahrscheinlichkeit je Option und je Kundenauftrag mit entsprechendem Kunden und Produktmodell ($p_{o_g,i}$) oder je Option, je Markt und je Produktmodell ($p_{o_g,\bar{im}}$) als unabhängig betrachtet. Dagegen gilt die Optionenwahl mit einer Wahrscheinlichkeit je kompletter Auftragskonfiguration eines Kundenauftrags mit entsprechendem Kunden und Produktmodell (p_{ω_i}) oder je kompletter Auftragskonfiguration eines Marktes und Produktmodells (p_{ω_m}) als abhängig. Werden für einzelne Kundenaufträge neben den sicheren Optionen weitere als spezifiziert betrachtet, so verringern diese die Unsicherheit. Entsprechend sind bei abhängiger Optionenwahl die Wahrscheinlichkeiten der Auftragskonfigurationen anzupassen, sodass diejenigen der nicht mehr möglichen Konfigurationen auf null gesetzt und die anderen entsprechend anteilig erhöht werden (A_Strunz 2017, S. 93, S. 116). Bei unabhängiger Optionenwahl können dagegen die Wahrscheinlichkeiten sicherer

Optionen auf eins und diejenigen der anderen Optionen derselben Optionsgruppen auf null gesetzt werden.

Bestehen bei unabhängiger Optionenwahl keine Beschränkungen hinsichtlich der Kombinatorik von Optionen durch Baubarkeitsregeln, so entspricht die bedingte Wahrscheinlichkeit einer Option der Ebene g zu den Pfaden bzw. teilweisen Konfigurationen ω_{g-1} der Ebene $g-1$ im Variantenbaum nach Formel 4-1 der gegebenen Wahrscheinlichkeit $P(o_g)$ der Option (Buergin et al. 2017, S. 502). Zur verallgemeinerten Beschreibung werden hierzu $P(o_g) = p_{o_{gi}}$ bzw. $P(o_g) = p_{o_{g\bar{m}}}$ und Kann-Optionsgruppen einschließlich $o_g = 0$ verwendet.

$$P(o_g | \omega_{g-1}) = P(o_g) \quad \forall g \in \{1, \dots, G\}, \forall o_g \in \{0, \dots, O_g\}, \forall \omega_{g-1} \in \Omega_{g-1} \quad \text{Formel 4-1}$$

Bestehen jedoch Baubarkeitsregeln, durch die eine Option o_g bei unabhängiger Optionenwahl mit einem Pfad der darüber liegenden Ebene $g-1$, wie in Abbildung 4.2 beispielhaft für eine Option der Ebene $g=2$ dargestellt, nicht baubar ist, so ist für diese anstelle der bedingten Wahrscheinlichkeit $P(o_g | \omega_{g-1}) = P(o_g)$ nach Formel 4-1 die korrigierte bedingte Wahrscheinlichkeit $P'(o_g | \omega_{g-1}) = 0$ zu verwenden. Folglich ist zu berücksichtigen, dass die Summe der Wahrscheinlichkeiten der Optionen je Optionsgruppe nach Formel 4-2 eins ergeben muss (vgl. Buergin et al. 2017, S. 502; vgl. Zagel 2006, S. 113).

$$\sum_{o_g \in \{0, \dots, O_g\}} P(o_g | \omega_{g-1}) = 1 \quad \forall g \in \{1, \dots, G\}, \forall \omega_{g-1} \in \Omega_{g-1} \quad \text{Formel 4-2}$$

Entsprechend sind, wie in Abbildung 4.4 durch Pfeile angedeutet, Wahrscheinlichkeiten der anderen Optionen in der betroffenen Optionsgruppe und der betroffenen Optionen in den anderen Pfaden ω_{g-1} zu korrigieren, sodass sowohl Formel 4-2 als auch die gegebenen Wahrscheinlichkeiten $P(o_g)$ nach Formel 4-3 durch die korrigierten bedingten Wahrscheinlichkeiten $P'(o_g | \omega_{g-1})$ eingehalten werden (vgl. Zagel 2006, S. 113 f.). (vgl. Buergin et al. 2017, S. 502)

$$P(o_g) = \sum_{\omega_{g-1} \in \{1, \dots, \Omega_{g-1}\}} (P'(o_g | \omega_{g-1}) \times P(\omega_{g-1})) \quad \forall g \in \{1, \dots, G\}, \forall o_g \in \{0, \dots, O_g\} \quad \text{Formel 4-3}$$

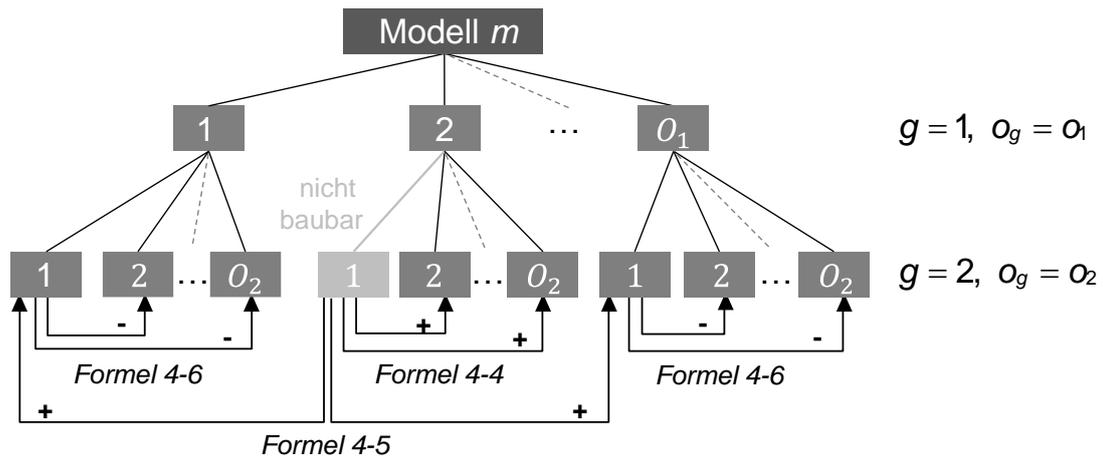


Abbildung 4.4: Verrechnung von Wahrscheinlichkeiten im Variantenbaum aufgrund nicht baubarer Optionenkombinationen (vgl. Buergin et al. 2017, S. 502)

Hinsichtlich der Verrechnung von Wahrscheinlichkeiten existiert aufgrund der Unabhängigkeit der gegebenen Wahrscheinlichkeiten keine eindeutige Verrechnungsvorschrift (vgl. Kappler 2010, S. 11 f.). Der in Abbildung A1 in Anhang A1 vorgestellte Verrechnungsalgorithmus soll daher eine Möglichkeit aufzeigen, wie Wahrscheinlichkeiten entsprechend der Wahrscheinlichkeiten anderer Optionen anteilig umverteilt werden können (A_Geier 2016, S. 60). Um Wahrscheinlichkeiten mit möglichst wenigen Berechnungsschritten und somit möglichst effizient zu verrechnen, sollten möglichst wenige Pfade in der Baumstruktur mit in die Berechnung einbezogen werden. Anstatt alle Pfade ω_{g-1} der Ebene $g-1$ zur Verrechnung der Wahrscheinlichkeit einer nicht baubaren Option auf Ebene g hinsichtlich eines Pfades ω_{g-1} zu betrachten, was eine Verrechnung von Ebene zu Ebene komplexer werden ließe, können lediglich Pfade ω_{g-1} mit gemeinsamem Pfad ω_{g-2} berücksichtigt werden. Somit kann eine Verrechnung bei Nichtbaubarkeit separat hinsichtlich der Pfade ω_{g-2} erfolgen (vgl. A_Geier 2016, S. 60; vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 51 f.). Für Verrechnungen auf tiefer gelegenen als den in Abbildung 4.4 dargestellten Ebenen werden also nicht mehr Ebenen betrachtet. Eine solche beschränkte Betrachtung reicht dann aus, wenn Baubarkeitsrestriktionen lediglich zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ebenen bestehen, sodass eine Verrechnung innerhalb der beschränkten Bereiche des Variantenbaums mit gemeinsamem Pfad ω_{g-2} möglich ist (vgl. A_Hao 2017, S. 57 f.).

Die Verrechnungen durch den Algorithmus in Abbildung A1 erfolgen mittels der folgenden Formeln. Formel 4-4 dient der anteiligen Umverteilung der Wahrscheinlichkeit einer nicht baubaren Option innerhalb ihrer Optionsgruppe desselben Pfades ω_{g-1} , sodass Formel 4-2 unter ω_{g-1} erfüllt wird. Um eine betrachtete nicht baubare Option o_g in den Verrechnungsformeln von den anderen Optionen innerhalb derselben Optionsgruppe zu unterscheiden, wird für letztere die Notation $\bar{o}_g \in \bar{O}_g$ verwendet. Durch Formel 4-5 wird die Wahrscheinlichkeit der nicht baubaren Option o_g bei anderen Pfaden $\bar{\omega}_{g-1} \in \bar{\Omega}_{g-1}$ mit gemeinsamem Pfad ω_{g-2} , mit denen o_g baubar ist, zur Einhaltung von Formel 4-3 für o_g erhöht. Durch Formel 4-6 werden die Wahrscheinlichkeiten von Optionen \bar{o}_g , die bei ω_{g-1} erhöht wurden, bei anderen Pfaden $\bar{\omega}_{g-1}$ reduziert, sodass Formel 4-2 unter $\bar{\omega}_{g-1}$ und Formel 4-3 für \bar{o}_g gelten. (vgl. A_Geier 2016, S. 59 ff.)

$$P'(\bar{o}_g | \omega_{g-1}) = P(\bar{o}_g | \omega_{g-1}) + P(o_g | \omega_{g-1}) \times \frac{P(\bar{o}_g | \omega_{g-1})}{\sum_{\forall \bar{o}_g \in \bar{O}_g} P(\bar{o}_g | \omega_{g-1})} \quad \text{Formel 4-4}$$

$$P'(o_g | \bar{\omega}_{g-1}) = P(o_g | \bar{\omega}_{g-1}) + P(o_g | \omega_{g-1}) \times \frac{P(\omega_{g-1})}{\sum_{\forall \bar{\omega}_{g-1} \in \bar{\Omega}_{g-1}} P(\bar{\omega}_{g-1})} \quad \text{Formel 4-5}$$

$$P'(\bar{o}_g | \bar{\omega}_{g-1}) = P(\bar{o}_g | \bar{\omega}_{g-1}) - P(o_g | \omega_{g-1}) \times \frac{P(\bar{o}_g | \omega_{g-1})}{\sum_{\forall \bar{o}_g \in \bar{O}_g} P(\bar{o}_g | \omega_{g-1})} \times \frac{P(\omega_{g-1})}{\sum_{\forall \bar{\omega}_{g-1} \in \bar{\Omega}_{g-1}} P(\bar{\omega}_{g-1})} \quad \text{Formel 4-6}$$

Durch den Algorithmus in Abbildung A1 kann nicht ausgeschlossen werden, dass unzulässige Wahrscheinlichkeiten von kleiner null oder größer eins zustande kommen. In einem solchen Fall ist eine Lösung nicht zulässig, sodass weiter überprüft werden kann, ob eine andere Verrechnungsmöglichkeit besteht, die zu zulässigen Wahrscheinlichkeiten unter Einhaltung von Formel 4-2 und Formel 4-3 und somit zu einer zulässigen Lösung führt. Jedoch können unzulässigen Wahrscheinlichkeiten auch darauf zurückzuführen sein, dass die prognostizierten Einbauraten unter Berücksichtigung der Baubarkeitsregeln gar nicht realisierbar sind und somit keine zulässige Lösung existiert. (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 50 f.; vgl. A_Hao 2017, S. 55)

In den folgenden Unterkapiteln wird darauf eingegangen, wie Szenarien hinsichtlich Konfigurationen von Kundenaufträgen auf Basis kundenspezifischer Wahrscheinlichkeiten und wie Planaufträge auf Basis marktspezifischer Wahrscheinlichkeiten generiert werden können.

4.1.1 Szenariengenerierung für Kundenaufträge

Liegt eine Menge an Kundenaufträgen vor, so kann jede Auftragskonfiguration ω_i der im Variantenbaum für den Auftrag abgebildeten Menge unsicherer, möglicher Auftragskonfigurationen Ω_i als Kundenauftragsszenario $\bar{s}_i \in \bar{S}_i$ betrachtet werden. Die Wahrscheinlichkeiten der Kundenauftragsszenarien $p_{\bar{s}_i}$ entsprechen somit den Wahrscheinlichkeiten der Auftragskonfigurationen p_{ω_i} .

Hinsichtlich der Auftragskonfigurationen verschiedener Kundenaufträge wird grundsätzlich im Rahmen dieser Arbeit von Unabhängigkeit ausgegangen, sodass bei der Aneinanderreihung der Variantenbäume zur Erstellung des Szenariobaums keine entsprechenden Abhängigkeiten zu berücksichtigen sind. Die Szenariowahrscheinlichkeiten $p_{\bar{s}}$ der Szenarien ($\bar{s} \in \bar{S}$) über alle Kundenaufträge des Betrachtungszeitraums ergeben sich somit nach Formel 4-7, wobei ein Szenario aus einem Kundenauftragsszenario je Kundenauftrag besteht und die Summe über alle Szenariowahrscheinlichkeiten $p_{\bar{s}}$ eins ergibt. Die Anzahl möglicher Szenarien lässt sich nach Formel 4-8 ermitteln (vgl. A_Strunz 2017, S. 91).

$$p_{\bar{s}} = \prod_{i \in I} p_{\bar{s}_i} \quad \forall \bar{s} \in \bar{S} \quad \text{Formel 4-7}$$

$$|\bar{S}| = |\bar{S}_1| \times |\bar{S}_2| \times \dots \times |\bar{S}_i| = |\Omega_1| \times |\Omega_2| \times \dots \times |\Omega_i| \quad \text{Formel 4-8}$$

Relevant für die Betrachtung sind jedoch lediglich Szenarien mit positiven Wahrscheinlichkeiten ($p_{\bar{s}} > 0$). Die Wahrscheinlichkeit eines einzigen Kundenauftragsszenarios von null führt zu einer entsprechenden Szenariowahrscheinlichkeit von null. (vgl. A_Strunz 2017, S. 89 ff., S. 128)

Je nach Anzahl möglicher Auftragskonfigurationen mit positiven Wahrscheinlichkeiten und der Anzahl betrachteter Aufträge kann die Anzahl relevanter Szenarien sehr hoch werden, sodass zur Komplexitätsbeschränkung unter den relevanten Szenarien eine Auswahl vorzunehmen ist (vgl. Mißler-Behr 2001, S. 160 ff.; vgl. Scholl 2001, S. 213 ff.). Da selbst die Erstellung aller relevanter Szenarien erhebliche Rechenlaufzeit in Anspruch nehmen kann, ist es sinnvoll, direkt eine reduzierte Anzahl relevanter Szenarien ($S \subseteq \bar{S}$) zu generieren. Die reduzierte Anzahl an relevanten Szenarien sollte möglichst

repräsentativ alle relevanten Szenarien abbilden (vgl. Mißler-Behr 2001, S. 160). (A_Almagro 2016, S. 31, S. 35 ff.; A_Strunz 2017, S. 92)

Eine hohe Szenarienanzahl kann vor allem aufgrund der Kombination von Kundenauftragsszenarien nach Formel 4-8 zustande kommen und reduziert werden, indem Szenarien zusammengefasst bzw. aggregiert werden (vgl. Heitsch 2005, S. 67 ff.; Römisch 2009, S. 1, S. 3, S. 6; Scholl 2001, S. 219 ff.), bei denen sich die Optionenwahlen der Kundenauftragsszenarien gegenseitig ausgleichen (vgl. A_Almagro 2016, S. 46 ff.). Eine solche Szenarienaggregation ist jedoch für die Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk nicht geeignet, da dabei einzelne Auftragskonfigurationen von Kunden mit entsprechenden Anforderungen und Implikationen an den entsprechenden Standorten (siehe Kapitel 4.2) zu berücksichtigen sind. Folglich ist eine Szenariengenerierung erforderlich, bei der Kundenauftragsszenarien verschiedener Aufträge unabhängig voneinander betrachtet und repräsentativ abgebildet werden (vgl. A_Strunz 2017, S. 92).

Im Rahmen der Auftragseinplanung spielen einerseits direkte Optionenwahlen der Kundenauftragsszenarien und andererseits die daraus resultierenden Arbeitslasten eine Rolle (siehe Kapitel 4.2), weshalb sowohl die Optionenwahlen als auch die Arbeitslasten repräsentativ abzubilden sind (A_Strunz 2017, S. 92). Zur Szenariengenerierung können dazu je Auftrag rein zufällige Stichproben aus den Kundenauftragsszenarien gezogen oder zur explizit repräsentativen Abbildung der Arbeitslasten der Kundenauftragsszenarien je Auftrag zunächst Cluster gebildet und darauf basierend Stichproben gezogen werden (A_Almagro 2016, S. 35 ff.; A_Strunz 2017, S. 92 ff.).

Bei einer relativ geringen Anzahl betrachteter Szenarien im Vergleich zu den Kundenauftragsszenarien mit positiven Wahrscheinlichkeiten der Kundenaufträge kann es insbesondere bei breiter Streuung der Arbeitslasten der Kundenauftragsszenarien sinnvoll sein, diese explizit repräsentativ abzudecken und dazu folgende Schritte, die in Abbildung 4.5 veranschaulicht sind, zu durchlaufen (vgl. A_Strunz 2017, S. 106 ff., S. 114):

1. *Berechnung der Arbeitslasten der Kundenauftragsszenarien je Kundenauftrag:*
Je Kundenauftrag sind für alle Kundenauftragsszenarien mit positiven Wahrscheinlichkeiten die Arbeitslasten basierend auf den entsprechenden Produktmodellen und Optionen zu berechnen. (vgl. A_Almagro 2016, S. 33 ff.)
2. *Erstellung einer diskreten Dichtefunktion der Arbeitslasten je Kundenauftrag:*
Auf Basis der Arbeitslasten und der Wahrscheinlichkeiten der Kundenauftragsszenarien ist je Kundenauftrag eine entsprechende diskrete Dichtefunktion zu

erstellen. Dabei werden Wahrscheinlichkeiten verschiedener Kundenauftrags-szenarien eines Kundenauftrags mit gleicher Arbeitslast aufsummiert. (vgl. A_Almagro 2016, S. 33 ff.)

3. *Clustering der Arbeitslasten je Kundenauftrag:*

Entsprechend dem k-means-Algorithmus (vgl. Han, Kamber & Pei 2012, S. 451 f.) werden die Arbeitslasten mit positiven Wahrscheinlichkeiten der diskreten Dichtefunktion je Kundenauftrag durch den in Abbildung A2 dargestellten Algorithmus so geclustert, dass sich die Arbeitslasten je Cluster $c_i \in C_i$ möglichst ähnlich sind. Hierzu ist vorab je Kundenauftrag die Anzahl zu bildender Cluster festzulegen (vgl. Han, Kamber & Pei 2012, S. 451), wozu die Angaben in Tabelle A1 verwendet werden können. Da die Lösung der Clustering von den initialisierten Cluster-Zentren abhängt (Backhaus et al. 2016, S. 478), werden zur repräsentativen Abbildung bei der Initialisierung Arbeitslasten aus der gesamten Bandbreite der aufsteigend sortierten Arbeitslasten als Cluster-Zentren ausgewählt. (A_Almagro 2016, S. 39; A_Strunz 2017, S. 46 ff.)

4. *Stichprobenziehung aus Kundenauftragsszenarien je Kundenauftrag:*

Kundenauftragsszenarien ($S_i \subset \bar{S}_i$) sind als Stichproben aus den Clustern entsprechend der Cluster-Wahrscheinlichkeiten je Kundenauftrag nach dem Algorithmus in Abbildung A3 zu ziehen, sodass jedes Cluster repräsentiert wird. Bei den Stichproben handelt es sich somit um ein „Stratified Sample“ (vgl. Han, Kamber & Pei 2012, S. 109 f.). Die Anzahl der Stichproben je Cluster n_{c_i} beruht auf der Anzahl der zu generierenden Szenarien ($|S_i| = |S|$) und der entsprechenden Cluster-Wahrscheinlichkeit p_{c_i} nach Formel 4-9. Da nur eine ganzzahlige Anzahl an Auftragskonfigurationen gezogen werden kann, wird durch Aufrunden sichergestellt, dass genügend Kundenauftragsszenarien zur Generierung der Szenarien in Schritt 5 zur Verfügung stehen. Kundenauftragsszenarien werden je Cluster unter Berücksichtigung ihrer Wahrscheinlichkeiten $p_{\bar{S}_i}$ gezogen und repräsentieren somit alle Cluster. (vgl. A_Strunz 2017, S. 107 ff., S. 114)

$$n_{c_i} = \lceil p_{c_i} \times |S| \rceil \quad \forall i \in I, \forall c_i \in C_i$$

Formel 4-9

5. Kombination der Stichproben der Kundenauftragsszenarien zu Szenarien:

Je Kundenauftrag wird eines der gezogenen Kundenauftragsszenarien als „Simple Random Sample without Replacement“ (SRSWOR) (vgl. Han, Kamber & Pei 2012, S. 108) entsprechend dem Algorithmus in Abbildung A4 rein zufällig gezogen. Die gezogenen Kundenauftragsszenarien der Kundenaufträge werden zu Szenarien kombiniert. Jedes Kundenauftragsszenario wird nach dessen Ziehung aus der Liste der in Schritt 4 gezogenen Kundenauftragsszenarien gelöscht, sodass es höchstens einmal ausgewählt werden kann. (vgl. A_Strunz 2017, S. 111 ff.)

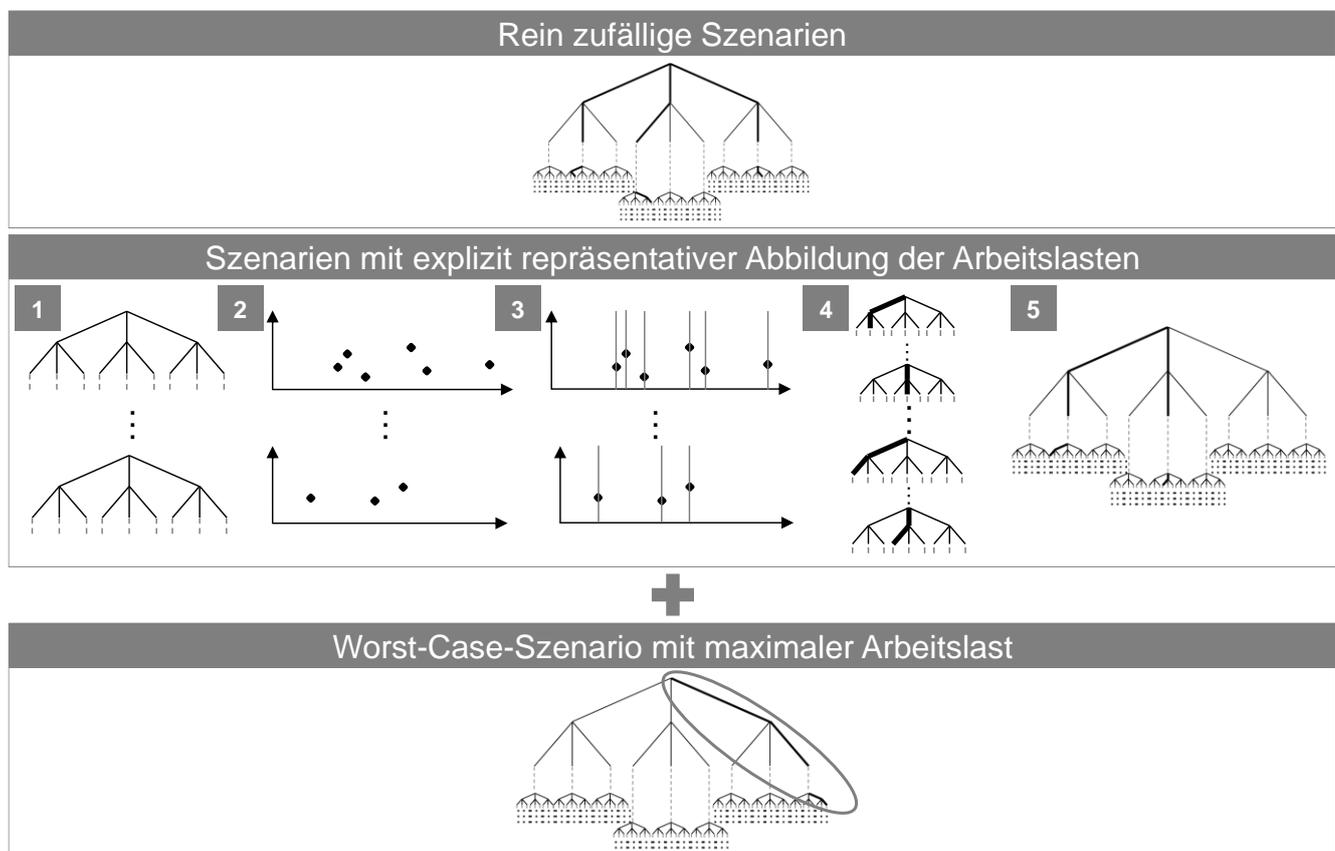


Abbildung 4.5: Vorgehen zur Szenariengenerierung

Neben den rein zufällig oder unter repräsentativer Abbildung der Arbeitslasten der Kundenauftragsszenarien generierten Szenarien ist insbesondere, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, das Szenario mit der maximalen Arbeitslast als Worst-Case-Szenario zur Sicherstellung der Informationsrobustheit bezüglich der Zulässigkeitsrobustheit der Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk (siehe Kapitel 4.2) explizit zu generieren

(A_Strunz 2017, S. 92, S. 96 f.). Dieses entspricht hinsichtlich der Arbeitslast dem Extremszenario am oberen Rand des Szenariengesamtraums der relevanten Szenarien und trägt somit zur repräsentativen Abbildung der Arbeitslasten bei (vgl. Mißler-Behr 2001, S. 182). Wird für jeden Auftrag die Konfiguration mit der höchsten Arbeitslast gewählt, so fällt unabhängig von der Einplanung der Aufträge an jedem Standort und in jeder Periode die maximale Arbeitslast an. Somit sind zunächst analog zu Schritt 1 der Szenariengenerierung unter repräsentativer Abbildung der Arbeitslasten je Kundenauftrag für alle Kundenauftragsszenarien mit positiven Wahrscheinlichkeiten die Arbeitslasten zu berechnen. Das Worst-Case-Szenario ergibt sich durch die Wahl des Kundenauftragsszenarios mit der maximalen Arbeitslast je Kundenauftrag (vgl. A_Strunz 2017, S. 97 ff.). Bestehen für einen Kundenauftrag mehrere Kundenauftragsszenarien mit der maximalen Arbeitslast, so kann ein beliebiges darunter ausgewählt werden. Das Worst-Case-Szenario basiert bei abhängiger Optionenwahl im Gegensatz zur unabhängigen Optionenwahl auf den je Kunde explizit angegebenen Auftragskonfigurationen und spiegelt daher womöglich eher ein realistisches Worst-Case-Szenario wider (A_Strunz 2017, S. 91). Die Höhe der Wahrscheinlichkeiten der Kundenauftragsszenarien spielt bei der Generierung des Worst-Case-Szenarios keine Rolle. Gleicht das Worst-Case-Szenario nicht einem bereits generierten Szenario, so ist es den generierten Szenarien hinzuzufügen, die daraufhin bei der Auftragseinplanung berücksichtigt werden.

4.1.2 Planauftragsgenerierung

Ist eine Menge an Planaufträgen für einen Markt und ein Produktmodell zu generieren, so sind hierzu die über die Planaufträge aggregierten, marktspezifischen Wahrscheinlichkeiten der Auftragskonfigurationen zu betrachten. Die relativen Häufigkeiten $n_{\omega_{\bar{m}}}$ der möglichen Auftragskonfigurationen $\omega_{\bar{m}} \in \Omega_{\bar{m}}$ je Markt und Produktmodell entsprechen den Wahrscheinlichkeiten der Auftragskonfigurationen $p_{\omega_{\bar{m}}}$. Die nicht-ganzzahlige Anzahl der Planaufträge je möglicher Auftragskonfiguration ergibt sich nach Formel 4-10, womit Formel 4-11 gilt (Buergin et al. 2017, S. 503).

$$N_{\omega_{\bar{m}}} = n_{\omega_{\bar{m}}} \times |I| \quad \forall \bar{I} \in \bar{L}, \forall m \in M, \forall \omega_{\bar{m}} \in \Omega_{\bar{m}} \quad \text{Formel 4-10}$$

$$|I| = \sum_{\omega_{\bar{m}} \in \Omega_{\bar{m}}} N_{\omega_{\bar{m}}} \quad \text{Formel 4-11}$$

Um eine ganzzahlige Anzahl an Planaufträgen je möglicher Auftragskonfiguration zu erhalten und die Gesamtanzahl an Planaufträgen einzuhalten, müssen entsprechende

Rundungen erfolgen (Buergin et al. 2017, S. 503). Ist die Anzahl möglicher Auftragskonfigurationen sehr hoch, so sind die relativen Häufigkeiten der Auftragskonfigurationen sehr gering. Bei einer zudem niedrigen Anzahl zu generierender Planaufträge, ist die Anzahl an Planaufträgen je Auftragskonfiguration nach Formel 4-10 sehr gering. Bei einer niedrigen Anzahl an Planaufträgen je Auftragskonfiguration fallen Rundungen stark ins Gewicht und führen zu Verzerrungen der gegebenen Wahrscheinlichkeiten der Auftragskonfigurationen bzw. derer Optionen. Um dies zu vermeiden und zudem die Komplexität des Variantenbaums bei einer sehr hohen Anzahl möglicher Auftragskonfigurationen zu reduzieren, kann es bei unabhängiger Optionenwahl sinnvoll sein, nicht alle kundenwählbaren Optionen und somit keine kompletten Auftragskonfigurationen im Variantenbaum abzubilden (vgl. A_Beisecker 2015, S. 83).

Um zu entscheiden, welche Optionen bzw. Optionsgruppen im Variantenbaum abgebildet werden sollen, ist eine Priorisierung zu treffen. Da jede Auftragskonfiguration eine Muss-Option je Muss-Optionsgruppe enthält und keine Ausweichmöglichkeit auf die Wahl „keine“ besteht, sollten Muss-Optionen unbedingt im Variantenbaum abgebildet werden. Darauf basierend können dann teilweise spezifizierte Auftragskonfigurationen durch Anwendung von Formel 4-10 generiert werden. Für Kann-Optionen, die nicht der Wahl „keine“ entsprechen, können deren Wahrscheinlichkeiten als relative Häufigkeiten verwendet ($n_{o_g \bar{m}} = p_{o_g \bar{m}}$) und somit deren absolute Häufigkeiten durch Formel 4-12 bestimmt werden. (vgl. Buergin et al. 2017, S. 503)

$$N_{o_g \bar{m}} = n_{o_g \bar{m}} \times |I| \quad \text{Formel 4-12}$$

Rundungen sind dennoch sowohl für die Auftragskonfigurationen der Muss-Optionen als auch für einzelne Kann-Optionen notwendig (Buergin et al. 2017, S. 503) und führen zu Verzerrungen der gegebenen Wahrscheinlichkeiten. Ein möglicher Algorithmus zur Planauftragsgenerierung mit Rundungen ist in Abbildung A5 dargestellt. Wird rundungsbedingt hinsichtlich der Auftragskonfigurationen der Muss-Optionen nicht die Gesamtanzahl an Planaufträgen erreicht, so bietet es sich an, Auftragskonfigurationen, deren absolute Häufigkeiten auf null gerundet wurden, mit einer Häufigkeit von eins zu generieren, sodass diese „Exoten“ (vgl. Ehinger et al. 2002, S. 106 f.) überhaupt in Form von Planaufträgen berücksichtigt werden. Da es bei Kann-Optionen dagegen nicht erforderlich ist, eine bestimmte Anzahl zu erreichen, können deren Häufigkeiten auf- oder abgerundet werden. Die teilweise spezifizierten Planaufträge werden beim Hinzufügen einer Kann-Option in zufälliger Reihenfolge durchlaufen, sodass die Kann-

Optionen zufällig unter den Planaufträgen verteilt werden. Jeder Planauftrag erhält somit unterschiedliche Kann-Optionen und auch unterschiedlich viele, wodurch reale Kundenaufträge widergespiegelt werden. Beim Hinzufügen der Kann-Optionen sind die Baubarkeitsregeln sowohl der hinzuzufügenden Option als auch der Optionen der entsprechenden teilweise spezifizierten Auftragskonfigurationen zu überprüfen. Dabei gelten Basis-Optionen als „wahr“ bekannt, sämtliche Muss-Optionen genauso wie bereits hinzugefügte Kann-Optionen entweder als „wahr“ oder „falsch“ bekannt und die hinzuzufügende Option als „wahr“ bekannt. (vgl. A_Geier 2016, S. 64 ff., S. 76; vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 54 f., S. 58 f.; vgl. A_Hao 2017, S. 59 ff.)

Der Ansatz zur Konstruktion von Planaufträgen berücksichtigt somit Einbauraten der Optionen bei unabhängiger Optionenwahl, ohne dass Referenzaufträge benötigt und somit Optionskombinationen der Kundenaufträge aus der Vergangenheit auf zukünftige Kunden desselben Marktes übertragen werden. Da Einbauraten aufgrund der Unsicherheit der Auftragskonfigurationen lediglich bedingt eintreten, sind Rekonfigurationen der Planaufträge hinsichtlich ihrer Optionen und somit Optionskombinationen im Rahmen der Kundenauftragszuordnung erforderlich, worauf in Kapitel 4.3 eingegangen wird. Zunächst sind die Planaufträge jedoch noch vor Kundenauftragseingang ins Produktionsnetzwerk einzuplanen, was im folgenden Kapitel 4.2 dargelegt wird.

4.2 Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk

Zur Einplanung von Kunden- und Planaufträgen $i \in I$ ins Produktionsnetzwerk ist hinsichtlich der Unsicherheit eine Unterscheidung zwischen Kundenaufträgen mit unsicheren Auftragskonfigurationen (Fall I) und Planaufträgen mit zur Auftragseinplanung als sicher angenommenen Auftragskonfigurationen (Fall II) zu treffen. Die Unsicherheit kann durch die folgenden alternativen Modelle unterschiedlich berücksichtigt werden:

1. *Deterministisches Erwartungswertmodell:*

Einwertige Abbildung der Unsicherheit in Form eines Szenarios ($s = 1$) durch direkte Verwendung der erwarteten Wahrscheinlichkeit je Option und je Auftrag.

2. *Szenarienmodell als robustes Optimierungsmodell in Form eines Kompensationsmodells:*

Mehrwertige Abbildung der Unsicherheit durch Verwendung von Szenarien möglicher Auftragskonfigurationen mit bekannten Eintrittswahrscheinlichkeiten nach Kapitel 4.1.1 als Entscheidung unter Risiko.

Die im Erwartungswertmodell verwendeten Wahrscheinlichkeiten einzelner Optionen je Kundenauftrag (p_{o_gis}) liegen für Kundenaufträge bei unabhängiger Optionenwahl bereits vor ($p_{o_gis} = p_{o_gi}$) und lassen sich bei abhängiger Optionenwahl aus den Wahrscheinlichkeiten der kompletten Auftragskonfigurationen (p_{o_i}) ableiten. Dagegen werden im Szenarienmodell sämtliche nach dem in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Vorgehen generierten Szenarien betrachtet und entsprechend die Wahrscheinlichkeiten einzelner Optionen der Kundenaufträge je nach Szenario entweder auf „gewählt“ ($p_{o_gis} = 1$) oder „nicht gewählt“ ($p_{o_gis} = 0$) gesetzt.

Planaufträge können sowohl im Erwartungswertmodell als auch im Szenarienmodell gleichermaßen berücksichtigt werden, indem je Planauftrag die Wahrscheinlichkeit jeder Option in allen Szenarien gleichermaßen entweder auf „gewählt“ ($p_{o_gis} = 1$) oder „nicht gewählt“ ($p_{o_gis} = 0$) gesetzt wird und somit je Planauftrag in allen Szenarien dieselbe Auftragskonfiguration berücksichtigt wird. Für den Fall, dass für alle Kundenaufträge bereits alle Optionen spezifiziert sind oder dass ausschließlich Planaufträge vorliegen, besteht keine Unsicherheit hinsichtlich der Auftragskonfigurationen bei der Einplanung. Das Szenarienmodell entspricht in einem solchen Fall dem Erwartungswertmodell, da dann lediglich ein einziges Szenario existiert.

Die Planungsaufgabe der mittelfristigen Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk besteht in der Zuordnung von Aufträgen zu Standorten und Perioden (Buergin et al. 2016, S. 330 f.). Es handelt sich somit um ein Zuordnungsproblem, das als ganzzahliges bzw. binäres Optimierungsmodell formuliert werden kann (vgl. Buergin et al. 2016, S. 333 f.; vgl. Neumann & Morlock 2002, S. 381 ff.; vgl. Nickel, Stein & Waldmann 2014, S. 173). Im Folgenden wird daher ein binäres Optimierungsmodell vorgestellt, das sowohl das deterministische Erwartungswertmodell als auch das Szenarienmodell durch die beschriebenen Parameter abbildet. Das Modell wurde vom Verfasser dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit den studentischen Arbeiten von Molzahn (A_Molzahn 2017, S. 32 ff.), Schweizer (A_Schweizer 2017, S. 23 ff.) und Strunz (A_Strunz 2017, S. 51 ff.) basierend auf den Vorarbeiten mit Blättchen (A_Blättchen 2016, S. 68 ff.), Qu (A_Qu 2015, S. 57 ff.) und Thoma (A_Thoma 2015, S. 65 ff.) entwickelt. Die binären Entscheidungsvariablen x_{it} des Optimierungsmodells geben an, ob Auftrag i Standort $l \in L$ und Periode $t \in T$ zugeordnet ist ($x_{it} = 1$) oder nicht ($x_{it} = 0$). Sie ergeben einen Vektor x an Entscheidungsvariablen. Dem Modell liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Indem alle betrachteten Aufträge i jeweils einer der betrachteten Perioden t zuzuordnen sind, kann bei der Annahme von Kundenaufträgen vor der Auftrags-einplanung bereits ein Zeitraum fixiert werden, der im Rahmen der Einplanung weiter auf Perioden spezifiziert wird. Planaufträge können je nach Anforderung direkt periodenweise generiert werden, sodass für diese ggf. keine Periodenzu-ordnung im Rahmen der Einplanung erforderlich ist.
- Es können lediglich Aufträge i berücksichtigt werden, deren Produktmodelle und sicheren Optionen an den Standorten l produziert werden können. Unsichere Optionen müssen an allen Standorten produzierbar sein, da ansonsten nicht ga-rantiert werden kann, dass der Verbau am zugeordneten Standort zulässig ist.
- Die Auftragseinplanung erfolgt prädiktiv zum spätestmöglichen Zeitpunkt, sodass sich direkt darauf basierend Bestellungen bezüglich sicherer Optionen, eine Be-stellvorschau bezüglich erwarteter unsicherer Optionen und auch der erwartete und maximale Bedarf an Mitarbeiterkapazität in den Perioden an den Standorten ableiten lassen. Die erfolgte Einplanung von Aufträgen wird als nicht änderbar betrachtet, sodass keine reaktive Planung bzw. Umplanung ermöglicht wird.
- Zur Produktion wird die Variantenfließfertigung auf einer oder mehreren Endmon-tagelinien $u \in U$ an den Endmontagestandorten l eines Produktionsnetzwerks betrachtet. Durch die Fließbandabstimmung sind die Taktzeiten und Startzeit-punkte einzelner Takte auf den Linien gegeben (vgl. Boysen 2005, S. 23, S. 208 f.). Zudem sind sowohl Takte ohne Aufträge, sogenannte Leertakte, als auch ge-plante Linienstopps möglich. Erfolgt der Übergang von einer Periode zur nächs-ten bzw. von einem Abschnitt zum nächsten ohne Leertakte, so können keine abgeschlossenen Zeiträume betrachtet werden, in denen ausschließlich Aufträge einer Periode bzw. eines Abschnitts produziert werden. Dies wird durch das Slot-gerüst in Abbildung 4.6 anhand von zwei Standorten mit jeweils einer Linie ver-anschaulicht, wobei je Slot die Zeitplanung für die Endmontage eines Produktes bzw. Auftrags in Form von Takten und deren Taktzeiten angegeben wird. Mit jedem Takt, der kein Leertakt ist, beginnt an der ersten Station ein Slot. Zur An-zahl an Slots einer Periode C_{ut}^{Slot} zählen alle Slots, deren Produktionsende in ei-nem bestimmten Zeitraum erreicht ist. Jedoch ist der Zeitraum der Auslieferung einer Periode neben dem Zeitraum des Produktionsendes ebenso von Bedeu-tung, falls dieser an allen Standorten identisch sein soll, um Aufträge standort-übergreifend mit Hinblick auf deren Auslieferungstermin einplanen zu können.

Diesbezüglich kann je Slot eine spezifische Zeitspanne für die Distribution zwischen Produktionsende und Auslieferung eingeplant werden, die jedoch auftragsunabhängig ist, da die Zuordnung von Aufträgen zu Slots erst im Rahmen der Reihenfolgeplanung erfolgt. Kundenindividuelle bzw. auftragspezifische Transportdauern können dagegen unabhängig vom Slotgerüst auf aggregierter Ebene berücksichtigt werden, indem die Angabe der frühest- und spätestmöglichen Auslieferungsperiode eines Auftrags (FA_i , SA_i) diese bereits berücksichtigt.

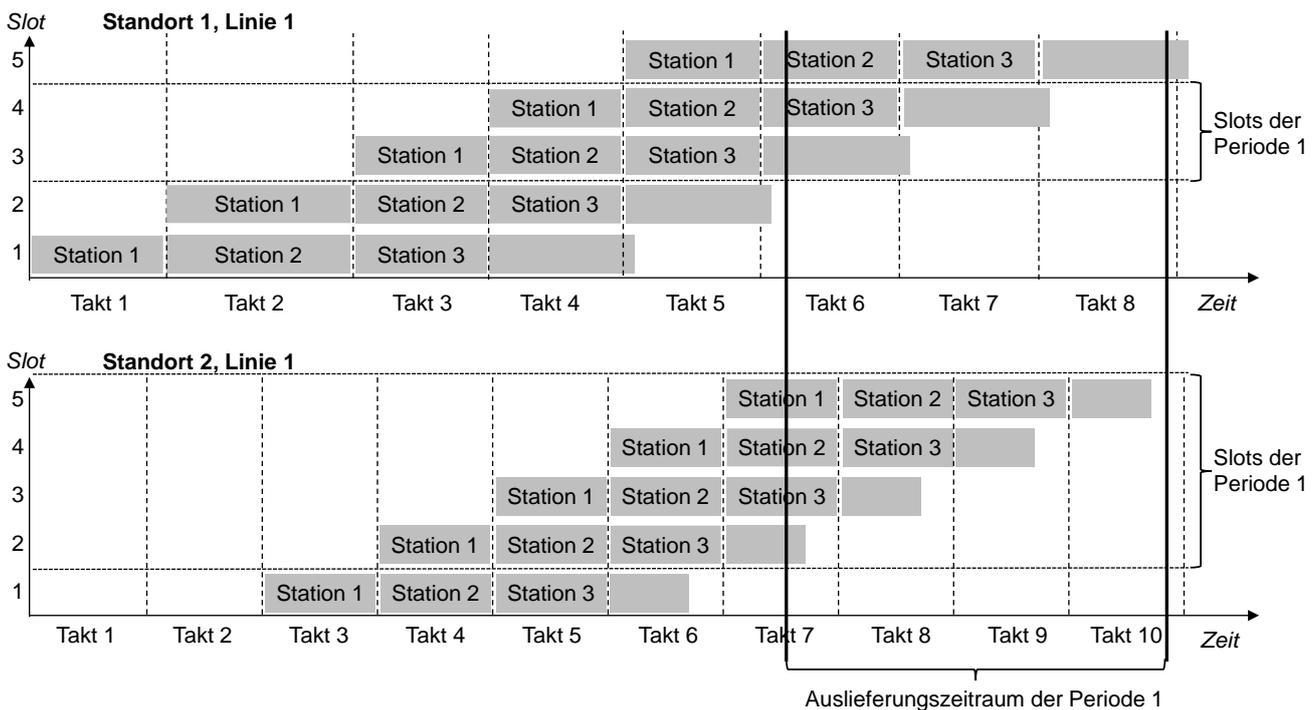


Abbildung 4.6: Beispielhaftes Slotgerüst (vgl. A_Molzahn 2017, S. 23, S. 33, S. 35; A_Schweizer 2017, S. 23 f.)

- Bestehen keine abgeschlossenen Zeiträume zur Endmontage der Aufträge einer Periode, so ist der Kapazitätsbedarf der Aufträge einer Periode nicht mit dem Kapazitätsangebot eines Zeitraums, sondern mit dem Kapazitätsangebot, das für die Slots der Periode zur Verfügung steht, abzugleichen.
- Die Anzahl einzuplanender Aufträge darf die Anzahl der Slots der Linien aller betrachteten Standorte in den betrachteten Perioden nicht überschreiten.

Das Modell zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk berücksichtigt die Planungsaufgaben der horizontalen Planungsebenen Beschaffung, Produktion, Distribution und Absatz in der Zielfunktion und den Nebenbedingungen. Dies ist in Abbildung 4.7 im Überblick dargestellt und wird im Folgenden erläutert.

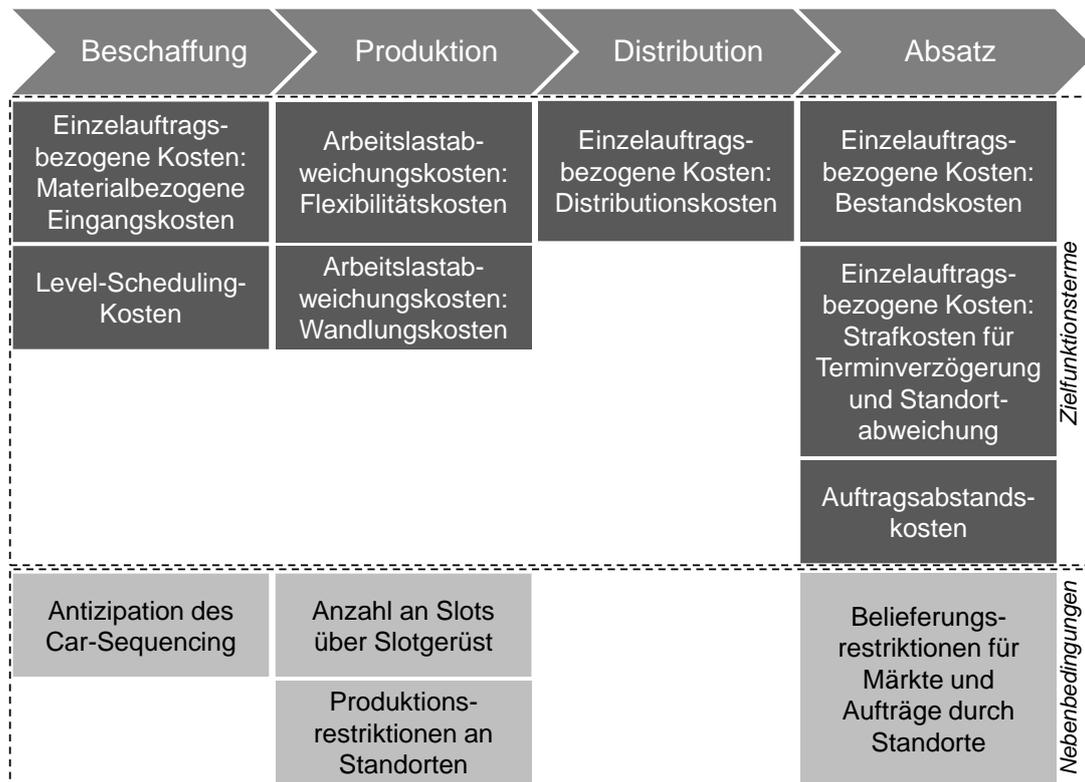


Abbildung 4.7: Bezug der Auftragseinplanung zu den horizontalen Planungsebenen der Supply Chain eines Unternehmens

Zur multikriteriellen Optimierung werden die Ziele im Folgenden durch bepreiste bzw. monetarisierte Zielfunktionsterme beschrieben, sodass keine subjektiven Zielkonfliktbewertungen durch Entscheider zu formalisieren sind und die Ziele unabhängig voneinander bepreist werden können (vgl. Keeney & Raiffa 1993, S. 66 f., S. 111, S. 125 ff.). Die Schwierigkeit kann jedoch ggf. darin bestehen, möglichst reale Kostensätze und entsprechende Kosten- bzw. Zielfunktionsterme für die Bepreisung der einzelnen Ziele zu erfassen. Die zu minimierende Zielfunktion setzt sich nach Formel 4-13 aus den vier Kostentermen einzelauftragsbezogene Kosten $K^{\text{Einzel}}(x)$, Auftragsabstandskosten $K^{\text{Abstand}}(x)$, Arbeitslastabweichungskosten $K^{\text{Arbeitslast}}(x)$ und Level-Scheduling-Kosten $K^{\text{LS}}(x)$ zusammen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Hierzu ist anzumerken, dass Kosten, die bereits durch Planungen, die zuvor erfolgen, feststehen bzw. fix sind und somit keinesfalls durch die Auftragseinplanung beeinflusst werden können, wie z. B. Kosten für das Kapazitätsangebot hinsichtlich der Standardarbeitszeit von unternehmensinternen Mitarbeitern und Investitionen in Betriebsmittel und Gebäude (vgl. Kapitel 2.4; vgl. Dellaert 1989, S. 14), nicht betrachtet werden müssen.

$$\min f(x) = K^{\text{Einzel}}(x) + K^{\text{Abstand}}(x) + K^{\text{Arbeitslast}}(x) + K^{\text{LS}}(x)$$

Formel 4-13

4.2.1 Einzelauftragsbezogene Kosten

Die einzelauftragsbezogenen Kosten zeichnen sich dadurch aus, dass sie im Gegensatz zu den anderen Kostentermen spezifisch für jeden einzelnen Auftrag und damit unabhängig von anderen Aufträgen anfallen. Für jeden Auftrag fallen diese spezifischen Kosten an dem Standort und in der Periode entsprechend der Zuordnung nach Formel 4-14 an. Sie hängen von den Auftragskonfigurationen ab, weshalb der nach den Szenariowahrscheinlichkeiten p_s gewichtete Durchschnitt über die generierten Szenarien nach dem Erwartungswertkriterium gebildet wird.

$$K^{Einzel}(x) = \sum_{s \in S} \left(p_s \times \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} (K_{ilts}^{Einzel} \times x_{ilt}) \right) / \sum_{s \in S} p_s \quad \text{Formel 4-14}$$

Einzelauftragsbezogenen Kosten, die je Auftrag für die mittelfristige Auftragseinplanung als relevant erachtet und daher betrachtet werden, sind nach Formel 4-15 die materialbezogenen Eingangskosten $K_{ilts}^{Material}$, die Bestandskosten $K_{ilts}^{Bestand}$, die Strafkosten K_{ilt}^{Strafe} und die Distributionskosten $K_{il}^{Distribution}$.

$$K_{ilts}^{Einzel} = K_{ilts}^{Material} + K_{ilts}^{Bestand} + K_{ilt}^{Strafe} + K_{il}^{Distribution} \quad \text{Formel 4-15}$$

$$\forall i \in I, \forall l \in L, \forall t \in T, \forall s \in S$$

Materialbezogene Eingangskosten

Die materialbezogenen Eingangskosten lassen sich nach Formel 4-16 in solche unterteilen, die bezogen auf das Produktmodell unabhängig von den betrachteten Optionen anfallen ($K_{m,l}^{Material}$), und solche, die bezogen auf einzelne Optionen ($K_{o,l}^{Material}$) entsprechend der Auftragskonfigurationen der Szenarien anfallen. Hierzu sind Kosten für Materialien auf die entsprechenden Produktmodelle und Optionen umzulegen. Alternativ können auch materialbezogene Eingangskosten für komplette Auftragskonfigurationen direkt berücksichtigt werden. Als Kostenfaktoren können somit je Produktmodell und je Option bzw. je Auftragskonfiguration standortabhängig Beschaffungskosten für die entsprechend in ein Produkt eingehenden Materialien betrachtet werden. Diese umfassen neben den Einkaufspreisen für die Materialien ebenso Kosten für deren Transport zum entsprechenden Endmontagestandort inklusive Steuern und Zölle (vgl. Chen & Hung 2014, S. 2). Ggf. können auch weitere durch das Produktmodell oder Optionen bedingte Verbrauchsfaktoren wie bspw. Energiekosten für den Einsatz der Betriebsmittel betrachtet werden (vgl. Dellaert 1989, S. 14; vgl. Fandel 2009, S. 44 f.). Dabei wird angenommen, dass sich die materialbezogenen Eingangskosten zwischen den betrachteten Perioden nicht unterscheiden. Erfolgt die Beschaffung von internen Lieferanten, so sind

als Einkaufspreise Transferpreise anzusetzen, die von den Marktpreisen abweichen können (vgl. Abele et al. 2008, S. 279 f.). Werden die materialbezogenen Kosten in einem Anwendungsfall nicht in ihrer absoluten Höhe für die nachfolgend beschriebenen Bestandskosten und Auftragsabstandskosten benötigt, so ist es ausreichend, die absoluten Kostenunterschiede der Produktmodelle und Optionen zwischen den Standorten in den Kostenfaktoren abzubilden.

$$K_{ils}^{Material} = K_{m,l}^{Material} + \sum_{g \in \{1, \dots, G\}} \sum_{o_g \in \{1, \dots, O_g\}} (K_{o_g,l}^{Material} \times p_{o_g, is}) \quad \forall i \in I, \forall l \in L, \forall s \in S \quad \text{Formel 4-16}$$

Bestandskosten

Wurde bereits mit Kunden eine frühestmögliche Auslieferungsperiode FA_i vereinbart, so sind fertige Aufträge, die in früheren Perioden fertiggestellt werden und ausgeliefert werden könnten, zu lagern und entsprechende Bestandskosten in der Zielfunktion zu berücksichtigen (vgl. Boysen, Fliedner & Scholl 2007b, S. 767 f.). Diesbezüglich sind bei Auftragskonfigurationen mit hohem Wert insbesondere Kapitalbindungskosten von Bedeutung (vgl. Domschke & Scholl 2008, S. 152). Diese werden zur Vereinfachung nach Formel 4-17 auf die im Modell bereits verwendeten materialbezogenen Eingangskosten $K_{ils}^{Material}$ bezogen, sodass nicht zusätzlich Produktionskosten erhoben und auf die Auftragskonfigurationen umgelegt werden müssen (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 34). Dadurch kann dennoch der erwünschte Effekt erzielt werden, dass eine zu frühe Fertigstellung von Aufträgen mit höheren materialbezogenen Eingangskosten eher vermieden wird. Die Kapitalbindungskosten fallen entsprechend einem kalkulatorischen Zinssatz r pro Periode an (vgl. Fandel 2009, S. 117 f., S. 122). Zudem sind Lagerhaltungskosten $K_{m,l}^{Lagerhaltung}$ zu berücksichtigen (vgl. Konen 1985, S. 53), wobei davon ausgegangen werden kann, dass diese lediglich vom Produktmodell und dessen Ausmaßen und nicht von einzelnen Optionen abhängen. Aufgrund der Aggregation zu Perioden wird antizipiert, dass Aufträge im Durchschnitt in der Periodenmitte fertiggestellt werden und direkt zu Beginn der vereinbarten Periode ausgeliefert werden können, weshalb in Formel 4-17 der Betrag 0,5 für eine halbe Periode addiert wird.

$$K_{ils}^{Bestand} = \max \left\{ 0, (r \times K_{ils}^{Material} + K_{m,l}^{Lagerhaltung}) \times (FA_i - (t + 0,5)) \right\} \quad \forall i \in I, \forall l \in L, \forall t \in T, \forall s \in S \quad \text{Formel 4-17}$$

Werden Planaufträge je Periode generiert, sodass lediglich eine Zuordnung zu Standorten erfolgt (A_Fischer 2015, S. 71 f.; A_Kramer 2016, S. 36 ff.; A_Hammerschmidt 2017, S. 76 ff.), gilt für sie $FA_i = t$, wodurch keine Bestandskosten anfallen.

Strafkosten

Strafkosten für einzelne Aufträge können sowohl aufgrund ihrer Periodenzuordnung in Form von Terminverzögerungskosten ($K_{it}^{Strafe,T}$) als auch aufgrund ihrer Standortzuordnung in Form von Standortabweichungskosten ($K_{ij}^{Strafe,L}$) nach Formel 4-18 anfallen.

$$K_{it}^{Strafe} = K_{it}^{Strafe,T} + K_{ij}^{Strafe,L} \quad \forall i \in I, \forall l \in L, \forall t \in T \quad \text{Formel 4-18}$$

Terminverzögerungskosten sind das Pendant zu den Bestandskosten und fallen für einen Auftrag an, wenn dieser erst nach der mit dem Kunden vereinbarten spätestmöglichen Auslieferungsperiode SA_i ausgeliefert wird. Bei Terminverzögerungskosten kann es sich um Preisnachlässe an die Kunden, um interne Kosten für mögliche Auftragsstornierungen oder um Kosten für in der Zukunft entgangene Aufträge handeln (Dellaert 1989, S. 15). Preisnachlässe können in Form vertraglich vereinbarter Strafzahlungen an die Kunden erforderlich sein. Da sich die Kosten je Kunde ggf. nach entsprechend vertraglichen Vereinbarungen unterscheiden können, kann der Kostensatz für einen Auftrag $K_{ki}^{Strafe,T}$ kundenspezifisch festgelegt werden. Zur Vereinfachung werden je Auftrag mit der Verzögerung linear steigende Kosten angenommen (vgl. Boysen, Fliedner & Scholl 2007b, S. 767; vgl. Dellaert 1989, S. 15). Auch hier wird wie bei den Bestandskosten davon ausgegangen, dass Aufträge im Durchschnitt in der Periodenmitte fertiggestellt werden, weshalb der Betrag 0,5 für eine halbe Periode in Formel 4-19 subtrahiert wird. Werden Planaufträge je Periode generiert, sodass lediglich eine Zuordnung zu Standorten erfolgt, gilt für sie $SA_i = t$, wodurch keine Terminverzögerungskosten anfallen. Eine Berücksichtigung von Auslieferterminen und Transportdauern erfolgt für Planaufträge im Rahmen der Kundenauftragszuordnung, worauf in Kapitel 4.3 eingegangen wird.

$$K_{it}^{Strafe,T} = \max \left\{ 0, K_{ki}^{Strafe,T} \times ((t - 0,5) - SA_i) \right\} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad \text{Formel 4-19}$$

Standortabweichungskosten fallen nach Formel 4-20 lediglich für Kundenaufträge unabhängig von der Periode an, wenn diese nicht an einem Standort produziert werden, der zu den von den entsprechenden Kunden gewünschten bzw. vertraglich mit den Kunden vereinbarten Standorte L_k gehört. Besteht keine Präferenz, so gehören alle Standorte zu L_k . Voraussetzung für entsprechende Strafkosten ist, dass an einem der präferierten Standorte zumindest auf einer Linie das von den Kunden gewählte Produktmodell montiert werden kann. Der Kostensatz eines Auftrags $K_{ki}^{Strafe,L}$ kann sich je nach Vereinbarung unterscheiden und somit kundenspezifisch festgelegt werden.

$$K_{il}^{Strafe,L} = \begin{cases} K_{k_i}^{Strafe,L} & , \forall i \in I, \forall l \in \{L \mid l \notin L_{k_i} \wedge \exists u \in U_m : l_u \in L_{k_i}\} \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Formel 4-20}$$

Distributionskosten

Als Distributionskosten werden Kosten, die zur Distribution von Aufträgen von deren Endmontagestandorten zu den entsprechenden Kundenmärkten \bar{l}_k nach Formel 4-21 anfallen, betrachtet. Sie können sämtliche Kosten der Distribution wie Transportkosten (vgl. Koenen 1985, S. 55) und Zölle (vgl. Chen & Hung 2014, S. 3) umfassen, die der Kunde nicht selbst trägt und somit vom produzierenden Unternehmen zu berücksichtigen sind. Der Kostensatz kann sich bei Kundenaufträgen je nach vertraglicher Vereinbarung zur Distribution unterscheiden und ist somit kunden- bzw. marktspezifisch.

$$K_{il}^{Distribution} = K_{l_{\bar{k}_i}}^{Distribution} \quad \forall i \in I, \forall l \in L \quad \text{Formel 4-21}$$

4.2.2 Auftragsabstandskosten

Auftragsabstandskosten sind für einzelne Kunden zu berücksichtigen, für die in den betrachteten Perioden mehr als ein Auftrag eingeplant wird, falls diese zwischen den Auslieferungen von je zwei Aufträgen einen zeitlichen Abstand Δ_k erfordern. Da die Betrachtung aufgrund der Aggregation auf Perioden lediglich periodenweise erfolgen kann, werden Kosten antizipiert, wenn ein erforderlicher Abstand für einen Kunden und eine Periode nicht eingehalten werden kann, indem $\Delta_{kt}^{Abstand}$ zu viele Aufträge des Kunden zu der Periode zugeordnet werden. In einem solchen Fall können die in einer Periode zu viel produzierten Aufträge nicht mehr in derselben Periode ausgeliefert werden, wodurch für diese durch den ersten Term in Formel 4-22 abstandserforderliche Bestandskosten und durch den zweiten Term abstandserforderliche Terminverzögerungskosten jeweils für eine halbe Periode (0,5) berücksichtigt werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass Aufträge im Durchschnitt in der Periodenmitte fertiggestellt werden und eine Auslieferung in der Folgeperiode erfolgen kann.

$$K^{Abstand}(x) = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \left[\max \{0, \Delta_{kt}^{Abstand}(x)\} \times K_k^{Bestand} \times 0,5 + \right. \\ \left. + \max \left\{ 0, \left(\Delta_{kt}^{Abstand}(x) - \sum_{i \in \{l \mid (k_i=k) \wedge (t \geq FA_i) \wedge (t < SA_i)\}} \sum_{l \in L} x_{ilt} - \sum_{t' \in T} \sum_{i \in \{l \mid (k_i=k) \wedge (t' < FA_i) \wedge (t=FA_i) \wedge (t < SA_i)\}} \sum_{l \in L} x_{ilt'} \right) \right\} \right] \\ \times K_{k_i}^{Strafe,T} \times 0,5 \quad \text{Formel 4-22}$$

Hinsichtlich Formel 4-22 ist anzumerken, dass Bestandskosten und Terminverzögerungskosten, die bereits durch $K_{ilts}^{Bestand}$ und $K_{it}^{Strafe,T}$ modellseitig abgebildet sind, nicht

nochmals erfasst werden. Daher werden in Formel 4-23 nur Aufträge eines Kunden einer Periode berücksichtigt, die der Periode zugeordnet werden und bereits ausgeliefert werden können ($t \geq FA_i$), und solche, die einer früheren Periode zugeordnet werden ($t' < FA_i$), jedoch erst in der betrachteten Periode ausgeliefert werden können ($t = FA_i$). Indem die zur Vorperiode zu viel zugeordneten Aufträge $\Delta_{k(t-1)}^{Abstand}$ zudem betrachtet werden, lässt sich die Anzahl der Aufträge, die in einer Periode an einen Kunden ausgeliefert werden können, bestimmen. Wird diese Anzahl mit der Anzahl maximal möglicher Auslieferungen abgeglichen, so ergibt sich die Anzahl der zu einer Periode zu viel zugeordneten Aufträge $\Delta_{kt}^{Abstand}$. Die Anzahl maximal möglicher Auslieferungen für eine Periode entspricht dem Quotienten aus der Anzahl an Sub-Perioden τ_t einer Periode, die zur Auslieferung für einen Kunden zur Verfügung stehen, und dem erforderlichen zeitlichen Abstand Δ_k in der Zeiteinheit der Sub-Perioden. Aufgrund der möglichen Nichtganzzahligkeit dieses Quotienten wird auch die Nichtganzzahligkeit von $\Delta_{kt}^{Abstand}$ zugelassen.

$$\Delta_{kt}^{Abstand}(\mathbf{x}) = \sum_{i \in \{l | (k_i = k) \wedge (t \geq FA_i)\}} \sum_{l \in L} x_{ilt} + \sum_{t' \in T} \sum_{i \in \{l | (k_i = k) \wedge (t' < FA_i) \wedge (t = FA_i)\}} \sum_{l \in L} x_{ilt'} \\ + \max \left\{ 0, \Delta_{k(t-1)}^{Abstand} \right\} - \frac{\tau_t}{\Delta_k} \quad \forall k \in K, \forall t \in T$$

Formel 4-23

Zur vereinfachten Abgrenzung zwischen den betrachteten Perioden und den davorliegenden Perioden kann nach Formel 4-24 die Anzahl der zu viel zugeordneten Aufträge vor Periode eins auf null gesetzt werden.

$$\Delta_{k0}^{Abstand} = 0 \quad \forall k \in K$$

Formel 4-24

Da die Reihenfolgeplanung erst nach der Auftragseinplanung erfolgt, kann keine Entscheidung darüber getroffen werden, welche der zu einer Periode zu viel zugeordneten Aufträge erst in der Folgeperiode ausgeliefert werden sollen. Somit können sich die durch den erforderlichen Auftragsabstand verursachten Bestandskosten nicht auf konkrete Aufträge beziehen. Daher wird für die Bestandskosten je Kunde der in Formel 4-25 angegebene, durchschnittliche Bestandskostensatz $K_k^{Bestand}$ verwendet, der Kapitalbindungs- und Lagerhaltungskosten umfasst. Hierbei werden zur Vereinfachung alle potentiellen Zuordnungen der Aufträge eines Kunden zu Standorten L_i^{pot} einbezogen, die nicht durch Nebenbedingungen hinsichtlich der Standorte (siehe Formel 4-39, For-

mel 4-40, Formel 4-43 und Formel 4-44 unten) ausgeschlossen werden. Würden stattdessen die konkreten Zuordnungen berücksichtigt werden, wäre das Optimierungsmodell durch die Multiplikation von Entscheidungsvariablen in Formel 4-22 komplexer.

$$K_k^{Bestand} = \frac{\sum_{s \in S} \left(p_s \times \sum_{i \in \{I|k_i=k\}} \sum_{l \in L_i^{pot}} (r \times K_{ils}^{Material} + K_{m,l}^{Lagerhaltung}) \right)}{\left(\sum_{i \in \{I|k_i=k\}} \sum_{l \in L_i^{pot}} 1 \right) \times \sum_{s \in S} p_s} \quad \forall k \in K \quad \text{Formel 4-25}$$

Hinsichtlich der Terminverzögerungskosten werden in Formel 4-22 aufgrund des erforderlichen Auftragsabstands von den zu einer Periode zu viel zugeordneten Aufträge $\Delta_{kt}^{Abstand}$ diejenigen subtrahiert, die der Periode zugeordnet werden, bereits ausgeliefert werden können ($t \geq FA_i$), aber noch nicht ausgeliefert werden müssen ($t < SA_i$) und solche, die einer früheren Periode zugeordnet werden ($t' < FA_i$), jedoch erst in der betrachteten Periode ausgeliefert werden können ($t = FA_i$), aber noch nicht ausgeliefert werden müssen ($t < SA_i$). Somit werden ausschließlich solche Aufträge, die produziert wurden und auch ausgeliefert werden müssten, jedoch aufgrund des erforderlichen Auftragsabstands nicht ausgeliefert werden können, berücksichtigt.

4.2.3 Arbeitslastabweichungskosten

Die Arbeitslastabweichungskosten ergeben sich durch die Abweichungen der Kapazitätsnachfrage vom Kapazitätsangebot je Standort, je Periode und je Szenario $A_{its}(x)$ in Abhängigkeit der Auftragseinplanung. Hierzu erfolgt eine aggregierte Betrachtung der durch die Arbeitslasten der Auftragskonfigurationen der zu einem Standort und einer Periode zugeordneten Aufträge bestehenden Kapazitätsnachfrage. Die Arbeitslastabweichungskosten werden im Sinne der Ergebnisrobustheit nach Formel 4-26 in Form von zwei Termen nach dem Hodges-Lehmann-Kriterium betrachtet (A_Strunz 2017, S. 68).

$$K^{Arbeitslast}(x) = \sum_{s \in S} \left(p_s \times \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} K_{its}^{Flexibilität} (A_{its}(x)) \right) / \sum_{s \in S} p_s + \sum_{l \in L} K_l^{Wandlung} (C_l^{Wandlung} (A_{its}(x))) \quad \text{Formel 4-26}$$

Der erste Term berücksichtigt Flexibilitätskosten, die szenariospezifisch bei der Planausführung entsprechend der Arbeitslastabweichung durch Inanspruchnahme der Kapazitätsflexibilität der Mitarbeiter je Standort und Periode anfallen. Die gesamten Flexibilitätskosten entsprechen der mit den Szenariowahrscheinlichkeiten gewichteten

Summe der Flexibilitätskosten in den Perioden an den Standorten in den einzelnen Szenarien im Sinne des Erwartungswertkriteriums. Der zweite Term berücksichtigt Kosten zur Anpassung der oberen Flexibilitätsgrenze entsprechend der maximalen Arbeitslastabweichung durch Einstellung von unternehmensexternen Mitarbeitern bzw. Leiharbeitern je Standort in Form von organisatorischen Wandlungskosten. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Entscheidung über die Wandlung aufgrund des Zeitaufwands zur Einstellung und Qualifizierung der Mitarbeiter mittelfristig zum Zeitpunkt der Auftragseinplanung und somit szenariounabhängig erfolgen muss. Durch die obere Flexibilitätsgrenze wird somit ein Anspruchsniveau für alle Szenarien hinsichtlich der Kapazitätsflexibilität der unternehmensinternen Mitarbeiter bzw. Arbeitszeitflexibilität abgebildet, deren Überschreitung für die Planausführung bzw. den Produktionsablauf kritisch ist. Überschreitungen werden daher durch eine entsprechende Wandlung als Maßnahme im Sinne des Minimax-Kriteriums vermieden, wodurch Zulässigkeitsrobustheit erreicht wird. Die Gewichtung der beiden Terme nach dem Hodges-Lehmann-Kriterium erfolgt durch eine Monetarisierung der Flexibilitäts- und Wandlungskosten mittels möglichst realer Kostensätze.

Durch die Arbeitslastabweichung werden die durch die Auftragskonfigurationen der zu einem Standort in einer Periode zugeordneten Aufträge bedingten Arbeitslasten detailliert erfasst und nach Formel 4-27 dem Kapazitätsangebot gegenübergestellt. Dadurch erfolgt eine Antizipation des *Mixed-Model-Sequencing* basierend auf den Arbeitslasten w_{ω_s} und dem Kapazitätsangebot C_{it} je Standort und Periode und somit aggregiert über alle entsprechenden Slots der entsprechenden Linien. Sind Arbeitslasten standortabhängig und mittels eines Skalierungsfaktors je Standort auf einen Referenzstandort bezogen, so ist zu berücksichtigen, dass C_{it} dem skalierten Kapazitätsangebot entsprechen muss.

$$A_{its}(x) = \left[\sum_{i \in I} (w_{\omega_s} \times x_{ilt}) \right] - C_{it} \quad \forall I \in L, \forall t \in T, \forall s \in S \quad \text{Formel 4-27}$$

Zur Zulässigkeit der Auftragseinplanung bei unsicheren Auftragskonfigurationen kann die Arbeitslast nicht durch das Kapazitätsangebot in Form von Nebenbedingungen (vgl. Boysen, Fliedner & Scholl 2007b, S. 782) beschränkt werden. Daher werden sowohl positive als auch negative Abweichungen vom Kapazitätsangebot im Sinne eines Kompensationsmodells zugelassen und kostenmäßig durch Flexibilitätskosten erfasst. Eine

differenzierte Betrachtung der Arbeitslastabweichungen wird durch standort- und periodenspezifische stückweise lineare Flexibilitätskostenfunktionen bezüglich der Arbeitslastabweichungen je Standort, je Periode und je Szenario nach Formel 4-28 ermöglicht.

$$\begin{aligned}
 & K_{lts}^{Flexibilität} (A_{lts}(x)) \\
 = & \begin{cases} P_{lt}^{intern,sub1} \times (\lambda_{lt} - C_{lt}^{min}) + P_{lt}^{intern,sub2} \times (C_{lt}^{min} - A_{lts}(x)) & , -C_{lt} \leq A_{lts}(x) \leq C_{lt}^{min} \\ P_{lt}^{intern,sub1} \times (\lambda_{lt} - A_{lts}(x)) & , C_{lt}^{min} < A_{lts}(x) \leq \lambda_{lt} \\ 0 & , \lambda_{lt} < A_{lts}(x) \leq \mu_{lt} \\ P_{lt}^{intern,add} \times (A_{lts}(x) - \mu_{lt}) & , \mu_{lt} < A_{lts}(x) \leq C_{lt}^{max} \\ P_{lt}^{intern,add} \times (C_{lt}^{max} - \mu_{lt}) + P_{lt}^{extern} \times (A_{lts}(x) - C_{lt}^{max}) & , A_{lts}(x) > C_{lt}^{max} \end{cases} \quad \text{Formel 4-28} \\
 & \forall l \in L, \forall t \in T, \forall s \in S
 \end{aligned}$$

Die Intervallgrenzen lassen sich relativ zum Kapazitätsangebot je Standort und Periode als prozentuale Über- bzw. Unterschreitung durch Formel 4-29, Formel 4-30, Formel 4-31 und Formel 4-32 definieren und in absolute negative und positive Werte umrechnen. Somit können nicht nur unterschiedliche Kostensätze, sondern auch Unterschiede in der Kapazitätsflexibilität der Mitarbeiter standort- und periodenspezifisch abgebildet werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Mitarbeiterflexibilität lediglich im Rahmen der Betriebsmittelflexibilität und der gegebenen Taktzeiten bzw. dem gegebenen Slotgerüst nutzbar und daher entsprechend abzubilden ist.

$$C_{lt}^{min} = C_{lt}^{minProzent} \times C_{lt} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad \text{Formel 4-29}$$

$$\lambda_{lt} = \lambda_{lt}^{Prozent} \times C_{lt} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad \text{Formel 4-30}$$

$$\mu_{lt} = \mu_{lt}^{Prozent} \times C_{lt} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad \text{Formel 4-31}$$

$$C_{lt}^{max} = C_{lt}^{maxProzent} \times C_{lt} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad \text{Formel 4-32}$$

Für Arbeitslastabweichungen unterhalb der unteren Flexibilitätsgrenze der internen Mitarbeiter C_{lt}^{min} sind Einsparungen bis zu einer negativen Arbeitslastabweichung in Höhe des gesamten Kapazitätsangebots $-C_{lt}$ durch Entlassungen möglich. Werden Entscheidungen über Entlassungen von unternehmensinternen Mitarbeitern ebenso wie deren Einstellungen nicht als mittelfristig auf Basis einzelner Perioden, sondern als langfristig betrachtet, so sind keine entsprechenden Lohnkosteneinsparungen möglich, sodass $P_{lt}^{intern,sub2} = 0$ gilt. Je nach vertraglicher und arbeitsrechtlicher Situation können Mitarbeiter oberhalb der unteren Flexibilitätsgrenze der internen Mitarbeiter C_{lt}^{min} bis zur unteren Grenze der kostenlosen Kapazitätsflexibilität der unternehmensinternen Mitarbeiter λ_{lt} aufgrund der Unterlast zu unbezahltem Urlaub oder Kurzarbeit (vgl. Lödding

2008, S. 470) verpflichtet werden. Somit können Lohnkosteneinsparungen durch den Kostensatz $P_{it}^{intern,sub1}$ erzielt werden.

Für Arbeitslastabweichungen innerhalb des Intervalls der unteren Grenze der kostenlosen Kapazitätsflexibilität der unternehmensinternen Mitarbeiter λ_{it} und der oberen Grenze der kostenlosen Kapazitätsflexibilität der unternehmensinternen Mitarbeiter μ_{it} werden keine Kosten berechnet, sodass hinsichtlich der Arbeitslast kostenlose Flexibilität zur mittelfristigen Auftragseinplanung zur Verfügung steht. Die Umsetzung von Mehr- und Minderarbeit ist in Form von Arbeitszeitkonten mit einem Ausgleich über Perioden hinweg prinzipiell möglich (vgl. Schneeweiß 2002, S. 172 ff.). Hierbei sollte jedoch beachtet werden, dass ein Ausgleich sowohl zwischen den betrachteten Perioden als auch über die betrachteten Perioden hinweg durch das Modell nicht sichergestellt wird.

Oberhalb der Intervallgrenze μ_{it} bis zur oberen Flexibilitätsgrenze der internen Mitarbeiter bzw. der maximal erlaubten Überstundenanzahl C_{it}^{max} sind ausbezahlte Überstunden zu einem Kostensatz $P_{it}^{intern,add}$ möglich (vgl. Dellaert 1989, S. 15 f.; vgl. Lingitz et al. 2013, S. 541 ff.; vgl. Schneeweiß 2002, S. 168 ff.). Dies kann in Form von Arbeitszeitkonten mit entsprechender Auszahlung je Periode umgesetzt werden (vgl. Lingitz et al. 2013, S. 541 ff.). Die Kapazitätsflexibilität der internen Mitarbeiter ist somit durch die obere Flexibilitätsgrenze beschränkt. Um Verzögerungen in der Produktion aufgrund von Überlastungen oberhalb der oberen Flexibilitätsgrenzen zu vermeiden, kann zusätzlich Kapazitätsflexibilität unternehmensexterner Mitarbeiter bzw. von Leiharbeitern zu einem Kostensatz P_{it}^{extern} herangezogen werden (vgl. Schneeweiß 2002, S. 168 ff.; Lödding 2008, S. 471).

Hinsichtlich der aggregierten Betrachtung der Arbeitslastabweichung je Periode ist zu beachten, dass die auf der Auftragseinplanung basierende, antizipierte Reihenfolgeplanung selbst bei einer aggregierten Arbeitslastabweichung von null in den Sub-Perioden oder Takten Über- und Unterlasten nicht unbedingt vermeiden kann. Zudem kann kurzfristig Flexibilität aufgrund von Planabweichungen bzw. Störungen im Produktionsablauf erforderlich sein. Um ausreichend Flexibilität auch nach der mittelfristigen Planung vorzubehalten bzw. zur Verfügung zu stellen, sollte diese mittelfristig nicht vollständig verplant werden (vgl. Ferber 2005, S. 132 f.; vgl. Lödding 2008, S. 468). Dies

kann in der Arbeitslastabweichungsberechnung erreicht werden, indem das Kapazitätsangebot (vgl. Boysen, Fliedner & Scholl 2007b, S. 782) oder die Flexibilitätsgrenzen um einen Flexibilitätsvorbehalt (vgl. Ferber 2005, S. 132 f.) reduziert werden. (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 18 ff., S. 29 ff.)

Sowohl die stückweise lineare Flexibilitätskostenfunktionen als auch die stückweise lineare Wandlungskostenfunktionen, auf die weiter unten eingegangen wird, sind im Zusammenhang in Abbildung 4.8 beispielhaft dargestellt.

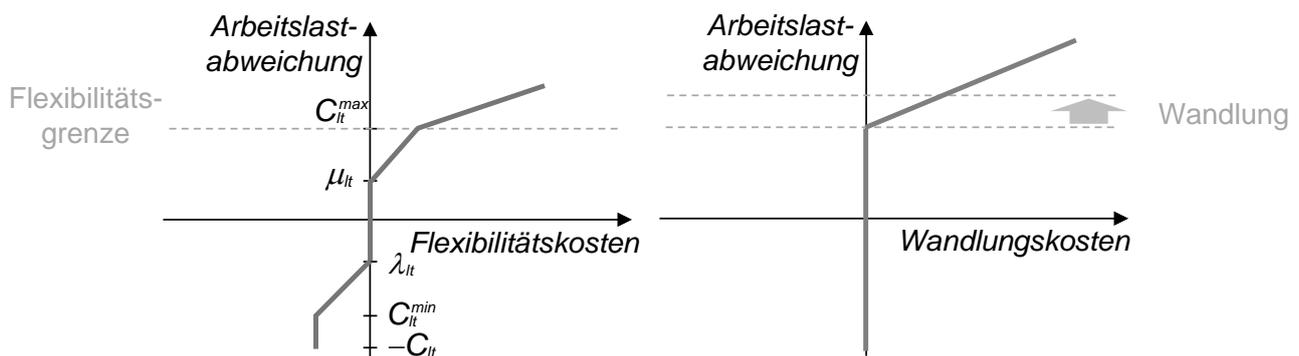


Abbildung 4.8: Arbeitslastabweichungskosten in Form von Flexibilitäts- und Wandlungskosten (vgl. A_Schweizer 2017, S. 40; vgl. A_Strunz 2017, S. 74 f.)

Die Verwendung der beschriebenen stückweise linearen Kostenfunktionen mit frei definierbaren Intervallen und Kostensätzen zur Monetarisierung der Flexibilitätskosten bietet folgende Vorteile (A_Strunz 2017, S. 63 ff.; A_Schweizer 2017 S. 37):

- Es können mehrere differenzierte Anspruchsniveaus durch Intervallgrenzen und reale Kostensätze zur Abbildung der zur Verfügung stehenden Flexibilität verwendet werden. Diese können sich je Standort und Periode unterscheiden, sodass lokale und sich zeitlich verändernde Flexibilität und Kostenstrukturen berücksichtigt werden können. Eine Monetarisierung der Arbeitslastabweichungen an den Standorten in den Perioden in den Szenarien ermöglicht eine Bewertung sämtlicher Abweichungen hinsichtlich ihrer Relevanz.
- Überlastungen oberhalb von C_{it}^{max} können überproportional bestraft werden, sodass im Rahmen der Optimierung ein Ausgleich zwischen überlasteten Perioden und Standorten untereinander erfolgen kann. Würden hierzu nichtlineare anstelle der stückweise linearen Kostenfunktionen verwendet werden, so würde dies zur Nichtlinearität des Problems führen und ggf. nicht reale Kostensätze widerspiegeln.

- Die Intervalle zur Bepreisung sind relativ zum Kapazitätsangebot gewählt, so dass Abweichungen nicht in ihrer absoluten Höhe unabhängig vom Kapazitätsangebot bewertet werden. Eine relative Betrachtung spiegelt im Gegensatz zu einer absoluten Betrachtung reale Maßnahmen zum Umgang mit Abweichungen unter Ausnutzung vorhandener Flexibilität wider. Hierbei wird im Zusammenhang mit der stückweisen Linearität vermieden, dass hohe Arbeitslastabweichungen lediglich an Standorten in Perioden mit hohen Kapazitätsangeboten, an denen sie relativ weniger ausmachen, anfallen.

Um externe Arbeitskräfte bei Arbeitslasten oberhalb der oberen Flexibilitätsgrenze der internen Mitarbeiter C_{it}^{max} einsetzen zu können, werden Wandlungskosten zu Erweiterung der Flexibilitätsgrenze durch zusätzliche externe Mitarbeiter berücksichtigt. In der realen Anwendung können diese in Form von Qualifizierungs- bzw. Schulungsmaßnahmen für die externen Mitarbeiter anfallen. Hierzu ist nach Formel 4-33 zunächst zu bestimmen, wie viele externe Mitarbeiter je Standort für die betrachteten Perioden qualifiziert werden sollen. Dazu wird die in den Perioden durch die betrachteten Szenarien maximal anfallende Überlast durch die Kapazität einer externen vollzeitäquivalenten Stelle C_i^{extern} geteilt. Die vollzeitäquivalente, nicht notwendigerweise ganzzahlige Anzahl an Mitarbeitern wird folglich in Formel 4-34 mit den Kosten für die Qualifizierung bzw. Wandlungskosten je vollzeitäquivalentem, externem Mitarbeiter $P_i^{Wandlung}$ verrechnet, wobei davon ausgegangen wird, dass nicht in Vollzeit arbeitende Mitarbeiter in einem geringeren Umfang qualifiziert werden.

$$C_i^{Wandlung}(A_{its}(x)) = \max_{t \in T, s \in S} \left\{ (A_{its}(x) - C_{it}^{max}) / C_i^{extern} \right\} \quad \forall i \in L \quad \text{Formel 4-33}$$

$$K_i^{Wandlung}(C_i^{Wandlung}(A_{its}(x))) = \begin{cases} 0 & , C_i^{Wandlung}(A_{its}(x)) \leq 0 \\ P_i^{Wandlung} \times C_i^{Wandlung}(A_{its}(x)) & , C_i^{Wandlung}(A_{its}(x)) > 0 \end{cases} \quad \forall i \in \{1, \dots, L\} \quad \text{Formel 4-34}$$

Die maximale Überlast besteht an einem Standort in einer Periode, wenn alle Aufträge in der jeweiligen Konfiguration mit der maximalen Arbeitslast vorliegen. Somit muss das Szenario mit der maximalen Arbeitslast für alle Aufträge, das explizit bei der Szenariengenerierung in Kapitel 4.1.1 als Worst-Case-Szenario berücksichtigt wird, unter den betrachteten Szenarien der Optimierung sein, um die obere Flexibilitätsgrenze entsprechend zu erweitern. Nur dadurch kann Zulässigkeitsrobustheit und somit auch Informationsrobustheit bezüglich der Zulässigkeitsrobustheit für alle möglichen Szenarien (vgl.

Scholl 2001, S. 129) garantiert werden. Hierzu werden entsprechende Wandlungskosten für die anfallende planbare bzw. erwünschte Maßnahme der Qualifizierung externer Mitarbeiter im Sinne des Kompensationsmodells (vgl. Scholl 2001, S. 73, S. 201 f.) berücksichtigt. Durch die Erweiterung der oberen Flexibilitätsgrenze hinsichtlich des Szenarios der maximalen Arbeitslast wird der Risikoaversion der robusten Planung Rechnung getragen. Dies wäre durch ein Chance-Constrained-Modell nicht gewährleistet, da die maximal anfallende Überlast nicht in ihrer Höhe berücksichtigt und kostenseitig erfasst werden würde, sodass eine sehr hohe maximale Überlast möglich wäre. Vorteile der Wandlungskosten bestehen somit vor allem in folgenden Punkten (A_Strunz 2017, S. 74 f., S. 97, S. 176):

- Es kann ein realer Kostensatz zur Abbildung der Wandlungskosten zur Erweiterung der oberen Flexibilitätsgrenze und somit gleichzeitig zur Abbildung und Gewichtung des Minimax-Kriteriums verwendet werden.
- Die Betrachtung des Worst-Case-Szenarios, dem Szenario mit maximaler Arbeitslast, ermöglicht im Szenarienmodell unabhängig von anderen Szenarien und deren Szenariowahrscheinlichkeiten eine möglichst geringe Arbeitslastabweichung oberhalb der oberen Flexibilitätsgrenze der internen Mitarbeiter. Dies kann allein durch die Flexibilitätskosten oberhalb der oberen Flexibilitätsgrenze trotz eines höheren Kostensatzes ($P_{it}^{extern} > P_{it}^{intern,add}$) aufgrund des Erwartungswertkriteriums und die damit verbundene Relativierung durch andere Szenarien nur bedingt erreicht werden. Somit wird durch die Wandlungskosten die Ergebnisstabilität hinsichtlich einer möglichst geringen maximalen Arbeitslastabweichung und damit die Ergebnisrobustheit erhöht. Im Erwartungswertmodell, das keine Szenarien betrachtet, wird jedoch lediglich die erwartete Arbeitslastabweichung berücksichtigt.
- Externe Mitarbeiter können mit mittelfristigem Vorlauf akquiriert und qualifiziert werden. Durch diese können Arbeitslasten aller möglichen Szenarien durch eine entsprechende Flexibilität des Kapazitätsangebots planmäßig abgearbeitet werden. Durch Berücksichtigung des Worst-Case-Szenarios wird Zulässigkeits- und Informationsrobustheit erreicht. Werden nicht genügend Arbeitskräfte bis zur Höhe des Worst-Case-Szenarios zur Verfügung gestellt, so gelten einzelne Szenarien, in denen die Arbeitslast die obere Flexibilitätsgrenze übersteigt, als unzulässig. In solchen Szenarien besteht dennoch kurzfristig die Notwendigkeit der Planausführung, sodass entsprechende unerwünschte Notmaßnahmen zur

Kompensation durchgeführt werden (vgl. Scholl 2001, S. 201), wofür entsprechende, szenarioabhängige Folgekosten anfallen (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 47 f.). Wandlungskosten sind somit im Gegensatz zu Folgekosten erwünschte Kompensationsmaßnahmen und deren Planungszeitpunkt entspricht dem Zeitpunkt der mittelfristigen Auftragseinplanung, sodass diese unabhängig vom später eingetretenen Szenario getragen werden.

4.2.4 Level-Scheduling-Kosten

Durch Level-Scheduling-Kosten wird ein möglichst gleichmäßiger Bedarfsverlauf der in die Endmontage eingehenden Materialien angestrebt, indem Abweichungen vom gleichmäßigen Bedarfsverlauf durch Kosten bestraft werden. Hierzu wird als materialbedarfsorientierter Ansatz des Level-Scheduling und als Alternative zu dem teileorientierten und dem variantenorientierten Level-Scheduling das optionsorientierte Level-Scheduling betrachtet (vgl. Boysen 2005, S. 170 f.). Dadurch wird die Komplexität von Teilen ebenso wie beim variantenorientierten Level-Scheduling vermieden, jedoch im Vergleich dazu auch eine Anwendung bei hoher Variantenanzahl ermöglicht. Durch den Bezug von Arbeitslasten zu Optionen kann durch das optionsorientierte Level-Scheduling gleichzeitig das arbeitslastorientierte Level-Scheduling als arbeitslastorientierter Ansatz verfolgt werden. Dies kann für einzelne Optionen anstelle der oder zusätzlich zur detaillierten Betrachtung im Rahmen der Arbeitslastabweichungskosten erfolgen. Eine zusätzliche Betrachtung kann für Arbeitslasten, die an den Endmontagestandorten bspw. vor- oder nachgelagert zur Produktion auf den Linien stattfinden und nicht im Rahmen des Kapazitätsangebots erfasst werden, sinnvoll sein.

Der Antizipation des Level-Scheduling kommt nach dem JIT-Prinzip im Gegensatz zum Level-Scheduling selbst eine höhere Bedeutung zu, da dadurch ein gleichmäßiger Bedarfsverlauf zwischen anstelle innerhalb der Perioden angestrebt wird (vgl. Boysen, Fliedner & Scholl 2007b, S. 783). Im Rahmen der Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk kann neben einem gleichmäßigen Bedarfsverlauf zwischen Perioden ebenso ein gleichmäßiger Bedarfsverlauf zwischen den Endmontagestandorten verfolgt werden. Beides in Kombination kann im Falle von lokaler Beschaffung mit je einem Lieferantenstandort je Endmontagestandort bezüglich einer Option (vgl. Abele et al. 2008, S. 328) und mit jeweils gegebener Transportdauer zu einem gleichmäßigen Bedarf an den Lieferantenstandorten führen.

Im Falle von globaler Beschaffung mit einem globalen Lieferanten bezüglich einer Option (vgl. Abele et al. 2008, S. 328 f.) stellt sich die Frage, ob für einen gleichmäßigen Bedarf an einem entsprechend globalen Lieferantenstandort, wie in Abbildung 4.9 beispielhaft dargestellt, nicht die Transportdauern zu den Endmontagestandorten und die entsprechenden Zeiträume am Lieferantenstandort für die Bereitstellung der Bestellungen der Endmontagestandorte für die Perioden betrachtet werden sollten. Dadurch könnte berücksichtigt werden, dass für eine Option ungleichmäßige Bedarfe der Endmontagestandorte zugelassen werden, solange am globalen Lieferantenstandort gleichmäßige Bedarfe entstehen. Problematisch wäre jedoch bei einer solchen Betrachtung, dass sowohl durch die unterschiedlichen Transportdauern von einem Lieferanten- zu den verschiedenen Endmontagestandorten als auch ggf. durch unterschiedliche Zeiträume je Periode für die Produktion an den Endmontagestandorten die Zeiträume der Bereitstellung einer Periode am Lieferantenstandort nicht identisch sind. Somit ist es nicht ohne weitere Annahmen möglich, auf der Aggregationsebene der Perioden einen gleichmäßigen Bedarfsverlauf direkt an einem globalen Lieferantenstandort detaillierter zu berücksichtigen. Daher wird im Folgenden ein gleichmäßiger Bedarfsverlauf für globale ebenso wie für lokale Beschaffung unabhängig von Transportdauern modellseitig abgebildet. Wohingegen für lokale Beschaffung ein gleichmäßiger Bedarfsverlauf zwischen Perioden und Standorten erforderlich ist, kann bei globaler Beschaffung ein gleichmäßiger Bedarfsverlauf zwischen Perioden ggf. als ausreichend betrachtet werden, da kein Ausgleich zwischen verschiedenen Lieferantenstandorten wie bei der lokalen Beschaffung erforderlich ist (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 38). Bedarfsschwankungen zwischen den betrachteten Perioden und den Perioden davor und danach bleiben unberücksichtigt, da lediglich der Bedarf bezüglich der Optionen der Aufträge der betrachteten Perioden einbezogen wird.

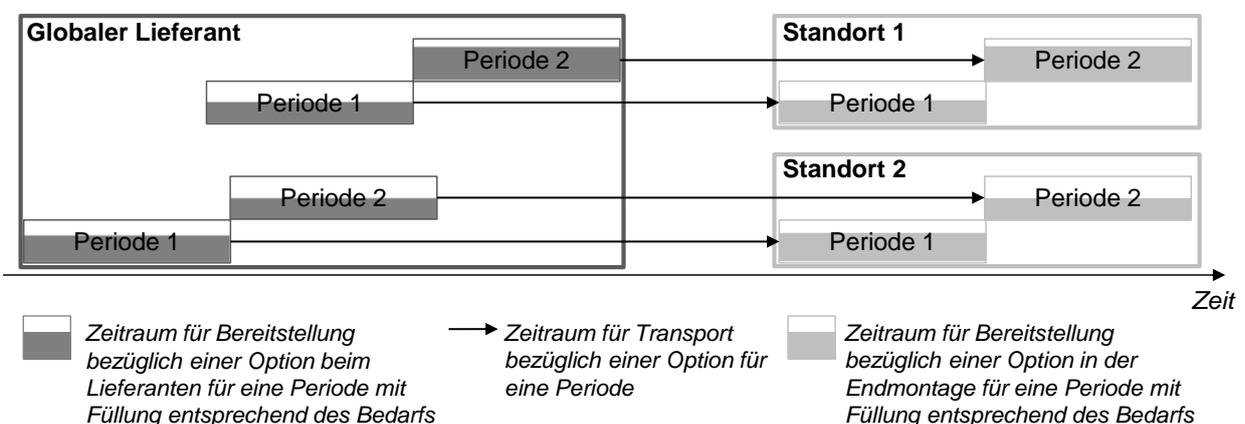


Abbildung 4.9: Belieferung von Standorten durch einen globalen Lieferanten

Durch das Level-Scheduling wird ein gleichmäßiger Bedarfsverlauf anstelle eines Abgleichs mit einem zur Verfügung stehenden Kapazitätsangebot angestrebt und somit auf eine detailliertere Betrachtung verzichtet. Zur Antizipation des Level-Scheduling wird eine obere Flexibilitätsgrenze bezogen auf den gleichmäßigen Bedarf zwischen Perioden und Standorten und nicht bezüglich des Kapazitätsangebots betrachtet. Je nach Stärke der Anforderung kann die obere Flexibilitätsgrenze durch einen Faktor β bezogen auf den gleichmäßigen Bedarf skaliert ($\beta \geq 1$) werden (vgl. Boysen, Fliedner & Scholl 2007b, S. 783). Da Unsicherheit der Auftragskonfigurationen besteht, erfolgt die Abbildung von Flexibilitätsgrenzen sowie eine differenzierte Betrachtung der Abweichungen vom gleichmäßigen Bedarf durch szenarioabhängige Level-Scheduling-Kosten im Sinne eines Kompensationsmodells. Dies wird durch stückweise lineare Flexibilitätskostenfunktionen ermöglicht, sodass die Ergebnisrobustheit betrachtet wird.

Im Gegensatz zu den Arbeitslastabweichungskosten werden für die Level-Scheduling-Kosten aufgrund des Verzichts auf eine detaillierte Betrachtung des Kapazitätsangebots keine Wandlungskosten berücksichtigt. Somit wird davon ausgegangen, dass zulässige Lösungen möglich sind, indem auch das Überschreiten von Flexibilitätsgrenzen ohne Wandlungsmaßnahmen durch Flexibilitätskosten kompensiert werden kann.

Bestehen explizite obere Flexibilitätsgrenzen des Kapazitätsangebots von Teilen (vgl. Boysen, Fliedner & Scholl 2007b, S. 768), so können diese zudem im Sinne eines Kompensationsmodells berücksichtigt werden. Da die Modellierung ähnlich zu den Level-Scheduling-Kosten erfolgen kann und durch Level-Scheduling bereits eine gleichmäßige Verteilung betrachtet wird, wird nicht weiter darauf eingegangen. Jedoch können obere Flexibilitätsgrenzen des Kapazitätsangebots für Produktmodelle und sichere Optionen aufgrund entsprechend sicherer Teile durch Nebenbedingungen abgebildet werden, sodass diese im Rahmen der Nebenbedingungen (siehe Formel 4-45 und Formel 4-46 unten) betrachtet werden. (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 60, S. 65 f.)

Ein gleichmäßiger Bedarfsverlauf kann durch das optionsorientierte Level-Scheduling nicht nur für Optionen, sondern ebenso für Produktmodelle angestrebt werden, da Teile durch Optionen und Produktmodelle bedingt werden. Die Produktmodelle werden einzeln betrachtet, wobei zudem auch einzeln entschieden werden kann, ob ein gleichmäßiger Verlauf über Standorte, Perioden oder beides erwünscht ist. Hinsichtlich der Optionen kann weiter unterschieden werden, ob diese einzeln als Optionen oder ob alle Optionen einer Optionsgruppe aggregiert betrachtet und gleichmäßig verteilt werden

sollen. Für additive Optionsgruppen ($\Phi_g = 1$) ist lediglich eine gemeinsame Betrachtung der Optionen je Gruppe sinnvoll. Für individuelle Optionsgruppen ($\Phi_g = 0$) können Optionen einzeln oder in der Gruppe betrachtet werden, wobei Letzteres sinnvoll ist, wenn für die Optionen dieselben Implikationen hinsichtlich des Aufwands bestehen. Bspw. kann eine einzelne Betrachtung bei unterschiedlichen Lieferanten je Option einer Gruppe erfolgen und eine Betrachtung in der Gruppe, wenn alle Teile bezüglich der Optionen der Gruppe durch denselben Lieferanten geliefert werden und in dessen Produktion denselben Aufwand erzeugen. Sollen Optionen einer individuellen Optionsgruppe einzeln gleichmäßig verteilt werden, so kann im Speziellen entschieden werden, für welche Optionen dies der Fall sein soll ($LS_{o_g} = 1$) und für welche nicht ($LS_{o_g} = 0$). Somit setzen sich die Level-Scheduling-Kosten nach Formel 4-35 aus Kosten aufgrund eines nicht gleichmäßigen Bedarfsverlaufs von Produktmodellen (M), Optionen (O) und Optionsgruppen (G) zwischen Standorten (L) und Perioden (T) zusammen. Die einzelnen Kostenberechnungen für die sechs Fälle ergeben sich durch Formel A-1, Formel A-2, Formel A-3, Formel A-4, Formel A-5 und Formel A-6.

$$K^{LS}(x) = K_M^{LS,L}(x) + K_M^{LS,T}(x) + K_O^{LS,L}(x) + K_O^{LS,T}(x) + K_G^{LS,L}(x) + K_G^{LS,T}(x) \quad \text{Formel 4-35}$$

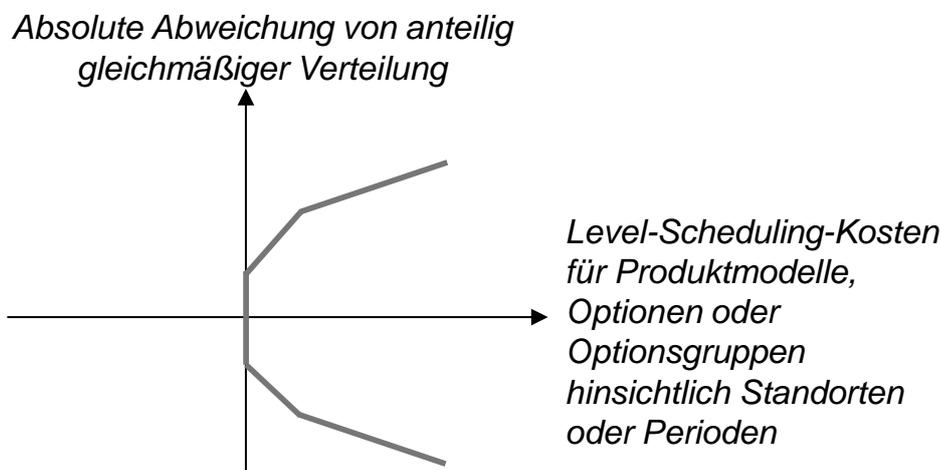


Abbildung 4.10: Level-Scheduling-Kostenfunktion für Produktmodelle, Optionen oder Optionsgruppen hinsichtlich Standorten oder Perioden (vgl. A_Strunz 2017, S. 87)

Die Kostenberechnungen berücksichtigen, wie in Abbildung 4.10 beispielhaft dargestellt, stückweise lineare Kostenfunktionen zur Bewertung der Abweichungen von Produktmodellen, Optionen und Optionsgruppen von einem entsprechenden gleichmäßigen Bedarfsverlauf bzw. einer entsprechend gleichmäßigen Verteilung $\Delta_{(m|o_g|g)/(t)(s)}^{LS,(L|T)}(x)$ je Standort und ggf. je Periode sowie im Fall von Optionen, die im Gegensatz zu Produktmodellen unsicher sein können, auch je Szenario. Diese Abweichungen können durch

entsprechende Parameter der stückweise linearen Kostenfunktionen nach Formel A-7 unterschiedlich bepreist werden. Die entsprechenden Kostensätze können zwischen Standorten und zwischen Perioden aufgrund sich ändernder Anforderungen verschieden sein. Außerdem können sowohl positive als auch negative Abweichungen je Standort und ggf. Periode bewertet werden. Stärkere Abweichungen können in beiden Richtungen mit höheren Kostensätzen versehen werden als geringere.

Die Berechnungen der Abweichungen $\Delta_{(m|o_g|g)l(t)(s)}^{LS,(L|T)}(\mathbf{x})$ nach den beschriebenen sechs Fällen erfolgen nach Formel A-8, Formel A-9, Formel A-10, Formel A-11, Formel A-12 und Formel A-13. Diese berücksichtigen eine gleichmäßige Verteilung entsprechend der Slots, die zur Produktion der Produktmodelle und Optionen unter Beachtung von Produktionsrestriktionen der Linien der Standorte (siehe Formel 4-39 und Formel 4-40 unten) zur Verfügung stehen, sodass die Verteilung anteilig gleichmäßig erfolgt. Hierbei wird bei Optionsgruppen davon ausgegangen, dass für alle Optionen einer Optionsgruppe dieselben Produktionsrestriktionen gelten. Erfolgt eine Verteilung zwischen Standorten (Formel A-8, Formel A-10, Formel A-12), so entspricht eine anteilig gleichmäßige Verteilung dem Verhältnis der an einem Standort in allen Perioden verfügbaren Slots zu den an allen Standorten in allen Perioden verfügbaren Slots. Erfolgt eine Verteilung zwischen Perioden (Formel A-9, Formel A-11, Formel A-13), so entspricht eine anteilig gleichmäßige Verteilung je Standort dem Verhältnis der in einer Periode an dem Standort verfügbaren Slots zu den in allen Perioden an dem Standort verfügbaren Slots. Hinsichtlich der entsprechenden, nicht ganzzahligen Quotienten ist zu beachten, dass aufgrund der Ganzzahligkeit der Produktmodelle und der Wahrscheinlichkeiten der Optionen ($p_{o_g|s}$) im Szenarienmodell ggf. geringe Abweichungen nicht vermieden werden können. Zur vereinfachten Berücksichtigung dieser Problematik, können positive und negative Abweichungen von bis zu eins im Betrag durch den dritten Abschnitt der Kostenfunktion nach Formel A-7 mit $\delta_{2(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} = -1$ und $\delta_{3(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} = 1 - \varepsilon$ mit einem Kostensatz von null abgebildet werden (A_Schweizer 2017, S. 50; A_Strunz 2017, S. 86). Aufgrund der Definitionsweise der stückweise linearen Funktion verhindert die kleine positive rationale Zahl ε , dass Abweichungen von genau eins mit Kosten von null berücksichtigt werden. Im Erwartungswertmodell werden dagegen Optionen mit ihren nicht-ganzzahligen Wahrscheinlichkeiten $p_{o_g|s}$ berücksichtigt, sodass nicht nur die Quotienten zur Berechnung der anteiligen Verhältnisse, sondern auch die Erwartungswerte der nachgefragten Optionen nicht ganzzahlig sind. Für den Fall, dass lediglich positive

Abweichungen ab einer gewissen relativen Flexibilitätsgrenze bepreist werden sollen, so kann dies über den Faktor $\beta > 1$ gegenüber dem gleichmäßigen Bedarf geregelt werden, wobei standardmäßig $\beta = 1$ gilt (vgl. Boysen, Friedner & Scholl 2007b, S. 783).

Individuelle und additive Optionsgruppen unterscheiden sich bei der anteilig gleichmäßigen Verteilung ihrer aggregierten Optionen nach Formel A-12 und Formel A-13 in der Hinsicht, dass bei individuellen Optionsgruppen jede Option mit der Anzahl $\sigma_{o_g} = 1$ und bei additiven Optionsgruppen jede Option mit der entsprechenden Anzahl σ_{o_g} der gewählten Option o_g berücksichtigt wird. Wird die Option „keine“ ($o_g = 0$) gewählt, so wird diese hinsichtlich der Anzahl sowohl bei individuellen als auch bei additiven Optionsgruppen nicht betrachtet.

4.2.5 Nebenbedingungen

Im Folgenden werden die Nebenbedingungen des Optimierungsmodells aufgeführt. Zunächst werden die binären Entscheidungsvariablen des Zuordnungsproblems nach Formel 4-36 definiert.

$$x_{ilt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall l \in L, \forall t \in T \quad \text{Formel 4-36}$$

Formel 4-37 stellt sicher, dass jeder Auftrag genau einem Standort und einer Periode zugeordnet wird.

$$\sum_{l \in L} \sum_{t \in T} x_{ilt} = 1 \quad \forall i \in I \quad \text{Formel 4-37}$$

Durch Formel 4-38 wird berücksichtigt, dass jedem Standort in jeder Periode maximal so viele Aufträge zugeordnet werden dürfen, wie Slots auf den Linien zur Verfügung stehen. Hierzu muss gelten, dass insgesamt nicht mehr Aufträge eingeplant werden sollen als Slots an den betrachteten Standorten in den betrachteten Perioden geplant sind. Es können somit aber auch weniger Aufträge zur Einplanung betrachtet werden.

$$\sum_{i \in I} x_{ilt} \leq \sum_{u \in \{U | l_u = l\}} C_{ut}^{\text{Slot}} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad \text{Formel 4-38}$$

Produktionsrestriktionen hinsichtlich Produktmodellen und sicheren Optionen werden durch Formel 4-39 und Formel 4-40 berücksichtigt, sodass ein Auftrag mit einem Produktmodell bzw. einer sicheren Option keinem Standort zugeordnet wird, an dem dieses bzw. diese auf keiner der Linien des Standorts montiert werden kann.

$$x_{ilt} = 0 \quad \forall m \in M, \forall i \in \{I \mid m_i = m\}, \forall l \in \{L \mid \forall u \in U_m : l \neq l_u\}, \forall t \in T \quad \text{Formel 4-39}$$

$$\begin{aligned} x_{ilt} = 0 \quad \forall g \in \{1, \dots, G \mid Z_g = 0\}, \forall o_g \in \{1, \dots, O_g\}, \\ \forall i \in \{I \mid \forall s \in S : p_{o_g, is} = 1\}, \forall l \in \{L \mid \forall u \in U_{o_g} : l \neq l_u\}, \forall t \in T \end{aligned} \quad \text{Formel 4-40}$$

Durch Formel 4-41 und Formel 4-42 wird erreicht, dass an einem Standort in einer Periode nur maximal so viele Aufträge eines bestimmten Produktmodells bzw. mit einer bestimmten sicheren Option zugeordnet werden dürfen, wie Slots auf den Linien des Standorts zur Verfügung stehen, auf denen entsprechend der Produktionsrestriktionen dieses Produktmodell bzw. diese Option montiert werden kann.

$$\sum_{i \in \{I \mid m = m\}} x_{ilt} \leq \sum_{u \in \{U \mid l_u = l \wedge u \in U_m\}} C_{ut}^{\text{Slot}} \quad \forall m \in M, \forall l \in L, \forall t \in T \quad \text{Formel 4-41}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in \{I \mid \forall s \in S : p_{o_g, is} = 1\}} x_{ilt} \leq \sum_{u \in \{U \mid l_u = l \wedge u \in U_{o_g}\}} C_{ut}^{\text{Slot}} \\ \forall g \in \{1, \dots, G \mid Z_g = 0\}, \forall o_g \in \{1, \dots, O_g\}, \forall l \in L, \forall t \in T \end{aligned} \quad \text{Formel 4-42}$$

Im Rahmen der Absatzplanung kann festgelegt werden, welche Standorte welche Kundenmärkte beliefern dürfen, sodass Aufträge aus Märkten, die durch einen Standort nicht beliefert werden dürfen, auch nicht dem Standort zugeordnet werden (Formel 4-43). Wird für einzelne Aufträge eine Menge an möglichen Standorten definiert, die nicht alle Standorte umfasst, so wird die Zuordnung zu einem der anderen Standorte ausgeschlossen (Formel 4-44).

$$x_{ilt} = 0 \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall l \in \{L \mid \bar{l}_k \notin \bar{L}_l\}, \forall t \in T \quad \text{Formel 4-43}$$

$$x_{ilt} = 0 \quad \forall i \in I, \forall l \in \{L \mid l \notin L\}, \forall t \in T \quad \text{Formel 4-44}$$

Die Einhaltung strikter oberer Flexibilitätsgrenzen hinsichtlich der Belieferung von Teilen kann sichergestellt werden, indem entsprechende Optionen bei der Auftragseinplanung als sicher gelten. Für Produktmodelle und sichere Optionen können somit Sequenzierungsregeln zur Antizipation des Car-Sequencing als arbeitslastorientiertem Ansatz hinsichtlich der Produktion der Lieferanten nach Formel 4-45 und Formel 4-46 in Form von Nebenbedingungen verwendet werden. Durch den Faktor α können die betrachteten Sequenzierungsregeln skaliert werden, wodurch Flexibilität für die Reihenfolgeplanung und für Planabweichungen bzw. Störungen vorbehalten werden kann (vgl. Boysen, Fliedner & Scholl 2007b, S. 782 f.).

$$\begin{aligned} \sum_{i \in \{I \mid m = m\}} x_{ilt} \leq \alpha \times \frac{H_{mt}}{N_{mt}} \times \sum_{u \in \{U \mid l_u = l\}} C_{ut}^{\text{Slot}} \\ \forall m \in \{M \mid H_{mt} / N_{mt} < 1\}, \forall l \in L, \forall t \in T \end{aligned} \quad \text{Formel 4-45}$$

$$\sum_{i \in \{j | \forall s \in S: \rho_{ogis} = 1\}} x_{ilt} \leq \alpha \times \frac{H_{oglt}}{N_{oglt}} \times \sum_{u \in \{U | l_u = l\}} C_{ut}^{Slot}$$

Formel 4-46

$$\forall g \in \{1, \dots, G | Z_g = 0\}, \forall o_g \in \{1, \dots, O_g | H_{oglt} / N_{oglt} < 1\}, \forall l \in L, \forall t \in T$$

Aus Sicht der Auftragseinplanung kann das Car-Sequencing somit auch als materialbedarfsorientierter Ansatz und zwar mit höherem Detaillierungsgrad als das optionsorientierte Level-Scheduling eingesetzt werden. Dies ist für Lieferanten sinnvoll, die ausschließlich für das betrachtete Produktionsnetzwerk produzieren und dazu für alle Aufträge Teile liefern, was insbesondere für unternehmensinterne Zulieferstandorte der Fall ist. Sind Sequenzierungsregeln für verschiedene durch ein Produktmodell oder eine sichere Option bedingte Teile zu beachten, so reicht es dabei aus, die restriktivste Regel für das Produktmodell bzw. die Option zu berücksichtigen (vgl. A_Schweizer 2017, S. 52; vgl. A_Strunz 2017, S. 79). Aufgrund der im Rahmen der Beschreibung der Level-Scheduling-Kosten geschilderten Problematik wird von der Berücksichtigung der Bereitstellung je Periode bei den Lieferanten abgesehen und daher eine Einhaltung der Sequenzierungsregeln der Lieferanten an den Endmontagestandorten modelliert (A_Schweizer 2017, S. 52; A_Strunz 2017, S. 79 f.). Hierzu sind Sequenzierungsregeln der Lieferanten für die einzelnen Endmontagestandorte und Perioden unter Berücksichtigung der Produktionsrestriktionen der Endmontagestandorte festzulegen (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 41 f., S. 60 ff.; vgl. A_Molzahn 2017, S. 42).

4.3 Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen

Durch den Eingang von Kundenaufträgen nach der mittelfristigen Auftragseinplanung und deren Zuordnung zu Planaufträgen wird die Unsicherheit über die Kunden von Planaufträgen und ihre gewünschten Auftragskonfigurationen aufgelöst. Für jeden einzelnen eingehenden Kundenauftrag ist dazu ein Planauftrag in einem beliebigen Abschnitt des Auftragsbestands (siehe Abbildung 4.1) der bereits eingeplanten Planaufträge auszuwählen, sodass der Kundenauftrag dem Planauftrag zugeordnet werden kann. Durch die Zuordnung kann jedem Kundenauftrag unmittelbar eine Auftragskonfiguration und ein Liefertermin zugesichert werden (vgl. Meyr 2004, S. 357 ff.).

Da Planaufträge je Produktmodell und Markt generiert werden (siehe Kapitel 4.1.2), stehen für die Zuordnung eines Kundenauftrags ausschließlich diejenigen Planaufträge desselben Produktmodells und desselben Marktes zur Verfügung, die noch nicht zugeordnet wurden und somit noch keine Kundenaufträge sind (Buergin et al. 2017, S. 504). Durch die kundenunabhängige Generierung der Planaufträge besteht somit Flexibilität

hinsichtlich der Planaufträge konkreten Kunden bzw. Kundenaufträgen zugeordnet zu werden. Je höher die Anzahl möglicher Varianten, desto unwahrscheinlicher ist es jedoch, dass die Konfiguration eines Kundenauftrags der Konfiguration eines Planauftrags entspricht. Um eine Kundenauftragszuordnung zu ermöglichen, auch wenn die Konfigurationen eines Planauftrags nicht der gewünschten Kundenauftragskonfiguration entspricht, ist es zur Erfüllung des Kundenwunsches erforderlich, eine Rekonfiguration von Planaufträgen im Rahmen der Rekonfigurationsflexibilität einzuräumen (Brabazon & MacCarthy 2004, S. 155 ff.). Eine solche Rekonfigurationsflexibilität kann entweder durch eine Änderung von Optionen eines Planauftrags, durch einen Tausch von Optionen zwischen Planaufträgen oder durch einen Umbau von Optionen nach erfolgter Endmontage im Rahmen der Distribution realisiert werden (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 92 ff.; vgl. Buergin et al. 2017, S. 503 f.; vgl. Brabazon & MacCarthy 2004, S. 157). Der Fixierungszeitpunkt je Option hinsichtlich ihrer Änderung entspricht dem Zeitpunkt der Just-in-Time-Spezifikation für Kundenaufträge und richtet sich somit nach dem Bestellzeitpunkt der entsprechenden Teile bei den Lieferanten, der in Abbildung 4.1 dargestellt ist (vgl. Buergin et al. 2017, S. 503; vgl. Buergin et al. 2018, S. 65 ff.). Der Fixierungszeitpunkt für den Tausch einer Option zwischen Planaufträgen ist, wie ebenfalls in Abbildung 4.1 veranschaulicht, erreicht, wenn die Sequenz bezüglich der Option entweder für die Lieferanten oder die Kommissionierung direkt am Endmontagestandort festgelegt werden muss und liegt somit nicht vor dem Fixierungszeitpunkt für die Änderung der Option (vgl. Buergin et al. 2017, S. 503). Ein Umbau nach erfolgter Endmontage kann hinsichtlich ausgewählter Optionen nach dem Fixierungszeitpunkt für den Tausch erfolgen (A_Hammerschmidt 2017, S. 94).

Neben einer Rekonfiguration von Planaufträgen durch das produzierende Unternehmen kann die Rekonfigurationsflexibilität der Kunden in Anspruch genommen werden. So können den Kunden vor allem dann von deren Wunschkonfigurationen abweichende Konfigurationen angeboten werden, wenn ansonsten ein verspäteter Liefertermin hingenommen werden müsste (A_Hammerschmidt 2017, S. 92 f.; vgl. Meyr 2004, S. 352; vgl. Wagenitz 2007, S. 121). Da Planaufträge ggf. je Periode generiert und eingeplant werden und mit den Wunschlieferterminen, Wunschstandorten und Abstandsanforderungen der Kundenaufträge erst im Rahmen der Kundenauftragszuordnung abgestimmt werden können, sind dabei Lieferterminabweichungen (vgl. Buergin et al. 2017, S. 504; vgl. Brabazon & MacCarthy 2004, S. 158 f.), Standortabweichungen und Abstände zwischen den Auslieferungen mehrerer Aufträge zu berücksichtigen.

Hinsichtlich der Rekonfigurationsflexibilität ist zu beachten, dass sowohl diejenigen Konfigurationen baubar sein müssen, die sich durch Änderungen und Tausche ergeben und somit in der Endmontage produziert werden sollen, als auch diejenigen, die sich durch Umbauten von Optionen nach der Endmontage ergeben und somit ausgeliefert werden sollen (A_Hammerschmidt 2017, S. 102). Um vor allem Baubarkeitsregeln nicht in Form von Nebenbedingungen in einem Optimierungsmodell zur Kundenauftragszuordnung abzubilden und somit bei einer hohen Anzahl an Regeln die Komplexität des Optimierungsmodells zu reduzieren, wird im Folgenden ein zweistufiges Vorgehen vorgestellt, das ein Optimierungsmodell in der ersten Stufe und unter anderem Baubarkeitsregeln in der zweiten Stufe betrachtet (vgl. A_Kramer 2016, S. 42, S. 58). Das Verfahren wurde vom Verfasser dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit den studentischen Arbeiten von Fischer (A_Fischer 2015, S. 68 ff.), Kramer (A_Kramer 2016, S. 42 ff.), Hammerschmidt (A_Hammerschmidt 2017, S. 92 ff.) und Hao (A_Hao 2017, S. 35 ff., S. 93 ff.) entwickelt. Dieses wird zunächst erläutert und dann ausführlich vorgestellt.

In der ersten Stufe, der Planauftragsauswahl, wird zunächst für einen baubaren Kundenauftrag durch ein Optimierungsmodell ein optimaler Planauftrag zur Zuordnung ausgewählt. Daraufhin werden in der zweiten Stufe, der Planauftragsrekonfiguration, ggf. Tausche mit anderen Planaufträgen durchgeführt und es wird überprüft, ob die Baubarkeit der betroffenen Konfigurationen sichergestellt ist und detaillierte Beschaffungs- und Produktionsrestriktionen erfüllt werden. Ergibt die Planauftragsrekonfiguration, dass dies nicht der Fall ist, so kann die Planauftragsauswahl unter Sperrung des zuvor ausgewählten Planauftrags oder unter Verbot von Optionstauschen erneut ausgeführt werden. (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 104 ff., S. 131; vgl. A_Kramer 2016, S. 42)

Wurden nach erfolgter Planauftragsauswahl und -rekonfiguration eine Auftragskonfiguration und ein Liefertermin durch einen Kunden bestätigt, so können Optionen auf Kundenwunsch nachträglich aufgrund der deterministischen Betrachtung der Aufträge im Auftragsbestand lediglich unter Berücksichtigung der Fixierungszeitpunkte durch Änderung, Tausch und Umbau angepasst werden. Ist eine Rekonfiguration entsprechend der Fixierungszeitpunkte nicht möglich, so kann ein alternativer Planauftrag ausgewählt und der zuvor zugeordnete wieder frei gegeben werden, was jedoch zu einem geänderten Liefertermin führen kann.

Das Vorgehen zur Kundenauftragszuordnung berücksichtigt, ebenso wie das Modell zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk, die Planungsaufgaben der horizonta-

len Planungsebenen Beschaffung, Produktion, Distribution und Absatz. Dies ist in Abbildung 4.11 im Überblick hinsichtlich der Zielfunktionsterme und Nebenbedingungen der Planauftragsauswahl sowie der Planauftragsrekonfiguration dargestellt und wird im Folgenden erläutert.

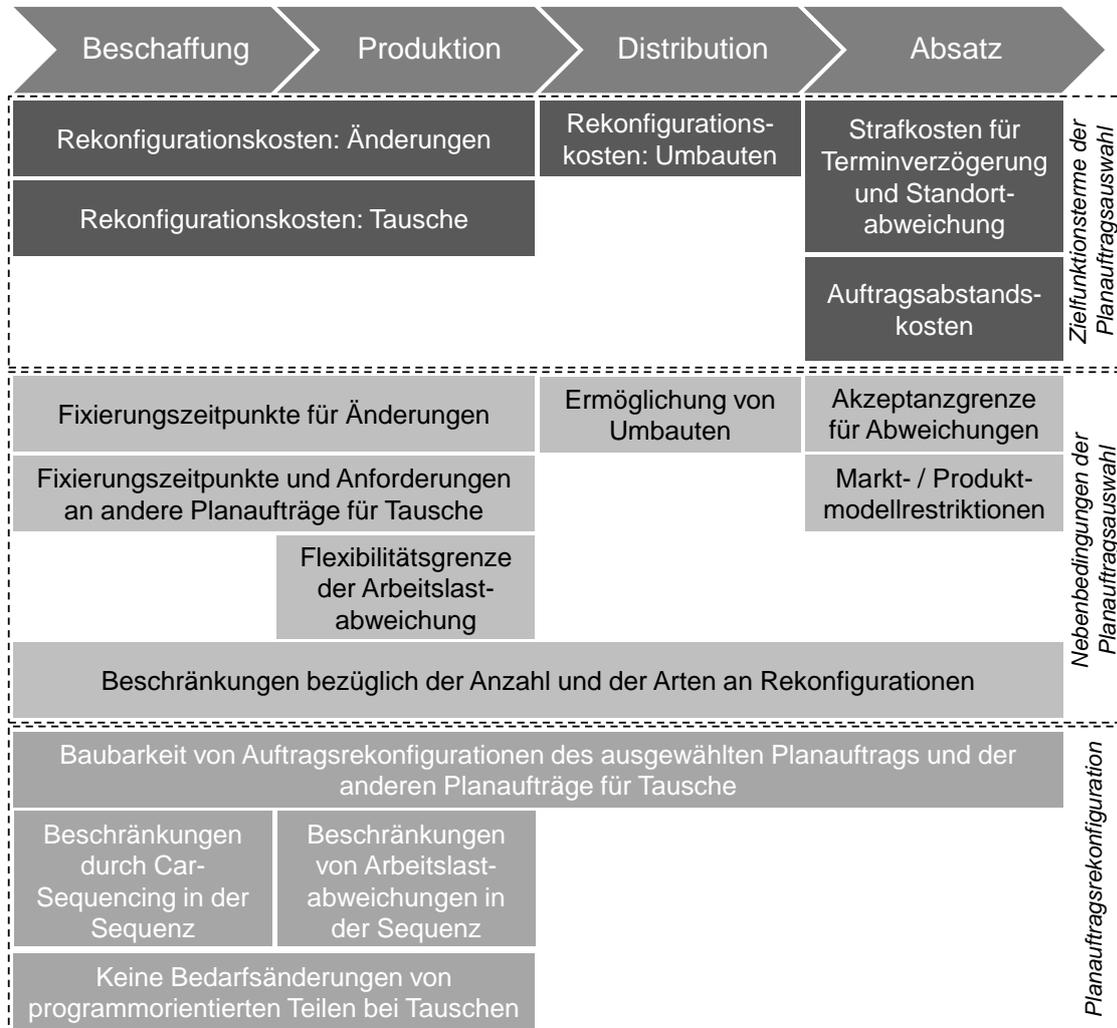


Abbildung 4.11: Bezug der Kundenauftragszuordnung zu den horizontalen Planungsebenen der Supply Chain eines Unternehmens

4.3.1 Planauftragsauswahl

Bei der Planauftragsauswahl zur Kundenauftragszuordnung handelt es sich ebenso wie bei der Auftragseinplanung um ein Zuordnungsproblem, das somit als ganzzahliges bzw. binäres Optimierungsmodell formuliert werden kann (vgl. Neumann & Morlock 2002, S. 381 ff.; vgl. Nickel, Stein & Waldmann 2014, S. 173). Durch das Modell wird jeweils für einen einzelnen Kundenauftrag direkt nach dessen Eingang ein potentieller Planauftrag zur Zuordnung identifiziert. Somit wird im Rahmen der Planauftragsaus-

wahl für einen konfigurierten Kundenauftrag $j \in J$ durch die binären Entscheidungsvariablen y_i (Formel 4-48) des Vektors y genau ein Planauftrag i aus dem gesamten Auftragsbestand I (Formel 4-49) ausgewählt (Büergin et al. 2017, S. 504). Es stehen dabei ausschließlich Aufträge zur Verfügung, die noch keinem Kunden zugeordnet wurden (Formel 4-50). Ein jeder Planauftrag i ist einem Abschnitt a_{il} an einem Standort l zugehörig und steht lediglich für Kundenaufträge desselben Produktmodells m (Formel 4-51) und desselben Marktes \bar{l} (Formel 4-52) zur Verfügung (Büergin et al. 2017, S. 504). Zur Planauftragsauswahl können die Ziele zur optimalen Auswahl ebenso wie für das Modell zur Auftragseinplanung in Form einer monetarisierten Zielfunktion dargestellt werden. Diese besteht aus den Terminverzögerungskosten $K_i^{Strafe,T}$, den Standortabweichungskosten $K_i^{Strafe,L}$, den Auftragsabstandskosten $K_i^{Abstand}$ und den Rekonfigurationskosten $K_i^{Rekonfiguration}$ und ist zu minimieren (Formel 4-47).

$$\min g(y) = \sum_{i \in I} ((K_i^{Strafe,T} + K_i^{Strafe,L} + K_i^{Abstand} + K_i^{Rekonfiguration}) \times y_i) \quad \text{Formel 4-47}$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad \text{Formel 4-48}$$

$$\sum_{i \in I} y_i = 1 \quad \text{Formel 4-49}$$

$$y_i = 0 \quad \forall i \in \{I \mid k_i \in K\} \quad \text{Formel 4-50}$$

$$y_i = 0 \quad \forall i \in \{I \mid m_i \neq m_j\} \quad \text{Formel 4-51}$$

$$y_i = 0 \quad \forall i \in \{I \mid \bar{l}_i \neq \bar{l}_j\} \quad \text{Formel 4-52}$$

Analog zur Auftragseinplanung sind bei der Kundenauftragszuordnung für Kundenaufträge Terminverzögerungskosten zu berücksichtigen, da diese nicht schon kundenspezifisch im Rahmen der Auftragseinplanung für die ggf. periodenweise generierten Planaufträge anfallen. Sie werden analog zu Formel 4-19 berechnet, beziehen sich jedoch auf die Abschnitte des Auftragsbestands mit jeweils unterschiedlichen Zeiträumen τ_a und sind entsprechend in Formel 4-53 dargestellt. Da Transportdauern zwischen dem Kundenmarkt und den Endmontagestandorten, an denen die Planaufträge bereits eingeplant sind, zu berücksichtigen sind, ist für den Wunschliefertermin eines Kundenauftrags zunächst der entsprechende Wunschproduktionstermin in Form von Abschnitt a_{jl} je Endmontagestandort l zu berechnen. (vgl. A_Hao 2017, S. 93 ff.)

$$K_i^{Strafe,T} = \begin{cases} 0 & , a_{il} \geq a_{jl} \\ K_{k_j}^{Strafe,T} \times (0,5 \times \tau_{a_{il}} + \sum_{a \in \{a_{il}+1, \dots, a_{jl}-1\}} \tau_a) & , a_{il} < a_{jl} \end{cases} \quad \text{Formel 4-53}$$

Bestandkosten werden im Gegensatz zur Auftragseinplanung nicht berücksichtigt, da Planaufträge nicht nur bei späterer Auslieferung, sondern auch, solange ihnen keine Kundenaufträge zugeordnet wurden, auf Lager gehalten werden. Standortabweichungskosten können ebenso wie bei der Auftragseinplanung nach Formel 4-20 ($K_i^{Strafe,L} = K_{ij}^{Strafe,L}$) einbezogen werden, jedoch sind hinsichtlich des Planauftrags die präferierten Standorte L_{k_j} des Kunden k_j des Kundenauftrags zu berücksichtigen. Distributionskosten sind bei der Planauftragsauswahl nicht zu betrachten, da diese bereits im Rahmen der Auftragseinplanung marktspezifisch einbezogen werden (siehe Kapitel 4.2) (A_Kramer 2016, S. 45).

Da lediglich Terminverzögerungskosten und keine Bestandskosten anfallen, spielen lediglich erstere für die Auftragsabstandskosten $K_i^{Abstand}$ eine Rolle. Wird ein erforderlicher zeitlicher Abstands Δ_k zwischen den bereits geplanten Auslieferungen an einen Kunden und dem für den Kunden ausgewählten Planauftrag in Abschnitt a_{ij} nicht eingehalten, fallen Auftragsabstandskosten entsprechend der Terminverzögerung hinsichtlich des Abschnitts a_{ij} und ggf. nachfolgender Abschnitte zum Kostensatz $K_{k_j}^{Strafe,T}$ an.

Rekonfigurationskosten können nach Formel 4-54 für die Änderung, den Tausch und den Umbau hinsichtlich kundenwählbaren Optionen, die sich zwischen der Konfiguration ω_i des Planauftrags i und der Konfiguration ω_j des Kundenauftrags j unterscheiden und somit Element der symmetrischen Differenzmenge $O_{\omega_i} \Delta O_{\omega_j}$ sind, anfallen. Hierzu geben die binären Entscheidungsvariablen b_{io} , q_{io} und u_{io} für einen Planauftrag i an, ob eine Option o geändert (Formel 4-55), getauscht (Formel 4-56) oder umgebaut (Formel 4-57) werden soll. Um sowohl die Kosten als auch die entsprechenden Fixierungszeitpunkte auf der Ebene der Optionen betrachten zu können, sind diese je Option entsprechend der bedingten, programmorientiert zu beschaffenden Teile zu ermitteln (vgl. A_Fischer 2015, S. 81 ff.).

$$K_i^{Rekonfiguration} = \sum_{o \in (O_{\omega_i} \Delta O_{\omega_j})} (b_{io} \times K_{io}^{Änderung} + q_{io} \times K_{io}^{Tausch} + u_{io} \times K_{io}^{Umbau}) \quad \text{Formel 4-54}$$

$$b_{io} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall o \in O \quad \text{Formel 4-55}$$

$$q_{io} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall o \in O \quad \text{Formel 4-56}$$

$$u_{io} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall o \in O \quad \text{Formel 4-57}$$

Kosten für die Änderung einer Option $K_{io}^{Änderung}$ bestehen durch die Anpassung der Bestellung hinsichtlich der Anzahl einer Option in einem Abschnitt an einem Standort im

Vergleich zur im Rahmen der Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk ermittelten und als Bestellvorschau abgegebenen bzw. auf Basis vorhergehender Kundenauftragszuordnungen aktualisierten Anzahl. Diese bestehen aufgrund von Änderungsaufwänden bei den entsprechenden Lieferanten eines Endmontagestandorts und können bis zu den entsprechenden Fixierungszeitpunkten in Anspruch genommen werden. Optionen $o \in O_i^b$ können nach Formel 4-58 für Planauftrag i in Abschnitt a_{ij} nicht mehr geändert werden.

$$b_o = 0 \quad \forall i \in I, \forall o \in O_i^b$$

Formel 4-58

Im Rahmen der Änderungskosten können materialbezogene Eingangskosten, Flexibilitätskosten für Arbeitslastabweichungen und Level-Scheduling-Kosten hinsichtlich der geänderten Optionen berücksichtigt werden. Die Einhaltung der hinsichtlich der Arbeitslastabweichungen ggf. im Rahmen der Auftragseinplanung für bestimmte Perioden bzw. Abschnitte erweiterten oberen Flexibilitätsgrenze $C_{a_{ij}}^{max}$ ist jedoch für den Abschnitt des ausgewählten Planauftrags a_{ij} mit der entsprechenden Menge an Aufträgen $I^{a_{ij}}$ sicherzustellen. Dies erfolgt durch Formel 4-59, indem die maximale Arbeitslast der zum Zeitpunkt der Kundenauftragszuordnung möglichen Szenarien $S^{a_{ij}}$ hinsichtlich der als unsicher eingeplanten Kundenaufträge und Änderungen von Optionen mit den entsprechenden Arbeitslasten w_o betrachtet werden. Bestehen mengenseitige Flexibilitätsgrenzen bei den Lieferanten, so können durch extrem hohe Kosten oder durch Nebenbedingungen analog zu Formel 4-58 mögliche Überschreitungen der Grenzen durch Änderungen von Optionen vermieden werden. Da für Produktmodelle und sichere Optionen Produktionsrestriktionen hinsichtlich der Standortzuordnung und der zur Verfügung stehenden Slots gelten können, liegen deren Fixierungszeitpunkte vor der Auftragseinplanung, sodass sie im Rahmen der Kundenauftragszuordnung nicht geändert werden können. So ist die Antizipation des Car-Sequencing (Formel 4-45, Formel 4-46) gewährleistet und muss nicht erneut überprüft werden. Aufgrund der Flexibilitätsgrenzen kann es vorkommen, dass in keinem Abschnitt eine zulässige Lösung und somit insgesamt keine zulässige Lösung für die Planauftragsauswahl gefunden wird. Solche Kundenaufträge, die somit nicht zugeordnet werden können, können bei der nächsten Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk, also im Abschnitt $a = 0$, direkt berücksichtigt werden, indem entsprechend weniger Planaufträge generiert werden (A_Kramer 2016, S. 44). Zwar sind hierzu entsprechende Terminverzögerungskosten in Kauf zu nehmen, jedoch fallen dann keine Rekonfigurationskosten an.

$$\left(\sum_{\forall i' \in I^{alt}} \max_{s \in S^{alt}} \{w_{\omega_{i's}}\} \right) + \left(\sum_{\forall o \in (O_{alt} \setminus O_{alt})} b_{io} \times w_o \right) - \left(\sum_{\forall o \in (O_{alt} \setminus O_{alt})} b_{io} \times w_o \right) \leq C_{a_i}^{max} \quad \forall i \in I \quad \text{Formel 4-59}$$

Die Kosten für den Tausch einer Option K_{io}^{Tausch} sind in der Regel niedriger als die Kosten für eine Änderung, da diese im Gegensatz zu letzteren zu keiner Änderung der Anzahl von Optionen und zu keinen Bestelländerungen hinsichtlich der Anzahl programmorientierter Teile bei den Lieferanten führen. Tauschkosten von null sind jedoch zur Optimierung nicht geeignet, da dann häufiger als nötig getauscht werden würde, was vermehrt zu nicht erfolgreichen Baubarkeitsprüfungen während der Planauftragsrekonfiguration führen kann (A_Hammerschmidt 2017, S. 131). Ein Tausch von Optionen kann nach Formel 4-60 für Optionen $o \in O_i^g$, deren Fixierungszeitpunkte für Planauftrag i erreicht ist, und für Optionen $o \in O_i^+$, die der Konfiguration ω_i des Planauftrags i fehlen und im selben Abschnitt am selben Standort in der Konfiguration keines anderen Planauftrags desselben Marktes und desselben Produktmodells vorkommen und somit nicht abgegeben werden können, nicht erfolgen. Gleiches gilt für Optionen $o \in O_i^-$, die die Konfiguration ω_i des Planauftrags i zu viel hat und im selben Abschnitt am selben Standort in der Konfiguration jedes anderen Planauftrags vorkommen und somit nicht aufgenommen werden können.

$$q_{io} = 0 \quad \forall i \in I, \forall o \in O_i^g \cup O_i^+ \cup O_i^- \quad \text{Formel 4-60}$$

Im Gegensatz zur Änderung und zum Tausch erfordert der Umbau zusätzlichen Aufwand für den Aus- und Einbau von Teilen im Rahmen der Distribution nach der Endmontage und für die Lagerhaltung der einzubauenden und ggf. auszubauenden Teile. Die Kosten für den Umbau K_{io}^{Umbau} sind somit tendenziell höher als die Änderungskosten, bieten jedoch vergleichsweise kurzfristige und zusätzliche Rekonfigurationsflexibilität. Für festzulegende Optionen $o \in O_i^u$ wird nach Formel 4-61 ein Umbau hinsichtlich Planauftrag i nicht ermöglicht.

$$u_{io} = 0 \quad \forall i \in I, \forall o \in O_i^u \quad \text{Formel 4-61}$$

Abweichungen der Planauftragskonfiguration von der gewünschten Kundenauftragskonfiguration im Rahmen der Rekonfigurationsflexibilität der Kunden werden nach Formel 4-63 je abweichende Option o durch die binäre Entscheidungsvariable v_{io} für einen Planauftrag i angegeben. Da dem Kunden ausschließlich eine abweichende Konfiguration angeboten werden sollte, die er voraussichtlich akzeptieren wird und die so-

mit nicht zu stark von der gewünschten abweicht, ist hierfür eine Abbildung als Nebenbedingung anstelle eines Zielfunktionsterms sinnvoll (vgl. Wagenitz 2007, S. 121). Hierzu kann nach Formel 4-62 je Option ein Akzeptanzwert $v_o^{Akzeptanz}$ im Intervall $[0,1]$ berücksichtigt und die Summe der Akzeptanzwerte der abweichenden Optionen im Sinne der Rekonfigurationsflexibilität der Kunden auf eins begrenzt werden (A_Hammerschmidt 2017, S. 97; vgl. Wagenitz 2007, S. 121).

$$\sum_{o \in (O_{i1} \Delta O_{ij})} (v_{io} \times v_o^{Akzeptanz}) \leq 1 \quad \forall i \in I \quad \text{Formel 4-62}$$

$$v_{io} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall o \in O \quad \text{Formel 4-63}$$

Genau diejenigen Optionen, die sich zwischen der Konfiguration des Kundenauftrags und der des ausgewählten Planauftrags unterscheiden, weichen ab oder sind zu ändern, zu tauschen oder umzubauen. Entsprechend muss Formel 4-64 hinsichtlich der Anzahl an Rekonfigurationen gelten. Da je Option lediglich eine Art der Rekonfiguration in Anspruch genommen werden kann, muss ebenso Formel 4-65 erfüllt sein. Für zwei Muss-Optionen O_g^{muss} einer Muss-Optionsgruppe $g \in G^{muss}$ gilt zudem, dass diese auf die gleiche Art rekonfiguriert werden müssen, sodass diese entweder geändert werden, getauscht werden, umgebaut werden oder abweichen (Formel 4-66, Formel 4-67, Formel 4-68, Formel 4-69) (A_Hammerschmidt 2017, S. 98 f.). Ansonsten wäre die Baubarkeitsanforderung, dass innerhalb einer Muss-Optionsgruppe genau eine Muss-Option gewählt werden muss, für die betroffenen Auftragskonfigurationen nicht gewährleistet. Eine Sicherstellung der Baubarkeit der rekonfigurierten Aufträge anhand sämtlicher Baubarkeitsregeln erfolgt jedoch im Rahmen der Planauftragsrekonfiguration.

$$\sum_{o \in (O_{i1} \Delta O_{ij})} (b_{io} + q_{io} + u_{io} + v_{io}) = y_i \times |(O_{i1} \Delta O_{ij})| \quad \forall i \in I \quad \text{Formel 4-64}$$

$$b_{io} + q_{io} + u_{io} + v_{io} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall o \in (O_{i1} \Delta O_{ij}) \quad \text{Formel 4-65}$$

$$b_{o_1} = b_{o_2} \quad \forall i \in I, \forall g \in G^{muss}, \forall o_1, o_2 \in (O_{i1} \Delta O_{ij}) \cap O_g^{muss}, o_1 \neq o_2 \quad \text{Formel 4-66}$$

$$q_{o_1} = q_{o_2} \quad \forall i \in I, \forall g \in G^{muss}, \forall o_1, o_2 \in (O_{i1} \Delta O_{ij}) \cap O_g^{muss}, o_1 \neq o_2 \quad \text{Formel 4-67}$$

$$u_{o_1} = u_{o_2} \quad \forall i \in I, \forall g \in G^{muss}, \forall o_1, o_2 \in (O_{i1} \Delta O_{ij}) \cap O_g^{muss}, o_1 \neq o_2 \quad \text{Formel 4-68}$$

$$v_{o_1} = v_{o_2} \quad \forall i \in I, \forall g \in G^{muss}, \forall o_1, o_2 \in (O_{i1} \Delta O_{ij}) \cap O_g^{muss}, o_1 \neq o_2 \quad \text{Formel 4-69}$$

Indem bei der Planauftragsauswahl die Rekonfigurationsflexibilität durch die Minimierung der Rekonfigurationskosten als Kostenterm der Zielfunktion in möglichst geringem Umfang ausgenutzt wird, wird Planungsrobustheit angestrebt. Durch die Rekonfigurationsflexibilität besteht somit eine Flexibilität bei der Kundenauftragszuordnung, durch

die das Planungssystem für Planaufträge mit deren Generierung und deterministischen Betrachtung bei der Einplanung ins Produktionsnetzwerk möglichst robust gegenüber der Unsicherheit der Kunden und deren Auftragskonfigurationen ist. Grenzen bzw. Anforderungen der Rekonfigurationsflexibilität werden durch Nebenbedingungen bei der Planauftragsauswahl sowie im Rahmen der im Folgenden dargestellten Planauftragsrekonfiguration berücksichtigt.

4.3.2 Planauftragsrekonfiguration

Im Rahmen der Planauftragsrekonfiguration werden für den im Rahmen der Planauftragsauswahl ausgewählten Planauftrag i^* die rekonfigurierten Konfigurationen nach Abbildung 4.12 entsprechend der Entscheidungsvariablen für Änderungen b_{io} , Tausche q_{io} , Umbauten u_{io} und Abweichungen v_{io} betrachtet. Dies ist notwendig, um sicherzustellen, dass die in der Endmontage zu produzierende Konfiguration ω_j'' , die sich durch Änderung von Optionen des ausgewählten baubaren Planauftrags und durch Tausche mit anderen Planaufträgen ergibt, baubar ist. Zudem muss eine Konfiguration nach dem Umbau ω_j' , also diejenige, die zur Auslieferung angeboten wird und ggf. von der gewünschten Konfiguration ω_j abweicht, baubar sein.

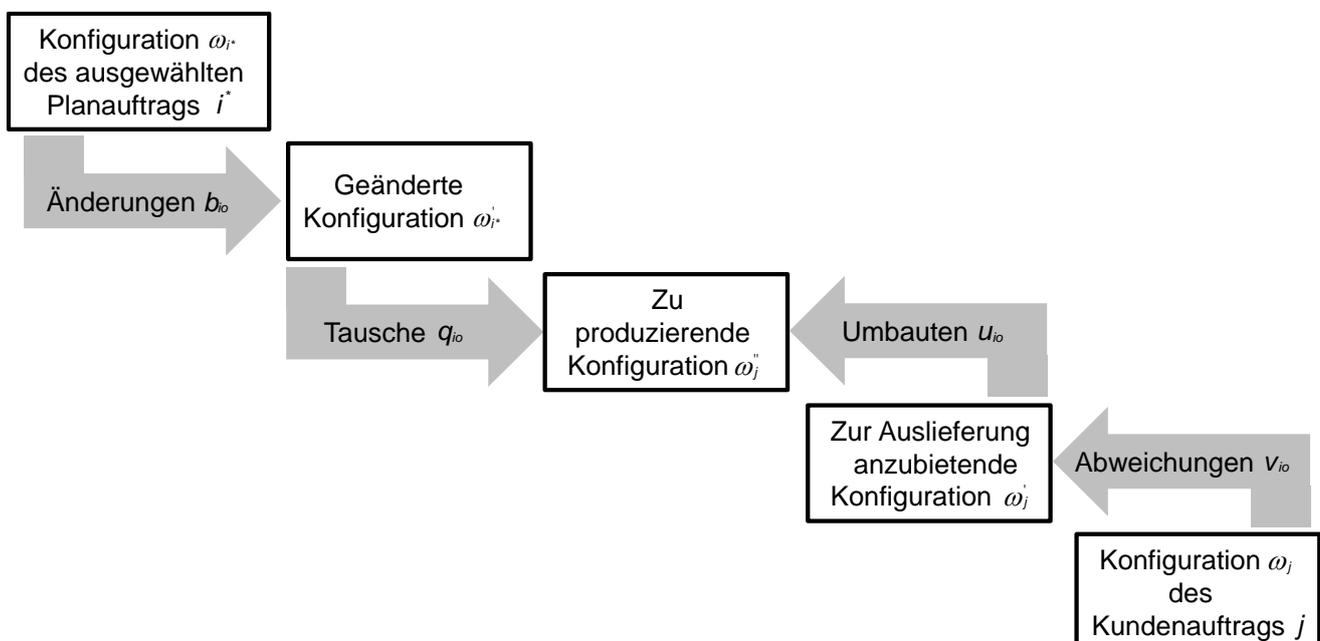


Abbildung 4.12: Auftragskonfigurationen der Planauftragsrekonfiguration (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 102)

Die Flexibilitätsgrenze der Arbeitslastabweichung wird für geänderte Optionen bereits im Rahmen der Planauftragsauswahl für den Abschnitt eines Planauftrags aggregiert

berücksichtigt. Jedoch ist für bereits sequenzierte Abschnitte zu überprüfen, ob Beschränkungen von Arbeitslastabweichungen in der geplanten Produktionsreihenfolge bzw. Sequenz für Planauftragskonfigurationen nach Änderungen oder Tauschen von Optionen eingehalten werden. Ebenso sind Beschränkungen des Car-Sequencing, das hinsichtlich der Beschaffung für Produktmodelle und sichere Optionen bei der Auftragsplanung antizipiert wird, in der Sequenz nach Tauschen sicherzustellen. Somit muss bei Änderungen überprüft werden, ob die Beschränkungen hinsichtlich der geänderten Optionen auch in der Sequenz für den ausgewählten Planauftrag eingehalten werden. Bei Tauschen muss für alle am Tausch beteiligten Planaufträge überprüft werden, ob die Beschränkungen hinsichtlich der getauschten Optionen in der Sequenz eingehalten werden. Sowohl bei Änderungen als auch bei Tauschen ist es ggf. ausreichend, die für die Beschränkungen relevante Teilsequenz um die betroffenen Planaufträge herum zu überprüfen. (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 102 f.; vgl. A_Kramer 2016, S. 54)

Hinsichtlich der Beschaffung ist zudem sicherzustellen, dass durch Tausche von Optionen keine Bedarfsänderungen von programmorientierten Teilen zustande kommen und es sich somit auch um Tausche von Teilen handelt. Führen Tausche zu Bedarfsänderungen von programmorientierten Teilen, so sind diese zu unterlassen, da sie nicht aufgrund der Flexibilität der Beschaffung möglich sind. Für die Überprüfung ist es dazu erforderlich, die Teileebene zu betrachten, sofern nicht jeweils eine Option genau einem Teil entspricht. (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 130 f.)

Sowohl für die Überprüfung der Beschränkungen der Sequenz als auch für die Überprüfung von Bedarfsänderungen aufgrund von Optionstauschen ist es erforderlich, Tausche zwischen dem ausgewählten Planauftrag und anderen Planaufträgen konkret durchzuführen. Hierzu müssen konkrete Planaufträge aus demselben Abschnitt am selben Standort, desselben Produktmodells und desselben Marktes des ausgewählten Planauftrags als Tauschpartner gefunden werden, sodass auch deren Baubarkeit nach dem Tausch überprüft werden kann. Die Anzahl der Tauschpartner kann möglichst gering gehalten werden, indem Optionen vorzugsweise mit solchen Planaufträgen getauscht werden, mit denen möglichst viele Muss-Optionen und auch Kann-Optionen getauscht werden können. Hierdurch soll erreicht werden, dass sich möglichst wenige Bedarfsänderungen ergeben und somit Bedarfsänderungen von programmorientierten Teilen möglichst vermieden werden. Mit einem Tauschpartner können zunächst Muss-Optionen getauscht werden, da Muss-Optionen je Optionsgruppe wechselseitig ge-

tauscht werden, sodass sowohl der ausgewählte Planauftrag als auch der Tauschpartner nach dem Tausch wieder eine Option je Muss-Optionsgruppe besitzen. Kann-Optionen können daraufhin entweder vom ausgewählten Planauftrag weg oder zu ihm hin getauscht werden. (vgl. A_Kramer 2016, S. 52 f., S. 55 f.)

Die Planauftragsrekonfiguration zeigt, dass Tausche im Vergleich zu Änderungen, Umbauten und Abweichungen am komplexesten sind, da Tauschpartner benötigt werden und Tausche entsprechend durchgeführt werden müssen. Daher werden Tausche nach dem in Abbildung A6 beschriebenen Algorithmus zur Planauftragsrekonfiguration zuletzt durchgeführt, sodass diese basierend auf dem Ergebnis der Planauftragsauswahl erst gar nicht durchgeführt werden, wenn bereits eine Rekonfiguration entsprechend der Entscheidungsvariablen für Änderungen, Umbauten oder Abweichungen nicht möglich ist.

Ist die zur Auslieferung anzubietende oder die zu produzierende Konfiguration nicht baubar, werden Beschränkungen in der Sequenz durch Änderungen nicht eingehalten oder können nicht alle für den Tausch vorgesehenen Optionen unter Berücksichtigung der Baubarkeit und der Beschränkungen der Sequenz ohne Bedarfsänderungen programmorientierter Teile getauscht werden, so ist die Planauftragsrekonfiguration entsprechend der Entscheidungsvariablen der Planauftragsauswahl und nach dem Algorithmus zur Planauftragsrekonfiguration nicht möglich. Folglich können die Planauftragsauswahl und die darauf folgende Planauftragsrekonfiguration unter Sperrung des zuvor ausgewählten Planauftrags erneut ausgeführt werden. Ggf. können auch die Planaufträge eines kompletten Abschnitts an einem Standort für die Planauftragsauswahl gesperrt werden, was zur effizienten Planauftragsauswahl sinnvoll sein kann, wenn bereits eine bestimmte Anzahl an Planaufträgen im selben Abschnitt im Rahmen vorangehender Durchläufe gesperrt wurden. Sind Tausche für ausgewählte Planaufträge bei mehreren Durchläufen nicht möglich oder ändern sich durch Tausche Teile, die programmorientiert beschafft werden, so kann die Planauftragsauswahl unter komplettem Verbot von Optionstauschen erneut durchgeführt werden. Hierzu sind zuvor gesperrte Planaufträge wieder freizugeben. Ein komplettes Verbot von Optionstauschen verhindert, dass erneut ein Planauftrag ausgewählt wird, für den Optionen getauscht werden sollen, die zu veränderten programmorientierten Bedarfen führen und somit eine Änderung und keinen Tausch auf der Teileebene darstellen. (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 105 f., S. 130 f.; vgl. A_Hao 2017, S. 97 ff.)

5 Implementierung und Validierung

Der in Kapitel 4 vorgestellte Ansatz zur mittelfristigen Auftragsplanung wurde zur Validierung als Softwareprototyp implementiert. Im Folgenden wird zunächst die prototypische Softwareimplementierung und darauf folgend die Validierung anhand der beiden in Kapitel 1.1 eingeführten industriellen Anwendungsfälle des Flugzeugbaus (Fall I) und des Automobilbaus (Fall II) vorgestellt. Im Sinne der Entscheidungsvalidierung wird analysiert, inwiefern die in den Anwendungsfällen erzielten Ergebnisse im Hinblick auf den Lösungsansatz mit seinen Zielen und Restriktionen akzeptabel sind (vgl. Mitroff et al. 1974, S. 48, S. 51; vgl. Schneeweiß 2002, S. 110 ff.). Hierzu werden die Anwendungsfälle beschrieben bevor jeweils die Entscheidungsvalidierung durchgeführt wird.

5.1 Prototypische Softwareimplementierung

Basierend auf der Anleitung des Verfassers dieser Arbeit erfolgte die Implementierung der Szenariengenerierung durch Almagro (A_Almagro 2016), Blättchen (A_Blättchen 2016) und Strunz (A_Strunz 2017) und die der Planauftragsgenerierung durch Geier (A_Geier 2016), Hammerschmidt (A_Hammerschmidt 2017), Hao (A_Hao 2017) und Kramer (A_Kramer 2016). Die Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk wurde von Blättchen (A_Blättchen 2016), Hammerschmidt (A_Hammerschmidt 2017), Kramer (A_Kramer 2016) und Schweizer (A_Schweizer 2017) implementiert. Die Implementierung der Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen realisierten Hammerschmidt (A_Hammerschmidt 2017), Hao (A_Hao 2017) und Kramer (A_Kramer 2016). Der gesamte Lösungsansatz wurde in der Programmiersprache Java implementiert, wobei zum Aufstellen und Lösen der Optimierungsmodelle zur Auftragseinplanung und zur Planauftragsauswahl in Java auf IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (vgl. IBM 2016, S. 27 ff.), kurz CPLEX, zugegriffen wird (A_Blättchen 2016, S. 102 f.; A_Kramer 2016, S. 60 ff.; A_Schweizer 2017, S. 75 f.). Neben den Optimierungsmodellen wurden die Implementierungen der Algorithmen zur Szenariengenerierung (vgl. A_Blättchen 2016, S. 102, S. 106), zur Planauftragsgenerierung (vgl. A_Geier 2016., S. 67) und zur Planauftragsrekonfiguration (vgl. A_Kramer 2016, S. 44, S. 60 ff.) sowie das Einlesen und Vorverarbeiten von Daten als auch deren Weiterverarbeitung und Ausgabe nach der Problemlösung in Java umgesetzt (vgl. A_Blättchen 2016, S. 102 f.; vgl. A_Kramer 2016, S. 64 ff.). Die Verifikation, also die Überprüfung der prototypischen Implementierung entsprechend des Lösungsansatzes (Schlesinger et al. 1979, S. 104), wurde im Rahmen der Implementierungsarbeiten anhand von Testdaten bzw. Testfällen durch

Feststellung der Übereinstimmung der Ergebnisse der Implementierung mit separaten Berechnungen bzw. Auswertungen durchgeführt (vgl. A_Blättchen 2016, S. 108; vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 132 f.; vgl. A_Hao 2017, S. 45 ff., S. 90 ff.; vgl. A_Schweizer 2017, S. 93 ff.; vgl. A_Strunz 2017, S. 123).

Zur Lösung ganzzahliger Optimierungsprobleme verwendet CPLEX einen Branch-and-Cut-Algorithmus, der unter anderem durch eine Zeitbegrenzung oder durch eine relative Lösungsgütetoleranz terminiert werden kann (IBM 2016, S. 226, S. 228 f.). Der verwendete Branch-and-Cut-Algorithmus ist eine Kombination eines Branch-and-Bound-Verfahrens mit einem Schnittebenenverfahren und ist somit zur effizienten Lösung von ganzzahligen Optimierungsproblemen geeignet (vgl. Neumann & Morlock 2002, S. 534). Mit der relativen Lösungsgütetoleranz als Abbruchkriterium wird die Optimierung beendet, wenn der Zielfunktionswert der besten gefundenen Lösung relativ zu dem der optimalen Lösung nachweislich um maximal die relative Lösungsgütetoleranz abweicht (vgl. Kallrath 2013, S. 94 ff.; vgl. IBM 2016, S. 226, S. 228). Die Standardeinstellung für die relative Lösungsgütetoleranz in CPLEX beträgt 0,01 % (IBM 2016, S. 228).

Zur Validierung wurde als Entwicklungsumgebung Eclipse IDE for Java EE Developers in der Version Neon mit der Java SE Runtime Environment 8 und zum Lösen der Optimierungsmodelle IBM ILOG CPLEX Optimization Studio in der Version 12.7 verwendet (A_Hao 2017, S. 42; A_Kronenbitter 2017, S. 76). Für Fall I wurde ein Rechner mit einem 2,4 GHz-Prozessor (Intel Core i5-6300U) sowie 8 GB Arbeitsspeicher (A_Kronenbitter 2017, S. 76) und für Fall II ein Rechner mit einem 2,9 GHz-Prozessor (Intel Core i7-3520M) sowie 16 GB Arbeitsspeicher eingesetzt (A_Hao 2017, S. 42).

Zur potentiellen Anwendung und Verwertbarkeit des Lösungsansatzes in der Industrie wurde unter Anleitung des Verfassers dieser Arbeit von Hao (A_Hao 2017) eine grafische Benutzeroberfläche für den Softwareprototypen in der Projektarchitektur für Web-Applikationen der flexis AG implementiert. Die Projektarchitektur ermöglicht die dynamische Datenhaltung in einer Datenbank, die Ausführung der Berechnungen auf einem Server und den Nutzerzugriff über einen Web-Client. (A_Hao 2017, S. 7 ff., S. 116 ff.)

Über die grafische Benutzeroberfläche können zur Planauftragsgenerierung ein Absatzmarkt und ein Produktmodell ausgewählt und Baubarkeits-, Zusteuer- und Einbauregeln importiert werden. Soll-Wahrscheinlichkeiten bzw. Soll-Einbauraten der Optionen mit den entsprechenden Codes können aus historischen Auftragsdaten als relative

Häufigkeiten errechnet oder direkt eingelesen und in der Oberfläche manuell angepasst werden. Wurden Planaufträge in der vom Benutzer angegebenen Anzahl generiert, so werden diese mit deren Optionen in Tabellenform angezeigt. Zudem werden die Plan-Wahrscheinlichkeiten bzw. Plan-Einbauraten der generierten Planaufträge und die Abweichungen der Plan-Einbauraten von den Soll-Einbauraten der einzelnen Muss- und Kann-Optionen im Betrag angegeben. Die Abweichungen werden zudem in Diagrammform dargestellt. Die entsprechende Ansicht der Benutzeroberfläche ist in Abbildung A7 für den Anwendungsfall der Automobilindustrie (Fall I) aufgeführt. (Bürgin et al. 2017, S. 30 f.; A_Hao 2017, S. 120 ff.)

Zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk können über die grafische Benutzeroberfläche die einzuplanenden Aufträge eingelesen und dargestellt werden (Bürgin et al. 2017, S. 31 f.; A_Hao 2017, S. 124 f.). Die Szenariengenerierung hinsichtlich der Kundenaufträge erfolgt direkt vor der Auftragseinplanung ohne weitere Ausgaben in der Oberfläche. Als Ergebnis der Einplanung werden sowohl die Zuordnungen der einzelnen Aufträge zu den Standorten und Perioden in Tabellenform und Diagrammen als auch die Gesamtkosten und deren Kostenterme in Tabellenform dargestellt (Bürgin et al. 2017, S. 31 f.; A_Hao 2017, S. 125 ff.). Die entsprechende Ansicht der Oberfläche ist für den Anwendungsfall des Flugzeugbaus (Fall I) in Abbildung A8 und für den Anwendungsfall des Automobilbaus (Fall II) in Abbildung A9 dargestellt.

Wie in Abbildung A10 für den Anwendungsfall der Automobilindustrie (Fall II) dargestellt, kann der aktuelle Auftragsbestand je Standort über alle Abschnitte zur Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen über die grafische Benutzeroberfläche angezeigt werden. In der Ansicht der Oberfläche wird eine Unterscheidung der Aufträge in Kunden- und Planaufträge ersichtlich. Zudem werden die Auftragsfüllgrade der einzelnen Abschnitte angezeigt. (Bürgin et al. 2017, S. 32; A_Hao 2017, S. 128 ff.)

5.2 Validierung im Flugzeugbau mit Kundenaufträgen mit unsicheren Auftragskonfigurationen (Fall I)

Im ersten Anwendungsfall mit Kundenaufträgen mit unsicheren Auftragskonfigurationen wird die Szenariengenerierung und die Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk im Flugzeugbau auf die Airbus A320-Produktfamilie mit den Produktmodellen A318, A319, A320 und A321 angewendet. Die Validierung erfolgt für das 2. Quartal 2015 als Auslieferungszeitraum mit 128 Kundenaufträgen und 128 zur Verfügung stehenden Slots. Da Kundenaufträge bereits zum Zeitpunkt der Einplanung, also ungefähr

ein Jahr vor Auslieferung, vorliegen und mit Kunden zunächst Quartalsverträge hinsichtlich des Auslieferungszeitraums vereinbart werden, werden zur Einplanung 100% Kundenaufträge mit unsicheren Auftragskonfigurationen eines Quartals betrachtet. Auslieferzeiträume der Perioden sind die Kalendermonate eines Quartals und zwar im betrachteten Fall April (Monat 4), Mai (Monat 5) und Juni (Monat 6) 2015. Das 2. Quartal 2015 eignet sich insbesondere zur Validierung, da sich sowohl die betrachtete Produktdokumentation als auch das Produktionsnetzwerk mit der Anzahl an Standorten, Linien und Stationen in den entsprechenden Produktionsperioden nicht geändert hat. Zudem umfasst das Quartal möglichst wenige Sonderfälle wie Corporate Jets, die nicht explizit im Optimierungsmodell betrachtet werden, indem sie aus dem Kapazitätsangebot herausgerechnet und als Leertakte abgebildet werden. Im betrachteten Auslieferungsquartal wurde das Produktmodell A318, wie auch generell im Jahr 2015, nicht bestellt, so dass lediglich die Produktmodelle A319, A320 und A321 Beachtung finden. Das Produktionsnetzwerk zur Produktion der globalen Produkte bzw. Produktmodelle A319, A320 und A321 besteht in den betrachteten Perioden aus den Endmontagestandorten Hamburg mit drei Linien, Toulouse mit zwei Linien und Tianjin mit einer Linie und ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Es kann somit zumindest als ein transregionales oder sogar globales Produktionsnetzwerk angesehen werden. (vgl. A_Molzahn 2017, S. 15 f., S. 18, S. 24 f., S. 32, S. 92 f.; vgl. A_Blättchen 2016, S. 68 f.)

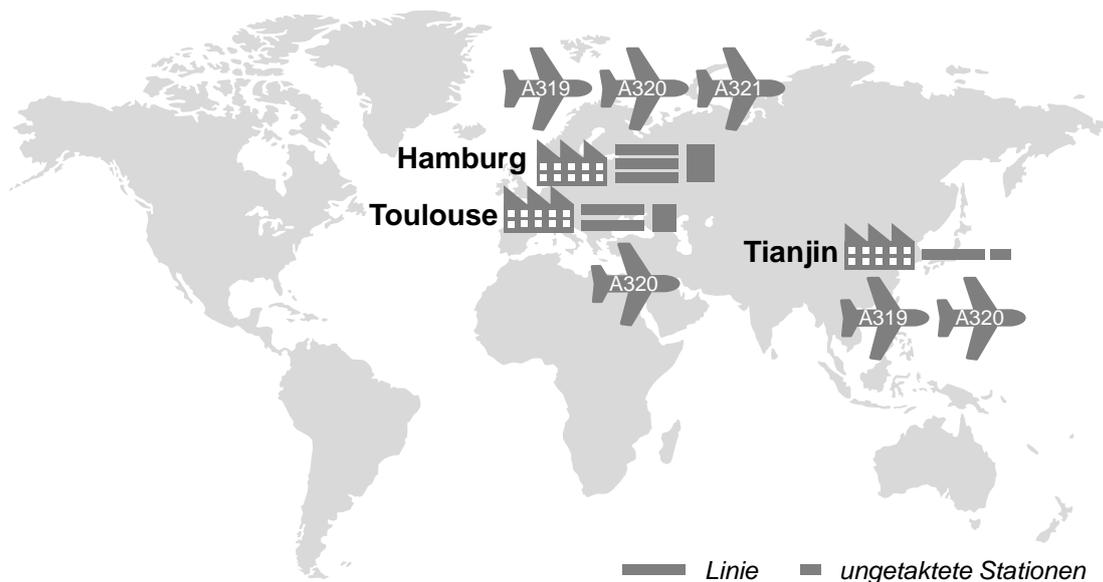


Abbildung 5.1: Produktionsnetzwerk mit Endmontagestandorten der Airbus A320-Produktfamilie im 2. Quartal 2015 (vgl. A_Molzahn 2017, S. 15 f., S. 18)

Jede Linie zur Variantenfließfertigung umfasst fünf in Reihe angeordnete Stationen. Der Transport der Flugzeuge von einer zur nächsten Station einer Linie erfolgt jeweils zum

Ende eines Taktes. Anknüpfend an die Linien findet die Fertigstellung der Flugzeuge auf ungetakteten Stationen, die in Abbildung 5.1 als Bereich nach den Linien eines jeden Standorts dargestellt sind, statt. In Hamburg können alle drei Produktmodelle montiert werden, wogegen in Toulouse lediglich die A320 und in Tianjin die A319 und die A320 montiert werden können. Der spätestmögliche Zeitpunkt der Auftragseinplanung richtet sich nach dem spätestmöglichen Zeitpunkt für die erste Teilebestellung für die betrachteten Standorte und Perioden, wobei insbesondere die Vorlaufzeiten zur Bestellung der strukturegebenden Teile bei den unternehmensinternen Zulieferstandorten und die standortspezifischen Transportdauern zu berücksichtigen sind (vgl. Buergin et al. 2018, S. 67, S. 72). (A_Molzahn 2017, S. 15 f., S. 18, S. 21, S. 24, S. 32; A_Blättchen 2016, S. 68 f.)

Der Arbeitskalender wird für die Auftragseinplanung als gegeben betrachtet und gibt für jeden Kalendertag je Linie an, zu wieviel Prozent der regulären Kapazität gearbeitet wird. Auf dem Arbeitskalender beruht das Slotgerüst mit den entsprechenden Takten und Taktzeiten der Linien mit einer Anzahl an Tagen als Sub-Perioden, wobei Tage, an denen gar nicht oder nur teilweise gearbeitet wird, zu entsprechend längeren Taktzeiten führen. Für die ungetakteten Stationen wird je Standort eine generische Durchlaufzeit von einer Anzahl an Arbeitstagen angenommen. Zur Distribution werden keine Transportdauern berücksichtigt, da die Auslieferungen an die Kunden direkt an den Endmontagestandorten erfolgen. Aus dem Slotgerüst können die Slots, die für die Auftragseinplanung für einen Auslieferungskalendermonat zur Verfügung stehen, und somit die Anzahl an Aufträgen je Auslieferungskalendermonat abgeleitet werden. Aufgrund unterschiedlicher Durchlaufzeiten an den Standorten unterscheiden sich die Zeiträume des Produktionsstarts von Aufträgen eines Auslieferungsmonats zwischen den Standorten. (A_Molzahn 2017, S. 18, S. 22 f., S. 33, S. 36 f., S. 96)

Aus den Produktmodellen lassen sich direkt solche strukturegebende Teile, die sich zwischen den Produktmodellen unterscheiden (z. B. vordere und hintere Rumpfsektion), und solche, die für alle Produktmodelle der Produktfamilie identisch sind (z. B. Seiten- und Höhenleitwerk), ableiten. Neben den Produktmodellen werden im Rahmen der Validierung zwölf kundenwählbare Optionsgruppen betrachtet. Die Optionen der Optionsgruppen sind für alle drei Produktmodelle identisch und frei kombinierbar, sodass keine Baubarkeitsrestriktionen zwischen den Optionen verschiedener Optionsgruppen gelten. Sämtliche betrachtete Optionen sind in Tabelle A2 dargestellt. (A_Hupays 2016, S. 50 ff.; A_Molzahn 2017, S. 16 f., S. 39 f.)

Die ersten zehn Optionsgruppen sind aufgrund ihres entscheidenden Einflusses auf die Arbeitslast bezüglich der Endmontagelinien und somit aufgrund der starken Abhängigkeit der Arbeitslast von den Kundenauftragskonfigurationen relevant (vgl. Buergin et al. 2016, S. 333). Diese sind als Kann-Optionen formuliert, sodass in jeder Optionsgruppe die Option „keine“ besteht. Bei einigen additiven Optionsgruppen (3, 4, 5, 8) bedeutet „keine“ jedoch, dass die Option bereits in den Basis-Optionen des Produktmodells vorhanden ist, jedoch nicht zusätzlich häufiger gewählt wird. Die mehrfache Wahl einer identischen Option ist dann als additive Optionsgruppe im Gegensatz zur individuellen Optionsgruppe formuliert, wenn die Implikation auf die Arbeitslast in der Endmontage auch dem entsprechenden Vielfachen entspricht. Dies ist für Optionsgruppe 8 nicht der Fall, da zwei oder mehr zusätzliche Tanks nach den Linien auf den ungetakteten Stationen montiert werden und somit dafür in den Linien nicht mehr Arbeitslast als für einen zusätzlichen Tank anfällt. Die in den Endmontagelinien anfallenden Arbeitslasten werden durch die Arbeitszeiten der Optionsgruppen eins bis zehn und die Arbeitszeiten der Produktmodelle vollständig berücksichtigt, indem letztere alle Arbeitszeiten in den Endmontagelinien umfassen, die nicht durch die ersten zehn Optionsgruppen abgedeckt werden. Die Arbeitslasten werden im Anwendungsfall als standortunabhängig betrachtet und müssen daher nicht skaliert werden. (A_Blättchen 2016, S. 58, S. 69; A_Hupays 2016, S. 50 ff.; A_Molzahn 2017, S. 16 f., S. 19, S. 39 f.)

Optionsgruppe 11 bildet außerhalb der Betrachtung der Endmontage auf den Linien die erforderliche Durchlaufzeit zur Lackierung ab, da die Lackierstationen als Engpass der nachgelagerten ungetakteten Stationen gelten. Als Optionen wird die Anzahl an Tagen zur Lackierung verwendet, um durch das optionsorientierte Level-Scheduling ein arbeitslastorientiertes Level-Scheduling für die ungetakteten Lackierstationen antizipieren zu können und eine möglichst gute Ausgangslage für die Ablaufplanung der ungetakteten Stationen zu bieten. (A_Blättchen 2016, S. 69; A_Molzahn 2017, S. 17, S. 39 f.; A_Strunz 2017, S. 52)

Optionsgruppe 12 dient dazu, eine kundenspezifische Erstversion eines Flugzeugs von den Nachfolgern zu unterscheiden, da für Erstversionen administrative Mehraufwände erforderlich sind. Da sich Nachfolger in der Konfiguration von ihren Erstversionen unterscheiden können, wird für sie die Unsicherheit der anderen Optionsgruppen gleichermaßen berücksichtigt. Im Gegensatz zu den anderen Optionsgruppen wird Optionsgruppe 12 zur Einplanung als sicher betrachtet, was aufgrund von Produktionsrestriktionen für Erstversionen notwendig ist. (Buergin et al. 2018, S. 61, S. 65 f., S. 69;

A_Hupays 2016, S. 20, S. 92; A_Kronenbitter 2017, S. 14; A_Molzahn 2017, S. 17, S. 39 f.; A_Strunz 2017, S. 51 f.)

Im Rahmen der Validierung werden sowohl die unabhängige als auch die abhängige Optionenwahl betrachtet und entsprechende Wahrscheinlichkeiten verwendet. Diesen liegt eine Datenbasis mit Auftragskonfigurationen je Kunde und Produktmodell zugrunde, deren relative Häufigkeiten als Verbundwahrscheinlichkeiten der Auftragskonfigurationen für die abhängige Optionenwahl verwendet werden. Die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Optionen für die unabhängige Optionenwahl lassen sich aus den Auftragskonfigurationen je Kunde und Produktmodell der Datenbasis ableiten. Die Wahrscheinlichkeiten werden als unabhängig von der sicheren Optionenwahl von Optionsgruppe 12 und somit als unabhängig von der Erstversion angesehen. Die Datenbasis enthält je Kunde lediglich die Wahl einer Option aus Optionsgruppe 11, sodass bezüglich der Lackierung keine Unsicherheit betrachtet wird, auch wenn sie prinzipiell als unsicher gilt. (A_Molzahn 2017, S. 94 f.; A_Strunz 2017, S. 89 ff., S. 98)

Da Optionen, die zum Zeitpunkt der Auftragseinplanung noch unsicher sind zu den spätestmöglichen Bestellzeitpunkten der entsprechenden Teile durch die Kunden zu spezifizieren sind, kann die Reihenfolgeplanung auf den Linien zu einem späteren Zeitpunkt unter sicheren Auftragskonfigurationen erfolgen. Durch die Reihenfolgeplanung werden schließlich die Lieferzeitpunkte für die Teile innerhalb der Monate auf Tage spezifiziert. Die Reihenfolgeplanung kann gleichzeitig für alle Linien eines Standorts durchgeführt werden und Arbeitslastabweichungen auf täglicher Basis berücksichtigen. Die Antizipation von Arbeitslastabweichungen erfolgt bei der Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk der A320-Produktfamilie in Form von Arbeitslastabweichungen je Monat und je Standort. (Buergin et al. 2016, S. 330 f., S. 333; A_Blättchen 2016, S. 70, S. 76, S. 89, S. 93)

5.2.1 Szenariengenerierung

Hinsichtlich der als unsicher betrachteten Optionen und deren freien Kombinierbarkeit bestehen im Anwendungsfall je Produktmodell bei sicherer Option der Optionsgruppe 12 maximal $(4 \times 2 \times 3 \times 3 \times 7 \times 3 \times 2 \times 3 \times 2 \times 2 \times 14 \times 1 =)$ 508.032 Kundenauftragsszenarien (Tabelle A2). Diese bestehen für jeden der 128 Kundenaufträge des 2. Quartals 2015, sodass die theoretisch mögliche Szenarienzahl $508.032^{128} = 2,2597 \times 10^{730}$ beträgt. Die Anzahl relevanter Szenarien beträgt bei unabhängiger Optionenwahl entsprechend der Optionen mit positiven Wahrscheinlichkeiten für die Kunden und Produktmodelle der

128 Kundenaufträge des Planungsquartals in der Datenbasis $1,1485 \times 10^{39}$ und ist somit deutlich geringer als die theoretisch mögliche Anzahl. Bei abhängiger Optionenwahl beträgt die Anzahl entsprechend der in der Datenbasis vorliegenden Auftragskonfigurationen für die Kunden und Produktmodelle der 128 Kundenaufträge $7,2958 \times 10^{18}$ und ist somit noch geringer als die Anzahl bei unabhängiger Optionenwahl. (A_Strunz 2017, S. 127 f.)

Aufgrund der hohen Szenarienanzahl sowohl bei unabhängiger, aber auch bei abhängiger Optionenwahl, ist die Anzahl zu generierender Szenarien zu bestimmen. Einerseits sollen die generierten Szenarien die relevanten Szenarien möglichst repräsentativ abbilden und somit Informationsrobustheit gewährleisten. Andererseits muss die entsprechend erforderliche Rechenlaufzeit zur optimalen Lösung des Optimierungsmodells zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk mittels CPLEX berücksichtigt werden. Diesbezüglich konnte festgestellt werden, dass die Rechenlaufzeit von CPLEX im vorliegenden Anwendungsfall erwartungsgemäß mit der Szenarienanzahl steigt. Dabei spielt jedoch die Einstellung der relativen Lösungsgütetoleranz für ganzzahligen Optimierungsprobleme in CPLEX eine Rolle. Im Anwendungsfall machen die materialbezogenen Eingangskosten ungefähr 99,99 % aus (siehe Kapitel 5.2.2), jedoch können sie durch die Optimierung nur geringfügig beeinflusst werden. Um auch bei hohen absoluten Kosten eine Optimierung hinsichtlich relativ geringen Kosten und somit auch hinsichtlich der anderen Kostenterme der Zielfunktion durchzuführen, ist die Standardeinstellung von CPLEX mit einer relativen Lösungsgütetoleranz von 0,01 % nicht ausreichend. Hierzu hat eine Analyse im Anwendungsfall ergeben, dass durch eine relative Lösungsgütetoleranz von 0,0001 % im Vergleich zu 0,01 % eine deutliche Reduzierung der hinsichtlich der Robustheit bedeutenden Arbeitslastabweichungen und der Arbeitslastabweichungskosten erzielt werden kann. Eine Rechenlaufzeit von mehr als zehn Stunden wird aus Anwendungsgesichtspunkten bei Airbus ausgeschlossen, sodass als Abbruchkriterium neben der relativen Lösungsgütetoleranz eine entsprechende Zeitbegrenzung gewählt wird. Werden im Optimierungsmodell zur Auftragseinplanung 200 Szenarien verwendet, so bricht die Optimierung in CPLEX nach zehn Stunden und einer relativen Lösungsgütetoleranz von 0,00 % ab (Tabelle A7 Spalte 1), womit diese unter 0,01 % liegt, jedoch von CPLEX nicht präziser ausgegeben wird (vgl. IBM 2016, S. 306). Aufgrund einer relativen Lösungsgütetoleranz von unter 0,01 % bei einer Laufzeit von zehn Stunden werden zur weiteren Validierung 200 Szenarien verwendet, was im Vergleich zur Verwendung einer höheren Szenarienanzahl in Anhang

A9 erläutert wird. (A_Strunz 2017, S. 128 f., S. 138, S. 143 ff.; A_Molzahn 2017, S. 100 ff.)

In einer durchgeführten Generierung von 200 Szenarien, wovon eines das Worst-Case-Szenario mit der maximalen Arbeitslast darstellt (W) und die restlichen 199 Szenarien repräsentativ die Arbeitslasten abbilden (R), beträgt deren kumulierte Wahrscheinlichkeit bei unabhängiger Optionenwahl $5,07 \times 10^{-30}$ und bei abhängiger Optionenwahl $1,15 \times 10^{-14}$ (Tabelle A7 Spalten 1 und 2). Dieser Fall wird im Folgenden als 200R&W bezeichnet, wogegen der Fall mit dem Worst-Case-Szenario (W) und 199 zufälligen Szenarien (Z) 200Z&W genannt wird. Im letzteren Fall beträgt die kumulierte Wahrscheinlichkeit in einer durchgeführten Generierung bei unabhängiger Optionenwahl $9,68 \times 10^{-30}$ (A_Kronenbitter 2017, S. XV) und bei abhängiger Optionenwahl $1,17 \times 10^{-14}$ (Tabelle A7 Spalte 3). Die kumulierte Wahrscheinlichkeit der Szenarien ist somit bei abhängiger Optionenwahl deutlich höher als bei unabhängiger und in den beiden Fällen 200R&W sowie 200Z&W auf ähnlichem Niveau. Hinsichtlich der Gesamtwahrscheinlichkeit sind jedoch die kumulierten Wahrscheinlichkeiten für 200 Szenarien sehr gering. Daher wird im Folgenden zunächst sowohl die bestehende Unsicherheit der Auftragskonfigurationen und deren Arbeitslasten als auch die repräsentative Abbildung von Arbeitslasten genauer betrachtet.

Eine Analyse der Verteilung der unsicheren Arbeitslasten, die durch die unsichere Optionenwahl bestehen, zeigt, dass die Spannweite zwischen minimaler und maximaler Arbeitslast der betrachteten Kundenauftragsszenarien bei abhängiger Optionenwahl bis zu 7,84 % und bei unabhängiger Optionenwahl bis zu 9,60 % der Arbeitslast des entsprechenden Produktmodells beträgt (Tabelle A3). Werden die Kundenaufträge einzeln betrachtet, so beträgt die Spannweite nach Abbildung A11 bei 60,16 % der Aufträge 0 %, wobei sie bei abhängiger Optionenwahl maximal 4,34 % und bei unabhängiger Optionenwahl maximal 5,82 % der Arbeitslast des entsprechenden Produktmodells annimmt (A_Kronenbitter 2017, S. 58, S. 77). Die abhängige Optionenwahl führt somit zu einer niedrigeren maximalen Arbeitslast, die durch das Worst-Case-Szenario berücksichtigt wird, und ist insofern realistischer, da sie je Kunde und je Produktmodell auf vorliegenden Auftragskonfigurationen beruht (vgl. A_Strunz 2017, S. 91).

Für 60,16 % der Kundenaufträge ist also die Auftragskonfiguration hinsichtlich der Arbeitslast in den Endmontagelinien nach der Datenbasis deterministisch. Für lediglich einen Kundenauftrag liegen mit zehn Konfigurationen mehr als fünf Konfigurationen vor, sodass ausschließlich für diesen nach Tabelle A1 tatsächlich ein Clustering der

Arbeitslasten zu deren repräsentativen Abbildung erfolgt. Anhand dieses Kundenauftrags ist das Clustering der Arbeitslasten für die abhängige Optionenwahl in Abbildung 5.2 und für die unabhängige Optionenwahl in Abbildung 5.3 dargestellt. Die Anzahl an Arbeitslasten mit positiven Wahrscheinlichkeiten beträgt bei abhängiger Optionenwahl 10 und bei unabhängiger Optionenwahl 256, sodass entsprechend Tabelle A1 bei abhängiger Optionenwahl vier Cluster und bei unabhängiger Optionenwahl zehn Cluster gebildet werden. Weitere Angaben zu den Clustern sind in Tabelle A4 und Tabelle A5 gegeben. Insgesamt ist durch die Validierung ersichtlich, dass durch Stichprobenziehungen aus den Auftragskonfigurationen eines Kundenauftrags aus sämtlichen Clustern die Arbeitslasten je Kundenauftrag repräsentativ abgebildet werden können. (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 77, S. 102 ff.)

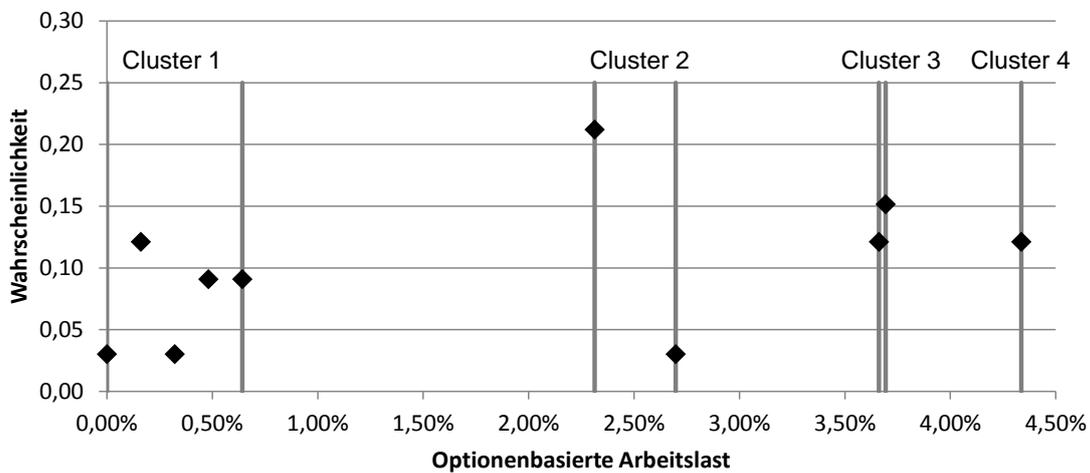


Abbildung 5.2: Dichtefunktion und Clustering der Arbeitslasten für einen Kundenauftrag bei abhängiger Optionenwahl (A_Kronenbitter 2017, S. 103)

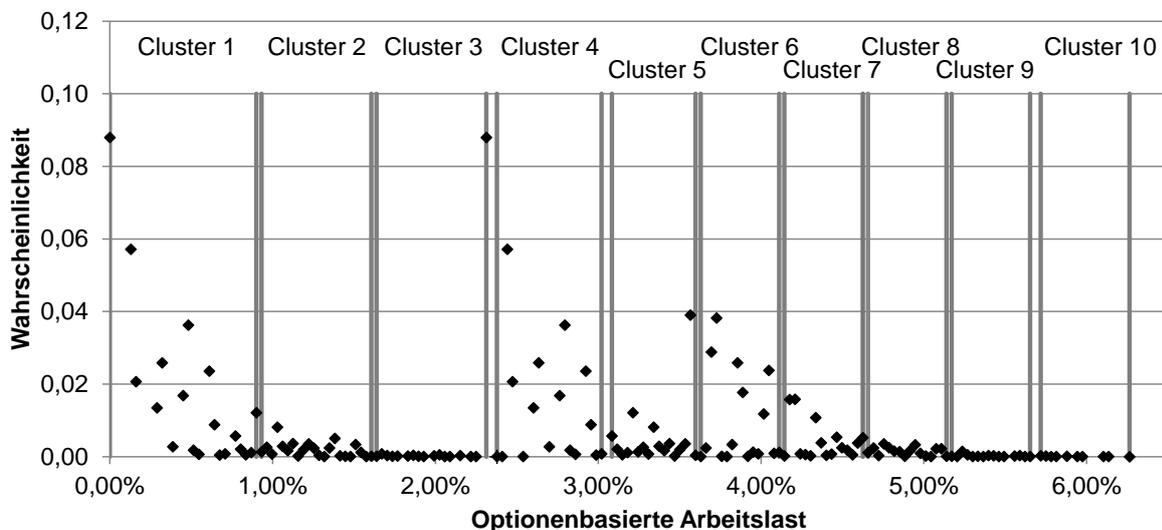


Abbildung 5.3: Dichtefunktion und Clustering der Arbeitslasten für einen Kundenauftrag bei unabhängiger Optionenwahl (A_Kronenbitter 2017, S. 104)

5.2.2 Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk

Zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk werden zunächst die Nebenbedingungen beschrieben und die Kostenterme der Zielfunktion im Anwendungsfall erläutert, woraufhin auf die Ergebnisse der Optimierung sowohl nach dem deterministischen Erwartungswertmodell als auch nach dem Szenarienmodell eingegangen wird. Im Rahmen der Entscheidungsvalidierung erfolgt eine Festlegung einer Standardvariante des Erwartungswertmodells und einer Standardvariante des Szenarienmodells. Aus Datenschutzgründen werden sämtliche Ergebnisse, insofern nicht anders angemerkt, relativ zu den Gesamtkosten der Standardvariante des Szenarienmodells unter 200 Szenarien angegeben, auch wenn absolute Kosten zur Modelllösung berücksichtigt wurden. Auch wenn lediglich hinsichtlich der Planungsaufgabe relevante Kosten betrachtet werden und einzelne Kostenterme relativ gering ausfallen, sei an dieser Stelle auf die absolute Höhe der durchschnittlichen Listenpreise im Jahr 2015 verwiesen. Das Produktmodell A319 kostete durchschnittlich 88,6 Mio. US-Dollar, das Modell A320 97,0 Mio. US-Dollar und das Modell A321 113,7 Mio. US-Dollar (Airbus 2014). Entsprechend dem Produktmodellmix im 2. Quartal 2015 mit den einzuplanenden 128 Kundenaufträgen beträgt die Summe der durchschnittlichen Listenpreise 13,1 Mrd. US-Dollar.

Nebenbedingungen

Produktionsrestriktionen bestehen, wie bereits in Abbildung 5.1 dargestellt, für das Produktmodell A319, das nicht in Toulouse gebaut werden kann, und das Produktmodell A321, das nur in Hamburg gebaut werden kann (Formel 4-39). Zudem kann eine Erstversion ausschließlich in Hamburg und in Toulouse produziert werden (Formel 4-40). Der Standort Tianjin darf nur Kunden aus dem chinesischen Markt beliefern (Formel 4-43). Vertragsstandorte der einzelnen Kundenaufträge werden berücksichtigt (Formel 4-44). Für das Produktmodell A321 wird je Monat zur Antizipation des Car-Sequencing eine Sequenzierungsregel berücksichtigt, indem die entsprechenden bei den internen Zulieferstandorten für die strukturgebenden Teile geltenden Sequenzierungsregeln auf den Standort Hamburg, der als einziger das Modell produzieren kann, bezogen werden und $\alpha = 1$ gesetzt wird (Formel 4-41). (vgl. A_Hupays 2016, S. 33; vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 17, S. 41 f., S. 84; vgl. A_Molzahn 2017, S. 16, S. 23, S. 42, S. 94)

Materialbezogene Eingangskosten

Für die Produktmodelle und Optionen der ersten zehn Optionsgruppen werden standortunabhängige materialbezogene Eingangskosten berücksichtigt. Transportkosten

werden lediglich für Produktmodelle hinsichtlich ihrer strukturgebenden Teile berücksichtigt, wobei diese für alle drei Produktmodelle identisch, jedoch standortabhängig sind. Da die 128 Aufträge der Anzahl der zur Verfügung stehenden Slots entsprechen, besteht diesbezüglich im konkreten Anwendungsfall kein Optimierungspotential. Für Optionsgruppe 11 werden je Option standortabhängige Eingangskosten in Form von Transferpreisen betrachtet. Dabei wird für den nachgelagerten Lackierprozess der Optionsgruppe 11 in Tianjin von niedrigeren Arbeitslohnkosten als in Hamburg und Toulouse und somit von einem entsprechend niedrigeren Transferpreis ausgegangen. Für Optionsgruppe 12 werden keine materialbezogenen Eingangskosten berücksichtigt. Da die materialbezogenen Eingangskosten der Produktmodelle und der ersten zehn Optionsgruppen somit lediglich von der Produktmodell- und Optionenwahl der Kunden abhängen, hat die Auftragseinplanung lediglich Einfluss auf die anfallenden materialbezogenen Eingangskosten bezüglich der Lackierung. (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 33; vgl. A_Molzahn 2017, S. 95, S. 114; vgl. A_Strunz 2017, S. 143)

Bestandskosten

Die beschriebenen materialbezogenen Eingangskosten finden in den Bestandskosten Berücksichtigung. Als Zinssatz für die Kapitalbindungskosten wird der firmeninterne kalkulatorische Zinssatz verwendet. Zudem werden durchschnittliche Lagerhaltungskosten für fertige Flugzeuge standortabhängig berücksichtigt. (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 34; vgl. A_Molzahn 2017, S. 95)

Strafkosten

Als Kostensatz für die Terminverzögerungskosten wird für alle Kunden ein Durchschnittswert historisch angefallener Strafkosten angenommen. Bezüglich der Standortabweichungskosten wird für alle Kunden ein von Planungsexperten bestimmter Kostensatz berücksichtigt. (A_Kronenbitter 2017, S. 34; A_Molzahn 2017, S. 96)

Distributionskosten

Distributionskosten werden aufgrund der Auslieferung an die Kunden direkt an den Endmontagestandorten keine berücksichtigt. (A_Molzahn 2017, S. 96)

Auftragsabstandskosten

Sub-Perioden, die prinzipiell zur Auslieferung für einen Kunden zur Verfügung stehen, sind im Anwendungsfall Kalendertage. Je Kalendertag, Standort und Kunde ist somit zu bestimmen, ob eine Auslieferung erfolgen kann. Hierzu kann prinzipiell je Kunde ein

entsprechender Auslieferungskalender berücksichtigt werden. An dieser Stelle wird jedoch vereinfacht angenommen, dass an allen Kalendertagen, an denen zumindest die Hälfte aller Linien mindestens teilweise produziert auch für alle Kunden eine Auslieferung erfolgen kann. Erforderliche zeitliche Abstände zwischen zwei Lieferungen werden entsprechend je Kunde in Tagen berücksichtigt. (A_Molzahn 2017, S. 24, S. 57, S. 94)

Arbeitslastabweichungskosten und Folgekosten

Einzelne Mitarbeiter sind Gewerken zugehörig, die auf bestimmte Montagevorgänge spezialisiert sind und teilweise stationen- und linienübergreifend eingesetzt werden, wobei gleichzeitig mehrere Mitarbeiter an einer Station arbeiten können (A_Kronenbitter 2017, S. 16; A_Molzahn 2017, S. 19). Im Modell werden die Arbeitslast und das Kapazitätsangebot in einer Periode an einem Standort aggregiert über die Mitarbeiter aller Gewerke betrachtet. Würden alternativ die Arbeitslastabweichungskosten je Gewerk betrachtet werden, so würde dies nicht nur die Komplexität des Modells zur Einplanung erhöhen, sondern es müssten auch die Arbeitslasten je Gewerk bei der Generierung repräsentativer Szenarien berücksichtigt werden.

Die Arbeitszeiten der Mitarbeiter werden über Gleitzeitkonten erfasst, die ein gewisses Maß an Flexibilität bieten. Neben den Stammmitarbeitern können auch Leiharbeiter eingesetzt werden, die eingelernt werden müssen. Das vor der mittelfristigen Auftragsplanung festgelegte Kapazitätsangebot einer Periode an einem Standort wird durch das Kapazitätsangebot je Standort, Periode und Slot und die Anzahl an Slots einer Periode aller Linien eines Standorts bestimmt. Entsprechend wird vor der mittelfristigen Auftragsplanung die Anzahl an notwendigen Mitarbeitern eingeplant, wobei dabei bereits Abzüge für bspw. Urlaub und Fortbildungen berücksichtigt werden und direkt zusätzliche Mitarbeiter aufgrund erwarteter kurzfristiger Störungen eingeplant werden können. (A_Blättchen 2016, S. 68; A_Molzahn 2017, S. 19, S. 25 f., S. 36, S. 94; A_Schweizer 2017, S. 38)

Die Bepreisung der Arbeitslastabweichungen durch stückweise lineare Kostenfunktionen erfolgt für positive Abweichungen zwischen 0 % und 0,5 % je Standort mit dem Kostensatz für ausbezahlte Überstunden der Stammmitarbeiter und für positive Abweichungen über 0,5 % mit dem Kostensatz für Zeitarbeitsstunden von Leiharbeitern. Somit werden mittelfristig keine kostenlosen positiven Abweichungen ermöglicht, sodass ein Ausgleich der Arbeitszeitkonten der Stammmitarbeiter je Monat durch die mittelfristige Auftragseinplanung angestrebt wird. Für negative Abweichungen wird ein Kostensatz von null angesetzt. Durch die engen Flexibilitätsgrenzen soll erreicht werden, dass

die Flexibilität der Mitarbeiter sowohl für die Reihenfolgeplanung, für die Kapazitätsabweichungen je Arbeitstag betrachtet werden, als auch für kurzfristige Störungen vorbehalten wird. Zudem ist zu berücksichtigen, dass sich die relativen Abweichungen durch die aggregierte Betrachtung auf sämtliche Stammmitarbeiter beziehen, wobei die optionenbasierten Arbeitslasten hauptsächlich für Mitarbeiter im Kabinenbereich anfallen. Es wird davon ausgegangen, dass Leiharbeiter direkt nach der mittelfristigen Auftragsplanung noch rechtzeitig eingestellt und eingelernt werden können, jedoch nicht damit gewartet werden kann bis die Kunden ihre Aufträge komplett spezifiziert haben und die Reihenfolgenplanung erfolgt ist. Somit sind entsprechende Wandlungskosten bereits zum Zeitpunkt der mittelfristigen Auftragseinsparung zu tragen. Die standortspezifischen Kostensätze zur Wandlung bzw. Qualifizierung der Leiharbeiter basieren auf den Arbeitslohnkosten je Standort und der Länge des Qualifizierungszeitraums. (A_Kronenbitter 2017, S. 29 ff., S. 35 ff.; A_Molzahn 2017, S. 96 f., S. 134; A_Strunz 2017, S. 125)

Wird die obere Flexibilitätsgrenze durch hohe Arbeitslastabweichungen überschritten und wird mittelfristig keine bzw. keine ausreichende Wandlung zur Erweiterung der Grenze in Form einer Einstellung und Qualifizierung von Leiharbeitern getätigt, so ist mit Folgen und entsprechenden Folgekosten zu rechnen (A_Molzahn 2017, S. 97). Folgekosten bestehen für Samstagarbeiten der Stammmitarbeiter als unerwünschte Notmaßnahme, die eigentlich nicht in Anspruch genommen werden soll, jedoch in solchen Szenarien erfolgen könnte (vgl. Scholl 2001, S. 201). Als Kostensatz für Samstagarbeiten der Stammmitarbeiter wird der Kostensatz für Zeitarbeitsstunden von Leiharbeitern verwendet, sodass in beiden Fällen für positive Abweichungen über 0,5 % der gleiche Kostensatz für die Flexibilitätskosten gilt. Die darüber hinaus anfallenden Folgekosten sind analog zu den Flexibilitätskosten als linear abhängig von der Arbeitslast oberhalb der positiven Abweichungen von 0,5 % zu antizipieren, sodass kurzfristige Maßnahmen entsprechend der zu kompensierenden Überlast kostenseitig erfasst werden. Zur Kompensation umfassen diese die zusätzlich zu den Flexibilitätskosten anfallenden Kosten zur Abarbeitung der Überlast außerhalb der Linien auf Stellplätzen. Durch ein anderes Montagesystem auf den Stellplätzen entstehen Ineffizienzen und somit verlängerte Arbeitszeiten im Vergleich zu denselben Montagetätigkeiten innerhalb der Linien. Die Zeit zur Bewältigung der Überlast kann zudem zu einer Verzögerung der Auslieferung und somit zu Bestands- und Terminverzögerungskosten für die

betroffenen Aufträge, aber auch für andere Aufträge, deren Stellplätze durch die betroffenen Aufträge belegt werden, führen. Insgesamt sind die Folgekosten standortspezifisch und werden an den Standorten je Stunde Überlast bis zu fast acht Mal so hoch antizipiert wie die Wandlungskosten. Im Gegensatz zu den Wandlungskosten fallen die Folgekosten an einem Standort in den einzelnen Monaten szenarioabhängig und nicht nur einmal für alle drei Monate des Quartals szenariounabhängig an. (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 47 ff.)

Level-Scheduling-Kosten

Eine anteilig gleichmäßige Verteilung wird für die Produktmodelle zwischen den Monaten an den Standorten (Formel A-9) zur anteilig gleichmäßigen Bestellung der strukturgebenden, produktmodellabhängigen Teile bei den unternehmensinternen Zulieferstandorten angestrebt. Diese wird für die Produktmodelle A319 und A321 umgesetzt. Auf eine Berücksichtigung für die A320 wird verzichtet, sodass an keinem Standort eine anteilig gleichmäßige Verteilung aller hinsichtlich der Produktionsrestriktionen möglichen Produktmodelle erfolgt. Dadurch wird vermieden, dass Abweichungen eines Modells zusätzlich durch die dadurch bedingten Abweichungen aller anderen Modelle an einem Standort kostenseitig erfasst werden. Eine anteilig gleichmäßige Verteilung der Produktmodelle zwischen den Standorten wird nicht verfolgt, da das Produktmodell A321 nur in Hamburg gebaut werden kann, weshalb eine anteilig gleichmäßige Verteilung zwischen den Standorten dafür nicht relevant ist. Zudem kann das Produktmodell A319 zwar in Hamburg und Tianjin gebaut werden, jedoch ist eine anteilig gleichmäßige Verteilung zwischen den beiden Standorten nicht sinnvoll, da Hamburg bereits allein Slots für das Modell A321 aufbringt und je nach Nachfrage nicht genügend weitere Slots hat, um anteilig das Modell A319 produzieren zu können. Das Modell A320, das als einziges an allen drei Standorten gebaut werden kann, wird aufgrund der Produktionsrestriktionen der anderen Modelle ebenso nicht anteilig gleichmäßig zwischen den Standorten verteilt. Eine anteilig gleichmäßige Verteilung zwischen den Standorten ist somit aufgrund der Produktionsrestriktionen nicht sinnvoll, jedoch auch nicht zwingend notwendig, da jedes strukturgebende Teil an jeweils einem globalen Zulieferstandort produziert und von dort aus an alle Endmontagestandorte geliefert wird. Somit kann durch die anteilig gleichmäßige Verteilung der Produktmodelle A319 und A321 zwischen den Perioden an den Endmontagestandorten bereits ein gleichmäßiger Bedarf der strukturgebenden Teile an den Zulieferstandorten angestrebt werden. (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 38 f.; vgl. A_Molzahn 2017, S. 21, S. 94; vgl. A_Strunz 2017, S. 89)

Die Optionen der additiven Optionsgruppe Lackierung (11) werden sowohl zwischen Standorten (Formel A-12) als auch zwischen Perioden (Formel A-13) anteilig gleichmäßig verteilt. Durch die anteilig gleichmäßige Verteilung der Anzahl an Tagen zur Lackierung zwischen den Standorten soll auch für die Lackierung erreicht werden, dass die Lackierstationen an den verschiedenen Standorten anteilig gleichmäßig belastet werden. (A_Molzahn 2017, S. 94)

Die Option Erstversion der individuellen Optionsgruppe Erstversion (12) wird aufgrund des administrativen Mehraufwands (vgl. Buergin et al. 2018, S. 61) sowohl zwischen den Standorten (Formel A-10), an denen entsprechend der Produktionsrestriktionen Erstversionen gebaut werden können, als auch zwischen den Monaten (Formel A-11) anteilig gleichmäßig verteilt (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 84; vgl. A_Molzahn 2017, S. 94). Die anteilig gleichmäßige Verteilung zwischen den Standorten ist zu berücksichtigen, da der technische Mehraufwand direkt Mitarbeiter an den lokalen Endmontagestandorten und keine globalen Zulieferstandorte betrifft.

Indem für die Lackierung und die Erstversion ein arbeitslastorientiertes Level-Scheduling außerhalb der Endmontagelinien verfolgt wird, wird im Gegensatz zur detaillierten Betrachtung der Arbeitslastabweichungskosten der Endmontagelinien durch die Level-Scheduling-Kosten auf einen Abgleich mit dem Kapazitätsangebot verzichtet und lediglich eine anteilig gleichmäßige Verteilung der Nachfrage angestrebt. Diese erfolgt anteilig entsprechend der Slotanzahl, da implizit davon ausgegangen wird, dass die Bereiche außerhalb der Endmontagelinien entsprechend dem Arbeitskalender der Linien Kapazität anbieten und auch entsprechend belastet werden sollen. Durch den Verzicht der Betrachtung des konkreten bzw. detaillierten Kapazitätsangebots, ist jedoch die Festlegung der Kostensätze problematisch (vgl. Boysen 2005, S. 171). Ebenso ist die Bestimmung der Intervalle der stückweise linearen Kostenfunktionen zur Berechnung der Level-Scheduling-Kosten schwierig. Aus diesem Grund wird die Annahme getroffen, dass die anteilig gleichmäßige Verteilung dem Kapazitätsangebot entspricht, so dass darauf basierend Abweichungskosten möglichst realitätsnah erfasst werden können (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 39 f.).

Im Anwendungsfall werden ausschließlich für positive Abweichungen des vierten und des fünften Abschnitts der stückweise linearen Kostenfunktionen nach Formel A-7 positive Kostensätze betrachtet. Je Produktmodell werden für die beiden Abschnitte dieselben Kostensätze verwendet, wobei Abweichungen des Modells A321 aufgrund der höheren Arbeitslasten zur Produktion der entsprechenden strukturgebenden Teile an

den Zulieferstandorten mit einem höheren Kostensatz als die des Modells A319 versehen werden. Die absoluten Grenzen der Abschnitte werden nach der entsprechenden Slotanzahl standortspezifisch gewählt. Bezüglich Optionsgruppe 11 werden standortspezifische Kostensätze erhoben, wobei für den letzten Abschnitt in Hamburg und Toulouse eine externe Lackierung zu einem höheren Kostensatz in Anspruch genommen werden kann, wogegen dies in Tianjin nicht möglich ist und daher extrem hohe Kosten angesetzt werden. Wären die Optionen der Lackierung unsicher, so könnten in Tianjin anstelle der extrem hohen Kosten tatsächliche Flexibilitätskosten zur Kompensation ohne externe Lackierung verwendet werden. Für die anteilig gleichmäßige Verteilung der Erstversion von Optionsgruppe 12 werden die Grenzen und Kostensätze für die beiden relevanten Standorte Hamburg und Toulouse gleich festgelegt, wobei ein extrem hoher Kostensatz für den letzten Abschnitt verwendet wird, da hohe positive Abweichungen zu vermeiden sind. Es wird in allen Fällen $\beta = 1$ verwendet. (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 40 f., S. 183 f.; vgl. A_Molzahn 2017, S. 96)

Ergebnisse der Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk

Im Rahmen der folgenden Entscheidungsvalidierung wird zunächst die Bestimmung einer Standardvariante des Erwartungswertmodells und einer des Szenarienmodells begründet, woraufhin ein Vergleich mit weiteren Modellvarianten durchgeführt wird. Bei sämtlichen der 128 Aufträge des 2. Quartals 2015 wird für die Standardvarianten auf Basis der vorliegenden Daten von Quartalsverträgen ausgegangen, sodass in den entsprechenden Auswertungen keine Bestandskosten und keine Terminverzögerungskosten anfallen. Eine zusätzliche Auswertung, bei der alle Aufträge als Monatsverträge betrachtet werden, zeigt, dass Bestandskosten und Terminverzögerungskosten sowie im Vergleich zu Quartalsverträgen höhere Standortabweichungskosten, Arbeitslastabweichungskosten und Level-Scheduling-Kosten aufgrund des vorgegebenen Periodenbezugs anfallen (Tabelle A6 Spalten 1 und 2). Bei einer Auswertung mit einem Drittel Quartalsverträgen und zwei Drittel Monatsverträgen im Vergleich zu ausschließlich Quartalsverträgen sind die Gesamtkosten nur geringfügig höher (Tabelle A6 Spalten 1 und 3). (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 84 f.; vgl. A_Molzahn 2017, S. 93, S. 116 f.)

Die Auswertungen der Standardvarianten zeigen, dass die materialbezogenen Eingangskosten mit ungefähr 99,99% einen Großteil der Gesamtkosten ausmachen (Tabelle A6 Spalte 1, Tabelle A7 Spalte 1). Diese können im Rahmen der Zuordnung jedoch ausschließlich hinsichtlich der standortabhängigen Kosten von Optionsgruppe 11

beeinflusst werden und variieren lediglich durch die Standortzuordnung, da keine Änderungen der materiabezogenen Eingangskosten zwischen den Monaten betrachtet werden. Bei einer Optimierung ausschließlich der einzelauftragsbezogenen Kosten können diese und die darin inbegriffenen materialbezogenen Eingangskosten im Vergleich zur Optimierung der Gesamtkosten weiter reduziert werden, wogegen jedoch höhere Arbeitslastabweichungskosten, zusätzliche Folgekosten für Arbeitslastabweichungen und hohe Level-Scheduling-Kosten anfallen (Tabelle A6 Spalte 4). Letztere nehmen aufgrund fiktiv extrem hoch gesetzter Kosten für hohe Abweichungen hohe Werte an. Aufgrund der Folgekosten bezüglich der Arbeitslastabweichungen gilt die Lösung als unzulässig. (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 87 f.; vgl. A_Molzahn 2017, S. 114 ff.)

Werden die materialbezogenen Eingangskosten bei der Optimierung dagegen außen vor gelassen, so fallen sowohl diese als auch die Gesamtkosten höher als bei der Optimierung der Gesamtkosten aus, wogegen jedoch die Arbeitslastabweichungskosten weiter reduziert werden können (Tabelle A6 Spalte 5). Aus diesem Grund erscheint es hinsichtlich sämtlicher Ziele des Lösungsansatzes sinnvoll, die materialbezogenen Eingangskosten in der Optimierung auch trotz ihres beschränkten Optimierungspotentials zu berücksichtigen. Hinsichtlich der nachfolgenden Auswertungen der Arbeitslastabweichungskosten ist daher zu betonen, dass deren Optimierung aufgrund der anderen Kostenterme der Zielfunktion nur anteilig zum Tragen kommt und diese somit höher ausfallen, als wenn nur danach optimiert werden würde (Tabelle A6 Spalte 6). Aufgrund des hohen Anteils der materialbezogenen Eingangskosten an den Gesamtkosten fallen die relativen Werte der anderen Kostenterme in den folgenden Auswertungen sehr gering aus. Letztere sind jedoch aufgrund ihrer hohen absoluten Werte durchaus betrachtungsrelevant. (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 86 f., S. 88 f.; vgl. A_Molzahn 2017, S. 114 ff., S. 121 f.)

Es bleibt somit festzuhalten, dass im betrachteten Anwendungsfall zwar nicht für alle Kostenterme der Zielfunktion Kosten anfallen, jedoch sämtliche Kostenterme in der Standardvariante des Erwartungswertmodells und in der des Szenarienmodells berücksichtigt werden. Hinsichtlich des Szenarienmodells wird im Folgenden basierend auf den Erläuterungen zur Szenariengenerierung in Kapitel 5.2.1 dargelegt, weshalb 200R&W bei abhängiger Optionenwahl in der Standardvariante betrachtet wird.

Szenarien der Standardvariante des Szenarienmodells

Im Rahmen der Szenariengenerierung wurde bereits dargelegt, dass die maximale Arbeitslast und auch die Spannweite der Arbeitslasten bei abhängiger Optionenwahl geringer als bei unabhängiger Optionenwahl ausfallen. Dies zeigt sich auch bei der Auftragseinplanung, bei der die maximalen Arbeitslastabweichungskosten bei unabhängiger Optionenwahl mit 757,16 % höher als bei abhängiger Optionenwahl mit 440,93 % bezogen auf die erwarteten Arbeitslastabweichungskosten der Standardvariante sind (Tabelle A7 Spalten 1 und 2). Um keine höhere maximale Arbeitslast als diejenige, die direkt auf den Auftragskonfigurationen der Datenbasis beruht, im Worst-Case-Szenario und um insgesamt ausschließlich realistische Auftragskonfigurationen für die Kunden und Produktmodelle entsprechend der Datenbasis zu berücksichtigen, wird die abhängige Optionenwahl für die Standardvariante des Szenarienmodells verwendet.

Aufgrund der geringen kumulierten Wahrscheinlichkeiten von 200 Szenarien wird zur Untersuchung der Informationsrobustheit des Szenarienmodells das Verhalten der Lösung der optimierten Auftragseinplanung unter den 200 Ausgangsszenarien unter dem höheren Informationsstand von 5000 zufälligen Szenarien analysiert (A_Strunz 2017, S. 130; vgl. Scholl 2001, S. 277). Bei unabhängiger Optionenwahl beträgt die kumulierte Wahrscheinlichkeit der 5000 zufälligen, unabhängigen Szenarien $2,92 \times 10^{-28}$ und bei abhängiger Optionenwahl der 5000 zufälligen, abhängigen Szenarien $3,14 \times 10^{-13}$ (Tabelle A9 Spalten 1 und 3). Ebenso wie bei den 200 Szenarien der Optimierung wird bei den 5000 Szenarien bei abhängiger Optionenwahl somit ein höherer Informationsstand berücksichtigt als bei unabhängiger Optionenwahl. Trotz des höheren Informationsstands von 5000 gegenüber 200 Szenarien ist auch dieser im Vergleich zum Informationsstand aller relevanter Szenarien, der nicht in akzeptabler Rechenlaufzeit abgebildet werden kann, sehr gering (A_Strunz 2017, S. 130). Ein Vergleich der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Gesamtkosten und der Arbeitslastabweichungskosten der Lösung der Standardvariante des Szenarienmodells unter den 5000 Szenarien zu der Lösung unter 5000 anderen Szenarien zeigt, dass diese ähnlich verlaufen (Abbildung A12, Abbildung A13). Die erwarteten Gesamtkosten weichen mit 100,0227 % von denen 5000 anderer Szenarien mit 100,0210 % um 0,0017 % ab und die erwarteten Arbeitslastabweichungskosten betragen jeweils rund 0,0062 % (Tabelle A9 Spalten 1 und 2). Aufgrund der Abhängigkeit der Gesamtkosten von den betrachteten 5000 Szenarien sollte bei Bewertungen der Informationsrobustheit hinsichtlich 200 Ausgangsszenarien gegenüber den 5000 Szenarien berücksichtigt werden, dass Kostenabweichungen auch

darin begründet sein können, dass durch 5000 Szenarien nicht alle relevanten Szenarien abgebildet werden. Zur Vergleichbarkeit der Modellvarianten werden daher unter Verwendung von Zufallszahlen identische 200 bzw. 5000 Szenarien mit abhängiger Optionenwahl und repräsentativer bzw. zufälliger Abbildung der Arbeitslasten generiert (A_Kronenbitter 2017, S. 53 f.).

Eine Begründung der Auswahl von 200R&W mit repräsentativen Arbeitslasten bei abhängiger Optionenwahl als Standardvariante im Vergleich zu 200Z&W mit zufälligen Szenarien und 500R&W mit 500 anstelle von 200 Ausgangsszenarien bei der Optimierung erfolgt in Anhang A9.

Vergleich der Ergebnisse des Szenarienmodells, des Erwartungswertmodells und der realen Einplanung bei Airbus

Grundlegend ist der Vergleich des Erwartungswertmodells mit dem Szenarienmodell. Hierzu wird im Folgenden die Standardvariante des Erwartungswertmodells mit der Standardvariante des Szenarienmodells (200R&W bei abhängiger Optionenwahl) verglichen. Als zusätzlicher Vergleich dient die reale Einplanung, wie sie für das betrachtete Quartal bei Airbus erfolgte.

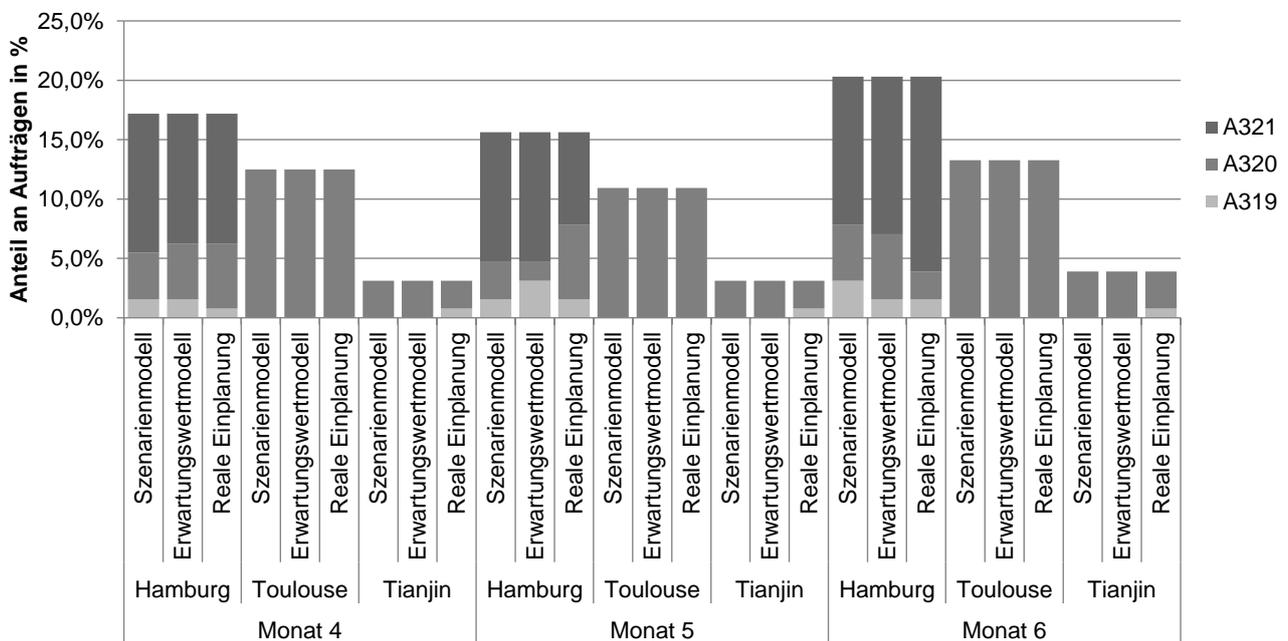


Abbildung 5.4: Zuordnung der Aufträge nach Produktmodellen zu Standorten und Monaten (A_Kronenbitter 2017, S. 139)

Die Zuordnungen zu Standorten und Monaten sind für das Szenarienmodell, das Erwartungswertmodell und die reale Einplanung in Abbildung 5.4 dargestellt. Die Zuordnungen zu den Standorten sind für 96,88 % der Aufträge nach der Standardvariante

des Szenarienmodells und der Standardvariante des Erwartungswertmodells identisch, jedoch werden lediglich 37,50 % der Aufträge den gleichen Standorten und Monaten zugeteilt (Tabelle A11). Die Freiheitsgrade der Standortzuordnungen sind aufgrund der Produktionsrestriktionen an den Standorten im Gegensatz zu den Monatszuordnungen der Quartalsverträge eingeschränkt und es besteht bei den Standortzuordnungen aufgrund der Standortabweichungskosten zudem ein Einfluss auf den Zielfunktionsterm (vgl. A_Molzahn 2017, S. 109, S. 120; A_Strunz 2017, S. 160). Größere Unterschiede der Zuordnungen zeigt ein Vergleich der Zuordnungen nach dem Szenarienmodell mit den realen Zuordnungen, wobei 80,47 % der Aufträge den gleichen Standorten und 29,69 % der Aufträge den gleichen Standorten und Monaten zugeordnet werden (Tabelle A11). Im Gegensatz zum Optimierungsmodell, in dem für das Produktmodell A321 je Monat eine Sequenzierungsregel berücksichtigt wird, ist deren Einhaltung für die realen Zuordnungen nicht in jedem Monat gegeben (Tabelle A12).

Das Szenarienmodell beruht auf dem Informationsstand der 200 Szenarien und das Erwartungswertmodell auf Erwartungswerten basierend auf dem kompletten Informationsstand. Ein Vergleich der beiden Modelle erfolgt unter 200 Szenarien, da ein Vergleich unter Erwartungswerten zwar den gesamten Informationsstand berücksichtigen, jedoch die Streuung der szenarioabhängigen Variablen vernachlässigen würde. Somit wird die Lösung der Standardvariante des Erwartungswertmodells unter den 200 Szenarien der Standardvariante des Szenarienmodells, also 200R&W bei abhängiger Optionenwahl, betrachtet und das entsprechende *erwartete Ergebnis der Lösung des deterministischen Erwartungswertmodells (expected result of using the expected value solution, EEV)* ermittelt. Da bei der Lösung des Erwartungswertmodells Wandlungskosten zur Erweiterung des Flexibilitätskorridors entsprechend der erwarteten Arbeitslastabweichungen und nicht entsprechend der Arbeitslastabweichungen der Szenarien berücksichtigt werden, wird bei Planung nach dem Erwartungswertmodell im Gegensatz zur Planung nach dem Szenarienmodell keine Zulässigkeit aller Szenarien bzw. insbesondere des Worst-Case-Szenarios und somit keine Zulässigkeitsrobustheit durch eine Wandlung mit entsprechenden Wandlungskosten erreicht. Für eigentlich unzulässige Szenarien werden zur Berechnung des EEV für Abweichungen außerhalb des Flexibilitätskorridors Folgekosten berücksichtigt.

Ebenso wie unter den 200 Ausgangsszenarien kann ein Vergleich unter den 5000 Szenarien mit der Berücksichtigung von Folgekosten für das Erwartungswertmodell erfolgen. Für das Szenarienmodell fallen keine Folgekosten an, jedoch werden unter 5000

Szenarien die Wandlungskosten der Optimierung unter 200 Szenarien angesetzt, da diese zum Zeitpunkt der Einplanung zur Zulässigkeitsrobustheit hinsichtlich der maximalen Arbeitslast anfallen. Für die reale Zuordnung werden keine Wandlungskosten zum Zeitpunkt der Einplanung, sondern Folgekosten bei Überschreiten des Flexibilitätskorridors sowohl unter 200 als auch unter 5000 Szenarien berücksichtigt. Die Vergleiche werden unter 200 Szenarien in Abbildung 5.5 und unter 5000 Szenarien in Abbildung A20 veranschaulicht.

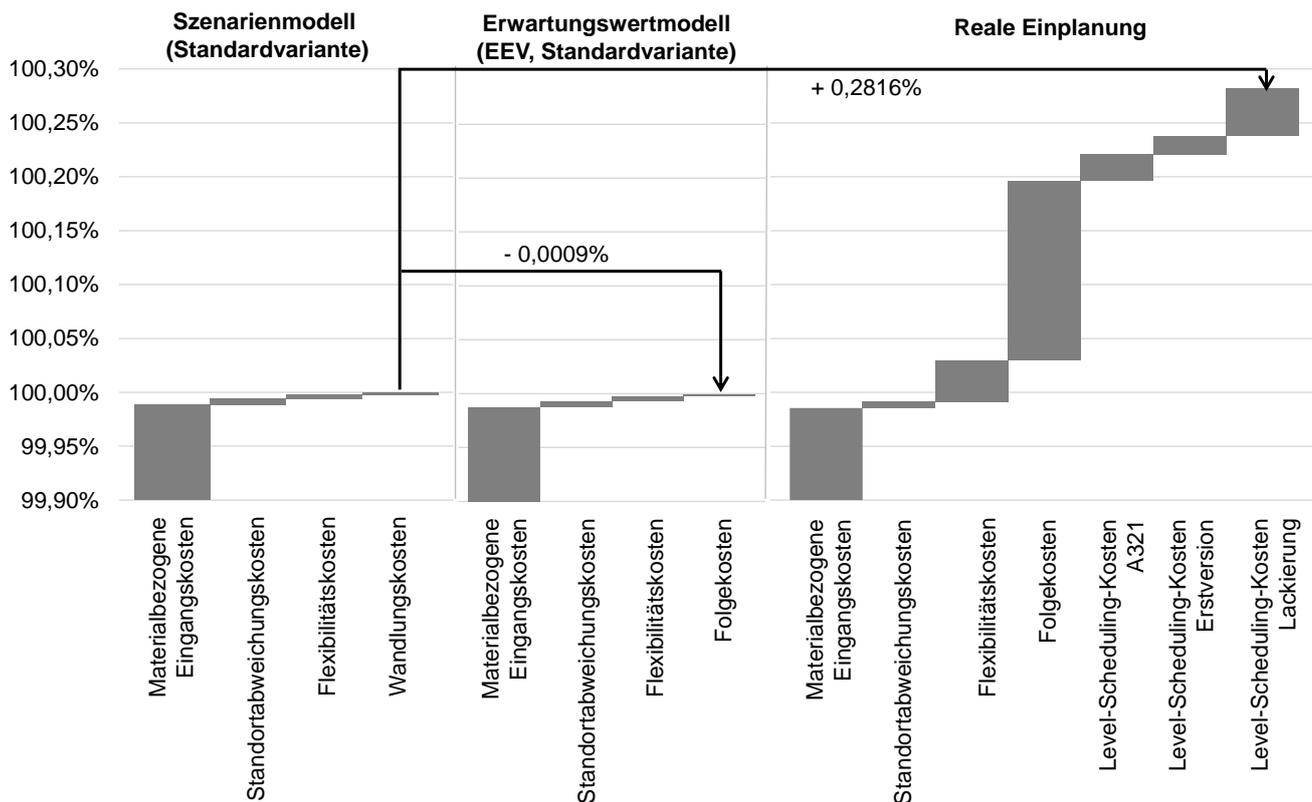


Abbildung 5.5: Gesamtkosten der Auftragseinplanung des Szenarienmodells, des Erwartungswertmodells und der realen Einplanung unter 200 Ausgangsszenarien (Tabelle A7, Tabelle A8)

Unter den 200 Szenarien der Optimierung schneidet das EEV um 0,0009 % besser als das Szenarienmodell ab (Abbildung 5.5), wogegen es unter 5000 Szenarien mit 100,0227 % im Rundungsbereich gleich abschneidet (Abbildung A20; A_Kronenbitter 2017, S. 148, S. 156, S. 176). Aufgrund der Robustheit des Szenarienmodells mit Wandlungskosten zur Absicherung gegen das Worst-Case-Szenario gegenüber erwarteten szenarioabhängigen Folgekosten des EEV, ist jedoch ein vereinfachter Vergleich der beiden Modelle anhand der Gesamtkosten nur eingeschränkt möglich. Die Folgekosten des EEV fallen durch die Erwartungswertbetrachtung entsprechend der Wahr-

scheinlichkeiten der Szenarien aus und spiegeln somit nicht die Risikoscheu bzw. Risikoaversion der robusten Planung wider (vgl. A_Strunz 2017, S. 177). Folgekosten fallen im EEV mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,28 % und in der Lösung des Erwartungswertmodells unter 5000 Szenarien mit einer Wahrscheinlichkeit von 56,80 % an, was auf eine entsprechend schlechte Zulässigkeitsrobustheit schließen lässt (Tabelle A7 Spalte 5, Tabelle A10 Spalte 1). Konkret bedeutet dies, dass antizipativ zu 68,28 % bzw. 56,80 % Samstagsarbeiten notwendig sind, die eine unerwünschte Notmaßnahme darstellen. Ein alternativer Vergleich des Szenarienmodells mit dem EEV kann anhand einer identischen Formulierung der beiden Modelle erfolgen, indem Wandlungskosten anstelle der Folgekosten im EEV und somit in beiden Modellen berücksichtigt werden. Ein solcher theoretischer Vergleich zeigt, dass der *Wert der stochastischen Lösung* (*value of the stochastic solution, VSS*) 0,0013 % beträgt und somit der Mehrwert des Szenarienmodells ersichtlich ist, was unter anderem darauf zurückzuführen ist, dass anstelle der Folgekosten in Höhe von 0,0016 % Wandlungskosten in Höhe von 0,0038 % anfallen würden (A_Kronenbitter 2017, S. 151 f., S. 175 f.).

Gegenüber der realen Einplanung schneidet das Szenarienmodell unter den 200 Szenarien um 0,2816 % besser (Abbildung 5.5, Tabelle A8 Spalte 1) und unter den 5000 Szenarien um $(100,3007 \% - 100,0227 \% =) 0,2780 \%$ besser ab (Abbildung A20, Tabelle A9 Spalte 1, Tabelle A10 Spalte 2). Der Größenbereich der Unterschiede liegt hierbei nicht wie beim Vergleich der Ergebnisse der beiden Optimierungsmodelle zuvor auf der dritten bzw. vierten, sondern auf der ersten prozentualen Nachkommastelle. Die Wahrscheinlichkeit der Unzulässigkeit beträgt bei der realen Einplanung sowohl unter 200 als auch unter 5000 Szenarien 100 %, womit die Zulässigkeitsrobustheit definitiv nicht gegeben ist (Tabelle A8 Spalte 1, Tabelle A10 Spalte 2). Somit liefern sowohl das Szenarienmodell als auch das Erwartungswertmodell unter den dargelegten Modellannahmen bessere Ergebnisse als die reale Einplanung.

Kosten aufgrund der Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen

Würde keine Unsicherheit der Auftragskonfigurationen bestehen, so könnte das eingetretene Szenario einzeln optimiert werden, sodass lediglich entsprechend notwendige Wandlungskosten berücksichtigt werden. Werden sämtliche 200 Szenarien einzeln optimiert, so ergibt sich im Vergleich zum Szenarienmodell ein *erwarteter Wert der vollständigen Information* (*expected value of perfect information, EVPI*) von $(100 \% - 99,9969 \% =) 0,0031 \%$ (A_Kronenbitter 2017, S. 136, S. XXIV). Unter den 5000 Szenarien beträgt der EVPI $(100,0227 \% - 100,0190 \% =) 0,0037 \%$ (A_Kronenbitter 2017,

S. XXIV). Die relativen Regretwerte liegen nach Abbildung 5.6 für die einzeloptimierten 200 Szenarien zwischen 0,0019 % und 0,0095 % (A_Kronenbitter 2017, S. 132). Ein Vergleich der jeweils szenariooptimalen Zuordnungen der 200 Szenarien mit den Zuordnungen des Szenarienmodells zeigt, dass die Zuordnungen zu Standorten für durchschnittlich 92,63 % der Aufträge und die Zuordnungen zu Standorten und Monaten für durchschnittlich 31,23 % der Aufträge identisch sind (A_Kronenbitter 2017, S. 134 f.).

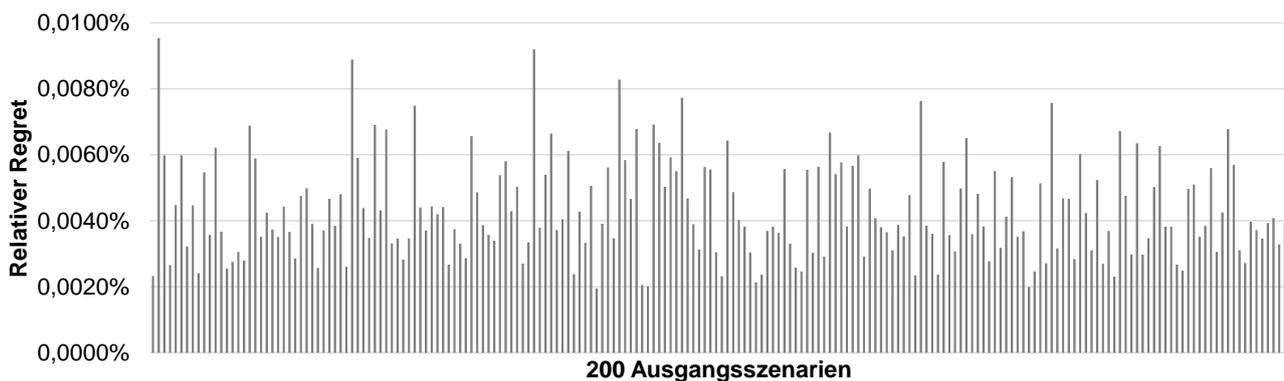


Abbildung 5.6: Relativer Regret je Ausgangsszenario des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 133)

Der EVPI entspricht den erwarteten Kosten, die durch die Unsicherheit der Auftragskonfigurationen aufgrund der Just-in-Time-Spezifikation anfallen. Diese könnten durch eine Spezifikation der Auftragskonfigurationen bis zum Zeitpunkt der Auftragseinplanung und eine entsprechende Optimierung unter sicheren Auftragskonfigurationen eingespart werden (vgl. Buergin et al. 2018, S. 73). Jedoch ist der EVPI um zwei Größenordnungen geringer als die Kosten, die zusätzlich bei der realen Einplanung im betrachteten Quartal bestehen und somit durch die Optimierung erwartungsgemäß eingespart werden können.

Ergebnisse der einzelauftragsbezogenen Kosten und Auftragsabstandskosten

Im Szenarienmodell betragen die einzelauftragsbezogenen Kosten 99,9943 %, im Erwartungswertmodell (EEV) 99,9933 % und in der realen Einplanung 99,9912 % (Tabelle A7 Spalten 1 und 5, Tabelle A8 Spalte 1). Die materialbezogenen Eingangskosten machen jeweils den Großteil davon aus und der Rest fällt jeweils in Höhe von 0,0057 % durch Standortabweichungskosten an (Tabelle A7 Spalten 1 und 5, Tabelle A8 Spalte 1). Auftragsabstandskosten können vermieden werden (Tabelle A7 Spalten 1 und 5, Tabelle A8 Spalte 1). Zur genaueren Analyse kann der Auftragsabstandsindikator als die Anzahl der Aufträge eines Kunden in einem Monat bezogen auf die Anzahl der

maximal möglichen Auslieferungen an den einen Kunden in demselben Monat angegeben werden (vgl. A_Molzahn 2017, S. 104). In Abbildung 5.7 sind die absoluten Häufigkeiten der klassierten Abstandsindikatoren der Kunden und Monate über 0,5 angegeben, wobei ersichtlich ist, dass sowohl in beiden Modellvarianten als auch in der realen Einplanung Abstandsindikatoren nahe an der Grenze von 1,00 auftreten. Bei Überschreiten der Grenze würden Auftragsabstandskosten anfallen.

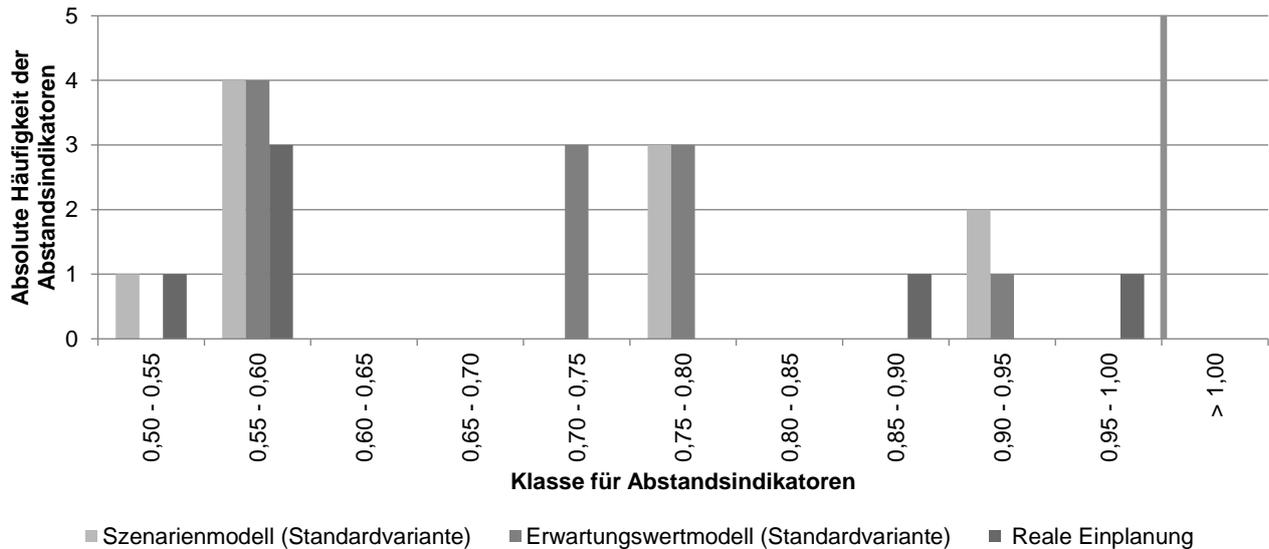


Abbildung 5.7: Absolute Häufigkeiten der Auftragsabstandsindikatoren der Kunden und Monate über 0,5 (A_Kronenbitter 2017, S. 142)

Ergebnisse der Arbeitslastabweichungskosten

Da im Szenarienmodell bei der Optimierung Szenarien und entsprechende Wandlungskosten betrachtet werden und im Erwartungswertmodell bei der Optimierung Erwartungswerte verwendet werden und von Folgekosten hinsichtlich der Szenarien ausgegangen wird, bestehen erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Robustheit der Auftragseinplanung nach dem Erwartungswertmodell und dem Szenarienmodell. Um die Unterschiede im Rahmen der Entscheidungsvalidierung weiter zu verdeutlichen und den Mehrwert des robusten Szenarienmodells gegenüber dem Erwartungswertmodell darzustellen, wird im Folgenden die Ergebnisstabilität unter den einzelnen Szenarien explizit betrachtet (vgl. A_Strunz 2017, S. 178). Im Vergleich zu den Gesamtkosten sind die Arbeitslastabweichungskosten und insbesondere die Flexibilitätskosten unter den einzelnen Szenarien viel weniger stabil (Abbildung A21, Abbildung A22, Abbildung A23) (vgl. A_Strunz 2017, S. 167 f.). Die Arbeitslastabweichungskosten betragen im Szenarienmodell 0,0057 % der Gesamtkosten und setzen sich aus den Flexibilitätskosten von 0,0038 % und den Wandlungskosten von 0,0019 % zusammen (Tabelle A7

Spalte 1). Im Erwartungswertmodell (EEV) entsprechen 0,0042 % den Arbeitslastabweichungskosten und somit den Flexibilitätskosten (Tabelle A7 Spalte 5). Die Flexibilitätskosten fallen somit im Erwartungswertmodell höher als im Szenarienmodell aus, was darauf zurückzuführen ist, dass bei der Optimierung nach dem Erwartungswertmodell nicht die Arbeitslastabweichungen der einzelnen Szenarien durch die stückweise linearen Kostenfunktionen in der Zielfunktion berücksichtigt werden. Neben den Flexibilitätskosten fallen im Erwartungswertmodell 0,0016 % Folgekosten an (Tabelle A7 Spalte 5), sodass insgesamt 0,0058 % Kosten aufgrund von Arbeitslastabweichungen entstehen und somit die Arbeitslastabweichungskosten des Szenarienmodells knapp übertreffen. Folgekosten fallen in den betrachteten Szenarien für das Erwartungswertmodell (EEV) mit der Unzulässigkeitswahrscheinlichkeit von rund 68 % an (Tabelle A7 Spalte 5), wogegen im Szenarienmodell die Wandlungskosten von 0,0019 % zum Zeitpunkt der Auftragseinplanung für sämtliche Szenarien getragen werden und höher als die Folgekosten des EEV von 0,0016 % ausfallen (Tabelle A7 Spalten 1 und 5). Die Folgekosten betragen jedoch lediglich im Erwartungswert 0,0016 % und können je nach Szenario bis zu 0,0357 % betragen und somit die über die Szenarien konstanten Wandlungskosten von 0,0019 % bei weitem übertreffen (Tabelle A7 Spalten 1 und 5).

Da die Wandlungskosten als Absicherung für alle Szenarien konstant anfallen, wird dadurch in einzelnen Szenarien mehr Flexibilität als notwendig geschaffen. Jedoch sind im Erwartungswert über die 200 Szenarien bereits Wandlungskosten von 0,0014 % erforderlich (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 92 f.). Dies ist darauf zurückzuführen, dass nach dem Szenarienmodell am Standort Tianjin für das gesamte Quartal Wandlungskosten zur Erweiterung der oberen Flexibilitätsgrenze von 0,5 % auf 0,84 % entsprechend der maximalen Arbeitslastabweichung in Monat 4 getragen werden (Tabelle A13). Aufgrund dieser Wandlung liegen die Arbeitslastabweichungen in sämtlichen Szenarien in Tianjin in Monat 4 über 0,5 % und betragen in einigen Szenarien mit einer Wahrscheinlichkeit von 10,97 % sogar 0,84 % wie für das Worst-Case-Szenario (Abbildung 5.9, A_Kronenbitter 2017, S. 93). Somit werden bezogen auf die einzelnen Szenarien Wandlungskosten nur teilweise oder überhaupt nicht zu viel bezahlt (Abbildung A24).

Auch unter 5000 Szenarien wird die geschaffene Flexibilität im Szenarienmodell am Standort Tianjin in Monat 4 bis zur vollen Höhe von 0,84 % ausgenutzt (Tabelle A14). Unter 5000 Szenarien zeigt sich, dass die Folgekosten für das Erwartungswertmodell

im Erwartungswert 0,0029 % betragen (Tabelle A10 Spalte 1) und somit sogar wesentlich über den Folgekosten des Erwartungswertmodells unter 200 Szenarien in Höhe von 0,0016 % liegen (Tabelle A7 Spalte 5). Dies zeigt eine mangelnde Informationsrobustheit des Erwartungswertmodells bezüglich der Ergebnisrobustheit hinsichtlich der Ergebnishöhe der Folgekosten auf (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 161). Die Folgekosten im Erwartungswertmodell unter 5000 Szenarien übertreffen mit 0,0029 % bereits die anfallenden Wandlungskosten des Szenarienmodells für das Worst-Case-Szenario in Höhe von 0,0019 % (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 161).

Die Verteilungen der Folgekosten für die Zuordnung des Erwartungswertmodells und der realen Zuordnung unter 5000 Szenarien in Abbildung 5.8 zeigen, dass die Folgekosten des Erwartungswertmodells zu $(100\% - 82,27\% =) 17,73\%$ und diejenigen der realen Einplanung zu 100 % höher als die Wandlungskosten des Szenarienmodells ausfallen (A_Kronenbitter 2017, S. 162). Die Entscheidungsvalidierung zeigt für den Anwendungsfall somit, dass durch das Szenarienmodell im Vergleich zum Erwartungswertmodell bei ähnlicher Ergebnishöhe der Gesamtkosten und der arbeitslastbezogenen Kosten eine höhere Ergebnisstabilität und somit Ergebnisrobustheit hinsichtlich der Wandlungskosten gegenüber den Folgekosten erreicht wird. Des Weiteren wird auf die Entscheidungsvalidierung bezüglich des Zusammenspiels von Flexibilitäts- und Wandlungskosten des Szenarienmodells eingegangen.

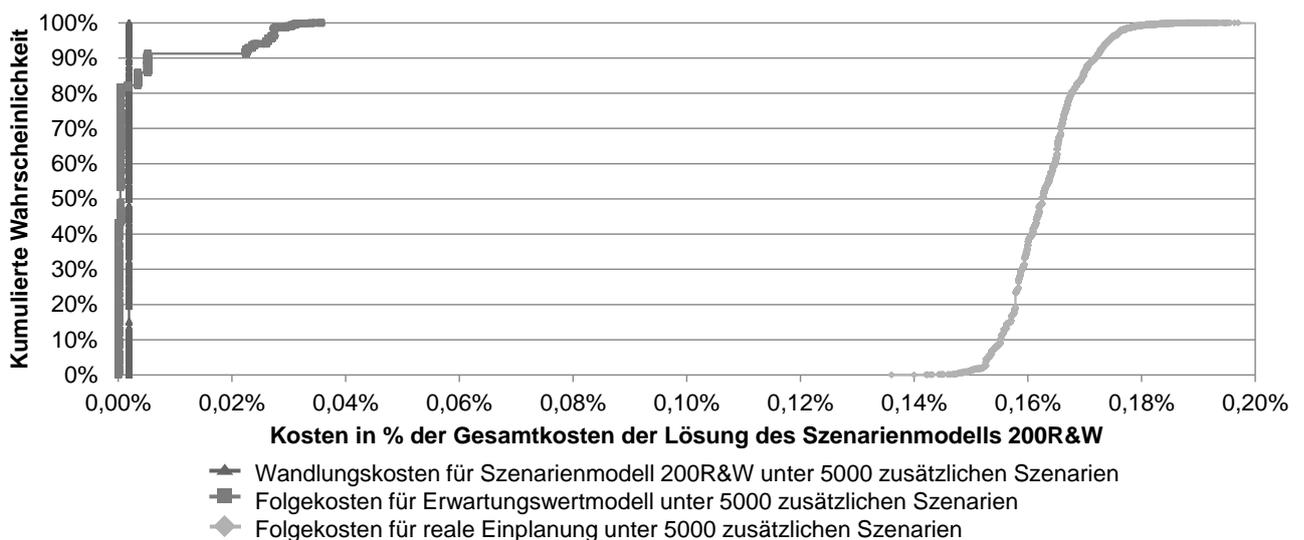


Abbildung 5.8: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Wandlungskosten des Szenarienmodells sowie der Folgekosten des Erwartungswertmodells und der realen Einplanung unter 5000 Szenarien (A_Kronenbitter 2017, S. 163)

Werden die Wandlungskosten im Szenarienmodell in der Modellvariante ohne Wandlungskosten nicht und somit nur die Flexibilitätskosten als Arbeitslastabweichungskosten bei der Optimierung berücksichtigt, sondern nachträglich berechnet, so betragen diese 0,0038 % und die Arbeitslastabweichungskosten insgesamt 0,0078 % (A_Kronenbitter 2017, S. XXVIII). Diese sind somit beträchtlich höher als die Arbeitslastabweichungskosten von 0,0057 % in der Standardvariante. Eine Betrachtung der Arbeitslastabweichungen je Standort und Monat der beiden Modellvarianten mit und ohne Wandlungskosten in Abbildung 5.9 zeigt, dass ohne Berücksichtigung der Wandlungskosten am Standort Tianjin in Monat 4 eine maximale Arbeitslastabweichung in Höhe von 1,19 % auftritt (Tabelle A13). Dagegen wird der Flexibilitätskorridor in Tianjin durch Wandlungskosten im Rahmen der Optimierung der Standardvariante für das gesamte Quartal entsprechend der maximalen Arbeitslastabweichung von 0,84 % in Monat 4 erhöht, sodass es in Monat 4 zu einer Abweichung bis zu maximal dieser Höhe und in Monat 6 zu einer Abweichung bis zu maximal 0,57 % kommt (Tabelle A13). Dagegen treten in der Modellvariante ohne Wandlungskosten Arbeitslastabweichungen über 0,5 % lediglich in Monat 4 und keinem weiteren Monat auf (Tabelle A13). Die Entscheidungsvalidierung zeigt somit, dass durch die Wandlungskosten im Optimierungsmodell eine höhere Ergebnisstabilität und somit Ergebnisrobustheit hinsichtlich der Arbeitslastabweichungen erreicht wird. So kann im Anwendungsfall die maximale Arbeitslastabweichung von 1,19 % in Tianjin in Monat 4 auf 0,84 % reduziert werden. Die Arbeitslastabweichungen sind für 200 Szenarien in Tabelle A13 und für 5000 Szenarien in Tabelle A14 aufgeführt.

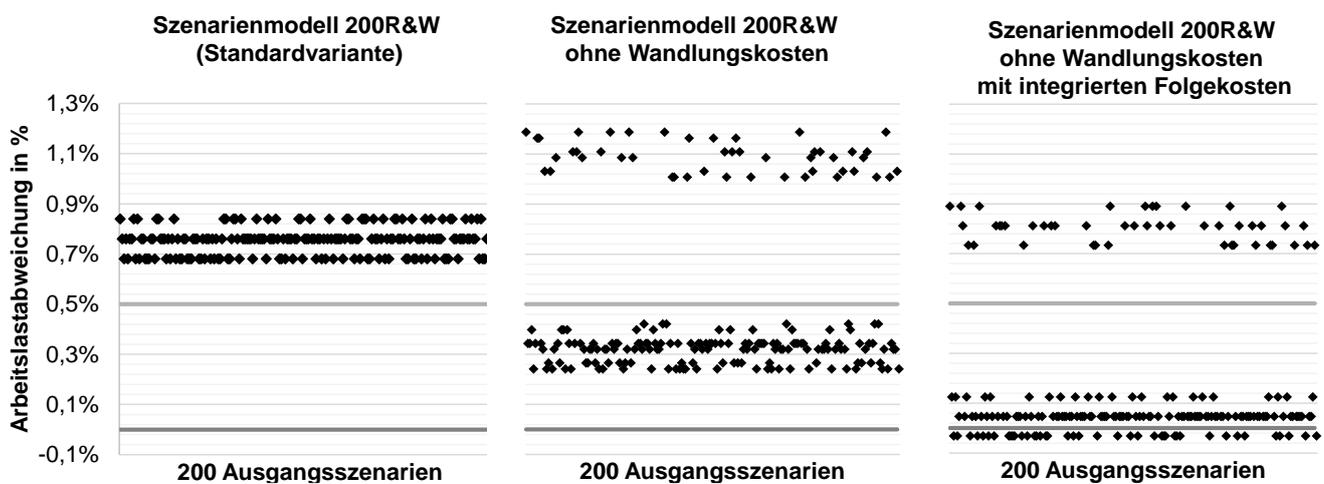


Abbildung 5.9: Arbeitslastabweichungen am Standort Tianjin in Monat 4 je Ausgangsszenario des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 124 f.)

Eine Modellvariante zwischen der Standardvariante und der Variante ohne Wandlungskosten, ist die Modellvariante, bei der anstelle der Wandlungskosten Folgekosten in der Optimierung berücksichtigt werden, indem diese im Optimierungsmodell zu dem Kostensatz der Flexibilitätskosten oberhalb der oberen Flexibilitätsgrenzen von 0,5 % addiert werden. Die Lösung dieser Modellvariante führt zu erwarteten Folgekosten von 0,0005 %, sodass insgesamt Arbeitslastabweichungskosten und Folgekosten von $(0,0033 \% + 0,0005 \% =) 0,0038 \%$ anfallen und somit die Arbeitslastabweichungskosten der Standardvariante von 0,0057 % unterschreiten (Tabelle A7 Spalte 1, Tabelle A8 Spalte 3). Jedoch können allein die Folgekosten maximal bis zu 0,0173 % betragen und somit die Wandlungskosten der Standardvariante von 0,0019 % um ein Vielfaches übertreffen (Tabelle A7 Spalte 1, Tabelle A8 Spalte 3). Im Vergleich zum Erwartungswertmodell (EEV) können jedoch niedrigere erwartete und maximale Folgekosten mit einer viel geringeren Wahrscheinlichkeit der Unzulässigkeit von 3,55 % gegenüber 68,28 % hinsichtlich der unerwünschten Notmaßnahme erreicht werden (Tabelle A7 Spalte 5, Tabelle A8 Spalte 3). Ein Vergleich der Arbeitslastabweichungen in Abbildung 5.9 zeigt, dass durch Berücksichtigung der Folgekosten eine maximale Arbeitslastabweichung von über 0,5 % lediglich in Tianjin in Monat 4 in Höhe von 0,89 % erreicht wird (Tabelle A13). Diese ist somit niedriger als in der Variante ohne Wandlungskosten mit 1,19 %, jedoch höher als in der Standardvariante in Höhe von 0,84 % (Tabelle A13). Werden keine Wandlungskosten berücksichtigt, so kann die Integration von Folgekosten in das Optimierungsmodell nicht nur zu einer Reduktion der maximalen Arbeitslastabweichung, sondern ebenso zu einer Reduktion der Summe der erwarteten positiven Arbeitslastabweichungen führen (Tabelle A13, Tabelle A14). Jedoch sind Wandlungskosten im Optimierungsmodell erforderlich, um maximale Abweichungen durch entsprechende Kosten für Qualifizierungsmaßnahmen möglichst gering zu halten und somit eine höhere Ergebnisstabilität zu garantieren, indem eine höhere bzw. schlechtere Ergebnishöhe aufgrund der Wandlungskosten in Kauf genommen wird. Die Ergebnisvalidierung hat somit gezeigt, dass durch die Berücksichtigung von Flexibilitäts- und Wandlungskosten im Optimierungsmodell Ergebnisrobustheit hinsichtlich Arbeitslastabweichungen erreicht werden kann.

Ergebnisse der Level-Scheduling-Kosten

Level-Scheduling-Kosten können in der Standardvariante des Szenarienmodells und in der des Erwartungswertmodells unter 200 und 5000 Szenarien vermieden werden. Eine

anteilige gleichmäßige Verteilung über die Monate an den Standorten kann somit neben der expliziten Berücksichtigung für die Produktmodelle A319 und A321 auch implizit für das Produktmodell A320 erreicht werden (Abbildung A25, Abbildung A26, Abbildung A27). Bei der realen Einplanung treten dagegen sowohl unter 200 als auch unter 5000 Szenarien Level-Scheduling-Kosten für das Produktmodell A321, für die Erstversion sowie für die Lackierung von insgesamt 0,0856 % auf (Tabelle A8 Spalte 1, Tabelle A10 Spalte 2). Eine genauere Analyse der absoluten Abweichungen von einer entsprechenden gleichmäßigen Verteilung des Produktmodells A321 zwischen den Monaten des Standorts Hamburg zeigt, dass bei der realen Einplanung in Monat 6 nicht nur die Sequenzierungsregel verletzt wird (Tabelle A12), sondern auch Level-Scheduling-Kosten in Höhe von 0,0251 % entstehen (Abbildung A25, Tabelle A8 Spalte 1, Tabelle A10 Spalte 2). Die aufgrund der Datenbasis als sicher betrachtete Optionsgruppe der Lackierung führt in der realen Einplanung durch Abweichungen von der anteilig gleichmäßigen Verteilung sowohl zwischen den Standorten als auch zwischen den Monaten der Standorte zu Kosten in Höhe von 0,0437 % (Abbildung A28, Tabelle A8 Spalte 1, Tabelle A10 Spalte 2). Eine anteilig gleichmäßige Verteilung der sicheren Erstversionen zwischen den Standorten Hamburg und Toulouse verursacht in der realen Einplanung keine Kosten, wogegen die anteilig gleichmäßige Verteilung zwischen den Monaten in Toulouse im 5. Monat zu Kosten in Höhe von 0,0168 % führt (Abbildung A29, Tabelle A8 Spalte 1, Tabelle A10 Spalte 2).

Fazit der Validierung der Einplanung von Kundenaufträgen mit unsicheren Auftragskonfigurationen ins Produktionsnetzwerk

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass sowohl das deterministische Erwartungswertmodell als auch das Szenarienmodell vorteilhaft gegenüber der realen Planung sind und dass durch die Unsicherheit der Auftragskonfigurationen aufgrund der Just-in-Time-Spezifikation gegenüber sicheren Auftragskonfigurationen Kosten entstehen. Hinsichtlich der unsicheren Auftragskonfigurationen wurde herausgestellt, dass das Szenarienmodell gegenüber dem Erwartungswertmodell durch die Abbildung der unsicherer Auftragskonfigurationen eine robuste Lösung ermöglicht. Durch die Berücksichtigung von Flexibilitäts- und Wandlungskosten im Szenarienmodell können unter expliziter Betrachtung des Worst-Case-Szenarios insbesondere maximale Arbeitslastabweichungen möglichst gering gehalten werden, sodass möglichst geringe und stabile positive Arbeitslastabweichungen erreicht werden.

5.3 Validierung im Automobilbau mit Planaufträgen mit unsicheren Zuordnungen zu Kundenaufträgen (Fall II)

Im zweiten Anwendungsfall mit Planaufträgen mit unsicheren Zuordnungen zu Kundenaufträgen werden die Planauftragsgenerierung, die Einplanung von 100% Planaufträgen ins Produktionsnetzwerk und die Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen im Automobilbau angewendet. Hierzu werden sowohl die regelbasierte Produktdokumentation in Form von pauschalen und baureihenspezifischen Baubarkeitsregeln, Zusteuerungsregeln und Einbauregeln als auch historische Kundenaufträge eines Automobilherstellers anonymisiert verwendet (A_Geier 2016, S. 77; A_Hammerschmidt 2017, S. 122, S. 124). Pauschale Baubarkeitsregeln gelten im Gegensatz zu baureihenspezifischen für alle Baureihen (Sinz 2003, S. 26), wobei eine Baureihe einer Zusammenfassung bestimmter gleichartiger Produktmodelle entspricht (Herlyn 1990, S. 46). Hinsichtlich der Baubarkeitsregeln müssen je Option sämtliche pauschalen Baubarkeitsregeln und entsprechend einer zusätzlichen Strukturierung muss je Position einer Option die baureihenspezifische Baubarkeitsregel mindestens einer Positionsvariante erfüllt sein (Sinz 2003, S. 27). Als Produktmodell wird im Folgenden ein Baumuster betrachtet (vgl. A_Geier 2016, S. 80; vgl. A_Kramer 2016, S. 78), das durch Basis-Optionen bzw. Basis-Codes hinsichtlich der Baureihe, der Aufbau- bzw. Karosserievariante und der Motorisierung spezifiziert ist (vgl. Ohl 2000, S. 29 ff.; vgl. Stäblein 2008, S. 63).

Als Produktionsnetzwerk werden zwei fiktive Endmontagestandorte in zwei Ländern Europas zur Belieferung von drei fiktiven Absatzmärkten in Form von drei europäischen Ländern betrachtet (A_Kramer 2016, S. 75). Somit wird berücksichtigt, dass die Endmontage in der Automobilindustrie vor allem in regionalen, wirtschaftsraumbezogenen Produktionsnetzwerken erfolgt und daher vor allem die Koordination der Produktionsstandorte innerhalb eines Wirtschaftsraums von Bedeutung ist (Wittek 2013, S. 22 f.). An beiden Endmontagestandorten wird von zwei Linien, 20 Arbeitstagen je Monat, zwei achtstündigen Schichten je Tag und einer Taktzeit von einer Minute (vgl. Ihme 2006, S. 336 f.) ausgegangen, sodass je Monat je Standort 38.400 Slots und insgesamt je Monat 76.800 Slots zur Produktion von Fahrzeugen zur Verfügung stehen (A_Hammerschmidt 2017, S. 91 f.; A_Kramer 2016, S. 76).

Zur statischen Betrachtung der Produkt- und der Produktionsstruktur werden ein Baumuster, ein Gültigkeitszeitraum und ein Produktionsstandort, für den die Baubarkeits-

regeln gelten, so ausgewählt, dass möglichst viele im Datensatz vorhandene historische Aufträge darunter fallen, die folglich berücksichtigt werden können. Daraus folgend wird das ausgewählte Baumuster mit den entsprechenden Basis-Codes betrachtet. Es wird angenommen, dass die entsprechenden Baubarkeitsregeln im kompletten betrachteten Zeitraum gleichermaßen an beiden Standorten des fiktiven Produktionsnetzwerks gültig sind, auch wenn diese im Datensatz standortabhängig vorliegen und daher ein Standort ausgewählt wird. Es wird somit exemplarisch ein Baumuster betrachtet und davon ausgegangen, dass nur für dieses die 76.800 Slots zur Verfügung stehen. Des Weiteren werden unter den entsprechenden Aufträgen des ausgewählten Baumusters, die im ausgewählten Gültigkeitszeitraum am ausgewählten Standort vorliegen, diejenigen entsprechend der drei verschiedenen Absatzmärkte mit der Lenkungsart „Links“ für die weitere Betrachtung herausgefiltert. Für diese liegen 4.393 pauschale und 1.683 baureihenspezifische Baubarkeitsregeln vor, die im Rahmen der Baubarkeitsprüfung berücksichtigt werden. Dabei werden die Lenkungsart und der entsprechende Markt neben den Codes des Baumusters ebenfalls als Basis-Codes betrachtet. (A_Geier 2016, S. 77 f., S. 80; A_Hammerschmidt 2017, S. 45; A_Hao 2017, S. 51; A_Kramer 2016, S. 75, S. 78)

Entsprechend der Anteile der drei Märkte in den historischen Aufträgen sind für den Markt 1 2.665 Planaufträge (3,47%), den Markt 2 48.545 Planaufträge (63,21%) und den Markt 3 25.590 Planaufträge (33,32%) für die 76.800 Slots eines Monats zu generieren (A_Hammerschmidt 2017, S. 92). Als Einbauraten bzw. Wahrscheinlichkeiten der Optionenwahl einzelner Optionen werden die relativen Häufigkeiten der betrachteten historischen Aufträge je Markt berücksichtigt (A_Geier 2016, S. 77). Im Folgenden wird lediglich die unabhängige Optionenwahl betrachtet, um die Konstruktion von Planaufträgen entsprechend der Einbauraten mittels Muss-Optionen im Variantenbaum unter Berücksichtigung der Baubarkeit und Verrechnung der Wahrscheinlichkeiten sowie das Hinzufügen von Kann-Optionen zu validieren. Nach Einplanung der Planaufträge ins Produktionsnetzwerk werden zur Kundenauftragszuordnung historische Aufträge als eingehende Kundenaufträge herangezogen und den generierten Planaufträgen zugeordnet (A_Kramer 2016, S. 84).

5.3.1 Planauftragsgenerierung

Zur Planauftragsgenerierung sind sowohl die kundenwählbaren Optionen des betrachteten Baumusters als auch die entsprechenden Optionsgruppen der Muss-Optionen

zum Aufbau des Variantenbaums zu berücksichtigen. Da diese Informationen in den vorliegenden Datensätzen nicht enthalten sind, werden dazu im Folgenden Annahmen getroffen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Dies ist jedoch ausreichend, um den Ansatz demonstrieren und validieren zu können. Somit werden unter den Optionen der historischen Kundenaufträge zunächst kundenwählbare Optionen für alle drei Märkte anhand ihrer Bezeichnungen und unter Zuhilfenahme des Produktkonfigurators auf der Webseite des Automobilherstellers identifiziert. Optionspakete als Kombinationen mehrerer Optionen werden hierbei nicht zusätzlich, sondern lediglich deren einzelnen, kundenwählbaren Optionen berücksichtigt. Die Muss-Optionsgruppen und somit Muss-Optionen unter den kundenwählbaren Optionen werden schließlich durch Analyse sich gegenseitig ausschließender Optionen anhand der Baubarkeitsregeln und unter Berechnung der relativen Häufigkeiten der Optionen in den historischen Aufträgen definiert. Da die Summe der relativen Häufigkeiten der Optionen einer Optionsgruppe eins ergeben muss, werden ausschließlich gebildete Optionsgruppen, bei denen dies der Fall ist, als Muss-Optionsgruppen betrachtet. (A_Geier 2016, S. 51 f., S. 77)

Somit werden für das ausgewählte Baumuster und die betrachteten drei Märkte acht Muss-Optionsgruppen mit insgesamt 33 Muss-Optionen und weitere 68 Kann-Optionen, also insgesamt 101 kundenwählbare Optionen, zur weiteren Betrachtung definiert. Diese sind in Tabelle A15 und Tabelle A16 dargestellt, wobei die Muss-Optionen in der Reihenfolge aufgeführt sind, in der sie auch auf den Ebenen des Variantenbaums verwendet werden. Die Fahrzeugfarben werden darunter nicht betrachtet, da diese in der vorliegenden Produktdokumentation nicht enthalten und für die weitere Betrachtung auch nicht relevant sind. Für die drei Märkte ergibt sich entsprechend der Muss-Optionsgruppen eine theoretisch mögliche Variantenanzahl von $(5 \times 2 \times 3 \times 3 \times 2 \times 3 \times 13 \times 2 =)$ 14.040 und entsprechend der Kann-Optionen eine von 2^{68} (Tabelle A15, Tabelle A16). Insgesamt ergibt sich somit eine theoretisch mögliche Variantenanzahl anhand der betrachteten kundenwählbaren Optionen von $(14.040 \times 2^{68} =)$ $4,14 \times 10^{24}$. Für die betrachteten drei Märkte sind die Baubarkeitsregeln zwischen den Muss-Optionen identisch, sodass nach der Baubarkeitsprüfung im Variantenbaum durch Abbildung aller baubaren Kombinationen der Muss-Optionen 7.560 von den 14.040 theoretisch möglichen Varianten bzw. Auftragskonfigurationen mit Muss-Optionen baubar sind. Jedoch wurden in keinem der drei Märkte alle möglichen Muss-Optionen und auch in keinem alle möglichen Kann-Optionen gewählt, sodass die Wahrscheinlichkeiten von Optionen in den

drei Märkten trotz möglicher Baubarkeit teilweise null betragen. Im Variantenbaum bestehen im Anwendungsfall ausschließlich zwischen den Muss-Optionsgruppen Reifen und Räder Baubarkeitsrestriktionen, weshalb diese direkt nacheinander im Variantenbaum aufgeführt sind, sodass Verrechnungen von Wahrscheinlichkeiten ausschließlich unter Betrachtung der beiden aufeinander folgenden Ebenen durchgeführt werden. (vgl. A_Geier 2016, S. 79; vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 55 f.; vgl. A_Hao 2017, S. 54, S. 59, S. 68)

Die Planaufträge werden schließlich in der erforderlichen Anzahl unter Berücksichtigung der Baubarkeitsregeln und der Einbauraten als Soll-Wahrscheinlichkeiten entsprechend der relativen Häufigkeiten der Optionen der historischen Aufträge generiert. Die Rechenlaufzeit zur Generierung der Planaufträge mit Muss-Optionen ist aufgrund der Verwendung des Variantenbaums unabhängig von der Anzahl zu generierender Planaufträge (Tabelle A17). Zum Erreichen einer kurzen Rechenlaufzeit ist es für die vorliegenden Baubarkeitsregeln und die verwendete Reihenfolge der Muss-Optionen im Variantenbaum ausreichend, wenn beim Hinzufügen einer Option in den Variantenbaum ausschließlich die Baubarkeitsregeln der Option selbst und nicht diejenigen sämtlicher als „wahr“ bekannter Optionen je Planauftrag überprüft werden. Die Rechenlaufzeiten zum Hinzufügen der Kann-Optionen sind dagegen abhängig von der Anzahl zu generierender Planaufträge (Tabelle A17). Beim Hinzufügen der meisten Kann-Optionen ist es für die vorliegenden Baubarkeitsregeln ausreichend, wenn ausschließlich deren Baubarkeitsregeln überprüft werden. Für einzelne Kann-Optionen ist es jedoch zur Sicherstellung ihrer Baubarkeit beim Hinzufügen notwendig, zusätzlich die Baubarkeitsregeln zumindest bestimmter anderer als „wahr“ bekannter Optionen zu überprüfen oder eine Reihenfolge für das Hinzufügen bestimmter Kann-Optionen vorzugeben, um weitere Prüfungen zu vermeiden. (A_Hao 2017, S. 54, S. 62 f., S. 66 ff., S. 73 f.)

Die Zusteuerung weiterer Optionen erfolgt auf Basis der generierten Planaufträge mit Muss- und Kann-Optionen sowie den entsprechenden Basis-Optionen durch die im Anwendungsfall vorliegenden 584 Zusteuerungsregeln. Hierzu sind neben Zusteuerungsregeln auch Baubarkeitsregeln zu berücksichtigen (Sinz 2003, S. 30). Zur Zusteuerung werden die Zusteuerungsregeln zwei Mal durchlaufen (vgl. Sinz 2003, S. 30), was eine relativ lange Rechenlaufzeit erfordert (Tabelle A17). Zum Vermeiden längerer Rechenlaufzeiten werden vor dem Zusteuern einer Option lediglich die Baubarkeitsregeln der Option selbst überprüft, wobei sämtliche als „wahr“ und als „falsch“ bekannte Optionen

berücksichtigt werden. Daraufhin wird nach jedem der beiden Durchläufe die Baubarkeit sämtlicher zugesteuerter Optionen überprüft, um Optionen, die in Kombination der zugesteuerten Optionen nicht baubar sind, zu entfernen. Insgesamt wird durch die Zusteuerung kein anhand der kundenwählbaren Optionen baubarer Auftrag unbaubar gemacht (vgl. Sinz 2003, S. 30, S. 109 f.). Dies wird dadurch bestätigt, dass eine vollständige Baubarkeitsprüfung nach Zusteuerung ergibt, dass alle generierten Planaufträge mit Basis-Optionen, Muss-Optionen, Kann-Optionen und zugesteuerten Optionen baubar sind. (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 122; vgl. A_Hao 2017, S. 63 ff., S. 68)

In Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11 sind die Abweichungen bzw. Differenzen der Soll-Wahrscheinlichkeiten bzw. der prognostizierten Einbauraten von den Plan-Wahrscheinlichkeiten, also diejenigen der generierten Planaufträge, der einzelnen Muss-Optionen bzw. Kann-Optionen im Betrag dargestellt. (vgl. A_Geier 2016, S. 81; vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 55)

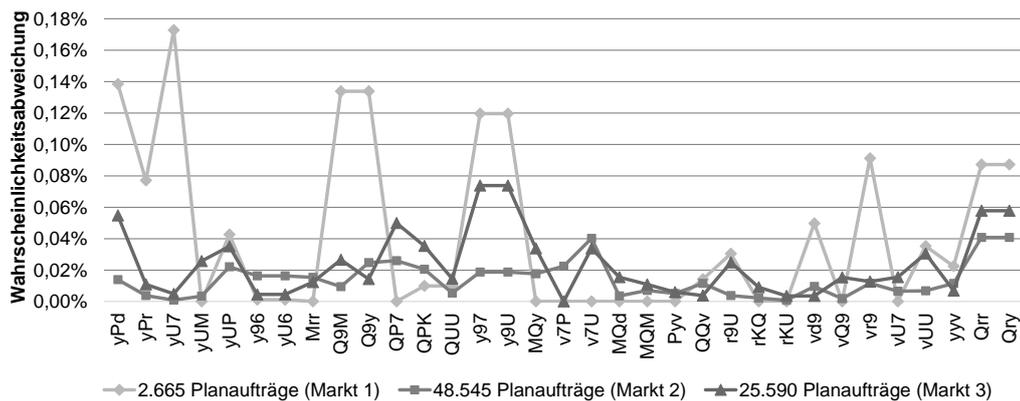


Abbildung 5.10: Abweichungen von Soll- und Plan-Wahrscheinlichkeiten der Muss-Optionen (A_Hao 2017, S. 71)

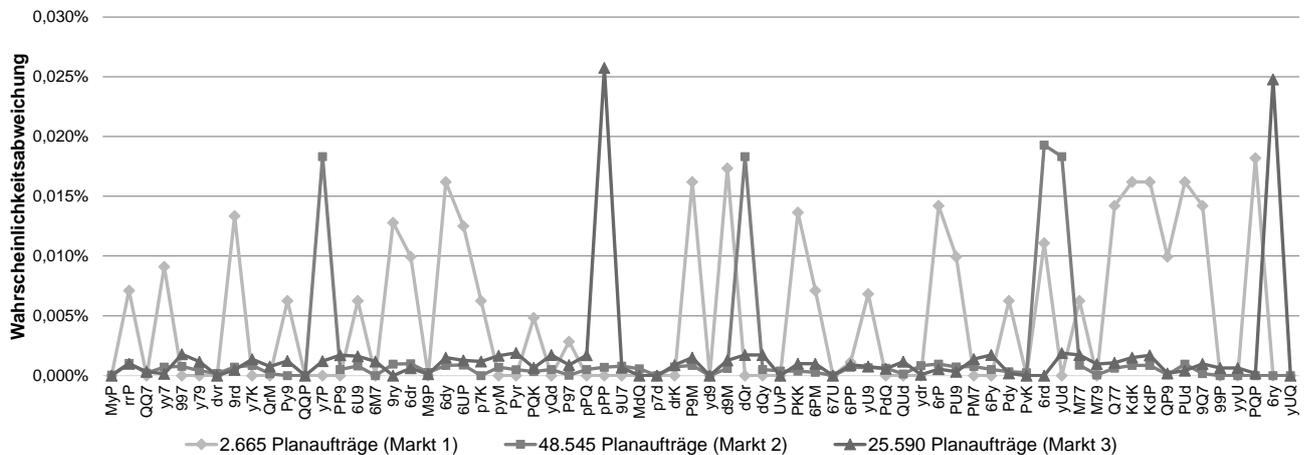


Abbildung 5.11: Abweichungen von Soll- und Plan-Wahrscheinlichkeiten der Kann-Optionen (A_Hao 2017, S. 72)

Insgesamt zeigt sich, dass sowohl die Abweichungen der Muss-Optionen mit durchschnittlich 0,0265 % über alle drei Märkte als auch diejenigen der Kann-Optionen mit durchschnittlich 0,0026 % sehr gering ausfallen. In beiden Fällen sind Rundungen aufgrund der Ganzzahligkeit der Aufträge erforderlich und führen zu Abweichungen. Hierzu werden die Wahrscheinlichkeiten der Muss-Optionen im Variantenbaum nicht einzeln gerundet, sondern diejenigen der Pfade bzw. Auftragskonfigurationen, wobei ggf. nicht für alle Pfade mindestens ein Planauftrag erzeugt wird. Dabei werden Varianten, deren Wahrscheinlichkeiten auf null abgerundet werden, gegebenenfalls zur Erreichung der erforderlichen Anzahl berücksichtigt. Für Kann-Optionen werden dagegen absolute Häufigkeiten berechnet und einzeln gerundet, weshalb deren Abweichungen durchschnittlich niedriger ausfallen als diejenigen der Muss-Optionen. (vgl. A_Geier 2016, S. 82; vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 61 f.; vgl. A_Hao 2017, S. 68 ff.)

Durch die unterschiedliche Anzahl an Planaufträgen für die drei betrachteten Märkte zeigt sich, dass die Abweichungen bei einer höheren Anzahl tendenziell geringer ausfallen als bei einer niedrigeren Anzahl (vgl. A_Hammerschmidt 2017 S. 59). Für Muss-Optionen liegen die Abweichungen für Markt 2 mit den meisten Aufträgen bei durchschnittlich 0,0139 %, wobei das Maximum bei 0,0408 % liegt. Für Markt 3 mit weniger Aufträgen liegen diese Werte bei 0,0237 % bzw. 0,0739 % und für Markt 1 mit noch weniger Aufträgen bei 0,0418 % bzw. 0,1728 %. Die niedrigeren Werte bei einer höheren Anzahl an Planaufträgen sind auf den relativ kleineren Effekt der Rundungen zurückzuführen (vgl. A_Hammerschmidt 2017 S. 59). Bei den Kann-Optionen ist die durchschnittliche Abweichung ebenfalls für Markt 2 mit 0,0015 % gegenüber 0,0016 % für Markt 3 und 0,0047 % für Markt 1 am geringsten. Die maximale Abweichung beträgt jedoch für Markt 2 0,0193 %, für Markt 3 0,0258 % und für Markt 1 0,0182 % und ist somit für den Markt mit der kleinsten Anzahl an Planaufträgen am niedrigsten. Grund hierfür ist, dass in diesem Fall Kann-Optionen aufgrund von Baubarkeitsrestriktionen weniger oft als durch die gerundeten, absoluten Häufigkeiten erforderlich hinzugefügt werden können (vgl. A_Geier 2016, S. 82). Die höchste Abweichung besteht laut Abbildung 5.11 für Markt 3 für Option „pPP“, die sieben Mal weniger verbaut werden kann als entsprechend der gerundeten Anzahl erforderlich wäre. Insgesamt ist festzuhalten, dass sowohl für Muss- als auch für Kann-Optionen Abweichungen von unter 0,2 % erreicht werden.

Entsprechend der Verrechnungsformeln (Formel 4-4, Formel 4-5, Formel 4-6) für die Muss-Optionen im Variantenbaum betragen die Plan-Wahrscheinlichkeiten bei Soll-

Wahrscheinlichkeiten von null ebenfalls null. Wahrscheinlichkeiten von kleiner null oder größer eins treten durch die Verrechnungen im Variantenbaum im Anwendungsfall nicht auf (A_Hao 2017, S. 55). Da bei Kann-Optionen für Soll-Wahrscheinlichkeiten von null keine Rundung erfolgt, betragen die Plan-Wahrscheinlichkeiten ebenfalls null. Die Abweichungen bei Soll-Wahrscheinlichkeiten von null ergeben somit sowohl für Muss- als auch für Kann-Optionen null.

Aufgrund höherer Abweichungen der Muss-Optionen als der Kann-Optionen wird im Folgenden untersucht, ob geringere Abweichungen erreicht werden können, indem Muss-Optionen auf die gleiche Art wie Kann-Optionen hinzugefügt werden. Dies würde ein Verzicht auf den Variantenbaum für Muss-Optionen und daher eine längere Rechenlaufzeit bedeuten. Eine Analyse für Markt 2 mit den meisten Planaufträgen zeigt, dass aufgrund der Baubarkeitsregeln und durch die zufällige Reihenfolge aller Optionen nicht jedem Planauftrag eine Muss-Option je Muss-Optionsgruppe hinzugefügt werden kann und aufgrund dessen 0,5376% der Aufträge nicht baubar sind. Werden solche, aufgrund fehlender Muss-Optionen nicht baubare Aufträge bei der Ermittlung der Abweichungen außen vor gelassen, so beträgt die durchschnittliche Abweichung der Muss-Optionen 0,1306% und die maximale Abweichung 0,5364%. Beide Werte sind somit ungefähr zehn Mal so hoch wie die entsprechenden Werte für Markt 2 unter Verwendung des Variantenbaums. Entsprechend ist die Verwendung des Variantenbaums für Muss-Optionen nicht nur aufgrund der kürzeren Rechenlaufzeiten, sondern ebenso zur Sicherstellung der Baubarkeit der in der gewünschten Anzahl zu generierenden Planaufträge und zur Erreichung von geringen Abweichungen vorteilhaft. (vgl. A_Hao 2017, S. 74 ff.)

Nach der Zusteuerung weiterer Optionen zu den mit Muss- und Kann-Optionen generierten Planaufträgen kann eine Sekundärbedarfsermittlung durchgeführt werden. Hierzu werden die vorliegenden 5.648 Einbauregeln für Teilmengen bis zu 20 Stück je Teileart ausgewertet, da davon ausgegangen wird, dass größere Teilmengen je Teileart eine geringe Wertigkeit haben und daher nicht programmorientiert beschaffen werden (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 124). Die Rechenlaufzeit zur Sekundärbedarfsermittlung ist von der Anzahl der Aufträge abhängig (Tabelle A17). Durchschnittlich enthält ein Auftrag aus einem der drei Märkte 2.861 Teile hinsichtlich der betrachteten Teilearten (vgl. Tabelle A18).

5.3.2 Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk

Die Einplanung der generierten Planaufträge ins Produktionsnetzwerk erfolgt sowohl nach dem Erwartungswertmodell als auch nach dem Szenarienmodell gleichermaßen, da die zu 100 % generierten Planaufträge ein deterministisches Szenario darstellen. Hierzu werden die relevanten Eingangsdaten für das fiktive Produktionsnetzwerk ebenso fiktiv festgelegt. Dabei wird von der weniger detaillierten Reihenfolgeplanung nach dem Car-Sequencing als arbeitslastorientiertem Ansatz bezüglich der Endmontage ausgegangen, sodass das Car-Sequencing hinsichtlich der Endmontage und nicht hinsichtlich der Produktion bei Lieferanten antizipiert wird. Da die Optionenwahl der 100 % Planaufträge bei der Einplanung als sicher betrachtet wird, kann die Antizipation der Sequenzierungsregeln hinsichtlich Optionen in Form von Nebenbedingungen erfolgen, ohne dass die Problematik der Zulässigkeitsrobustheit und somit die Erfordernis zur Wandlung aufgrund der Unsicherheit besteht. In dem Fall, dass auch bei sicheren Planaufträgen keine zulässige Lösung existiert, sind die prognostizierten Wahrscheinlichkeiten der Optionen bzw. Einbauraten der Planauftragsgenerierung und die Sequenzierungsregeln zur Auftragseinplanung abzustimmen (A_Hammerschmidt 2017, S. 75). Entweder sind Wahrscheinlichkeiten für Optionen für Märkte zu beschränken oder Wandlungen zur Erweiterung der oberen Flexibilitätsgrenzen an den Standorten vorzunehmen. Die Sequenzierungsregeln werden für beide Produktionsstandorte je Option als identisch angenommen und für jede kundenwählbare Option, sofern möglich, in Anlehnung an Holweg & Pil (2004, S. 31) festgelegt (A_Hammerschmidt 2017, S. 75; A_Kramer 2016, S. 79). Als Skalierungsfaktor wird $\alpha = 0,9$ gesetzt (A_Hammerschmidt 2017, S. 78), sodass nicht die gesamte Flexibilität durch die Auftragseinplanung ausgenutzt wird. Durch die Antizipation der Reihenfolgeplanung durch das Car-Sequencing mittels Nebenbedingungen wird auf die Berücksichtigung von Arbeitslastabweichungskosten nach dem Mixed-Model-Sequencing verzichtet.

Indem Planaufträge je Produktionsmonat generiert und monatsweise an den Standorten eingeplant werden, sind Transportdauern und Liefertermine erst im Rahmen der Kundenauftragszuordnung relevant. Somit werden im Rahmen der Auftragseinplanung weder Bestands- noch Terminverzögerungskosten berücksichtigt. Ebenfalls werden hinsichtlich der Märkte als vorläufige Kunden der Planaufträge keine Standortabweichungskosten und auch keine Auftragsabstandskosten betrachtet. Hinsichtlich der materialbezogenen Eingangskosten müssen daher auch nicht sämtliche entsprechenden

Kosten je Planauftrag erfasst werden, da diese nicht für die Berechnung der Kapitalbindungskosten als Teil der Bestandskosten benötigt werden. Da zudem lediglich ein Baumuster eingeplant wird und sämtliche zur Verfügung stehende Slots belegt werden, besteht kein Optimierungspotential hinsichtlich der einzelauftragsbezogenen Eingangskosten der durch die Baumuster implizierten Teile, weshalb diese im Folgenden nicht betrachtet werden. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Teile jeder Muss-Option je Muss-Optionsgruppe die gleichen Kosten ausmachen, sodass auch diese aufgrund der Tatsache, dass jeder Auftrag eine Muss-Option je Optionsgruppe enthält, vernachlässigt werden können (A_Hammerschmidt 2017, S. 77). Für die meisten Kann-Optionen wird angenommen, dass ihre materialbezogenen Eingangskosten an beiden Standorten identisch sind, sodass sie vernachlässigt werden können, wogegen für einzelne Kann-Optionen an den beiden Standorten unterschiedliche, fiktive materialbezogene Eingangskosten von entweder € 100 oder € 200 angenommen und berücksichtigt werden (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 77).

Zur Betrachtung von Distributionskosten werden Entfernungen zwischen den Märkten, in denen die Produktionsstandorte liegen, und den Absatzmärkten berücksichtigt. Hierbei ist anzumerken, dass Standort 1 in Markt 1 und Standort 2 in Markt 2 liegt. Markt 3 liegt zudem näher an Standort 2 als an Standort 1. (A_Hammerschmidt 2017, S. 77)

Da lediglich eine Zuordnung zu Standorten und nicht zu Monaten erfolgt, wird eine gleichmäßige Verteilung von allen kundenwählbaren Optionen zwischen den beiden Standorten (Formel A-10) angestrebt. Im Sinne der Level-Scheduling-Kosten werden lediglich positive Abweichungen größer $\delta_{3o_g l}^{LS,L} = 1 - \varepsilon$ mit extrem hohen Kosten bepreist ($P_{1o_g l}^{LS,L} = P_{2o_g l}^{LS,L} = 0, P_{3o_g l}^{LS,L} = P_{4o_g l}^{LS,L} = \infty$), sodass diese möglichst vermieden werden. Entsprechend kann die Antizipation des Level-Scheduling aufgrund der als sicher betrachteten Optionenwahl der 100 % Planaufträge basierend auf Formel A-10 als Nebenbedingung nach Formel 5-1 formuliert werden (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 78). Es erfolgt eine Division durch die Anzahl an Standorten, da die Anzahl an Slots an beiden betrachteten Standorten im Anwendungsfall identisch ist und keine Produktionsrestriktionen betrachtet werden. Auch wenn durch die Aufrundung auf die nächste ganze positive Zahl Abweichungen von kleiner als eins ermöglicht werden, wird $\beta = 1,1$ gesetzt, um positive Abweichungen von der gleichmäßigen Verteilung bis zur entsprechenden Flexibilitätsgrenze zuzulassen und somit der Minimierung der Kosten in der Zielfunktion einen größeren Lösungsraum zu bieten (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 78).

$$\sum_{i \in I} (x_{ilt} \times p_{o_g, is}) \leq \left[\beta \times \frac{\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} (x_{il't} \times p_{o_g, is})}{|L|} \right]$$

Formel 5-1

$$\forall g \in \{1, \dots, G \mid LS_{gOL} = 1 \wedge \Phi_g = 0\}, \forall o_g \in \{1, \dots, O_g \mid LS_{o_g} = 1\},$$

$$\forall l \in \{L \mid \exists u \in \{U \mid l_u = l \wedge u \in U_{o_g}\}\}, s = S, t = T$$

Die Einplanung der Planaufträge ins Produktionsnetzwerk kann in der beschriebenen Form in CPLEX mit der standardmäßigen Lösungsgütetoleranz von 0,01 % innerhalb von 117 Sekunden erfolgen (A_Hao 2017, S. 80). In Tabelle 5.1 sind die Anzahl der zugeordneten Aufträge zu den beiden Standorten je Markt und die entsprechenden Kosten dargestellt. Die Gesamtkosten betragen 83,17 Mio. Euro und bestehen zu rund 73 % aus Distributionskosten, da materialbezogene Eingangskosten wie beschrieben lediglich für einzelne Kann-Optionen berücksichtigt werden. Aufträge aus Markt 1 werden vorzugsweise Standort 1, der in Markt 1 liegt, zugeordnet und Aufträge aus Markt 3 vorzugsweise dem nähergelegenen Standort 2, sodass für Markt 2 mehr Aufträge an Standort 1 produziert werden als an Standort 2, in dessen Markt er liegt.

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Auftragseinplanung für $\beta=1,1$ (A_Hao 2017, S. 80)

	Anzahl der zugeordneten Aufträge			Materialbezogene Eingangskosten in Mio. Euro (teilweise)	Distributionskosten in Mio. Euro			Gesamtkosten in Mio. Euro
	Markt 1	Markt 2	Markt 3		Markt 1	Markt 2	Markt 3	
Standort 1 (in Markt 1)	2.588	29.234	6.578	11,81	0,00	34,93	12,51	83,17
Standort 2 (in Markt 2)	77	19.311	19.012	10,37	0,09	0,00	13,46	
Summe	76.800			22,18	60,99			

Die an den beiden Standorten eingeplante Anzahl an Muss-Optionen ist in Abbildung 5.12 und die eingeplante Anzahl an Kann-Optionen in Abbildung A30 abgebildet. Die angestrebte gleichmäßige Verteilung je Option ist deutlich zu erkennen. Abweichungen von der gleichmäßigen Verteilung sind für $\beta = 1,1$ aufgrund des Aufrundens in Formel 5-1 bis knapp über 10 % möglich und betragen im Anwendungsfall bis zu 12,2 %.

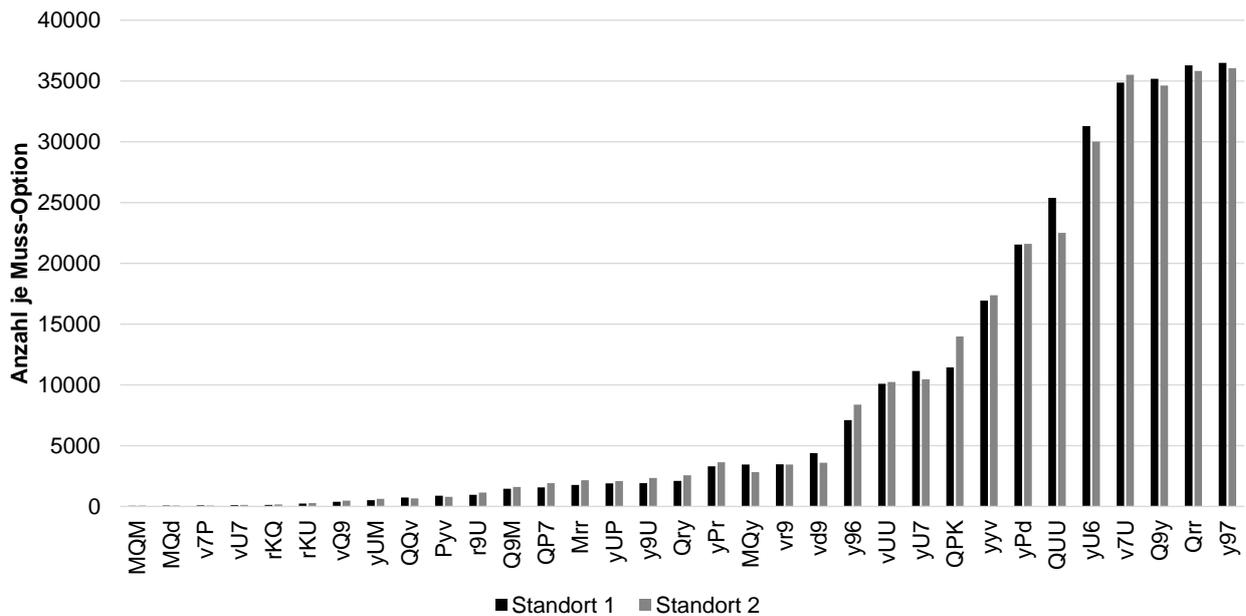


Abbildung 5.12: An Standorten eingeplante Anzahl an Muss-Optionen für $\beta=1,1$ (A_Hao 2017, S. 82)

Zur Analyse, inwiefern die annähernd gleichmäßige Verteilung der Optionen zwischen den Standorten auch zu einer annähernd gleichmäßigen Verteilung der Teile führt, kann die Teileanzahl je Teileart an den beiden Standorten miteinander verglichen werden. Eine Abweichung der Teileanzahl zwischen den beiden Standorten besteht für 614 der 1792 betrachteten Teilearten, wobei lediglich 27 der Teilearten, also 1,5%, die maximale Abweichung der Optionen von 12,2% überschreiten und die Teile somit tendenziell gleichmäßig verteilt sind (Abbildung A31). Somit zeigt sich, dass eine Antizipation des teileorientierten Level-Scheduling approximativ durch die Antizipation des optionsorientierten Level-Scheduling erfolgen kann.

Wird $\beta = 2,0$ gesetzt und somit die Level-Scheduling-Nebenbedingung mit $|L| = 2$ nach Formel 5-1 aufgehoben, so können die Gesamtkosten auf 80,56 Mio. Euro im Vergleich zu den Gesamtkosten für $\beta = 1,1$ von 83,17 Mio. Euro reduziert werden (Tabelle A19). Die an den beiden Standorten eingeplante Anzahl an Muss-Optionen bzw. Kann-Optionen ist Abbildung A32 bzw. Abbildung A33 zu entnehmen. Insgesamt können die materialbezogenen Eingangskosten um 10,9 % und die Distributionskosten um 0,3 % gesenkt werden (vgl. Tabelle A19), indem Abweichungen von der gleichmäßigen Verteilung von Optionen um bis zu 97,9 % toleriert werden. Die Senkung der materialbezogenen Eingangskosten ist auf die veränderte Zuordnung von Aufträgen mit Kann-Optionen, deren Kosten sich zwischen den Standorten unterscheiden, zurückzuführen. So

sind für entsprechende Kann-Optionen wie bspw. „9Q7“, „QUd“, „QP9“, „P97“ und „9rd“ die ungleichmäßigen Verteilungen zwischen den Standorten in Abbildung A33 auffällig. Die Einplanung sämtlicher Aufträge für Markt 1 an Standort 1, der sich in Markt 1 befindet, trägt zur Reduktion der Distributionskosten bei (Tabelle A19).

5.3.3 Kundenauftragszuordnung

Zur Zuordnung von Kunden- zu Planaufträgen ist zunächst als Ausgangslage ein Auftragsbestand für einen diskreten Zeitpunkt analog zur generischen Darstellung in Abbildung 4.1 zu erstellen. Dieser ist für den Anwendungsfall in Abbildung 5.13 dargestellt.

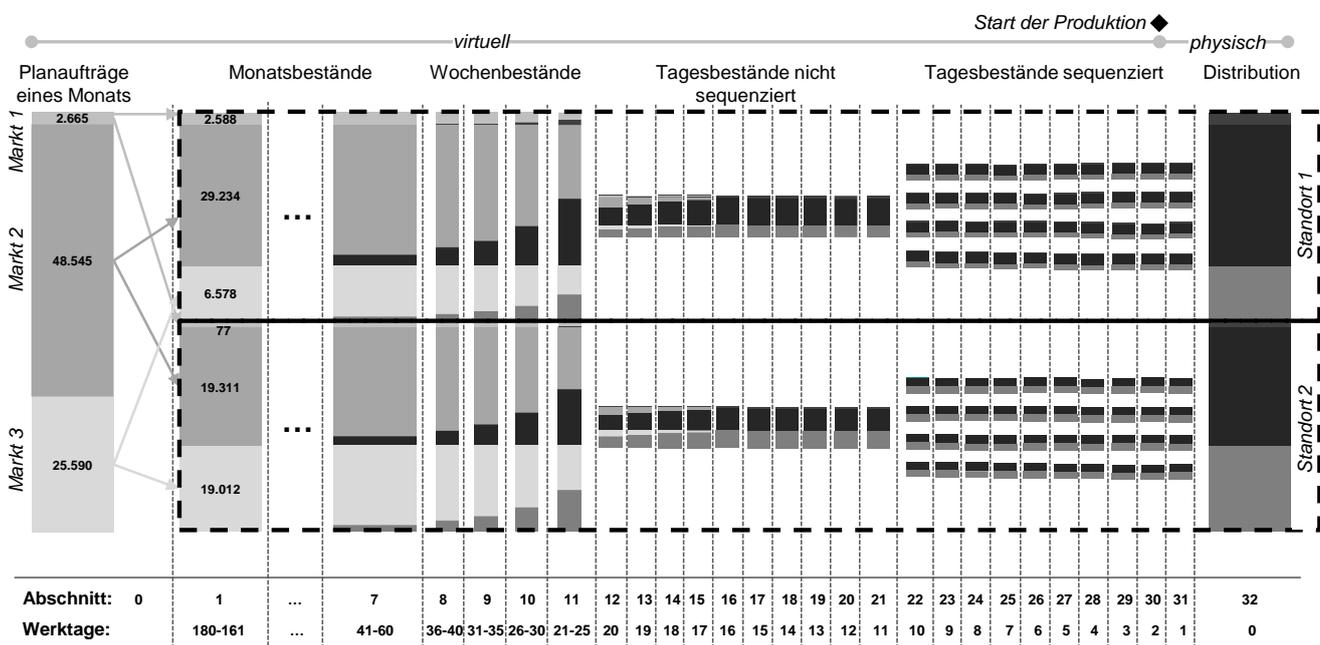


Abbildung 5.13: Auftragsbestand an Kunden- und Planaufträgen im Anwendungsfall des Automobilbaus zu einem diskreten Zeitpunkt (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 91; vgl. A_Kramer 2016, S. 77; vgl. Buergin et al. 2017, S. 503)

Entsprechend dem Zeitpunkt für den mittelfristigen Lieferabruf (LAB) in der Automobilindustrie, der ggf. neun Monate vor der Produktion erfolgt (Stäblein 2008, S. 57), umfasst der betrachtete Auftragsbestand Aufträge der neun Monate vor der Produktion. Hierzu muss die Auftragsplanung neun Monate vor der Produktion beginnen, wodurch für alle neun Monate Planaufträge zu generieren und an den beiden Standorten des betrachteten Produktionsnetzwerks einzuplanen sind. Hierzu werden im Anwendungsfall für alle betrachteten neun Monate dieselben Planaufträge und dieselbe Einplanung verwendet, wozu auf die in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Planaufträge und deren in Kapitel 5.3.2 dargestellte Einplanung zurückgegriffen wird. Entsprechend wird von einer

gleichen Anzahl an Aufträgen derselben Abschnitte an den beiden Standorten ausgegangen. Da Taktlängen von einer Minute betrachtet werden, erfolgt mit zunehmender Nähe zum Produktionsstart, wie in der Automobilindustrie üblich, eine weitere Terminplanung zu Wochen- und Tagesbeständen (vgl. Meyr 2004, S. 350, S. 353). Hierbei wird von vier Wochen und zwanzig Arbeitstagen je Monat ohne Abbildung von Wochenenden, Feiertagen und variierenden Monatslängen ausgegangen, wobei zwanzig Tagesbestände, vier Wochenbestände und sieben Monatsbestände betrachtet werden (A_Kramer 2016, S. 40, S. 76 f.; A_Hammerschmidt 2017, S. 89, S. 91). Insgesamt wird also ein Auftragsbestand von neun Monaten erstellt, dessen Abschnitte einen oder mehrere Werktage umfassen. Durch die Tagesbestände wird ein tagesgenauer Feinabruf (FAB) bis zu etwa vier Wochen vor der Produktion ermöglicht (vgl. Stäblein 2008, S. 57).

Die Zuordnung zu Wochen- und Tagesbeständen wird zur Darstellung des Auftragsbestands ähnlich zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk unter Nebenbedingungen zur Antizipation des Car-Sequencing und des Level-Scheduling, jedoch ohne Kostenbetrachtung durchgeführt (A_Hammerschmidt 2017, S. 88; A_Kramer 2016, S. 40). Da von zwei Linien je Standort und zwei Schichten je Tag ausgegangen wird, werden daraufhin für jeden Tagesbestand je Standort zunächst vier Teilbestände analog zur Zuordnung zu Wochen- und Tagesbeständen gebildet, worauf basierend jeweils die Reihenfolgeplanung erfolgt (A_Kramer 2016, S. 41). Zehn der Tagesbestände werden sequenziert, wobei für den ersten Tagesbestand, also für Abschnitt 31, zum diskreten Betrachtungszeitpunkt die Endmontage erfolgt (A_Hammerschmidt 2017, S. 91). Durch die Sequenzierung ist ein produktionssynchroner Abruf (PAB) bis zu etwa zwei Wochen vor der Produktion möglich (vgl. Klug 2010, S. 294). Der Endmontage folgt die Distribution, wobei Kundenaufträge direkt ausgeliefert werden und alle nicht zu Kundenaufträgen zugeordneten Planaufträge nach der Produktion dem Lager des entsprechenden Standorts übergeben werden (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 90; vgl. Brabazon & MacCarthy 2004, S. 156; vgl. Buergin et al. 2017, S. 503). Des Weiteren wird jedes Lager mit der Anzahl an Aufträgen eines Monatsbestands betrachtet (A_Hammerschmidt 2017, S. 90 f.).

Je Markt wird eine Normalverteilung der gewünschten Lieferzeit mit einem Erwartungswert von 25 Werktagen und einer Standardabweichung von 10 Werktagen in Anlehnung an Stautner (2001, S. 38) und Herold (1998, S. 244 f.) verwendet. Entsprechend wird der Auftragsfüllgrad für jeden standortspezifischen Abschnitt unter Berücksichtigung

der Transportdauern zwischen den einzelnen Märkten und dem Produktionsstandort berechnet (vgl. Volling 2009, S. 70 ff.; A_Hammerschmidt 2017, S. 92; A_Hao 2017, S. 90 ff.). Hierbei werden zwei Werkzeuge für den Transport zu einem Markt, in dem der Standort selbst liegt, und zehn Werkzeuge zum Transport zu einem anderen der europäischen Märkte (vgl. Holweg & Pil 2004, S. 43) angenommen (A_Hammerschmidt 2017, S. 92). Zur Berechnung der Auftragsfüllgrade wird der zeitliche Beginn je Abschnitt verwendet, um zum Betrachtungszeitpunkt den Auftragsbestand vor dem Eingang von Kundenaufträgen je Abschnitt darzustellen und entsprechend der errechneten Anzahl zufällig Planaufträge zur Sperrung auszuwählen (vgl. A_Hao 2017, S. 90 ff.).

Die Bestellzeitpunkte und somit Fixierungszeitpunkte für Änderungen werden für die betrachteten Optionen an beiden Standorten auf die Abschnitte 12 bis 26 und somit 6 bis 20 Tage vor Fertigstellung bzw. 5 bis 19 Tage vor Produktionsstart gelegt (vgl. Stäblein 2008, S. 57). Die Teilesequenzierungszeitpunkte und somit Fixierungszeitpunkte für Tausche werden auf die Abschnitte 22 bis 30 und somit zwei bis zehn Tage vor Fertigstellung bzw. ein bis neun Tage vor Produktionsstart festgesetzt (vgl. Klug 2010, S. 294). Für Optionen, deren Teile nicht produktionssynchron bereitgestellt werden, erfolgt eine Festlegung in Abschnitt 30 und somit ein Tag vor Produktionsstart. Die Zeiträume der Fixierungszeitpunkte für Änderungen und Tausche überschneiden sich somit, wobei je Option ersterer zeitlich vor letzterem liegen muss. (A_Hammerschmidt 2017, S. 110 f.)

Als Kostensatz für die Terminverzögerungskosten werden je Kunde € 100,00 je Werktag berücksichtigt (A_Hammerschmidt 2017, S. 97). Es werden keine Präferenzen hinsichtlich des Endmontagestandorts und somit keine Standortabweichungskosten betrachtet. Ebenfalls werden keine Auftragsabstandskosten berücksichtigt. Zur Planauftragsauswahl werden Änderungskosten in Höhe von € 25,00 €, € 27,50 oder € 30,00, Tauschkosten in Höhe von € 5,00 €, € 5,50 oder € 6,00, sowie Umbaukosten in Höhe von € 100,00 €, € 110,00 oder € 120,00 je Option an beiden Standorten veranschlagt (A_Hammerschmidt 2017, S. 95). Tausche werden als am günstigsten angenommen, da diese im Vergleich zu Änderungen nicht zu Bedarfsänderungen programmorientierter Teile führen und somit keine Änderungsaufwände bei den entsprechenden Lieferanten erfordern (vgl. A_Fischer 2015, S. 79; vgl. A_Kramer 2016, S. 45). Umbauten werden als am teuersten angenommen, da für diese ein zusätzlicher Aufwand für den Umbau nach der Endmontage sowie eine zusätzliche Lagerhaltung der entsprechenden Teile bzw. Teilearten notwendig ist (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 95).

Ob ein Umbau möglich ist, wird je Option für beide Standorte gleichermaßen festgelegt, wobei rund ein Drittel der kundenwählbaren Optionen, darunter Reifen, Räder und Fußmatten, als umbaubar betrachtet werden (A_Hammerschmidt 2017, S. 94). Akzeptanzwerte für Abweichungen werden für Optionen zwischen 0,1 und 0,51 gesetzt, wobei bei Abweichungen von Muss-Optionen je Gruppe zwei Optionen betroffen sind und somit die Akzeptanzwerte beider Optionen eingehen (A_Hao 2017, S. 103; A_Hammerschmidt 2017, S. 97). Akzeptanzwerte von Kann-Optionen, die in einem Kundenauftrag gewählt sind, werden doppelt gewichtet, um gewählte Kann-Optionen stärker zu berücksichtigen (A_Hao 2017, S. 103; A_Hammerschmidt 2017, S. 97). Durch den maximalen Akzeptanzwert einer einzelnen Option in Höhe von 0,51 wird somit für eine solche gewählte Muss- oder Kann-Optionen verhindert, dass diese abweicht (A_Hammerschmidt 2017, S. 97 f.). Hinsichtlich der Tausche wird rund ein Drittel der betrachteten Teilearten als programmorientiert angenommen, sodass sich deren Teileanzahlen durch einen Tausch nicht ändern dürfen (A_Hammerschmidt 2017, S. 131).

Sequenzierungsregeln werden zur Antizipation des Car-Sequencing hinsichtlich der Endmontage bei der Planauftragsauswahl ebenso wie bei der Auftragseinplanung je kundenwählbare Option für beide Standorte und auch für alle Abschnitte gleichermaßen angenommen. Anstelle der Antizipation des Mixed-Model-Sequencing durch Arbeitslastabweichungen sind daher bei der Planauftragsauswahl Car-Sequencing-Regeln für Optionen zu berücksichtigen, da die Fixierungszeitpunkte für Änderungen der für die 100 % Planaufträge als sicher angenommenen Optionen erst nach der Auftragsplanung liegen. Entsprechend der Car-Sequencing-Regeln ist die Anzahl an Aufträgen $|I_o^{ai}|$ mit einer Optionen je Abschnitt und somit auch je Standort nach Formel 5-2 beschränkt. Hierbei ist zu beachten, dass es ausschließlich durch zusätzliche Optionen, die der Kunde wünscht und die somit in der Kundenauftragskonfiguration und nicht in der Planauftragskonfiguration enthalten sind, zu Verletzungen kommen kann. Ebenso werden Car-Sequencing-Regeln für die Sicherstellung ihrer Einhaltung in der Sequenz der sequenzierten Tagesbestände bei der Planauftragsrekonfiguration verwendet. Beschränkungen von Arbeitslastabweichungen in der Sequenz sind keine zu beachten. (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 75 ff.; vgl. A_Kramer 2016, S. 49, S. 54, S. 79)

$$b_{i_o} \times (|I_o^{ai}| + 1) \leq \alpha \times \frac{H_{o_{ai}}}{N_{o_{ai}}} \times C_{ai}^{Slot} \quad \forall i \in I, \forall o \in (O_j \setminus O_i) \quad \text{Formel 5-2}$$

Basierend auf dem Auftragsbestand zum beschriebenen diskreten Betrachtungszeitpunkt wird die aufeinanderfolgende Zuordnung von 100 einzelnen Kundenaufträgen zu Planaufträgen simuliert. Diese werden zufällig aus den vorliegenden historischen Kundenaufträgen gezogen. Die Wunschliefertermine werden entsprechend der beschriebenen Normalverteilung der gewünschten Lieferzeit, die auch zur Berechnung des Auftragsfüllgrades verwendet wird, zufällig generiert und entsprechend der Transportdauern in Wunschproduktionsabschnitte je Standort umgerechnet. Zur laufzeiteffizienteren Planauftragsauswahl werden im Folgenden lediglich die Abschnitte 7 bis 32 betrachtet, da es sich in Abschnitt 7 mit bis zu 60 Werktagen vor der Distribution entsprechend dem Auftragsfüllgrad lediglich bei einem kleinen Bruchteil des Auftragsbestands um Kundenaufträge handelt. Aufgrund der identischen Aufträge je Monat kann womöglich kein besserer Planauftrag in den Abschnitten eins bis sechs gegenüber den anderen Abschnitten gefunden werden. In den betrachteten Abschnitten liegen 307.200 Aufträge, wobei 56 % der Aufträge entsprechend der Auftragsfüllgrade der Abschnitte Planaufträge sind und somit für die Kundenauftragszuordnung zur Verfügung stehen. (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 99 f., S. 108, S. 110; vgl. A_Hao 2017, S. 92 f., S. 103)

Zur Planauftragsauswahl wird die standardmäßige Lösungsgütetoleranz in CPLEX von 0,01 % und eine Rechenlaufzeitbegrenzung zur Lösung des Optimierungsproblems von einer Minute gewählt. Je Kundenauftrag wird die Planauftragsauswahl ohne abweichende Optionen (Angebot 1) und mit abweichenden Optionen (Angebot 2) ausgeführt. Eine abweichende Konfiguration bzw. ein zweites Angebot wird jedoch ausschließlich dann angeboten, wenn deren bzw. dessen Zielfunktionswert der Planauftragsauswahl den der Planauftragsauswahl entsprechend der Wunschkonfiguration des ersten Angebots unterschreitet. Ist dies nicht der Fall, so besteht auch kein Grund für den Automobilhersteller, dem Kunden eine abweichende Konfiguration anzubieten. In der Simulation wird schließlich jeder Kundenauftrag dem Planauftrag mit der Wunschkonfiguration (Angebot 1) zugeordnet und steht somit für die nachfolgenden Kundenauftragszuordnungen nicht mehr zur Verfügung. Sämtliche Planaufträge eines Abschnitts an einem Standort werden zur Planauftragsauswahl für einen Kundenauftrag gesperrt, nachdem fünf Planaufträge des Abschnitts gesperrt wurden. Nach Sperrungen wird in CPLEX das Problem erneut gelöst ohne das Optimierungsmodell neu aufbauen zu müssen. Werden Tausche für einen Kundenauftrag aufgrund der Baubarkeit oder der Sequenz bei fünf Durchläufen nicht zugelassen oder ändern sich programmorientierte Teilebedarfe, so werden Tausche verboten und das Modell in CPLEX wird neu aufgebaut und

gelöst. Das entsprechende Ablaufdiagramm zur Kundenauftragszuordnung ist in Abbildung A34 dargestellt. (A_Hao 2017, S. 101 ff.; vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 108 ff.)

Zur Untersuchung der Rekonfigurationsflexibilität werden neben der Standardvariante, die Änderungen, Tausche und Umbauten zulässt, weitere Modellvarianten betrachtet. In der zweiten Variante werden Umbauten, in der dritten Variante Tausche und in der vierten Variante sowohl Umbauten als auch Tausche nicht ermöglicht. Änderungen werden in allen Varianten bis zu den Fixierungszeitpunkten zugelassen. Die durchschnittlich erzielten Kosten sind sowohl für das erste und als auch für das zweite Angebot für die 100 simulierten Kundenauftragszuordnungen der Modellvarianten in Tabelle A20 angegeben. Da nicht für jeden der 100 Kundenaufträge ein zweites Angebot ausgewiesen wird, wird zum Vergleich der Kosten für die Angebote 1 und 2 auf Basis von sämtlichen 100 Kundenaufträgen je Kundenauftrag Angebot 1 anstelle von Angebot 2 verwendet, falls kein Angebot 2 besteht (Angebot 1/2). Angaben über die Einhaltung der gewünschten Liefertermine und die durchschnittliche Ausnutzung der einzelnen Rekonfigurationsflexibilitätsarten finden sich in Tabelle A21. In Tabelle A22 sind weitere Auswertungen wie die Rechenlaufzeiten und die Anzahl an angebotenen Planaufträgen für die 100 Kundenaufträge angegeben. Zur Vergleichbarkeit der Modellvarianten werden jeweils dieselben Kundenaufträge mit denselben Wunschlieferterminen zur Kundenauftragszuordnung verwendet (A_Hao 2017, S. 103; vgl. A_Kramer 2016, S. 84).

Die Verteilung der Gesamtkosten und der einzelnen Kostenarten ohne Optionsabweichungen (Angebot 1) und mit Optionsabweichungen (Angebot 1/2) sind für die Standardvariante in Abbildung 5.14 dargestellt. Dabei ist die höhere Spannweite der Terminverzögerungskosten im Vergleich zu den Rekonfigurationskosten ersichtlich. Da Kundenaufträge nacheinander ohne direkte Abhängigkeit untereinander Planaufträgen zugeordnet werden, sind jedoch vor allem die realisierten Gesamtkosten über die Aufträge hinweg und somit die durchschnittlichen Gesamtkosten als Ergebnishöhe von Interesse. Hinsichtlich der Planungsrobustheit sind die durchschnittlichen Rekonfigurationskosten aufgrund der damit verbundenen Anpassungen relevant. Die Rekonfigurationskosten ergeben sich durch Rekonfigurationen unter Nutzung der Rekonfigurationsflexibilität. Die Notwendigkeit für Rekonfigurationen hängt davon ab, wie stark die Plan-Einbauraten der Planaufträge von den tatsächlichen Ist-Einbauraten abweichen und wie gut die Planauftragskonfigurationen die Kombination von Optionen der Kundenauftragskonfigurationen widerspiegeln. Da die Abweichungen zwischen den Plan-Einbauraten und den prognostizierten Soll-Einbauraten durch die Planauftragsgenerierung

möglichst gering gehalten werden, spielen die Abweichungen der prognostizierten Soll-Einbauraten von den tatsächlichen Ist-Einbauraten bei der Planauftragsrekonfiguration eine Rolle.

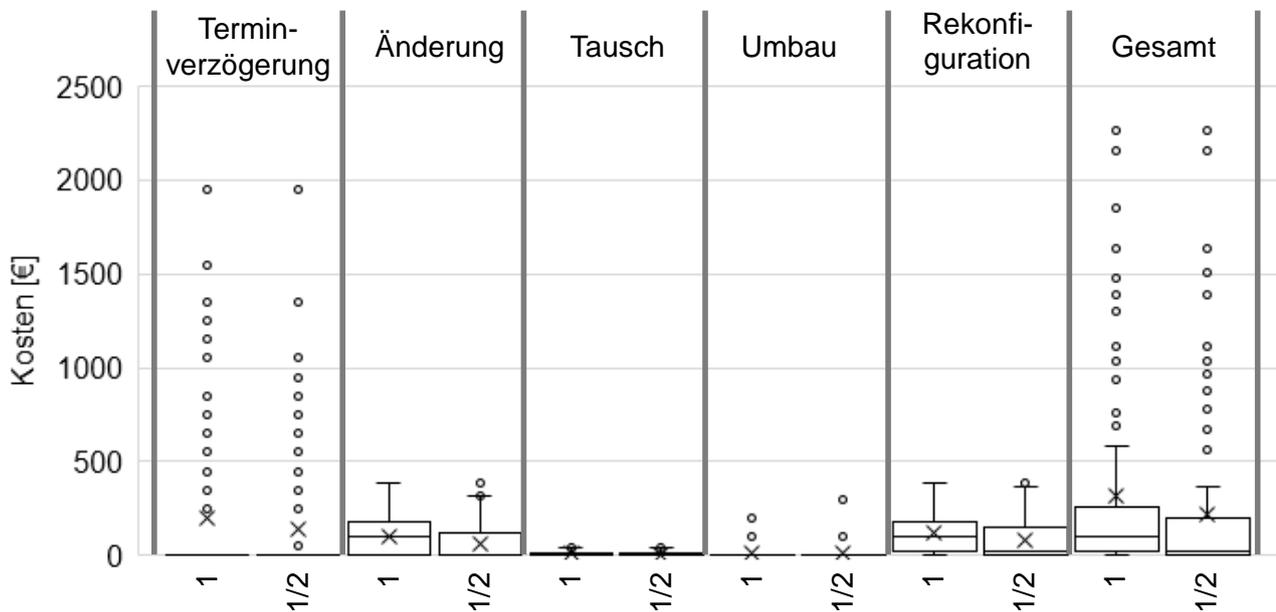


Abbildung 5.14: Verteilung der Gesamtkosten und der einzelnen Kostenterme der Standardvariante ohne (1) und mit (1/2) Optionsabweichungen (A_Hao 2017, S. 115)

Unter Zulassung von abweichenden Optionen (Angebot 2) wird in der Standardmodellvariante für 60 der 100 Kundenaufträge innerhalb der vorgegebenen Rechenlaufzeit ein Planauftrag mit niedrigeren Gesamtkosten als ohne abweichende Optionen (Angebot 1) gefunden. Die durchschnittliche Summe der Akzeptanzwerte beträgt für diese 0,85. Wird für jeden der 60 Aufträge, für die ein zweites Angebot erfolgt, auch dieses gewählt und für alle anderen das erste Angebot (Angebot 1/2), so können die durchschnittlichen Gesamtkosten von € 315,46 (Angebot 1) auf € 220,50 (Angebot 1/2) reduziert werden. Hinsichtlich der Kostenterme können durch die Inanspruchnahme der Rekonfigurationsflexibilität in Form von Abweichungen die Rekonfigurationskosten gesenkt werden. Eine bessere Einhaltung der gewünschten Liefertermine und entsprechend geringere Terminverzögerungskosten können ebenfalls durch die Rekonfigurationsflexibilität durch Abweichungen erzielt werden. So wird für Angebot 1 eine Einhaltung der gewünschten Liefertermine zu 78% und für Angebot 1/2 zu 83% erreicht. Dies lässt sich dadurch erklären, dass Kundenaufträge für Angebot 1/2 den näher am Produktionstermin liegenden Abschnitten zugeordnet werden können, da weniger Änderungen zu den entsprechenden frühzeitigen Fixierungszeitpunkten erfolgen müssen. Ebenfalls werden für Angebot 1/2 weniger Tausche genutzt, obwohl für Angebot 1 bei

63 der 100 Aufträge Tausche verboten werden, da sie nicht erfolgreich hinsichtlich der Baubarkeit, der Beschränkungen hinsichtlich der Sequenz der Optionen oder der programmorientierten Teile durchgeführt werden können. Insgesamt werden Kundenaufträge eines Marktes auch Planaufträgen der weiter entfernt gelegenen Standorte zugeordnet, sodass die längeren Transportdauern nicht vermieden werden. (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 111; vgl. A_Hao 2017, S. 105, S. 109 ff.)

Die Ergebnisse der zweiten Modellvariante ohne Rekonfigurationsflexibilität durch Umbauten zeigen, dass die durchschnittlichen Gesamtkosten für die 100 Aufträge höher als in der ersten Modellvariante ausfallen. Dies ist auf den Anstieg der Terminverzögerungskosten zurückzuführen, da durch die wegfallende Umbauflexibilität Rekonfigurationen nach den Fixierungszeitpunkten für Tausche ggf. lediglich durch Abweichungen möglich sind. Dagegen sinken die Rekonfigurationskosten leicht, da die günstigere Rekonfigurationsflexibilität durch Änderungen und Tausche vermehrt in Anspruch genommen wird. (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 111; vgl. A_Hao 2017, S. 111)

Wird in der dritten Modellvariante Rekonfigurationsflexibilität durch Tausche nicht erst bei nicht erfolgreichem Tausch, sondern generell nicht ermöglicht, so steigen die Gesamtkosten für die 100 Aufträge erheblich gegenüber der Standardvariante. Sowohl die Terminverzögerungskosten als auch die Rekonfigurationskosten fallen höher aus. Dies kann dadurch erklärt werden, dass anstelle von günstigen Tauschen mehr Änderungen und Umbauten durchgeführt werden, die beide teurer sind. Zudem müssen Änderungen bis zu den entsprechenden Fixierungszeitpunkten erfolgen, was somit zu einer schlechteren Einhaltung der gewünschten Liefertermine führt. (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 112; vgl. A_Hao 2017, S. 111 f.)

In der vierten Modellvariante ohne Rekonfigurationsflexibilität durch Umbauten und durch Tausche und somit der reinen Rekonfigurationsflexibilität durch Änderungen des ersten Angebots und zusätzlich der Abweichungen des zweiten Angebots liegen die Gesamtkosten für die 100 Aufträge höher als in den ersten drei Modellvarianten. Im Vergleich zur Standardvariante fallen sowohl die Terminverzögerungskosten als auch die Rekonfigurationskosten höher aus, da Rekonfigurationen durch Änderungen lediglich bis zu deren Fixierungszeitpunkten erfolgen können. (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 112; vgl. A_Hao 2017, S. 112)

Zur Rekonfigurationsflexibilität werden Änderungen in allen Modellvarianten als erforderlich betrachtet und zugelassen. Darauf basierend tragen vor allem Abweichungen

gefolgt von Tauschen und Umbauten zur kostenminimalen Kundenauftragszuordnung bei. Dies zeigt sich daran, dass ohne Tausche und ohne Umbauten mit Abweichungen niedrigere Gesamtkosten (€ 295,80) erreicht werden als mit Tauschen und mit Umbauten ohne Abweichungen (€ 315,46). Zudem führen verbotene Tausche in Modellvariante 3 zu höheren Kostensteigerungen als Verbote von Umbauten in Modellvariante 2. Da Abweichungen als kostenlos betrachtet werden und die verwendeten Kostensätze für Tausche niedriger sind als diejenigen von Umbauten, trägt die Nutzung kostengünstiger Flexibilität zwar stärker zur kostengünstigen Kundenauftragszuordnung bei, jedoch können durch die Ermöglichung sämtlicher Rekonfigurationsflexibilitätsarten die niedrigsten Gesamtkosten erzielt werden. Dies ist auf die Beschränkung der Summe der Akzeptanzwerte von Abweichungen und die Ermöglichung von Umbauten für einzelne Optionen sowie den Zusammenhang zwischen den Fixierungszeitpunkten von Änderungen und Tauschen mit den Terminverzögerungskosten zurückzuführen.

Die Nutzung der einzelnen Rekonfigurationsflexibilitätsarten hängt zudem von den Lieferzeitanforderungen der Kunden in Bezug auf die Fixierungszeitpunkte und vom Auftragsfüllgrad ab. Hierzu zeigen die Ergebnisse der fünften Modellvariante, dass bei Verkürzung der gewünschten, mittleren Lieferzeit von 25 Werktagen auf 10 Werktage bei einer Standardabweichung von einem Werktag und gleichbleibendem Auftragsfüllgrad sowohl stark höhere Terminverzögerungskosten als auch höhere Rekonfigurationskosten im Vergleich zur Standardvariante anfallen. Dies kann sowohl dadurch erklärt werden, dass näher am Produktionsstart bereits mehr Fixierungszeitpunkte für Änderungen und Tausche überschritten sind, als auch dadurch, dass der Auftragsfüllgrad näher am Produktionsstart höher ist und dadurch weniger potentielle Tauschpartner zur Verfügung stehen. Daher werden mehr Umbauten in Anspruch genommen. (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 112 ff.; vgl. A_Hao 2017, S. 113)

Insgesamt ist durch die Entscheidungsvalidierung ersichtlich, dass jede der vier dargestellten Rekonfigurationsflexibilitätsarten zu einer Kostenreduzierung der Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen und somit zur Planungsrobustheit beiträgt. Gerade durch die gleichzeitige Abbildung sämtlicher Rekonfigurationsflexibilitätsarten in der Standardvariante des Modells können die niedrigsten Gesamtkosten erreicht werden. Die explizite und differenzierte Abbildung der zur Verfügung stehenden Flexibilität der einzelnen horizontalen Planungsebenen Beschaffung, Produktion, Distribution und Absatz der unternehmensinternen Supply Chain erweist sich somit hinsichtlich der Gesamtkosten und der Planungsrobustheit als vorteilhaft.

6 Diskussion und Ausblick

6.1 Diskussion

Entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit wurde ein Lösungsansatz zur mittelfristigen Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen entwickelt und vorgestellt. Dabei wurde unterschieden, ob Kundenaufträge mit unsicheren Auftragskonfigurationen oder keine Kundenaufträge vorliegen. Die relevanten Planungsaufgaben Auftragsgenerierung, Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk und Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen wurden adressiert, womit die entsprechenden forschungsleitenden Fragestellungen beantwortet wurden. Die Ansätze zur Lösung der drei Planungsaufgaben werden im Folgenden hinsichtlich der in Kapitel 3 eingeführten Kriterien bewertet.

Zur Generierung von sowohl Szenarien hinsichtlich Konfigurationen von Kundenaufträgen als auch von Planaufträgen wird die Optionenebene betrachtet. Bei der Szenariengenerierung ist die repräsentative Abbildung aller relevanten Szenarien in Form von baubaren Auftragskonfigurationen der Kundenaufträge von Bedeutung. Im Rahmen der Entscheidungsvalidierung im Flugzeugbau mit Kundenaufträgen mit unsicheren Auftragskonfigurationen wurde dargelegt, dass durch den entwickelten Ansatz mittels Stichprobenziehungen aus Arbeitslast-Clustern Szenarien generiert werden können, die die durch die Auftragskonfigurationen bedingten Arbeitslasten in der Endmontage je Kundenauftrag explizit repräsentativ abbilden. Durch die zusätzliche Generierung eines Szenarios mit der maximalen Arbeitslast in der Endmontage als Worst-Case-Szenario kann Informationsrobustheit bezüglich der Zulässigkeitsrobustheit bei der Auftragseinplanung sichergestellt werden. Bei der Planauftragsgenerierung im Automobilbau wurden Baubarkeitsregeln bezüglich Optionskombinationen berücksichtigt und Wahrscheinlichkeiten für die Optionenwahl bzw. Einbauraten mit einer Abweichung von unter 0,2 % eingehalten. Somit wird die Planungsrobustheit der Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen begünstigt, insofern die prognostizierten Einbauraten den tatsächlichen Einbauraten entsprechen. Referenzaufträge werden zur Planauftragsgenerierung keine benötigt, indem Auftragskonfigurationen unter Berücksichtigung von Baubarkeitsregeln und Einbauraten komplett neu konstruiert werden können.

Zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk wird ebenso wie bei der Auftragsgenerierung die Optionenebene betrachtet. Unsichere Auftragskonfigurationen werden für Kundenaufträge durch Szenarien und für noch nicht vorliegende Kundenaufträge durch

Planaufträge antizipiert. Durch das vorgestellte Optimierungsmodell erfolgt eine Zuordnung von Aufträgen zu Standorten und Perioden unter Antizipation der Materialbedarfsplanung durch z. B. Level-Scheduling-Kosten, der Ablaufplanung durch z. B. Arbeitslastabweichungskosten in Form von Flexibilitäts- und Wandlungskosten und der Distributionsplanung durch Distributionskosten (vgl. Abbildung 4.7). Die Absatzplanung wird z. B. durch Bestands- und Terminverzögerungskosten berücksichtigt (vgl. Abbildung 4.7). Eine Betrachtung der Ergebnis- sowie der Zulässigkeitsrobustheit wird durch das Szenarienmodell als robustes Optimierungsmodell in Form eines Kompensationsmodells ermöglicht. Durch das Worst-Case-Szenario besteht zudem Informationsrobustheit bezüglich der Zulässigkeitsrobustheit. Im Anwendungsfall des Flugzeugbaus wurde validiert, dass durch die Berücksichtigung von Flexibilitäts- und Wandlungskosten im Szenarienmodell maximale Arbeitslastabweichungen und dadurch auch andere positive Arbeitslastabweichungen möglichst gering gehalten werden. Das Szenarienmodell ermöglicht somit im Gegensatz zum Erwartungswertmodell durch die Antizipation unsicherer Auftragskonfigurationen der Kundenaufträge eine robuste Lösung. Im Anwendungsfall des Automobilbaus wurde validiert, dass die Antizipation des teileorientierten Level-Scheduling durch die Antizipation des optionsorientierten Level-Scheduling im Optimierungsmodell zur Auftragseinplanung approximiert werden kann. Bei der Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen werden Aufträge ebenfalls auf der Optionenebene betrachtet. Basierend auf der Planauftragsauswahl für einen Kundenauftrag durch das vorgestellte Optimierungsmodell wird die Erfüllung von Baubarkeitsregeln für rekonfigurierte Aufträge durch einen Algorithmus zur Planauftragsrekonfiguration sichergestellt. Als Rekonfigurationsflexibilitätsarten werden Änderungen, Tausche, Umbauten und Abweichungen betrachtet. Änderungen und Tausche werden entsprechend optionsbasierter Fixierungszeitpunkte ermöglicht. Die Materialbedarfsplanung und die Ablaufplanung werden bei Änderungen und Tauschen berücksichtigt, wobei Umbauten im Rahmen der Distributionsplanung und z. B. Abweichungen und Terminverzögerungskosten im Rahmen der Absatzplanung betrachtet werden (vgl. Abbildung 4.11). Zur Planungsrobustheit werden unter anderem die Rekonfigurationskosten minimiert, sodass die zur Verfügung stehenden Rekonfigurationsflexibilitätsarten in möglichst geringem Umfang genutzt werden. Die Entscheidungsvalidierung im Anwendungsfall des Automobilbaus legt dar, dass sich die explizite und differenzierte Abbildung sämtlicher Rekonfigurationsflexibilitätsarten im Optimierungsmodell als vorteilhaft hinsichtlich der Planungsrobustheit erweist.

Somit werden alle aufgeführten Kriterien durch den Lösungsansatz erfüllt. Dennoch ist zu beachten, dass für Fall I mit Kundenaufträgen mit unsicheren Auftragskonfigurationen zwar eine robuste Optimierung mittels Szenarien ermöglicht wird, die Anzahl der betrachteten Szenarien aufgrund der Komplexität jedoch ggf. lediglich einen geringen Anteil aller relevanten Szenarien ausmacht. Hinsichtlich Fall II mit Planaufträgen mit unsicheren Kundenauftragszuordnungen ist anzumerken, dass es unwahrscheinlich ist, dass die Auftragskonfigurationen der Planaufträge bei hoher Variantenzahl denen der später eingehenden Kundenaufträge entsprechen, womit die Planung „scheingenau“ ist und Rekonfigurationen nicht vermieden werden können (vgl. Stäblein 2008, S. 89).

6.2 Ausblick

Als Ausblick wird in diesem Kapitel auf mögliche Forschungsarbeiten zur Erweiterung des vorgestellten Lösungsansatzes eingegangen.

Bei der Auftragsgenerierung kann die Prognose der verwendeten Wahrscheinlichkeiten von Optionen bspw. durch eine stärkere Kundeninteraktion und Datenanalysen verbessert werden. Hierzu können bspw. Informationen über die Nutzung des Produktkonfigurators auf der unternehmenseigenen Webseite und über bestellte Auftragskonfigurationen ausgewertet werden (vgl. McKinsey & Company 2015, S. 26). So können insbesondere markt- und kundensegmentspezifische Trends kontinuierlich analysiert werden. Sollen zudem Abhängigkeiten und somit Verbundwahrscheinlichkeiten zwischen einzelnen Optionen bei der Auftragsgenerierung berücksichtigt werden, so ist der Lösungsansatz entsprechend zu erweitern, sodass diese insbesondere im Variantenbaum berücksichtigt werden. Die Beachtung von Verbundwahrscheinlichkeiten im Rahmen der Kundenauftragszuordnung wäre dann ebenfalls entsprechend zu erforschen.

Bei der Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk besteht bezüglich der Festlegung der Intervallgrenzen und insbesondere der oberen Flexibilitätsgrenze der stückweise linearen Kostenfunktionen der Arbeitslastabweichungskosten Forschungsbedarf. Hierzu können anwendungsfallsspezifische Analysen zu kurzfristigen Störungen im Produktionsablauf sowie zur erforderlichen Flexibilität der Reihenfolgeplanung durchgeführt werden, sodass der erforderliche Flexibilitätsvorbehalt systematisch ermittelt werden kann. Sollen bei der Auftragseinplanung neben dem Szenario mit der maximalen Arbeitslast weitere Szenarien mit Maximalwerten wie bspw. mit der maximalen Anzahl einer bestimmten unsicheren Option aufgrund der Flexibilitätsgrenzen der stückweise

linearen Level-Scheduling-Kostenfunktionen berücksichtigt werden, so können entsprechende Worst-Case-Szenarien generiert werden. So wäre bspw. neben einem Worst-Case-Szenario mit der maximalen Arbeitslast je Kundenauftrag, ebenso ein Worst-Case-Szenario mit der maximalen Anzahl einer unsicheren Option je Kundenauftrag zur Antizipation des Level-Scheduling sinnvoll, wenn hohe positive Abweichungen an einzelnen Standorten oder in einzelnen Monaten möglichst vermieden und transparent dargestellt werden sollen.

Zur Anwendung der Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen ist es hinsichtlich der Rekonfigurationskosten erforderlich, im Anwendungsfall möglichst reale Änderungskosten je Option festzulegen. Diese können entsprechend dem Optimierungsmodell zur Planauftragsauswahl als dynamisch betrachtet werden und je Abschnitt kontinuierlich aktualisiert werden, sodass bei jeder Anwendung des Modells aktuelle Preisinformationen verwendet werden können. Diesbezüglich kann der Ansatz hinsichtlich strukturierten, automatisierten Verhandlungen mit Lieferanten erweitert werden, indem Lieferanten aktuelle Preise entsprechend ihrer Kapazitäten abgeben (vgl. Egri et al. 2011, S. 228 f.), die als Rekonfigurationskosten für Änderungen bei der Kundenauftragszuordnung berücksichtigt werden können. Je besser Rekonfigurationskosten den „echten“ Kosten bzw. Preisen entsprechen, desto mehr kann die Planungsnervosität reduziert und die Planungsrobustheit erhöht werden (vgl. Egri et al. 2011, S. 229). Auf der anderen Seite kann ebenso die Information hinsichtlich der Kunden verbessert werden, indem kundenindividuelle Lieferterminabweichungskosten abhängig von ihrer Warteaversion und kundenindividuelle Akzeptanzwerte für abweichende Optionen ermittelt und verwendet werden, wobei auch entsprechende Anreize über den Verkaufspreis gegeben werden können (vgl. Brabazon & MacCarthy 2004, S. 158; vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 101). Darüber hinaus wäre es denkbar, Marktrestriktionen im Rahmen der Kundenauftragszuordnung aufzulockern und stattdessen mit Kostensätzen zu versehen, sodass Kundenaufträge auch Planaufträgen anderer Märkte zugeordnet werden können (vgl. Brabazon et al. 2010, S. 490, S. 493, S. 499).

7 Zusammenfassung

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Lösungsansatzes zur mittelfristigen Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen. Indem mittelfristig noch nicht vorliegende und somit unsichere Auftragskonfigurationen antizipiert und bei der Auftragsplanung berücksichtigt werden, kann eine robuste und somit möglichst optimale Planung unter Unsicherheit erfolgen. Die Motivation für den Ansatz besteht somit einerseits durch die Herausforderung von Unternehmen, die Produktion in Produktionsnetzwerken unter Unsicherheit möglichst optimal zu planen, und andererseits durch das Potential, den Ansatz in Form einer Software als Entscheidungsunterstützung im industriellen Kontext einsetzbar zu machen.

Insbesondere werden im Rahmen dieser Arbeit die Fälle betrachtet, dass zum mittelfristigen Planungszeitpunkt entweder Kundenaufträge mit unsicheren Auftragskonfigurationen oder keine Kundenaufträge vorliegen. Im letzteren Fall wird ebenso wie im ersteren eine auftragsbasierte Planung und zwar durch Planaufträge verfolgt, um auch ohne Kundenaufträge eine zeitliche Durchgängigkeit und somit Planungsrobustheit zwischen dem mittel- und kurzfristigen Planungshorizont zu ermöglichen. Die Planungsaufgabe der Auftragsgenerierung besteht daher im Falle von Kundenaufträgen in der Generierung von Szenarien hinsichtlich Auftragskonfigurationen für bekannte Kunden und Produktmodelle und im Falle von Planaufträgen in der Generierung von Planaufträgen hinsichtlich Auftragskonfigurationen für Märkte und Produktmodelle. Darauf folgend können die generierten Aufträge in das Produktionsnetzwerk eingeplant werden. Eingehende Kundenaufträge können schließlich den eingeplanten Planaufträgen zugeordnet werden.

Der Stand der Forschung bietet keinen Lösungsansatz, der die drei relevanten Planungsaufgaben der Auftragsgenerierung, der Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk und der Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen integriert betrachtet. Insbesondere wird in keinem der Ansätze die Robustheit hinsichtlich unsicherer Auftragskonfigurationen umfangreich betrachtet. Bei der Auftragsgenerierung bestehen vor allem Forschungsdefizite bezüglich der Generierung von Szenarien hinsichtlich unsicheren Auftragskonfigurationen und der Einhaltung von Einbauraten durch Planaufträge. Bei der Auftragseinplanung liegen Defizite bezüglich der Antizipation unsicherer Kundenauftragskonfigurationen und der entsprechenden Betrachtung der Robustheit vor. Bei

der Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen existieren Forschungsdefizite bezüglich der Berücksichtigung von Baubarkeitsregeln sowie bezüglich der expliziten und differenzierten Abbildung der zur Verfügung stehenden Flexibilität durch Rekonfigurationskosten bezüglich der Materialbedarfs-, der Ablauf- und der Distributionsplanung zur Robustheitsbetrachtung hinsichtlich der unsicheren Auftragskonfigurationen.

Entsprechend der bestehenden Forschungsdefizite wurde ein eigener Lösungsansatz entwickelt, der die drei relevanten Planungsaufgaben integriert adressiert und auf die Robustheit der Planung unter Unsicherheit der Auftragskonfigurationen abzielt. Zur Auftragsgenerierung wurde ein Ansatz zur Abbildung von Optionen bezüglich Auftragskonfigurationen in einem Variantenbaum unter Berücksichtigung der Baubarkeit von Optionskombinationen sowie zur Verrechnung von Optionswahrscheinlichkeiten zur Einhaltung prognostizierter Einbauraten vorgestellt. Für sichere Kundenaufträge mit unsicheren Auftragskonfigurationen nach Fall I sind zur Auftragseinplanung Szenarien hinsichtlich der Auftragskonfigurationen zu generieren. Hierzu wurde alternativ zur rein zufälligen Generierung von Szenarien eine Vorgehensweise zu deren Generierung mit explizit repräsentativer Abbildung der auf den Auftragskonfigurationen basierenden Arbeitslasten in der Endmontage entwickelt. Zur Betrachtung der Zulässigkeitsrobustheit hinsichtlich der Szenarien bei der Auftragseinplanung wurde auf die zusätzliche Generierung eines Worst-Case-Szenarios hinsichtlich der Arbeitslast eingegangen. Für Fall II mit nicht vorliegenden Kundenaufträgen wurde dargelegt, dass es zur Generierung von Planaufträgen für Märkte und Produktmodelle bei einer hohen Anzahl möglicher Auftragskonfigurationen in Bezug auf die Anzahl zu generierender Planaufträge sinnvoll sein kann, nicht sämtliche Optionen im Variantenbaum abzubilden. Priorisiert können hierzu Muss-Optionen im Variantenbaum abgebildet und Kann-Optionen den auf Basis der Muss-Optionen generierten Planaufträgen hinzugefügt werden.

Zur mittelfristigen Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk wurde ein Optimierungsmodell aufgestellt, das die Unsicherheit der Auftragskonfigurationen von Kundenaufträgen entweder durch ein deterministisches Erwartungswertmodell oder ein robustes Szenarienmodell berücksichtigt. Dabei werden die Aufgaben der Materialbedarfs-, der Ablauf- und der Distributionsplanung antizipiert und die erfolgte Absatzplanung berücksichtigt. Robustheit hinsichtlich der Arbeitslasten wird einerseits durch Flexibilitätskosten und andererseits durch Wandlungskosten unter Betrachtung des Worst-Case-Szenarios bezüglich der vorliegenden Kundenaufträge ermöglicht.

Durch den Eingang von Kundenaufträgen nach der mittelfristigen Auftragseinplanung wird die Unsicherheit über die Kunden von Planaufträgen und deren gewünschten Auftragskonfigurationen im Rahmen der Kundenauftragszuordnung aufgelöst. Dabei werden die Materialbedarfs-, Ablauf-, Distributions- und Absatzplanung berücksichtigt, indem in einem Optimierungsmodell die zur Verfügung stehende Rekonfigurationsflexibilität differenziert in Form von Änderungen, Tauschen und Umbauten mit entsprechenden Kosten sowie Abweichungen abgebildet wird. Im Sinne der Planungsrobustheit wird die Flexibilität durch Minimierung der Kosten in möglichst geringem Umfang genutzt. Durch einen zusätzlichen Algorithmus zur Planauftragsrekonfiguration wird unter anderem die Baubarkeit der Rekonfigurationen der Aufträge zur Ermöglichung der Kundenauftragszuordnung überprüft.

Der vorgestellte Lösungsansatz zur mittelfristigen Auftragsplanung wurde schließlich als Softwareprototyp implementiert. Zur Validierung wurden im Rahmen dieser Arbeit die beiden Extremfälle mit 100 % Kundenaufträgen nach Fall I im Flugzeugbau und mit 100 % Planaufträgen nach Fall II im Automobilbau betrachtet. So wurde in Fall I die Szenariengenerierung und die Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk anhand der Airbus A320-Produktfamilie validiert. Dabei wurden die Vorteile des robusten Szenarienmodells gegenüber dem deterministischen Erwartungswertmodell herausgestellt und die erwarteten Kosten, die durch die Unsicherheit der Auftragskonfigurationen aufgrund der Just-in-Time-Spezifikation anfallen, aufgeführt. Das Verbesserungspotential gegenüber der real erfolgten Planung wurde ebenso dargestellt. In Fall II wurde die Planauftragsgenerierung, die Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk und die Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen anhand eines Produktmodells mit Baubarkeitsregeln der regelbasierten Produktdokumentation eines Automobilherstellers mit $4,14 \times 10^{24}$ theoretisch möglichen Varianten validiert. Baubare Planaufträge konnten mit niedrigen Abweichungen der Einbauraten generiert und in ein fiktives Produktionsnetzwerk eingeplant werden. Der Beitrag der Rekonfigurationsflexibilität in Form von Änderungen, Tauschen, Umbauten und Abweichungen von Optionen zur Planungsrobustheit wurde im Rahmen der Entscheidungsvalidierung dargelegt.

Schließlich wurde der Lösungsansatz vor dem Hintergrund der Kriterien zur Bewertung des Stands der Forschung diskutiert. Es konnte festgestellt werden, dass dieser die Kriterien vollständig erfüllt. Möglichkeiten zur Erweiterung des Lösungsansatzes wurden im Ausblick der Arbeit dargestellt.

Literaturverzeichnis

Literaturangaben gemäß dem Schema A_Nachname beziehen sich auf studentische Arbeiten des wbk, die vom Verfasser der Dissertation angeleitet wurden.

A_Almagro, M. (2016), *Konzeptionierung einer Methodik zur Szenariengenerierung für die Auftragseinplanung in globalen Produktionsnetzwerken*. Bachelorarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Beisecker, J. (2015), *Konzeptionierung einer Produktstruktur zur prognosebasierten Generierung von Planaufträgen zur variantenreichen Serienproduktion*. Masterarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Blättchen, P. (2016), *Development and implementation of a two-stage approach for order-based production planning in the aircraft manufacturing industry*. Masterarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Fischer, S. (2015), *Konzeptionierung eines Abwicklungsprozesses für Kundenaufträge auf Basis von prognostizierten Planaufträgen*. Masterarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Geier, B. (2016), *Konzeptionierung und Implementierung eines Modells zur prognosebasierten Generierung von Planaufträgen für die variantenreiche Serienproduktion*. Masterarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Hammerschmidt, A. (2017), *Validierung eines durchgängigen Planungskonzepts für die variantenreiche Serienproduktion in globalen Produktionsnetzwerken*. Masterarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Hao, H. (2017), *Anwendungskonzeptionierung und -implementierung zur Auftragsplanung für die variantenreiche Serienproduktion in globalen Produktionsnetzwerken*. Masterarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Hupays, C. (2016), *Konzeptentwicklung für eine zeitlich verteilte Flugzeugspezifikation durch die Kunden für die A320-Familie aus Sicht der Produktionsplanung bei Airbus*. Masterarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Kramer, S. (2016), *Konzeptionierung und Implementierung einer multikriteriellen Einplanung von Planaufträgen und deren Zuordnung zu Kundenaufträgen für die variantenreiche Serienproduktion in globalen Produktionsnetzwerken*. Masterarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

- A_Kronenbitter, J. (2017), *Validierung und Anwendung eines robusten Modells zur Auftragseinplanung im globalen Produktionsnetzwerk der Airbus A320-Familie*. Masterarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.
- A_Molzahn, K. (2017), *Weiterentwicklung und Validierung eines Modells zur Optimierung der Auftragseinplanung in globalen Produktionsnetzwerken bei Airbus*. Masterarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.
- A_Qu, C. (2015), *Konzeptionierung eines Modells zur Optimierung der Auftragsallokation in globalen Produktionsnetzwerken*. Bachelorarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.
- A_Schweizer, Y. (2017), *Weiterentwicklung und Verifikation eines Modells zur Auftragsplanung in globalen Produktionsnetzwerken der Luftfahrtindustrie*. Masterarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.
- A_Strunz, C. (2017), *Konzeptionierung und Validierung eines robusten Modells zur Auftragseinplanung unter Berücksichtigung von Szenarien der Kundenoptionswahl*. Masterarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.
- A_Thoma, J. (2015), *Konzeptionierung eines Modells zur Optimierung der Auftragseinplanung in globalen Produktionsnetzwerken*. Bachelorarbeit, KIT, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.
- Abele, E.; Meyer, T.; Näher, U.; Strube, G. & Sykes, R. (2008), *Global Production. A Handbook for Strategy and Implementation*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Airbus (2014), *Neue Listenpreise für Airbus-Flugzeuge ab Januar 2015*. <http://www.airbus.com/newsroom/press-releases/de/2015/01/new-airbus-aircraft-list-prices-for-2015.html#> [18.11.2017].
- Airbus (2017), *ODs Airbus Commercial Aircraft October 2017*. http://www.aircraft.airbus.com/market/orders-deliveries/?eID=maglisting_push&tx_maglisting_pi1%5BdocID%5D=240348 [28.11.2017].
- Anthony, R. N. (1965), *Planning and control systems. A framework for analysis*, Harvard University, Boston.
- Auer, S.; Mayrhofer, W. & Sihn, W. (2012), „Implementation of a Comprehensive Production Planning Approach in Special Purpose Vehicle Production“, *Procedia CIRP*, Bd. 3, S. 43–48.

- Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W. & Weiber, R. (2016), *Multivariate Analysemethoden*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Ball, M. O.; Chen, C.-Y. & Zhao, Z.-Y. (2004), „Available to Promise“ in *Handbook of quantitative supply chain analysis. Modeling in the e-business era*, Hrsg. D. Simchi-Levi, S. D. Wu & Z.-J. Shen, Springer, New York, S. 447–483.
- Bamberg, G.; Baur, F. & Krapp, M. (2012), *Statistik*, Oldenbourg, München.
- Belkadi, F.; Buergin, J.; Gupta, R. K.; Zhang, Y.; Bernard, A.; Lanza, G.; Colledani, M. & Urgo, M. (2016), „Co-Definition of Product Structure and Production Network for Frugal Innovation Perspectives: Towards a Modular-based Approach“, *Procedia CIRP*, Bd. 50, S. 589–594.
- Birge, J. R. & Louveaux, F. (2011), *Introduction to stochastic programming*, Springer, New York.
- Bish, E. K.; Muriel, A. & Biller, S. (2005), „Managing Flexible Capacity in a Make-to-Order Environment“, *Management Science*, Bd. 51, Nr. 2, S. 167–180.
- Bitran, G. R. & Tirupati, D. (1989), „Hierarchical Production Planning“, *MIT Sloan School Working Paper #3017-89-MS*.
- Blackburn, J. D.; Kropp, D. H. & Millen, R. A. (1986), „A comparison of strategies to dampen nervousness in MRP systems“, *Management Science*, Bd. 32, Nr. 4.
- Boysen, N. (2005), *Variantenfließfertigung*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Boysen, N.; Fliedner, M. & Scholl, A. (2007a), „Level-Scheduling bei Variantenfließfertigung. Klassifikation, Literaturüberblick und Modellkritik“, *Journal für Betriebswirtschaft*, Bd. 57, S. 37–66.
- Boysen, N.; Fliedner, M. & Scholl, A. (2007b), „Produktionsplanung bei Variantenfließfertigung: Planungshierarchie und Elemente einer Hierarchischen Planung“, *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 2007, S. 759–793.
- Boysen, N.; Fliedner, M. & Scholl, A. (2009), „Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique“, *European Journal of Operational Research*, Bd. 192, S. 349–373.
- Brabazon, P. G. & MacCarthy, B. (2004), „Virtual-Build-to-Order as a Mass Customization Order Fulfilment Model“, *Concurrent Engineering*, Bd. 12, Nr. 2, S. 155–165.

- Brabazon, P. G. & MacCarthy, B. (2006), „Fundamental behaviour of virtual-build-to-order systems“, *International Journal of Production Economics*, Bd. 104, S. 514–524.
- Brabazon, P. G.; MacCarthy, B.; Woodcock, A. & Hawkins, R. W. (2010), „Mass Customization in the Automotive Industry: Comparing Interdealer Trading and Reconfiguration Flexibilities in Order Fulfillment“, *Production and Operations Management*, Bd. 19, Nr. 5, S. 489–502.
- Bracht, U. & Eisenhart Rothe, M. v. (2000), „Stücklistenkonsistenz in der Serienfertigung. Ein Lösungsansatz für variantenreiche Serienprodukte am Beispiel der Automobilindustrie“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 95, Nr. 12, S. 616–620.
- Buergin, J.; Beisecker, J.; Fischer, S.; Geier, B.; Tutsch, H.; Mercamp, S. & Lanza, G. (2017), „Generation of Planned Orders and their Matching with Customer Orders in Multi-variant Series Production“, *Procedia CIRP*, Bd. 61, S. 499–504.
- Buergin, J.; Belkadi, F.; Hupays, C.; Gupta, R. K.; Bitte, F.; Lanza, G. & Bernard, A. (2018), „A modular-based approach for Just-In-Time Specification of customer orders in the aircraft manufacturing industry“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Bd. 21, S. 61–74.
- Buergin, J.; Blaettchen, P.; Qu, C. & Lanza, G. (2016), „Assignment of Customer-Specific Orders to Plants with Mixed-Model Assembly Lines in Global Production Networks“, *Procedia CIRP*, Bd. 50, S. 330–335.
- Bürgin, J.; Hao, H.; Lanza, G. & Tutsch, H. (2017), „Integrierte Auftragsplanung variantenreicher Produkte. Ein Softwareprototyp zur Generierung und Einplanung von Planaufträgen sowie deren Zuordnung zu Kundenaufträgen“, *Industrie 4.0 Management*, Nr. 33, S. 29–32.
- Buzacott, J. A.; Corsten, H.; Gössinger, R. & Schneider, H. M. (2010), *Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Konzepte und integrative Entwicklungen*, Oldenbourg, München.
- Chen, R.-C. & Hung, P.-H. (2014), „Multiobjective Order Assignment Optimization in a Global Multiple-Factory Environment“, *Mathematical Problems in Engineering*, Bd. 2014, S. 1–14.
- Colledani, M.; Silipo, L.; Yemane, A.; Lanza, G.; Bürgin, J.; Hochdörffer, J.; Georgoulas, K.; Mourtzis, D.; Bitte, F.; Bernard, A. & Belkadi, F. (2016), „Technology-based

- Product-services for Supporting Frugal Innovation“, *Procedia CIRP*, Bd. 47, S. 126–131.
- Dauzère-Péres, S. & Lasserre, J.-B. (1994), *An integrated approach in production planning and scheduling*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Decker, M. (1993), *Variantenfließfertigung*, Physica-Verlag, Heidelberg.
- Dellaert, N. P. (1989), *Production to Order: Models and Rules for Production Planning*, Springer, Heidelberg.
- Dichtl, E.; Raffee, H.; Beeskow, W. & Köglmayr, H.-G. (1982), *Faktisches Bestellverhalten als Grundlage einer optimalen Ausstattungspolitik bei Pkw-Modellen*, Institut für Marketing, Universität Mannheim.
- Domschke, W. & Scholl, A. (2008), *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht*, Springer, Berlin.
- Dörmer, J. (2013), *Produktionsprogrammplanung bei variantenreicher Fließproduktion. Untersucht am Beispiel der Automobilendmontage*, Springer Gabler, Wiesbaden.
- Drexl, A. & Kimms, A. (2001), „Sequencing JIT Mixed-Model Assembly Lines Under Station-Load and Part-Usage Constraints“, *Management Science*, Bd. 47, Nr. 3, S. 480–491.
- Eckey, H.-F.; Kosfeld, R. & Dreger, C. (2000), *Statistik. Grundlagen - Methoden - Beispiele*, Gabler, Wiesbaden.
- Egri, P.; Döring, A.; Timm, T. & Váncza, J. (2011), „Collaborative planning with benefit balancing in Dynamic Supply Loops“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Bd. 4, Nr. 3, S. 226–233.
- Ehinger, G.; Eisenhart-Rothe, M.; Hauck, C.; Klostermann, F.; Krugmann, R.; Murtic, S.; Puri, W.; Spors, K. & Zscheile, M. (2002), „Komplexitätsmanagement“ in *Leitprojekt integrierte, virtuelle Produktentstehung. Abschlussbericht*, Hrsg. F.-L. Krause, T. Tang & U. Ahle, S. 106–114.
- Elias, S. (2002), *3 Day Car Programme Research Survey Report. New Car Buyer Behaviour*, Cardiff.
- Ellinger, T. (1959), *Ablaufplanung: Grundfragen der Planung des zeitlichen Ablaufs der Fertigung im Rahmen der industriellen Produktionsplanung*, Poeschel, Stuttgart.
- Fandel, G. (2009), *Kostenrechnung*, Springer, Berlin, Heidelberg.

- Ferber, S. (2005), *Strategische Kapazitäts- und Investitionsplanung in der globalen Supply Chain eines Automobilherstellers*, Shaker, Aachen.
- Flaherty, M. T. (1986), „Coordinating international manufacturing and technology“ in *Competition in Global Industries*, Hrsg. M. E. Porter, Harvard Business School Press, S. 83–110.
- Fleischmann, B.; Meyr, H. & Wagner, M. (2015), „Advanced Planning“ in *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies*, Hrsg. H. Stadtler, C. Kilger & H. Meyr, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 71–95.
- Gausemeier, J. & Plass, C. (2014), *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung. Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*, Hanser, München.
- Gebhard, M. (2009), *Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit*, Gabler, Wiesbaden.
- Guo, Z. X.; Wong, W. K. & Leung, S. (2013), „A hybrid intelligent model for order allocation planning in make-to-order manufacturing“, *Applied Soft Computing*, Bd. 13, Nr. 3, S. 1376–1390.
- Guo, Z. X.; Wong, W. K.; Li, Z. & Ren, P. (2013), „Modeling and Pareto optimization of multi-objective order scheduling problems in production planning“, *Computers & Industrial Engineering*, Bd. 64, Nr. 4, S. 972–986.
- Han, J.; Kamber, M. & Pei, J. (2012), *Data Mining. Concepts and Techniques*, Elsevier, Amsterdam.
- Hax, A. C. & Candea, D. (1984), *Production and inventory management*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Hax, A. C. & Meal, H. C. (1973), „Hierarchical integration of production planning and scheduling“, *Sloan Working Papers*, 656–73.
- Hayes, R. H. & Wheelwright, S. C. (1984), *Restoring Our Competitive Edge: Competing Through Manufacturing*, Wiley, New York.
- Hayler, C. (1999), *Ein regelbasiertes System zur Generierung von Orders für Lagerfahrzeuge. Fallstudie bei einem deutschen Automobilhersteller*, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

- Heger, C. L. (2007), *Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten*, PZH, Produktionstechn. Zentrum, Garbsen.
- Heitsch, H. (2005), „Modellierung multivariater Szenariobäume für die Optimierung von Energieportfolios“, *Optimierung in der Energiewirtschaft, VDI-Berichte 1908*, S. 65–75.
- Herlyn, W. (1990), *Zur Problematik der Abbildung variantenreicher Erzeugnisse in der Automobilindustrie*, VDI-Verl., Düsseldorf.
- Herlyn, W. (2012), *PPS im Automobilbau. Produktionsprogrammplanung und -steuerung von Fahrzeugen und Aggregaten*, Hanser Verlag, München.
- Hernández Morales, R. (2003), *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*, VDI-Verl., Düsseldorf.
- Herold, L. (1998), „Prozeßkettenorientiertes Logistik-Controlling "vom Kunden bis zum Kunden" am Beispiel der Automobilindustrie“ in *Unternehmensplanung und Controlling. Festschrift zum 60. Geburtstag von Jürgen Bloech*, Hrsg. R. Bogaschewsky & U. Götze, Physica, Heidelberg, S. 233–250.
- Hodges, J. L. & Lehmann, E. L. (1952), „The use of Previous Experience in Reaching Statistical Decisions“, *The Annals of Mathematical Statistics*, Bd. 23, Nr. 3, S. 396–407.
- Hoekstra, S. & Romme, J. (Hrsg.) (1992), *Integral logistic structures. Developing customer-oriented goods flow*, Industrial Press Inc., New York.
- Holweg, M. & Pil, F. K. (2001), „Successful Build-to-Order Strategies. Start With the Customer“, *MIT Sloan Management Review 2001*, S. 74–85.
- Holweg, M. & Pil, F. K. (2004), *The Second Century: Reconnecting Customer and Value Chain through Build-to-Order. Moving beyond Mass and Lean Production in the Auto Industry*, MIT Press, Cambridge.
- IBM (2016), *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. CPLEX User's Manual: Version 12 Release 7*.
- Ihme, J. (2006), *Logistik im Automobilbau. Logistikkomponenten und Logistiksysteme im Fahrzeugbau*, Hanser, München.
- Kall, P. & Wallace, S. W. (1994), *Stochastic programming*, Wiley, Chichester.
- Kallrath, J. (2013), *Gemischt-ganzzahlige Optimierung. Modellierung in der Praxis ; mit Fallstudien aus Chemie, Energiewirtschaft, Papierindustrie, Metallgewerbe, Produktion und Logistik*, Springer Spektrum, Wiesbaden.

- Kappler, J. (2010), *Robuste intervallbasierte Primär- und Sekundärbedarfsplanung in automobilen Neuproduktprojekten*, Shaker, Aachen.
- Kappler, J.; Schütte, A.; Jung, H.; Arnhold, D. & Bracht, U. (2010), „Robuste Primär- und Sekundärbedarfsplanung komplexer und variantenreicher Serienprodukte“, *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*, S. 69–76.
- Keeney, R. L. & Raiffa, H. (1993), *Decisions with multiple objectives. Preferences and value tradeoffs*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kilger, C. & Meyr, H. (2015), „Demand Fulfilment and ATP“ in *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies*, Hrsg. H. Stadtler, C. Kilger & H. Meyr, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 177–194.
- King, A. J. & Wallace, S. W. (2012), *Modeling with stochastic programming*, Springer, New York.
- Klug, F. (2010), *Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Konen, W. (1985), *Kennzahlen in der Distribution*, Springer, Berlin.
- Koren, Y. (2010), *The global manufacturing revolution. Product-process-business integration and reconfigurable systems*, Wiley, Hoboken.
- Lanza, G.; Bürgin, J.; Berger, D. & Peters, S. (2015), „Wie Industrie 4.0 die Steuerung von Produktion und Supply Chain verändern wird“ in *Controlling im digitalen Zeitalter. Herausforderungen und Best-Practice-Lösungen*, Hrsg. P. Horváth & U. Michel, Schäffer-Poeschel, Stuttgart, S. 87–99.
- Liebler, K. M. (2013), *Eine prozess- und IT-gestützte Methode für die Produktionsplanung in der Automobilindustrie*, Technische Universität Dortmund.
- Lingitz, L.; Morawetz, C.; Gigloo, D. T.; Minner, S. & Sihm, W. (2013), „Modelling of Flexibility Costs in a Decision Support System for Mid-term Capacity Planning“, *Procedia CIRP*, Bd. 7, S. 539–544.
- Lödding, H. (2008), *Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- McKinsey & Company (Hrsg.) (2015), *Industry 4.0. How to navigate digitization of the manufacturing sector*.

- Meredith, J. R. & Akinc, U. (2007), „Characterizing and structuring a new make-to-forecast production strategy“, *Journal of Operations Management*, Bd. 25, Nr. 3, S. 623–642.
- Meyr, H. (2004), „Supply chain planning in the German automotive industry“, *OR Spectrum*, Bd. 26, Nr. 4, S. 447–470.
- Meyr, H. (2009), „Customer segmentation, allocation planning and order promising in make-to-stock production“ in *Supply Chain Planning. Quantitative Decision Support and Advanced Planning Solutions*, Hrsg. H. O. Günther & H. Meyr, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 117–144.
- Mißler-Behr, M. (2001), *Fuzzybasierte Controllinginstrumente. Entwicklung von unscharfen Ansätzen*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Mitroff, I. I.; Betz, F.; Pondy, L. R. & Sagasti, F. (1974), „On managing science in the systems age. Two schemas for the study of science as a whole systems phenomenon“, *Interfaces*, Bd. 4, Nr. 3, S. 46–58.
- Möller, N. (2008), *Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme*, Herbert Utz Verlag, München.
- Mulvey, J. M.; Vanderbei, R. J. & Zenios, S. A. (1995), „Robust Optimization of Large-Scale Systems“, *Operations Research*, Bd. 43, Nr. 2, S. 264–281.
- Neumann, K. & Morlock, M. (2002), *Operations Research*, Hanser, München.
- Nickel, S.; Stein, O. & Waldmann, K.-H. (2014), *Operations Research*, Springer Gabler, Berlin, Heidelberg.
- Ohl, S. (2000), *Prognose und Planung variantenreicher Produkte am Beispiel der Automobilindustrie*, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Rohde, J.; Meyr, H. & Wagner, M. (2000), „Die Supply Chain Planning Matrix“, *PPS Management*, Bd. 5, Nr. 1, S. 10–15.
- Römisch, W. (2009), „Scenario Reduction Techniques in Stochastic Programming“ in *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications. 5th International Symposium, SAGA 2009, Sapporo, Japan, October 26-28, 2009. Proceedings*, Hrsg. O. Watanabe & T. Zeugmann, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 1–14.
- Rosenberg, O. (1996), „Variantenfertigung“ in *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*, Hrsg. W. Kern, Schäffer-Poeschel, Stuttgart, S. 2119–2129.

- Rudberg, M. & Olhager, J. (2003), „Manufacturing networks and supply chains. An operations strategy perspective“, *Omega*, Bd. 31, Nr. 1, S. 29–39.
- Salvador, F.; Forza, C.; Rungtusanatham, M. & Choi, T. Y. (2001), „Supply chain interactions and time-related performances“, *International Journal of Operations & Production Management*, Bd. 21, Nr. 4, S. 461–475.
- Sauer, J. (2002), *Multi-Site Scheduling: Hierarchisch koordinierte Ablaufplanung auf mehreren Ebenen*, Universität Oldenburg.
- Schlesinger, S.; Crosbie, R.; Gagné, R.; Innis, G.; Lalwani, C.; Loch, J.; Sylvester, R.; Wright, R.; Kheir, N. & Bartos, D. (1979), „Terminology for model credibility“, *SIMULATION*, Bd. 32, Nr. 3, S. 103–104.
- Schneeweiß, C. (2002), *Einführung in die Produktionswirtschaft*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Schneeweiss, C. (2003), „Distributed decision making. A unified approach“, *European Journal of Operational Research*, Bd. 150, S. 237–252.
- Scholl, A. (2001), *Robuste Planung und Optimierung. Grundlagen, Konzepte und Methoden, Experimentelle Untersuchungen*, Physica-Verlag, Heidelberg.
- Shi, Y. & Gregory, M. (1998), „International manufacturing networks—to develop global competitive capabilities“, *Journal of Operations Management*, Bd. 16, 2-3, S. 195–214.
- Sinz, C. (2003), *Verifikation regelbasierter Konfigurationssysteme*, Universität Tübingen.
- Slack, N. (1983), „Flexibility as a Manufacturing Objective“, *International Journal of Operations & Production Management*, Bd. 3, Nr. 3, S. 4–13.
- Stäblein, T. (2008), *Integrierte Planung des Materialbedarfs bei kundenauftragsorientierter Fertigung von komplexen und variantenreichen Serienprodukten*, Shaker, Aachen.
- Staeblein, T. & Aoki, K. (2015), „Planning and scheduling in the automotive industry: A comparison of industrial practice at German and Japanese makers“, *International Journal of Production Economics*, Bd. 162, S. 258–272.
- Stautner, U. (2001), *Kundenorientierte Lagerfertigung im Automobilvertrieb. Ergänzende Ansätze zum Supply-chain-Management*, Deutscher Universitätsverlag, Göttingen.

- Steven, M. (1994), *Hierarchische Produktionsplanung*, Physica-Verlag, Heidelberg.
- Stricker, N. (2016), *Robustheit verketteter Produktionssysteme. Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit*, Shaker.
- Stricker, N. & Lanza, G. (2014a), „An Approach towards Improving the Robustness of Production Systems“. *WGP Congress 2014*, Trans Tech Publications, S. 461–468.
- Stricker, N. & Lanza, G. (2014b), „The Concept of Robustness in Production Systems and its Correlation to Disturbances“, *Procedia CIRP*, Bd. 19, S. 87–92.
- The Boston Consulting Group (Hrsg.) (2015), *Industry 4.0. The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*.
- Thierry, C.; Besnard, P.; Ghattas, D. & Bel, G. (1995), „Multi-site planning: non flexible production units and set-up time treatment“ in *INRIA/IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation*, S. 261–269.
- Thierry, C.; Le Page, P.; Chapeaublanc, N. & Bel, G. (1994), „Multi-site planning: A centralized or a distributed approach?“ in *11th International Conference on Analysis and Optimization of Systems Discrete Event Systems*, Hrsg. G. Cohen & J.-P. Quadrat, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 609–615.
- Volling, T. (2009), *Auftragsbezogene Planung bei variantenreicher Serienproduktion. Eine Untersuchung mit Fallstudien aus der Automobilindustrie*, Gabler, Wiesbaden.
- Volling, T.; Matzke, A.; Grunewald, M. & Spengler, T. S. (2013), „Planning of capacities and orders in build-to-order automobile production. A review“, *European Journal of Operational Research*, Bd. 224, Nr. 2, S. 240–260.
- Wagenitz, A. (2007), *Modellierungsmethode zur Auftragsabwicklung in der Automobilindustrie*, Universität Dortmund.
- Wittek, K. (2013), *Standortübergreifende Programmplanung in flexiblen Produktionsnetzwerken der Automobilindustrie*, Springer Gabler, Wiesbaden.
- Yang, F.-C.; Chen, K.; Wang, M.-T.; Chang, P.-Y. & Sun, K.-C. (2010), „Mathematical modeling of multi-plant order allocation problem and solving by genetic algorithm with matrix representation“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Bd. 51, Nr. 9, S. 1251–1259.

Zaeh, M. F.; Moeller, N. & Vogl, W. (2005), „Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The Emperor’s New Clothes or Key Factor for Future Success?“, *International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*.

Zagel, M. (2006), *Übergreifendes Konzept zur Strukturierung variantenreicher Produkte und Vorgehensweise zur iterativen Produktstruktur-Optimierung*, Technische Universität Kaiserslautern.

Zanker, C.; Kinkel, S. & Maloca, S. (2013), „Globale Produktion von einer starken Heimatbasis aus“, *Modernisierung der Produktion - Mitteilungen aus der ISI-Erhebung*, Nr. 63.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Planungsaufgaben der mittelfristigen Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen	5
Abbildung 2.1: Supply Chain Planning Matrix (vgl. Rohde, Meyr & Wagner 2000, S. 10; vgl. Volling 2009, S. 58; vgl. Dörmer 2013, S. 32)	10
Abbildung 2.2: Auftragsfüllgrad durch angenommene Kundenaufträge und Planaufträge (vgl. Meyr 2004, S. 347; vgl. Volling et al. 2013, S. 243)	13
Abbildung 2.3: Unterscheidung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (vgl. Zaeh, Moeller & Vogl 2005, S. 2)	17
Abbildung 2.4: Regelbasierte Produktdokumentation auf Optionen- und Teileebene (vgl. Bracht & Eisenhart Rothe 2000, S. 617; vgl. Stäblein 2008, S. 62)	19
Abbildung 3.1: Bewertung von Ansätzen zur Planauftragsgenerierung	31
Abbildung 3.2: Bewertung von Ansätzen zur Auftragseinplanung	33
Abbildung 3.3: Bewertung von Ansätzen zur Kundenauftragszuordnung	37
Abbildung 4.1: Auftragsbestand an Kunden- und Planaufträgen in einem Produktionsnetzwerk zu einem diskreten Zeitpunkt (vgl. Buergin et al. 2017, S. 503)	39
Abbildung 4.2: Variantenbaum mit bekannten Optionen bis zur Ebene $g=2$	44
Abbildung 4.3: Variantenbäume aneinandergereiht als Szenariobaum für Kundenaufträge und einzeln je Markt für Planaufträge	47
Abbildung 4.4: Verrechnung von Wahrscheinlichkeiten im Variantenbaum aufgrund nicht baubarer Optionenkombinationen (vgl. Buergin et al. 2017, S. 502)	50
Abbildung 4.5: Vorgehen zur Szenariengenerierung	55
Abbildung 4.6: Beispielhaftes Slotgerüst (vgl. A_Molzahn 2017, S. 23, S. 33, S. 35; A_Schweizer 2017, S. 23 f.)	61
Abbildung 4.7: Bezug der Auftragseinplanung zu den horizontalen Planungsebenen der Supply Chain eines Unternehmens	62
Abbildung 4.8: Arbeitslastabweichungskosten in Form von Flexibilitäts- und Wandlungskosten (vgl. A_Schweizer 2017, S. 40; vgl. A_Strunz 2017, S. 74 f.)	72

Abbildung 4.9: Belieferung von Standorten durch einen globalen Lieferanten	76
Abbildung 4.10: Level-Scheduling-Kostenfunktion für Produktmodelle, Optionen oder Optionsgruppen hinsichtlich Standorten oder Perioden (vgl. A_Strunz 2017, S. 87)	78
Abbildung 4.11: Bezug der Kundenauftragszuordnung zu den horizontalen Planungsebenen der Supply Chain eines Unternehmens	85
Abbildung 4.12: Auftragskonfigurationen der Planauftragsrekonfiguration (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 102)	91
Abbildung 5.1: Produktionsnetzwerk mit Endmontagestandorten der Airbus A320-Produktfamilie im 2. Quartal 2015 (vgl. A_Molzahn 2017, S. 15 f., S. 18)	97
Abbildung 5.2: Dichtefunktion und Clustering der Arbeitslasten für einen Kundenauftrag bei abhängiger Optionenwahl (A_Kronenbitter 2017, S. 103)	103
Abbildung 5.3: Dichtefunktion und Clustering der Arbeitslasten für einen Kundenauftrag bei unabhängiger Optionenwahl (A_Kronenbitter 2017, S. 104)	103
Abbildung 5.4: Zuordnung der Aufträge nach Produktmodellen zu Standorten und Monaten (A_Kronenbitter 2017, S. 139)	113
Abbildung 5.5: Gesamtkosten der Auftragseinplanung des Szenarienmodells, des Erwartungswertmodells und der realen Einplanung unter 200 Ausgangsszenarien (Tabelle A7, Tabelle A8)	115
Abbildung 5.6: Relativer Regret je Ausgangsszenario des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 133)	117
Abbildung 5.7: Absolute Häufigkeiten der Auftragsabstandsindikatoren der Kunden und Monate über 0,5 (A_Kronenbitter 2017, S. 142)	118
Abbildung 5.8: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Wandlungskosten des Szenarienmodells sowie der Folgekosten des Erwartungswertmodells und der realen Einplanung unter 5000 Szenarien (A_Kronenbitter 2017, S. 163)	120
Abbildung 5.9: Arbeitslastabweichungen am Standort Tianjin in Monat 4 je Ausgangsszenario des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 124 f.)	121
Abbildung 5.10: Abweichungen von Soll- und Plan-Wahrscheinlichkeiten der Muss-Optionen (A_Hao 2017, S. 71)	128

Abbildung 5.11: Abweichungen von Soll- und Plan-Wahrscheinlichkeiten der Kann-Optionen (A_Hao 2017, S. 72)	128
Abbildung 5.12: An Standorten eingeplante Anzahl an Muss-Optionen für $\beta=1,1$ (A_Hao 2017, S. 82)	134
Abbildung 5.13: Auftragsbestand an Kunden- und Planaufträgen im Anwendungsfall des Automobilbaus zu einem diskreten Zeitpunkt (vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 91; vgl. A_Kramer 2016, S. 77; vgl. Buergin et al. 2017, S. 503)	135
Abbildung 5.14: Verteilung der Gesamtkosten und der einzelnen Kostenterme der Standardvariante ohne (1) und mit (1/2) Optionsabweichungen (A_Hao 2017, S. 115)	141
Abbildung A1: Algorithmus zur Verrechnung von Wahrscheinlichkeiten beim Aufbau des Variantenbaums (A_Geier 2016, S. 53 f., S. 59 ff., S. 74; A_Hammerschmidt 2017, S. 52 f.)	171
Abbildung A2: Clustering der Arbeitslast-Dichtefunktion eines Kundenauftrags (vgl. A_Almagro 2016; vgl. A_Strunz 2017, S. 47 ff., S. 107)	172
Abbildung A3: Stichprobenziehung aus den Kundenauftragsszenarien (vgl. A_Strunz 2017, S. 108 ff.)	173
Abbildung A4: Erstellung der Szenarien aus den Stichproben der Kundenauftragsszenarien (vgl. A_Strunz 2017, S. 111 ff.)	173
Abbildung A5: Algorithmus zur Planauftragsgenerierung (vgl. A_Geier 2016, S. 64 ff., S. 76; vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 54 f., S. 58 f.; vgl. A_Hao 2017, S. 60 ff.)	174
Abbildung A6: Algorithmus zur Planauftragsrekonfiguration (vgl. A_Hao 2017, S. 97 ff.; vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 101 ff., S. 130 f.; vgl. A_Kramer 2016, S. 57)	180
Abbildung A7: Ansicht der grafischen Benutzeroberfläche zur Planauftragsgenerierung für Fall II (A_Hao 2017, S. XIV)	181
Abbildung A8: Ansicht der grafischen Benutzeroberfläche zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk für Fall I mit fiktiven Daten (A_Hao 2017, S. XX)	182
Abbildung A9: Ansicht der grafischen Benutzeroberfläche zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk für Fall II (A_Hao 2017, S. XV)	183
Abbildung A10: Ansicht der grafischen Benutzeroberfläche zur Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen für Fall II (A_Hao 2017, S. XVIII)	184

Abbildung A11: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Spannweite der Arbeitslasten durch Optionen anteilig an den Arbeitslasten durch entsprechende Produktmodelle für Kundenaufträge im 2. Quartal 2015 (A_Kronenbitter 2017, S. 59)	187
Abbildung A12: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Gesamtkosten des Szenarienmodells 200R&W unter 5000 Szenarien mit 5000 anderen Szenarien (A_Kronenbitter 2017, S. 80)	195
Abbildung A13: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Arbeitslastabweichungskosten des Szenarienmodells 200R&W unter 5000 Szenarien mit 5000 anderen Szenarien (A_Kronenbitter 2017, S. 81)	195
Abbildung A14: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gesamtkosten des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 105)	196
Abbildung A15: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Arbeitslastabweichungskosten des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 108)	196
Abbildung A16: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gesamtkosten des Szenarienmodells 200Z&W (A_Kronenbitter 2017, S. 106)	197
Abbildung A17: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Arbeitslastabweichungskosten des Szenarienmodells 200Z&W (A_Kronenbitter 2017, S. 108)	197
Abbildung A18: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gesamtkosten des Szenarienmodells 500R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 98)	199
Abbildung A19: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Arbeitslastabweichungskosten des Szenarienmodells 500R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 100)	199
Abbildung A20: Gesamtkosten der Auftragseinplanung des Szenarienmodells, des Erwartungswertmodells und der realen Einplanung unter 5000 zusätzlichen Szenarien (Tabelle A9, Tabelle A10)	201
Abbildung A21: Gesamtkosten je Ausgangsszenario des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 90)	202
Abbildung A22: Arbeitslastabweichungskosten je Ausgangsszenario des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 91)	202
Abbildung A23: Flexibilitätskosten je Ausgangsszenario des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 92)	202

Abbildung A24: Zu viel bezahlte Wandlungskosten je Ausgangsszenario des Szenarienmodells 200R&W (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 93)	205
Abbildung A25: Abweichungen des Produktmodells A321 von der anteilig gleichmäßigen Verteilung (A_Kronenbitter 2017, S. 143)	205
Abbildung A26: Abweichungen des Produktmodells A319 von der anteilig gleichmäßigen Verteilung (A_Kronenbitter 2017, S. 143)	206
Abbildung A27: Abweichungen des Produktmodells A320 von der anteilig gleichmäßigen Verteilung mit der Kostenschwelle entsprechend dem Produktmodell A319 (A_Kronenbitter 2017, S. 144)	206
Abbildung A28: Abweichungen der Anzahl an Lackiertagen von der anteilig gleichmäßigen Verteilung (A_Kronenbitter 2017, S. 145)	207
Abbildung A29: Abweichungen der Erstversion von der anteilig gleichmäßigen Verteilung (A_Kronenbitter 2017, S. 146)	207
Abbildung A30: An Standorten eingeplante Anzahl an Kann-Optionen für $\beta=1,1$ (A_Hao 2017, S. 84)	212
Abbildung A31: An Standorten eingeplante Anzahl an Teilen je Teileart mit unterschiedlicher Teileanzahl unter 100.000 je Standort für $\beta=1,1$ (vgl. A_Hao 2017, S. 88 f.)	212
Abbildung A32: An Standorten eingeplante Anzahl an Muss-Optionen für $\beta=2,0$ (A_Hao 2017, S. 83)	213
Abbildung A33: An Standorten eingeplante Anzahl an Kann-Optionen für $\beta=2,0$ (A_Hao 2017, S. 87)	213
Abbildung A34: Ablaufdiagramm der Kundenauftragszuordnung (vgl. A_Hao 2017, S. 102 f.)	214

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Auftragseinplanung für $\beta=1,1$ (A_Hao 2017, S. 80)	133
Tabelle A1: Clusteranzahl entsprechend der Anzahl der Arbeitslasten in Anlehnung an Regeln zur Klassenanzahl von Histogrammen (A_Almagro 2016; A_Strunz 2017; Bamberg, Baur & Krapp 2012; Eckey, Kosfeld & Dreger 2000)	172
Tabelle A2: Übersicht der Optionsgruppen in Fall I (A_Hupays 2016, S. 51 f.; A_Molzahn 2017, S. 28, S. 40; A_Strunz 2017, S. 52)	185
Tabelle A3: Analyse der Arbeitslasten durch Optionen anteilig an Arbeitslasten durch entsprechende Produktmodelle in % für Kundenaufträge im 2. Quartal 2015 (A_Kronenbitter 2017, S. 58; A_Molzahn 2017, S. XXXIX)	186
Tabelle A4: Angaben zu Clustern bei abhängiger Optionenwahl (A_Kronenbitter 2017, S. 103)	188
Tabelle A5: Angaben zu Clustern bei unabhängiger Optionenwahl (A_Kronenbitter 2017, S. 104)	188
Tabelle A6: Ergebnisse der Zielfunktionsterme verschiedener Modellvarianten (A_Kronenbitter 2017, XXII)	190
Tabelle A7: Ergebnisse der Zielfunktionsterme verschiedener Modellvarianten (A_Kronenbitter 2017, S. XX, S. XXIV f.)	191
Tabelle A8: Ergebnisse der Zielfunktionsterme verschiedener Modellvarianten (A_Kronenbitter 2017, S. XXIV, S. XXVI ff.)	192
Tabelle A9: Ergebnisse der Zielfunktionsterme verschiedener Modellvarianten (A_Kronenbitter 2017, S. XXI)	193
Tabelle A10: Ergebnisse der Zielfunktionsterme verschiedener Modellvarianten (A_Kronenbitter 2017, S. XXII ff.)	194
Tabelle A11: Anteil übereinstimmender Zuordnungen der Aufträge nach Produktmodellen zu Standorten sowie zu Standorten und Monaten in % (A_Kronenbitter 2017, S. 140)	200
Tabelle A12: Einhaltung der Antizipation des Car-Sequencing für das Produktmodell A321 am Standort Hamburg je Monat (A_Kronenbitter 2017, S. XIX)	200

Tabelle A13: Arbeitslastabweichungen je Standort und Monat unter 200 Szenarien in % (A_Kronenbitter 2017, S. 123, S. 149)	203
Tabelle A14: Arbeitslastabweichungen je Standort und Monat unter 5000 Szenarien in % (A_Kronenbitter 2017, S. 126, S. 159)	204
Tabelle A15: Übersicht der Muss-Optionsgruppen mit anonymisierten Bezeichnungen und Codes in Fall II (vgl. A_Hao 2017, S. VII)	208
Tabelle A16: Übersicht der Kann-Optionen mit anonymisierten Bezeichnungen und Codes in Fall II (A_Hao 2017, S. VIII f.)	209
Tabelle A17: Rechenlaufzeiten zur Planauftragsgenerierung (A_Hao 2017, S. 74)	211
Tabelle A18: Teileanzahl der generierten Planaufträge (A_Hao 2017, S. 73)	211
Tabelle A19: Ergebnisse der Auftragseinplanung für $\beta=2,0$ (A_Hao 2017, S. 82)	213
Tabelle A20: Durchschnittliche Kosten der Kundenauftragszuordnung (A_Hao 2017, S. 105 f.)	215
Tabelle A21: Einhaltung der gewünschten Liefertermine und durchschnittliche Ausnutzung der einzelnen Rekonfigurationsflexibilitätsarten (A_Hao 2017, S. 108)	215
Tabelle A22: Weitere Auswertung der Kundenauftragszuordnung (A_Hao 2017, S. 104, S. 107)	216

Anhang

A1 Variantenbaum zur Auftragsgenerierung

```
1 Für jede Ebene  $g$ 
2   Für jeden Pfad  $\omega_{g-1}$ 
3     Für jede Option  $o_g$  der Optionsgruppe  $g$ 
4       Falls Baubarkeit erfüllt ist
5         Füge Option  $o_g$  hinzu
6     Falls allen Pfaden  $\omega_{g-1}$  mit demselben Vorgängerpfad  $\omega_{g-2}$  Optionen hinzugefügt wurden und die Baubarkeit für mindestens eine Option nicht erfüllt ist
7       Für jede Option  $o_g$ , die bei mindestens einem Pfad  $\omega_{g-1}$  mit demselben Vorgängerpfad  $\omega_{g-2}$  nicht angefügt werden konnte
8         Für jeden Pfad  $\omega_{g-1}$ , an den Option  $o_g$  nicht angefügt werden konnte
9           Identifiziere diejenigen Pfade  $\bar{\omega}_{g-1}$  mit dem Vorgängerpfad  $\omega_{g-2}$ , bei denen  $o_g$  baubar ist
10          Identifizieren diejenigen Optionen  $\bar{o}_g$ , die sowohl bei  $\omega_{g-1}$  als auch bei allen Pfaden  $\bar{\omega}_{g-1}$  baubar sind
11          Für jede Option  $\bar{o}_g$  bei  $\omega_{g-1}$  berechne erhöhte Wahrscheinlichkeit nach Formel 4-4
12          Für jeden Pfad  $\bar{\omega}_{g-1}$ 
13            Für Option  $o_g$  berechne erhöhte Wahrscheinlichkeit nach Formel 4-5
14            Für jede Option  $\bar{o}_g$  bei  $\bar{\omega}_{g-1}$  berechne reduzierte Wahrscheinlichkeit nach Formel 4-6
```

Abbildung A1: Algorithmus zur Verrechnung von Wahrscheinlichkeiten beim Aufbau des Variantenbaums (A_Geier 2016, S. 53 f., S. 59 ff., S. 74; A_Hammerschmidt 2017, S. 52 f.)

A2 Szenariengenerierung

Tabelle A1: Clusteranzahl entsprechend der Anzahl der Arbeitslasten in Anlehnung an Regeln zur Klassenanzahl von Histogrammen (A_Almagro 2016; A_Strunz 2017; Bamberg, Baur & Krapp 2012; Eckey, Kosfeld & Dreger 2000)

Anzahl an Arbeitslasten ($ W_\omega $)	Clusteranzahl $ C_i $
$ W_\omega < 4$	$ W_\omega $
$4 \leq W_\omega < 20$	4
$20 \leq W_\omega < 60$	6
$60 \leq W_\omega < 100$	8
$100 \leq W_\omega < 500$	10
$500 \leq W_\omega < 1000$	12
$1000 \leq W_\omega < 5000$	13
$ W_\omega \geq 5000$	16

```

1 Falls (Anzahl an Arbeitslasten der Dichtefunktion  $|W_\omega| < 4$ )
2   Jede der Arbeitslasten entspricht einem Cluster
3 Sonst
4   Initialisiere  $|C_i|$  Cluster-Zentren
5   Für jede Arbeitslast der Dichtefunktion
6     Berechne die Differenz zur Arbeitslast jedes Cluster-Zentrums
7     Ordne die Arbeitslast dem Cluster mit der geringsten Differenz zu
8   Berechne je Cluster das arithmetische Mittel über alle dem Cluster zugeordneten
   Arbeitslasten
9   Falls das arithmetische Mittel jedes Clusters dem entsprechenden Cluster-
   Zentrum entspricht
10    Berechne Summe über Wahrscheinlichkeiten der Arbeitslasten eines Clus-
   ters als Cluster-Wahrscheinlichkeiten  $p_{c_i}$ 
11    Ausgabe der Arbeitslasten und entsprechenden Kundenauftragsszenarien je
   Cluster sowie der Cluster-Wahrscheinlichkeiten
12  Sonst
13    Setze jedes Cluster-Zentrum auf das arithmetische Mittel des Clusters
14    Wiederhole ab Zeile 5

```

Abbildung A2: Clustering der Arbeitslast-Dichtefunktion eines Kundenauftrags (vgl. A_Almagro 2016; vgl. A_Strunz 2017, S. 47 ff., S. 107)

```
1 Für jedes Cluster  $c_i \in C_i$  in der Reihenfolge aufsteigender Arbeitslasten
2   Berechne Anzahl an zu ziehenden Kundenauftragsszenarien des Clusters  $n_{c_i}$  nach
   Formel 4-9
3     Durchlaufe  $n_{c_i}$  mal
4       Ziehe eine Zufallszahl zwischen 0 und 1
5       Multipliziere die Zufallszahl mit der Cluster-Wahrscheinlichkeit
        $p_{c_i}$  und addiere diese zu den Cluster-Wahrscheinlichkeiten der zuvor
       betrachteten Cluster
6       Ziehe entsprechend der verrechneten Zufallszahl dasjenige Kunden-
       auftragsszenario aus der nach aufsteigenden Arbeitslasten sor-
       tierte Liste aller Kundenauftragsszenarien des Auftrags  $i$ 
7       Gebe das gezogene Kundenauftragsszenario und dessen Wahr-
       scheinlichkeit  $p_{s_i}$  aus
```

Abbildung A3: Stichprobenziehung aus den Kundenauftragsszenarien (vgl. A_Strunz 2017, S. 108 ff.)

```
1 Für jedes Szenario  $s \in S$ 
2   Für jeden Kundenauftrag  $i \in I$ 
3     Ziehe eine Zufallszahl zwischen 0 und 1
4     Ziehe entsprechend der Zufallszahl ein Kundenauftragsszenario aus der
       Liste der gezogenen Kundenauftragsszenarien des Auftrags  $i$ , wobei jedes
       Kundenauftragsszenario unabhängig von dessen Wahrscheinlichkeit berück-
       sichtigt wird
5     Füge das Kundenauftragsszenario und dessen Wahrscheinlichkeit dem Sze-
       nario hinzu
6     Lösche das Kundenauftragsszenario aus der Liste der Kundenauftragssze-
       narien
7   Berechne die Szenariowahrscheinlichkeit  $p_s$ 
8   Gebe das Szenario und dessen Szenariowahrscheinlichkeit  $p_s$  aus, falls dieses
       keinem der zuvor ausgegebenen Szenarien entspricht
```

**Abbildung A4: Erstellung der Szenarien aus den Stichproben der Kundenauftragssze-
narien (vgl. A_Strunz 2017, S. 111 ff.)**

A3 Planauftragsgenerierung

```
1 Für jede Auftragskonfiguration mit Muss-Optionen im Variantenbaum
2   Berechne absolute Häufigkeit  $N_{opt}$  nach Formel 4-10
3 Sortiere die Konfigurationen absteigend nach ihren absoluten Häufigkeiten  $N_{opt}$ 
4 Für jede Konfiguration in der Reihenfolge absteigender Häufigkeiten
5   Runde die absolute Häufigkeit  $N_{opt}$  auf die nächstgelegene ganze Zahl auf oder
   ab
6     Falls die gerundete absolute Häufigkeit größer null ist und die Gesamt-
   anzahl  $|I|$  an Planaufträgen noch nicht erreicht ist
7       Generiere Planaufträge entsprechend der Konfiguration bis die ge-
   rundete Häufigkeit der Konfiguration oder die Gesamtanzahl  $|I|$  an
   Planaufträgen erreicht ist
8     Falls die gerundete absolute Häufigkeit gleich null ist und die Gesamt-
   anzahl  $|I|$  an Planaufträgen noch nicht erreicht ist
9       Generiere einen Planauftrag entsprechend der Konfiguration
10 Für jede Kann-Option  $o_j$ , die nicht der Wahl „keine“ entspricht
11   Berechne absolute Häufigkeit nach Formel 4-12 und runde diese auf die
   nächstgelegene ganze Zahl auf oder ab
12   Führe die Planaufträge in zufälliger Reihenfolge auf
13   Für jeden Planauftrag in der zufälligen Reihenfolge
14     Falls die gerundete absolute Häufigkeit der Option noch nicht erreicht
   ist
15       Falls Baubarkeit erfüllt ist
16         Füge die Kann-Option  $o_j$  hinzu
```

Abbildung A5: Algorithmus zur Planauftragsgenerierung (vgl. A_Geier 2016, S. 64 ff., S. 76; vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 54 f., S. 58 f.; vgl. A_Hao 2017, S. 60 ff.)

A4 Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk

Kosten aufgrund von Abweichungen von Produktmodellen von der anteilig gleichmäßigen Verteilung zwischen Standorten (M, L):

$$K_M^{LS,L}(\mathbf{x}) = \sum_{m \in \{M | LS_{ml}=1\}} \sum_{l \in L} K_{ml}^{LS,L}(\Delta_{ml}^{LS,L}(\mathbf{x})) \quad \text{Formel A-1}$$

Kosten aufgrund von Abweichungen von Produktmodellen von der anteilig gleichmäßigen Verteilung zwischen Perioden (M, T):

$$K_M^{LS,T}(\mathbf{x}) = \sum_{m \in \{M | LS_{mt}=1\}} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} K_{mlt}^{LS,T}(\Delta_{mlt}^{LS,T}(\mathbf{x})) \quad \text{Formel A-2}$$

Kosten aufgrund von Abweichungen von einzelnen Optionen individueller Optionsgruppen von der anteilig gleichmäßigen Verteilung zwischen Standorten (O, L):

$$K_O^{LS,L}(\mathbf{x}) = \frac{\left(\sum_{s \in S} (p_s \times \sum_{g \in \{1, \dots, G | LS_{gOl}=1 \wedge \Phi_g=0\}} \sum_{o_g \in \{1, \dots, O_g | LS_{og}=1\}} \sum_{l \in L} K_{o_g l}^{LS,L}(\Delta_{o_g l s}^{LS,L}(\mathbf{x}))) \right)}{\sum_{s \in S} p_s} \quad \text{Formel A-3}$$

Kosten aufgrund von Abweichungen von einzelnen Optionen individueller Optionsgruppen von der anteilig gleichmäßigen Verteilung zwischen Perioden (O, T):

$$K_O^{LS,T}(\mathbf{x}) = \frac{\left(\sum_{s \in S} (p_s \times \sum_{g \in \{1, \dots, G | LS_{gOT}=1 \wedge \Phi_g=0\}} \sum_{o_g \in \{1, \dots, O_g | LS_{og}=1\}} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} K_{o_g l t s}^{LS,T}(\Delta_{o_g l t s}^{LS,T}(\mathbf{x}))) \right)}{\sum_{s \in S} p_s} \quad \text{Formel A-4}$$

Kosten aufgrund von Abweichungen von aggregierten Optionen von Optionsgruppen von der anteilig gleichmäßigen Verteilung zwischen Standorten (G, L):

$$K_G^{LS,L}(\mathbf{x}) = \frac{\left(\sum_{s \in S} (p_s \times \sum_{g \in \{1, \dots, G | LS_{gOl}=1\}} \sum_{l \in L} K_{gl}^{LS,L}(\Delta_{gl s}^{LS,L}(\mathbf{x}))) \right)}{\sum_{s \in S} p_s} \quad \text{Formel A-5}$$

Kosten aufgrund von Abweichungen von aggregierten Optionen von Optionsgruppen von der anteilig gleichmäßigen Verteilung zwischen Perioden (G, T):

$$K_G^{LS,T}(\mathbf{x}) = \frac{\left(\sum_{s \in S} (p_s \times \sum_{g \in \{1, \dots, G | LS_{gOT}=1\}} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} K_{glt}^{LS,T}(\Delta_{glt s}^{LS,T}(\mathbf{x}))) \right)}{\sum_{s \in S} p_s} \quad \text{Formel A-6}$$

Stückweise lineare Kostenfunktion zur Bewertung von Abweichungen von einer anteilig gleichmäßigen Verteilung:

$$\begin{aligned}
K_{(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \left(\Delta_{(m|o_g|g)l(t)(s)}^{LS,(L|T)}(\mathbf{x}) \right) = & \\
\left\{ \begin{aligned}
& P_{2(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \times \left(\delta_{2(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} - \delta_{1(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \right) \\
& + P_{1(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \times \left(\delta_{1(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} - \Delta_{(m|o_g|g)l(t)(s)}^{LS,(L|T)}(\mathbf{x}) \right) \\
& \hspace{15em}, \Delta_{(m|o_g|g)l(t)(s)}^{LS,(L|T)}(\mathbf{x}) \leq \delta_{1(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \\
& P_{2(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \times \left(\delta_{2(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} - \Delta_{(m|o_g|g)l(t)(s)}^{LS,(L|T)}(\mathbf{x}) \right) \\
& \hspace{15em}, \delta_{1(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} < \Delta_{(m|o_g|g)l(t)(s)}^{LS,(L|T)}(\mathbf{x}) \leq \delta_{2(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \\
& 0 \\
& \hspace{15em}, \delta_{2(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} < \Delta_{(m|o_g|g)l(t)(s)}^{LS,(L|T)}(\mathbf{x}) \leq \delta_{3(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \\
& P_{3(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \times \left(\Delta_{(m|o_g|g)l(t)(s)}^{LS,(L|T)}(\mathbf{x}) - \delta_{3(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \right) \\
& \hspace{15em}, \delta_{3(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} < \Delta_{(m|o_g|g)l(t)(s)}^{LS,(L|T)}(\mathbf{x}) \leq \delta_{4(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \\
& P_{3(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \times \left(\delta_{4(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} - \delta_{3(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \right) \\
& + P_{4(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \times \left(\Delta_{(m|o_g|g)l(t)(s)}^{LS,(L|T)}(\mathbf{x}) - \delta_{4(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)} \right) \\
& \hspace{15em}, \Delta_{(m|o_g|g)l(t)(s)}^{LS,(L|T)}(\mathbf{x}) > \delta_{4(m|o_g|g)l(t)}^{LS,(L|T)}
\end{aligned} \right. \quad \text{Formel A-7}
\end{aligned}$$

Abweichung des Produktmodells m von der anteilig gleichmäßigen Verteilung an Standort l :

$$\begin{aligned}
\Delta_{ml}^{LS,L}(\mathbf{x}) = & \left(\sum_{i \in \{l|m_i=m\}} \sum_{t \in T} \mathbf{x}_{ilt} \right) \\
- & \left(\beta \times \frac{\sum_{t \in T} \sum_{u \in \{U|l_u=l \wedge u \in U_m\}} C_{ut}^{Slot}}{\sum_{l' \in L} \sum_{t \in T} \sum_{u \in \{U|l_u=l' \wedge u \in U_m\}} C_{ut}^{Slot}} \times \sum_{i \in \{l|m_i=m\}} \sum_{t \in T} \sum_{l' \in L} \mathbf{x}_{il't} \right) \quad \text{Formel A-8}
\end{aligned}$$

$$\forall m \in \{M \mid LS_{mL} = 1\}, \forall l \in L$$

Abweichung des Produktmodells m von der anteilig gleichmäßigen Verteilung an Standort l in Periode t :

$$\begin{aligned}
\Delta_{mlt}^{LS,T}(\mathbf{x}) = & \left(\sum_{i \in \{l|m_i=m\}} \mathbf{x}_{ilt} \right) \\
- & \left(\beta \times \frac{\sum_{u \in \{1, \dots, U|l_u=l \wedge u \in U_m\}} C_{ut}^{Slot}}{\sum_{t' \in T} \sum_{u \in \{U|l_u=l' \wedge u \in U_m\}} C_{ut'}^{Slot}} \times \sum_{i \in \{l|m_i=m\}} \sum_{t' \in T} \mathbf{x}_{ilt'} \right) \quad \text{Formel A-9}
\end{aligned}$$

$$\forall m \in \{M \mid LS_{mT} = 1\}, \forall l \in L, \forall t \in T$$

Abweichung der Option o_g von der anteilig gleichmäßigen Verteilung an Standort l in Szenario s :

$$\Delta_{o_g|s}^{LS,L}(\mathbf{x}) = \left(\sum_{i \in l} \sum_{t \in T} [x_{ilt} \times p_{o_g|s}] \right) - \left(\beta \times \frac{\sum_{t \in T} \sum_{u \in \{U|l_u=l \wedge u \in U_{o_g}\}} C_{ut}^{Slot}}{\sum_{l' \in L} \sum_{t \in T} \sum_{u \in \{U|l_u=l' \wedge u \in U_{o_g}\}} C_{ut}^{Slot}} \times \sum_{i \in l} \sum_{t \in T} \sum_{l' \in L} [x_{il't} \times p_{o_g|s}] \right) \quad \text{Formel A-10}$$

$$\forall g \in \{1, \dots, G \mid LS_{gOL} = 1 \wedge \Phi_g = 0\}, \forall o_g \in \{1, \dots, O_g \mid LS_{o_g} = 1\},$$

$$\forall l \in \{L \mid \exists u \in \{U \mid l_u = l \wedge u \in U_{o_g}\}\}, \forall s \in S$$

Abweichung der Option o_g von der anteilig gleichmäßigen Verteilung an Standort l in Periode t und in Szenario s :

$$\Delta_{o_g|ts}^{LS,T}(\mathbf{x}) = \left(\sum_{i \in l} [x_{ilt} \times p_{o_g|s}] \right) - \left(\beta \times \frac{\sum_{u \in \{U|l_u=l \wedge u \in U_{o_g}\}} C_{ut}^{Slot}}{\sum_{t' \in T} \sum_{u \in \{U|l_u=l \wedge u \in U_{o_g}\}} C_{ut'}^{Slot}} \times \sum_{i \in l} \sum_{t' \in T} [x_{ilt'} \times p_{o_g|s}] \right) \quad \text{Formel A-11}$$

$$\forall g \in \{1, \dots, G \mid LS_{gOT} = 1 \wedge \Phi_g = 0\}, \forall o_g \in \{1, \dots, O_g \mid LS_{o_g} = 1\},$$

$$\forall l \in \{L \mid \exists u \in \{U \mid l_u = l \wedge u \in U_{o_g}\}\}, \forall t \in T, \forall s \in S$$

Abweichung von aggregierten Optionen der Optionsgruppe g von der anteilig gleichmäßigen Verteilung an Standort l in Szenario s :

$$\Delta_{g|s}^{LS,L}(\mathbf{x}) = \left(\sum_{i \in l} \sum_{t \in T} \left[x_{ilt} \times \sum_{o_g \in \{1, \dots, O_g\}} (\sigma_{o_g} \times p_{o_g|s}) \right] \right) - \left(\beta \times \frac{\sum_{t \in T} \sum_{u \in \{U|l_u=l \wedge u \in U_g\}} C_{ut}^{Slot}}{\sum_{l' \in L} \sum_{t \in T} \sum_{u \in \{U|l_u=l' \wedge u \in U_g\}} C_{ut}^{Slot}} \times \sum_{i \in l} \sum_{t \in T} \sum_{l' \in L} \left[x_{il't} \times \sum_{o_g \in \{1, \dots, O_g\}} (\sigma_{o_g} \times p_{o_g|s}) \right] \right) \quad \text{Formel A-12}$$

$$\forall g \in \{1, \dots, G \mid LS_{gGL} = 1\}, \forall l \in \{L \mid \exists u \in \{U \mid l_u = l \wedge u \in U_g\}\}, \forall s \in S$$

Abweichung von aggregierten Optionen der Optionsgruppe g von der anteilig gleichmäßigen Verteilung an Standort l in Periode t und in Szenario s :

$$\Delta_{gls}^{LS,T}(\mathbf{x}) = \left(\sum_{i \in I} \left[\mathbf{x}_{ilt} \times \sum_{o_g \in \{1, \dots, O_g\}} (\sigma_{o_g} \times \rho_{o_g is}) \right] \right) - \left(\beta \times \frac{\sum_{u \in \{U | l_u = l \wedge u \in U_g\}} C_{ut}^{Slot}}{\sum_{t' \in T} \sum_{u \in \{U | l_u = l \wedge u \in U_g\}} C_{ut'}} \times \sum_{i \in I} \sum_{t' \in T} \left[\mathbf{x}_{ilt'} \times \sum_{o_g \in \{1, \dots, O_g\}} (\sigma_{o_g} \times \rho_{o_g is}) \right] \right)$$

Formel
A-13

$$\forall g \in \{1, \dots, G \mid LS_{gGT} = 1\}, \forall l \in \{L \mid \exists u \in \{U \mid l_u = l \wedge u \in U_g\}\}, \forall t \in T, \forall s \in S$$

A5 Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen

- 1 Rekonfiguriere baubare Konfiguration ω_j des Kundenauftrags j um abweichende Optionen v_{i_o} um zur Auslieferung anzubietende Konfiguration ω'_j zu erhalten
- 2 Falls zur Auslieferung anzubietende Konfiguration ω'_j anhand der Baubarkeitsregeln aller kundenwählbarer Optionen O nicht baubar ist
- 3 Abbruch
- 4 Rekonfiguriere zur Auslieferung anzubietende Konfiguration ω'_j um umzubauende Optionen u_{i_o} um zu produzierende Konfiguration ω'_j zu erhalten
- 5 Falls zu produzierende Konfiguration ω'_j anhand der Baubarkeitsregeln aller kundenwählbarer Optionen O nicht baubar ist
- 6 Abbruch
- 7 Rekonfiguriere baubare Konfiguration ω_{i^*} des ausgewählten Planauftrags i^* um geänderte Optionen b_{i_o} um geänderte Konfiguration ω'_{i^*} zu erhalten
- 8 Falls i^* in einem sequenzierten Abschnitt liegt
- 9 Falls Beschränkungen der Sequenz für geänderte Optionen b_{i_o} für ω'_{i^*} nicht eingehalten werden
- 10 Abbruch
- 11 Bestimme für jeden Planauftrag i' desselben Abschnitts am selben Standort, desselben Produktmodells und desselben Marktes wie i^* , also für jeden potentiellen Tauschpartner, die Anzahl der Muss-Optionen $|O_{\omega_{i'}} \cap (O_{\omega'_j} \setminus O_{\omega_{i'}}) \cap O^{\text{muss}}|$, die der geänderten Konfiguration ω'_{i^*} gegenüber ω'_j fehlen und $\omega_{i'}$ hat und somit getauscht werden können
- 12 Sortiere die potentiellen Tauschpartner i' absteigend nach $|O_{\omega_{i'}} \cap (O_{\omega'_j} \setminus O_{\omega_{i'}}) \cap O^{\text{muss}}|$
- 13 Solange Muss-Optionen zwischen den Konfigurationen ω'_{i^*} und ω'_j abweichen und noch nicht alle potentiellen Tauschpartner i' durchlaufen wurden
- 14 Wähle den nächsten potentiellen Tauschpartner i' in der absteigenden Reihenfolge
- 15 Falls die Konfiguration $\omega_{i'}$ des Tauschpartners i' nach Tausch aller Muss-Optionen $O_{\omega_{i'}} \cap (O_{\omega'_j} \setminus O_{\omega_{i'}}) \cap O^{\text{muss}}$ entsprechend derer Baubarkeitsregeln baubar ist und falls i^* in einem sequenzierten Abschnitt liegt und Beschränkungen der Sequenz für getauschte Optionen für ω'_{i^*} und $\omega_{i'}$ eingehalten werden
- 16 Führe den Tausch aller Muss-Optionen $O_{\omega_{i'}} \cap (O_{\omega'_j} \setminus O_{\omega_{i'}}) \cap O^{\text{muss}}$ mit i' durch und aktualisiere $O_{\omega_{i'}}$.
- 17 Für jede Kann-Option o , die zwischen den Konfigurationen ω'_{i^*} und $\omega_{i'}$ abweicht
- 18 Falls die Konfiguration $\omega_{i'}$ des Tauschpartners i' nach Tausch der Kann-Option o entsprechend derer Baubarkeitsregeln baubar ist und falls i^* in einem sequenzierten Abschnitt liegt und Beschränkungen der Sequenz für die getauschte Option für ω'_{i^*} und $\omega_{i'}$ eingehalten werden
- 19 Führe Tausch der Kann-Option mit i' durch und aktualisiere $O_{\omega_{i'}}$.

```

20 Falls  $\omega_i$  anhand der Baubarkeitsregeln aller kundenwählbarer Optionen  $O$  nicht
    baubar ist
21     Mache Tausche mit  $i'$  rückgängig und aktualisiere  $O_{\omega_i}$ .
22 Falls nicht alle Muss-Optionen  $O_{\omega_i} \cap (O_{\omega_j} \setminus O_{\omega_i}) \cap O^{\text{muss}}$  getauscht werden konnten
    Abbruch
23 Bestimme für jeden Planauftrag  $i'$  desselben Abschnitts am selben Standort,
    desselben Produktmodells und desselben Marktes wie  $i^*$ , also für jeden potentiellen
    Tauschpartner, die Anzahl der übrigen Optionen bzw. Kann-Optionen
     $|(O_{\omega_i} \cap (O_{\omega_j} \setminus O_{\omega_i})) \cup ((O \setminus O_{\omega_i}) \cap (O_{\omega_j} \setminus O_{\omega_i}))|$ , die getauscht werden können
24 Sortiere die potentiellen Tauschpartner  $i'$  absteigend nach
     $|(O_{\omega_i} \cap (O_{\omega_j} \setminus O_{\omega_i})) \cup ((O \setminus O_{\omega_i}) \cap (O_{\omega_j} \setminus O_{\omega_i}))|$ 
25 Solange Optionen zwischen den Konfigurationen  $\omega_i$  und  $\omega_j$  abweichen und noch nicht
    alle potentiellen Tauschpartner  $i'$  durchlaufen wurden
26     Wähle den nächsten potentiellen Tauschpartner  $i'$  in der absteigenden Reihen-
    folge
27     Falls die Konfiguration  $\omega_i$  des Tauschpartners  $i'$  nach Tausch aller Optionen
     $(O_{\omega_i} \cap (O_{\omega_j} \setminus O_{\omega_i})) \cup ((O \setminus O_{\omega_i}) \cap (O_{\omega_j} \setminus O_{\omega_i}))$  entsprechend derer Baubarkeitsregeln
    baubar ist und falls  $i^*$  in einem sequenzierten Abschnitt liegt und Beschrän-
    kungen der Sequenz für getauschte Optionen für  $\omega_i$  und  $\omega_j$  eingehalten werden
28     Führe den Tausch aller Optionen  $(O_{\omega_i} \cap (O_{\omega_j} \setminus O_{\omega_i})) \cup ((O \setminus O_{\omega_i}) \cap (O_{\omega_j} \setminus O_{\omega_i}))$  mit
     $i'$  durch und aktualisiere  $O_{\omega_i}$ .
29 Falls  $\omega_i$  anhand der Baubarkeitsregeln aller kundenwählbarer Optionen  $O$  nicht
    baubar ist
30     Mache Tausche mit  $i'$  rückgängig und aktualisiere  $O_{\omega_i}$ .
31 Falls nicht alle übrigen Optionen  $(O_{\omega_i} \cap (O_{\omega_j} \setminus O_{\omega_i})) \cup ((O \setminus O_{\omega_i}) \cap (O_{\omega_j} \setminus O_{\omega_i}))$ 
    getauscht werden konnten
32     Abbruch
33 Für Konfiguration  $\omega_i$  und alle tatsächlichen Tauschpartner vor dem Tausch sowie
    für Konfiguration  $\omega_j$  und alle tatsächlichen Tauschpartner nach dem Tausch
34     Führe Zusteuerung und Stücklistenauflösung durch
35 Falls sich die Bedarfe programmorientierter Teile vor und nach dem Tausch
    aggregiert für die betrachteten Aufträge ändern
36     Abbruch

```

Abbildung A6: Algorithmus zur Planauftragsrekonfiguration (vgl. A_Hao 2017, S. 97 ff.; vgl. A_Hammerschmidt 2017, S. 101 ff., S. 130 f.; vgl. A_Kramer 2016, S. 57)

A6 Grafische Benutzeroberfläche

Eingabe

Absatzmarkt: PWWWh

Produktmodell: PQM608L

Anzahl zu generierender Planaufträge: 48.545

Einbaubauten

Plan-Menge: 26.945

Plan-Embaubauten: 4.726

Plan-Embaubauten: 13.725

Plan-Embaubauten: 694

Plan-Embaubauten: 2.555

Plan-Embaubauten: 8.687

Plan-Embaubauten: 39.858

Plan-Embaubauten: 0,18

Plan-Embaubauten: 0,82

Plan-Embaubauten: 0,016

Plan-Embaubauten: 0,016

Diagramm

Abweichungen der Einbaubauten - Miss-Optionen

Abweichungen der Einbaubauten - Kam-Optionen

Abweichungen der Einbaubauten - Kam-Optionen

48545	ID	Absatzmarkt	Modell	Muss-Optionen	Kam-Optionen	Zugesteuerte Optionen	Anzahl BOM-Telle
1	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.882	
2	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.882	
3	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.848	
4	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.789	
5	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.826	
6	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.874	
7	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.874	
8	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.874	
9	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.874	
10	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.874	
11	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.874	
12	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.874	
13	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.889	
14	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.843	
15	PWWWh	PQM608L	Qrr.yvv.v7U.y97.QUU.O8y.yU6.yPd	Q07.9rd.Py9.OQP.6M7.p7K.pYM.yOd.P97.p7d.y89.dOy...	PWWWh.L.vMM.U6d.Frdp.9Pd.P9dp.AC.PM9p.Oro.KUd.P9Up.P7P...	2.875	

Abbildung A7: Ansicht der grafischen Benutzeroberfläche zur Planauftragsgenerierung für Fall II (A_Hao 2017, S. XIV)

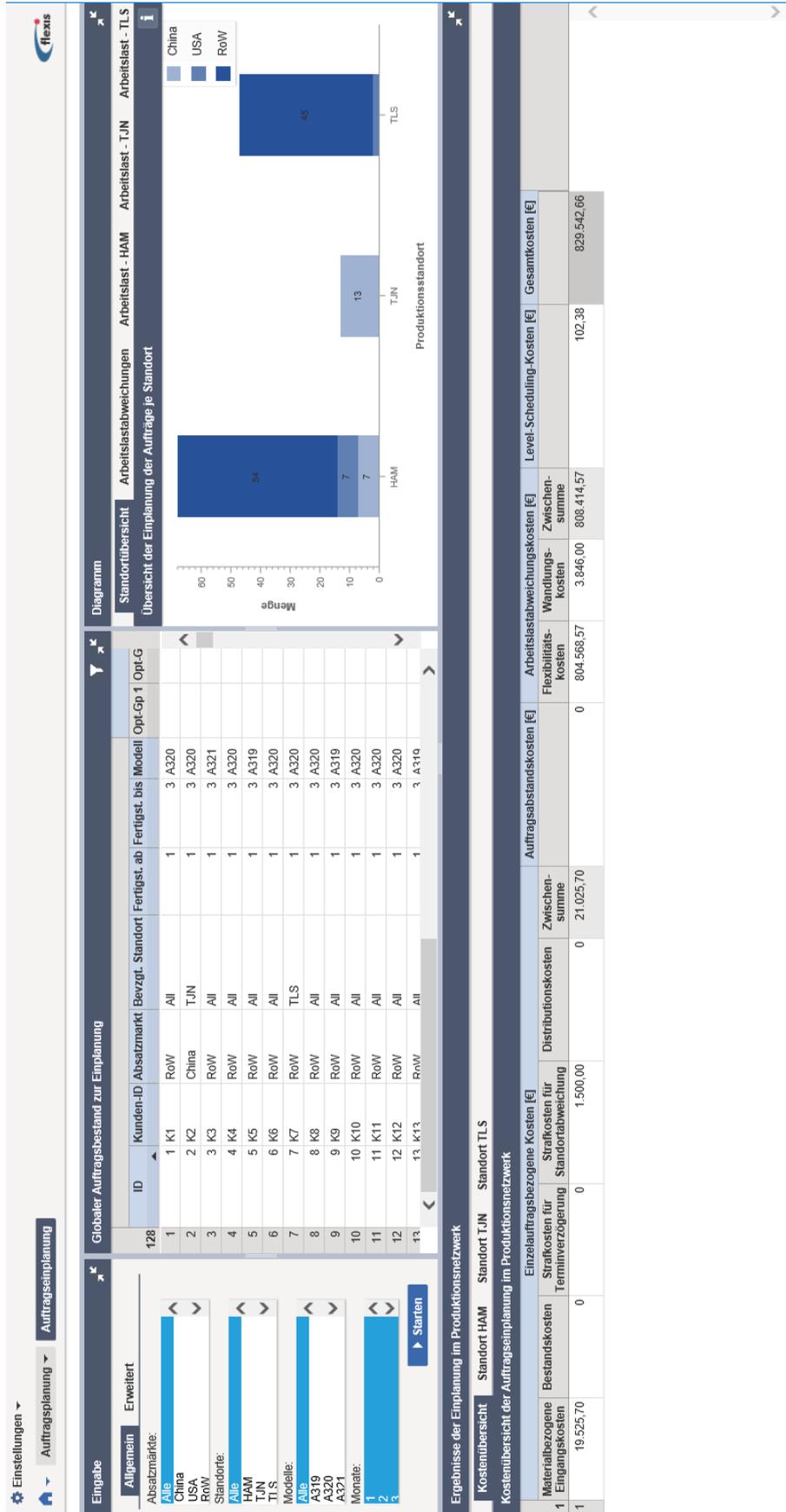


Abbildung A8: Ansicht der grafischen Benutzeroberfläche zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk für Fall I mit fiktiven Daten (A_Hao 2017, S. XX)

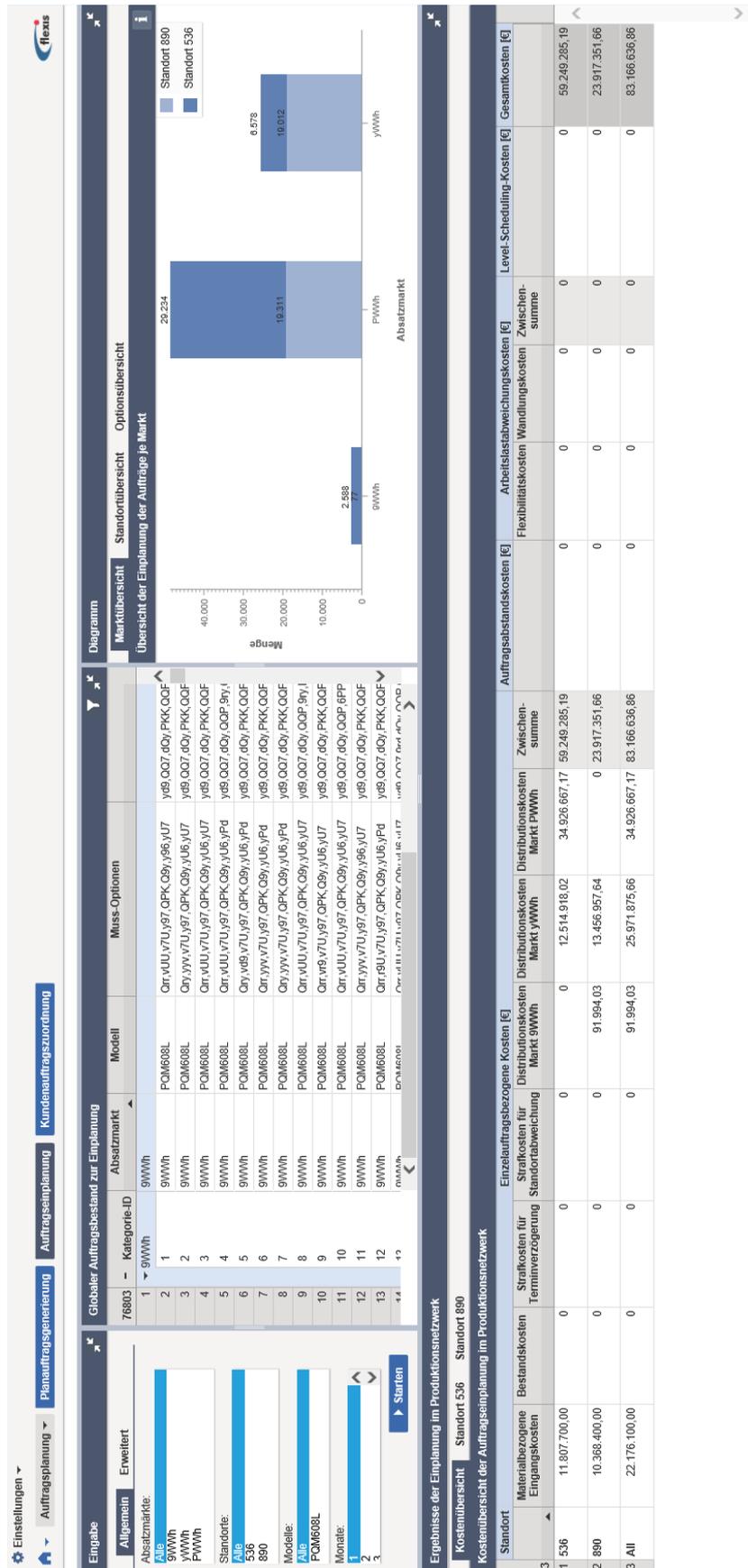


Abbildung A9: Ansicht der grafischen Benutzeroberfläche zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk für Fall II (A_Hao 2017, S. XV)

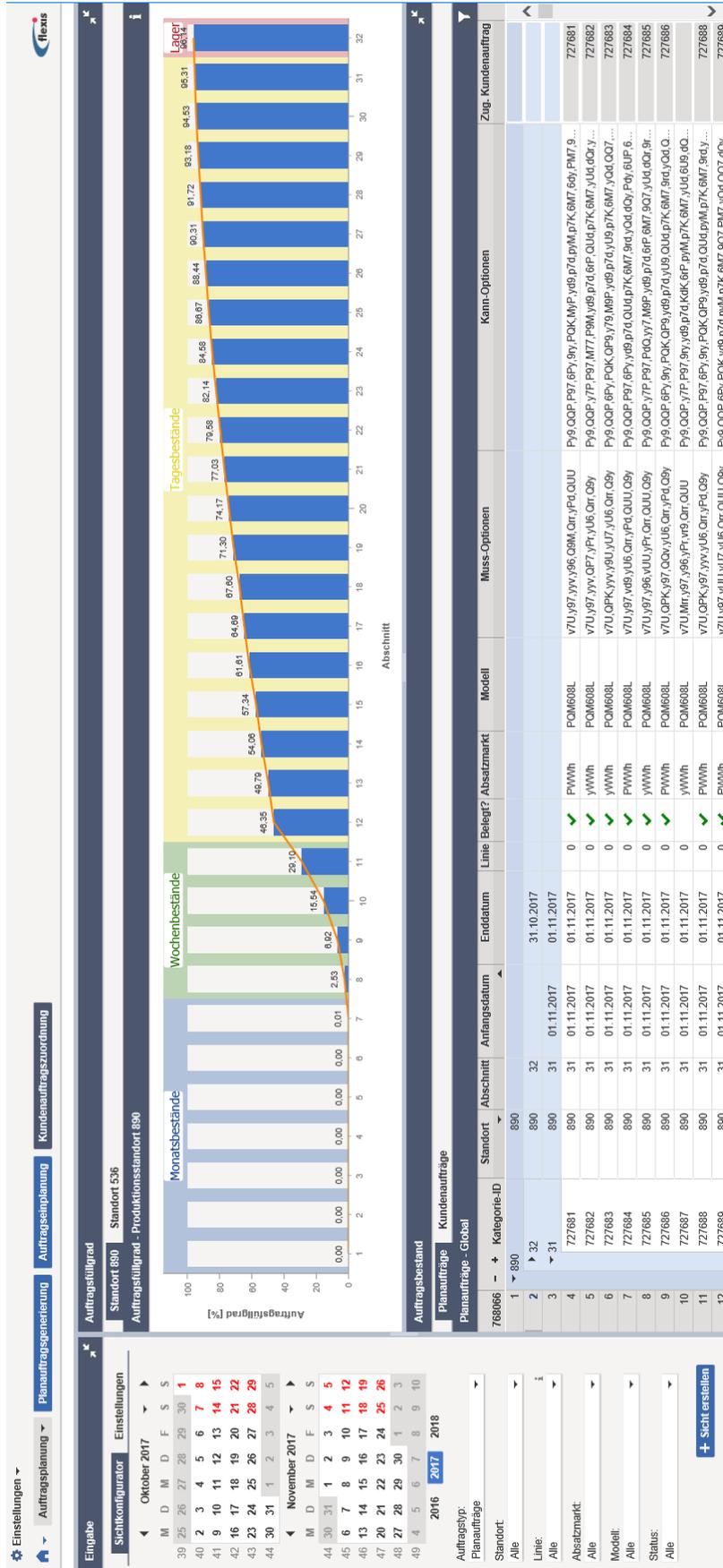


Abbildung A10: Ansicht der grafischen Benutzeroberfläche zur Kundenauftragszuordnung zu Planaufträgen für Fall II (A_Hao 2017, S. XVIII)

A7 Fall I: Optionen und Arbeitslasten

Tabelle A2: Übersicht der Optionsgruppen in Fall I (A_Hupays 2016, S. 51 f.; A_Molzahn 2017, S. 28, S. 40; A_Strunz 2017, S. 52)

Optionsgruppe g		Optionen o_g		Individuell / Additiv $\Phi_g = 0/1$	Sicher / unsicher $Z_g = 0/1$	Anzahl Konfigurationen hinsichtlich Unsicherheit
1	In-Flight Entertainment (IFE)	0	kein IFE	0	1	4
		1	IFE Provisions			
		2	Classic IFE			
		3	Integrated IFE			
2	Global System for Mobile Communications (GSM)	0	kein GSM	0	1	2
		1	GSM			
3	zusätzliche Bordküche (Galley)	0	keine zusätzliche Bordküche	1	1	3
		1	eine zusätzliche Bordküche			
		2	zwei zusätzliche Bordküchen			
4	zusätzliche Toilette (Lavatory)	0	keine zusätzliche Toilette	1	1	3
		1	eine zusätzliche Toilette			
		2	zwei zusätzliche Toiletten			
5	zusätzlicher Stauraum (Stowage)	0	kein zusätzlicher Stauraum	1	1	7
		1	ein zusätzlicher Stauraum			
		2	zwei zusätzliche Stauräume			
		3	drei zusätzliche Stauräume			
		4	vier zusätzliche Stauräume			
		5	fünf zusätzliche Stauräume			
		6	sechs zusätzliche Stauräume			
6	beweglicher Klassentrenner (Movable Class Divider, MCD)	0	kein beweglicher Klassentrenner	0	1	3
		1	normaler beweglicher Klassentrenner			
		2	elektrischer beweglicher Klassentrenner			
7	gasförmiges O ₂ -System (Gaseous O ₂)	0	kein gasförmiges O ₂ -System	0	1	2
		1	gasförmiges O ₂ -System			
8	zusätzlicher Tank (Additional Center Fuel Tank, ACT)	0	kein zusätzlicher Tank	0	1	3
		1	ein zusätzlicher Tank			
		2	zwei oder mehr zusätzliche Tanks			
9	Frachtladesystem (Cargo Loading System, CLS)	0	kein Frachtladesystem	0	1	2
		1	Frachtladesystem			

10	SpaceFlex	0	kein SpaceFlex	0	1	2
		1	SpaceFlex			
11	Lackierung	0	kein Tag	1	1	14
		1	ein Tag			
		2	zwei Tage			
		3	drei Tage			
		4	vier Tage			
		5	fünf Tage			
		6	sechs Tage			
		7	sieben Tage			
		8	acht Tage			
		9	neun Tage			
		10	zehn Tage			
		11	elf Tage			
		12	zwölf Tage			
		13	dreizehn Tage			
12	Erstversion (Head of Ver- sion)	0	keine Erstversion (Rebuild)	0	0	1
		1	Erstversion (Head of Version)			
						508.032

Tabelle A3: Analyse der Arbeitslasten durch Optionen anteilig an Arbeitslasten durch entsprechende Produktmodelle in % für Kundenaufträge im 2. Quartal 2015 (A_Kronenbitter 2017, S. 58; A_Molzahn 2017, S. XXXIX)

Pro- dukt- mo- dell	An- teil	Minimale Arbeitslast je Auftrag		Durchschnittliche Arbeitslast gewich- tet mit relativen Häu- figkeiten je Auftrag	Maximale Arbeitslast je Auftrag (Worst Case)		
		Minimum unter Auf- trägen (ab- hängig und unab- hängig)	Durch- schnitt über Aufträge (ab- hängig)	Durchschnitt über Aufträge (abhängig und unabhängig)	Durch- schnitt über Auf- träge (ab- hängig)	Maxi- mum un- ter Auf- trägen (ab- hängig)	Maxi- mum unter Aufträ- gen (unab- hängig)
A319	6,25	0,00	4,07	4,12	4,19	4,28	4,28
A320	58,59	0,00	1,94	2,09	2,30	5,65	7,16
A321	35,16	0,00	4,18	4,20	4,35	7,84	9,60

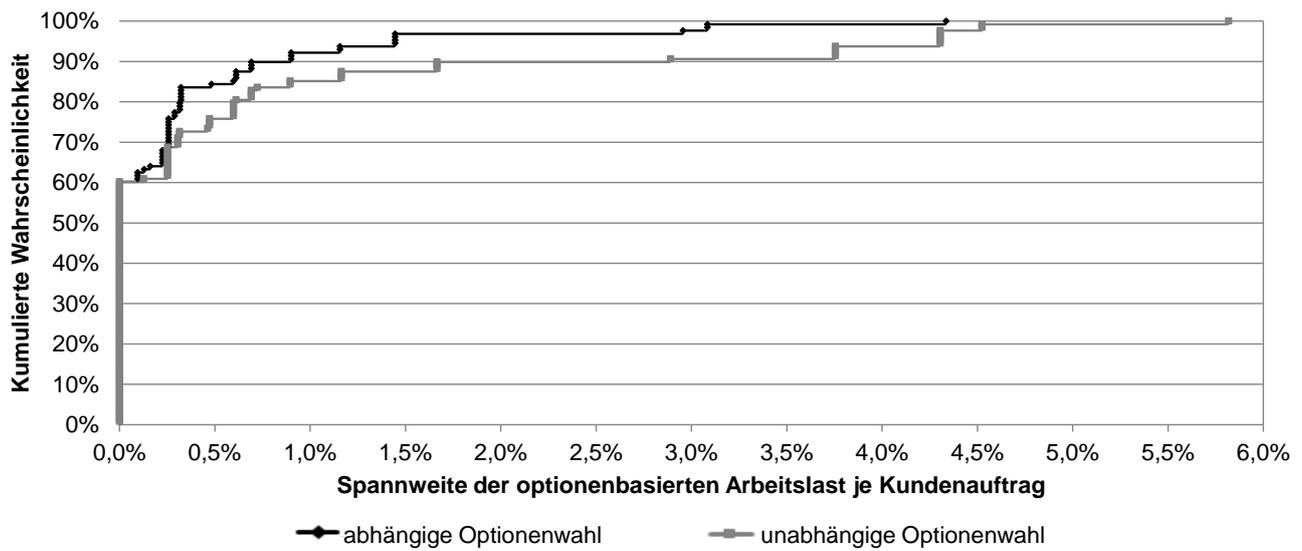


Abbildung A11: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Spannweite der Arbeitslasten durch Optionen anteilig an den Arbeitslasten durch entsprechende Produktmodelle für Kundenaufträge im 2. Quartal 2015 (A_Kronenbitter 2017, S. 59)

A8 Fall I: Ergebnisse der Szenariengenerierung

Tabelle A4: Angaben zu Clustern bei abhängiger Optionenwahl (A_Kronenbitter 2017, S. 103)

Cluster	1	2	3	4	Summe
Cluster-Wahrscheinlichkeit (%)	36,36	24,24	27,27	12,12	100
Anzahl Ziehungen vor Rundung	72,4	48,2	54,3	24,1	199
Anzahl Ziehungen aufgerundet	73	49	55	25	202
Minimale Arbeitslast des Clusters anteilig an Arbeitslast durch Produktmodell in %	0,00	2,31	3,66	4,34	
Maximale Arbeitslast des Clusters anteilig an Arbeitslast durch Produktmodell in %	0,64	2,70	3,69	4,34	
Cluster-Zentrum bei Abbruch anteilig an Arbeitslast durch Produktmodell in %	0,32	2,51	3,68	4,34	

Tabelle A5: Angaben zu Clustern bei unabhängiger Optionenwahl (A_Kronenbitter 2017, S. 104)

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Summe
Cluster-Wahrscheinlichkeit (%)	31,85	4,20	9,11	20,90	8,76	15,63	6,82	2,33	0,35	0,05	100
Anzahl Ziehungen vor Rundung	63,4	8,3	18,1	41,6	17,4	31,1	13,6	4,6	0,7	0,1	199
Anzahl Ziehungen aufgerundet	64	9	19	42	18	32	14	5	1	1	205
Minimale Arbeitslast des Clusters anteilig an Arbeitslast durch Produktmodell in %	0,00	0,93	1,64	2,38	3,08	3,63	4,14	4,66	5,17	5,72	
Maximale Arbeitslast des Clusters anteilig an Arbeitslast durch Produktmodell in %	0,90	1,61	2,31	3,02	3,60	4,11	4,63	5,14	5,65	6,26	
Cluster-Zentrum bei Abbruch anteilig an Arbeitslast durch Produktmodell in %	0,53	1,27	1,95	2,71	3,34	3,87	4,38	4,90	5,40	5,94	

A9 Fall I: Ergebnisse der Auftragseinplanung

In Tabelle A6, Tabelle A7, Tabelle A8, Tabelle A9 und Tabelle A10 sind die schwarzen Werte (Spalten a) auf die Gesamtkosten der Standardvariante des Szenarienmodells unter den Ausgangsszenarien bezogen angegeben. In Ausnahmen (maximale Arbeitslastabweichungskosten, 95%-Quantil der Arbeitslastabweichungskosten, Spannweite der Arbeitslastabweichungskosten, maximale Flexibilitätskosten) beziehen sich die schwarzen Werte (Spalten a) auf den in den Zeilenbeschriftungen angemerkten Kostenterm der Standardvariante des Szenarienmodells unter den Ausgangsszenarien. Die grauen Werte (Spalten b) sind auf die Gesamtkosten des Modells derselben Spalte bezogen angegeben. In Ausnahmen (maximale Arbeitslastabweichungskosten, 95%-Quantil der Arbeitslastabweichungskosten, Spannweite der Arbeitslastabweichungskosten, maximale Flexibilitätskosten) beziehen sich die grauen Werte (Spalten b) auf den in den Zeilenbeschriftungen angemerkten Kostenterm des Modells derselben Spalte.

Tabelle A7: Ergebnisse der Zielfunktionsterme verschiedener Modellvarianten (A_Kronbitter 2017, S. XX, S. XXIV f.)

	1) Szenarienmodell 200R&W (Standardva- riante)		2) Szenarienmodell 200R&W (unabhängige Optionenwahl)		3) Szenarienmodell 200Z&W			4) Szenarienmodell 500R&W			5) Erwartetes Ergeb- nis des Erwartungs- wertmodells (Stan- dardvariante) unter 200R&W (EEV)	
	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b		
	Ausgangsszenarien											
Gesamtkosten in %	100,0000	100,0000	100,0209	100,0000	99,9827	100,0000	100,0410	100,0000	99,9991	100,0000	99,9991	100,0000
Maximale Gesamtkosten in %	100,3354	100,3354	101,0247	101,0036	100,3123	100,3296	100,3457	100,3046	100,3449	100,3046	100,3449	100,3458
Spannweite der Gesamtkosten in %	0,6866	0,6866	1,3324	1,3321	0,6257	0,6258	0,6665	0,6662	0,6760	0,6662	0,6760	0,6760
Standardabweichung der Gesamtkosten in %	0,0720		0,0699		0,0953		0,0922		0,0723		0,0723	
Einzelauftragsbezogene Kosten in %	99,9943	99,9943	100,0106	99,9897	99,9773	99,9945	100,0289	99,9879	99,9933	99,9879	99,9933	99,9942
Materialbezogene Eingangskosten in %	99,9886	99,9886	100,0030	99,9821	99,9716	99,9888	100,0222	99,9813	99,9876	99,9813	99,9876	99,9885
Bestandskosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Terminverzögerungskosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Standortabweichungskosten in %	0,0057	0,0057	0,0076	0,0076	0,0057	0,0057	0,0066	0,0066	0,0057	0,0066	0,0057	0,0057
Auftragsabsatzkosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Arbeitslastabweichungskosten in %	0,0057	0,0057	0,0084	0,0084	0,0055	0,0055	0,0121	0,0121	0,0042	0,0121	0,0042	0,0042
Maximale Arbeitslastabweichungskosten bezogen auf erwartete Arbeitslastabweichungskosten in %	440,9291	440,9291	757,1634	515,0029	433,7720	452,0110	473,3760	223,1762	398,0093	223,1762	398,0093	535,7785
95%-Quantil der Arbeitslastabweichungskosten bezogen auf erwartete Arbeitslastabweichungskosten in %	200,5185	200,5185	288,7467	196,3981	206,3625	215,0395	300,6670	141,7514	164,0509	141,7514	164,0509	220,8364
Spannweite der Arbeitslastabweichungskosten bezogen auf erwartete Arbeitslastabweichungskosten in %	365,0271	365,0271	648,7583	441,3609	363,6646	378,8904	324,2046	152,9110	353,7637	152,9110	353,7637	476,2174
Standardabweichung der Arbeitslastabweichungskosten in %	16,0774		18,9168		22,1454		13,5530		19,4290		19,4290	
Flexibilitätskosten in %	0,0038	0,0038	0,0042	0,0042	0,0037	0,0037	0,0082	0,0082	0,0042	0,0082	0,0042	0,0042
Maximale Flexibilitätskosten bezogen auf erwartete Flexibilitätskosten in %	606,6094	606,6094	1016,4241	925,9332	599,3646	615,3991	601,7071	281,8665	591,4288	281,8665	591,4288	535,7785
Wandlungskosten in %	0,0019	0,0019	0,0042	0,0042	0,0017	0,0017	0,0039	0,0039	0,0000	0,0039	0,0000	0,0000
Wahrscheinlichkeit der Unzulässigkeit bezüglich Arbeitslastabweichung	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		68,2840		68,2840	
Folgekosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0016	0,0000	0,0016	0,0016
Maximale Folgekosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0357	0,0000	0,0357	0,0357
Level-Scheduling-Kosten in %	0,0000	0,0000	0,0019	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Level-Scheduling-Kosten A319 in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Level-Scheduling-Kosten A321 in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Level-Scheduling-Kosten Lackierung in %	0,0000	0,0000	0,0019	0,0019	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Level-Scheduling-Kosten Erstversion in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Summe der Szenariowahrscheinlichkeiten	1,1537E-14		5,0690E-30		1,1710E-14		2,1242E-14		1,1537E-14		1,1537E-14	
Zeit zur Szenariengenerierung in s	7		94		4		31					
Rechenaufzeit zur Modelllösung in s	36000		36000		36000		90000					
Lösungsgütetoleranz in %	0,00		0,00		0,00		0,01					

Tabelle A8: Ergebnisse der Zielfunktionsterme verschiedener Modellvarianten (A_Kronbitter 2017, S. XXIV, S. XXVI ff.)

	1) Reale Einplanung		2) Szenarienmodell 200R&W ohne Wandlungskosten			3) Szenarienmodell 200R&W ohne Wandlungskosten mit integrierten Folgekosten		
	Ausgangsszenarien							
	1a	1b	2a	2b	3a	3b		
Gesamtkosten in %	100,2816	100,0000	99,9982	100,0000	99,9981	100,0000		
Maximale Gesamtkosten in %	100,6493	100,3666	100,3396	100,3415	100,3323	100,3468		
Spannweite der Gesamtkosten in %	0,7088	0,7068	0,6707	0,6707	0,6706	0,6706		
Standardabweichung der Gesamtkosten in %	0,1687		0,0722		0,0722			
Einzelaufragsbezogene Kosten in %	99,9912	99,7104	99,9933	99,9951	99,9943	99,9962		
Materialbezogene Eingangskosten in %	99,9855	99,7047	99,9876	99,9894	99,9886	99,9905		
Bestandskosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
Terminverzögerungskosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
Standortabweichungskosten in %	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057		
Auftragsabstandskosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
Arbeitslastabweichungskosten in %	0,0387	0,0386	0,0040	0,0040	0,0033	0,0033		
Maximale Arbeitslastabweichungskosten bezogen auf erwartete Arbeitslastabweichungskosten in %	970,3586	143,2720	397,1825	569,9087	397,8187	685,2684		
95%-Quantil der Arbeitslastabweichungskosten bezogen auf erwartete Arbeitslastabweichungskosten in %	788,8161	116,4675	160,3680	230,1087	161,1909	277,6616		
Spannweite der Arbeitslastabweichungskosten bezogen auf erwartete Arbeitslastabweichungskosten in %	352,4262	52,1818	368,0528	513,7529	371,6851	640,2392		
Standardabweichung der Arbeitslastabweichungskosten in %	2,8986		16,9626		26,3959			
Flexibilitätskosten in %	0,0387	0,0386	0,0040	0,0040	0,0033	0,0033		
Maximale Flexibilitätskosten bezogen auf erwartete Flexibilitätskosten in %	1441,9209	143,2720	590,2000	569,9087	591,1455	685,2684		
Wandlungskosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
Wahrscheinlichkeit der Unzulässigkeit bezüglich Arbeitslastabweichung	100,0000		3,5477		3,5477			
Folgekosten in %	0,1661	0,1657	0,0009	0,0009	0,0005	0,0005		
Maximale Folgekosten in %	0,2238	0,2232	0,0305	0,0305	0,0173	0,0173		
Level-Scheduling-Kosten in %	0,0856	0,0854	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
Level-Scheduling-Kosten A319 in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
Level-Scheduling-Kosten A321 in %	0,0251	0,0250	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
Level-Scheduling-Kosten Lackierung in %	0,0437	0,0436	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
Level-Scheduling-Kosten Erstversion in %	0,0168	0,0167	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
Summe der Szenariowahrscheinlichkeiten	1,1537E-14		1,1537E-14			1,1537E-14		
Zeit zur Szenariengenerierung in s	5							
Rechenlaufzeit zur Modelllösung in s	36000							
Lösungsgütertoleranz in %	0,00							

Tabelle A9: Ergebnisse der Zielfunktionsterme verschiedener Modellvarianten (A_Kronbitter 2017, S. XXI)

	5000 Szenarien										4) Szenarienmodell 200Z&W		5) Szenarienmodell 500R&W	
	1) Szenarienmodell 200R&W (Standardvariante)		2) Szenarienmodell 200R&W (Standardvariante unter 5000 anderen Szenarien)		3) Szenarienmodell 200R&W (unabhängige Optionswahl)		4a	4b	5a	5b				
	1a	1b	2a	2b	3a	3b								
Gesamtkosten in %	100,0227	100,0000	100,0210	100,0000	100,0544	100,0000	100,0222	100,0000	100,0279	100,0000				
Gesamtkosten bezogen auf Gesamtkosten unter den Ausgangsszenarien in %	100,0227		100,0210		100,0335		100,0395		99,9869					
Maximale Gesamtkosten in %	100,4233	100,4006	100,3774	100,3563	100,3873	100,3328	100,4216	100,3992	100,4286	100,4005				
Spannweite der Gesamtkosten in %	0,8670	0,8668	0,8488	0,8486	0,6950	0,6946	0,8650	0,8648	0,8662	0,8660				
Standardabweichung der Gesamtkosten in %	0,0782		0,0892		0,0373		0,0781		0,0781					
Einzelanfragebezogene Kosten in %	100,0165	99,9938	100,0148	99,9938	100,0431	99,9887	100,0165	99,9943	100,0164	99,9885				
Materialbezogene Eingangskosten in %	100,0108	99,9882	100,0091	99,9882	100,0355	99,9812	100,0108	99,9886	100,0098	99,9819				
Bestandskosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
Terminverzögerungskosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
Standortabweichungskosten in %	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0076	0,0076	0,0057	0,0057	0,0066	0,0066				
Auftragsabstandskosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
Arbeitslastabweichungskosten in %	0,0062	0,0062	0,0062	0,0062	0,0094	0,0093	0,0057	0,0057	0,0115	0,0115				
Maximale Arbeitslastabweichungskosten bezogen auf erwartete Arbeitslastabweichungskosten in %	323,6658	299,8719	280,4111	258,0244	396,0185	241,7081	286,46483	285,9035	413,8400	205,8793				
95%-Quantil der Arbeitslastabweichungskosten bezogen auf erwartete Arbeitslastabweichungskosten in %	199,4935	184,8280	196,4867	180,8001	275,5311	168,1692	191,7150	191,2169	297,9628	148,2321				
Spannweite der Arbeitslastabweichungskosten bezogen auf erwartete Arbeitslastabweichungskosten in %	247,7637	229,5497	204,5090	188,1820	286,0884	174,6128	219,4442	218,8740	271,7763	161,2870				
Standardabweichung der Arbeitslastabweichungskosten in %	16,2830		17,2710		12,1194		18,6439		13,2052					
Flexibilitätskosten in %	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043	0,0052	0,0052	0,0040	0,0040	0,0076	0,0076				
Maximale Flexibilitätskosten bezogen auf erwartete Flexibilitätskosten in %	432,3600	386,7585	368,0849	326,0490	479,7747	356,0017	380,7437	366,8844	513,2385	260,5515				
Wandlungskosten in %	0,0019	0,0019	0,0019	0,0019	0,0042	0,0042	0,0017	0,0017	0,0039	0,0039				
Wahrscheinlichkeit der Unzulässigkeit bezüglich Arbeitslastabweichung	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000					
Folgekosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
Maximale Folgekosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
Level-Scheduling-Kosten in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0019	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
Level-Scheduling-Kosten A319 in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
Level-Scheduling-Kosten A321 in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
Level-Scheduling-Kosten Lackierung in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0019	0,0019	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
Level-Scheduling-Kosten Erstversion in %	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
Summe der Szenariowahrscheinlichkeiten	3,1386E-13		2,6659E-13		2,9186E-28		3,1386E-13		3,1386E-13		3,1386E-13			

Szenarien der Standardvariante des Szenarienmodells

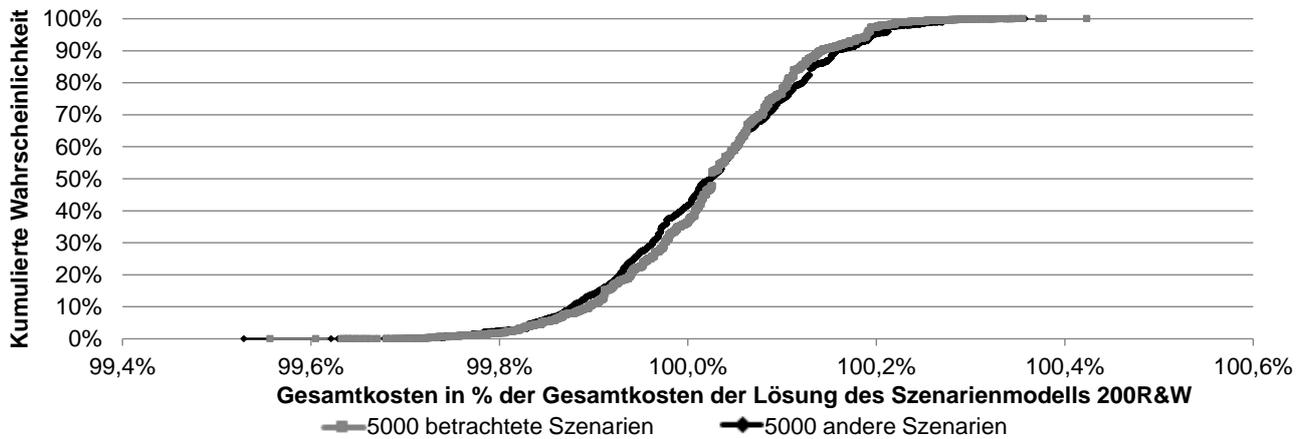


Abbildung A12: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Gesamtkosten des Szenarienmodells 200R&W unter 5000 Szenarien mit 5000 anderen Szenarien (A_Kronenbitter 2017, S. 80)

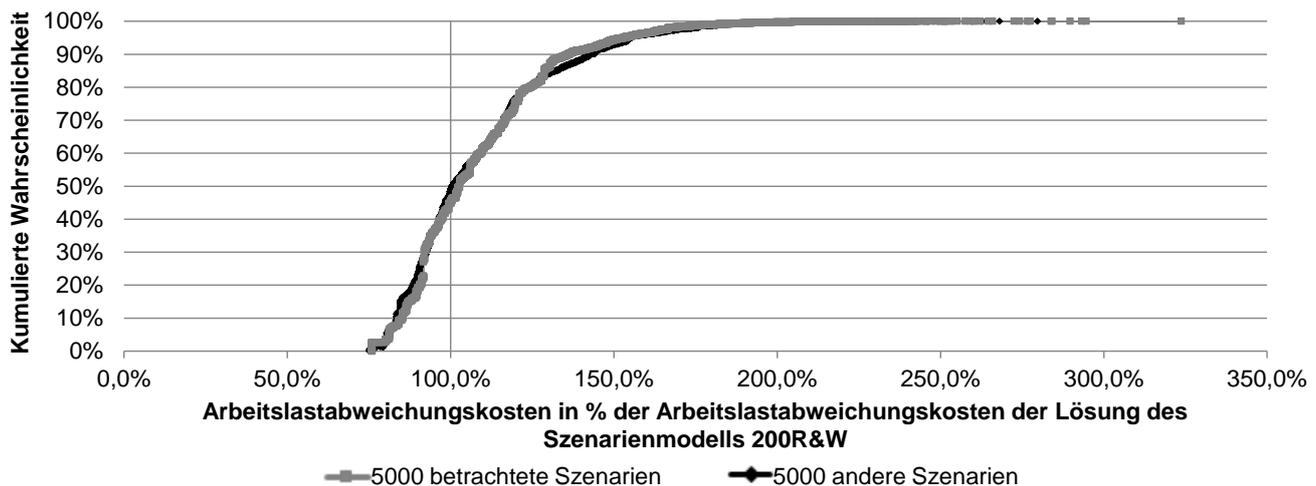


Abbildung A13: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Arbeitslastabweichungskosten des Szenarienmodells 200R&W unter 5000 Szenarien mit 5000 anderen Szenarien (A_Kronenbitter 2017, S. 81)

An dieser Stelle wird die Auswahl von 200R&W als Standardvariante des Szenarienmodells begründet. Dazu werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Gesamtkosten und die Arbeitslastabweichungskosten der Auftragseinplanung für die abhängige Optionenwahl unter Verwendung repräsentativer Arbeitslasten durch die Modellvariante 200R&W (Abbildung A14, Abbildung A15) und unter Verwendung zufälliger Szenarien durch 200Z&W (Abbildung A16, Abbildung A17) jeweils mit den entsprechenden Kosten unter 5000 zufälligen, abhängigen Szenarien verglichen.

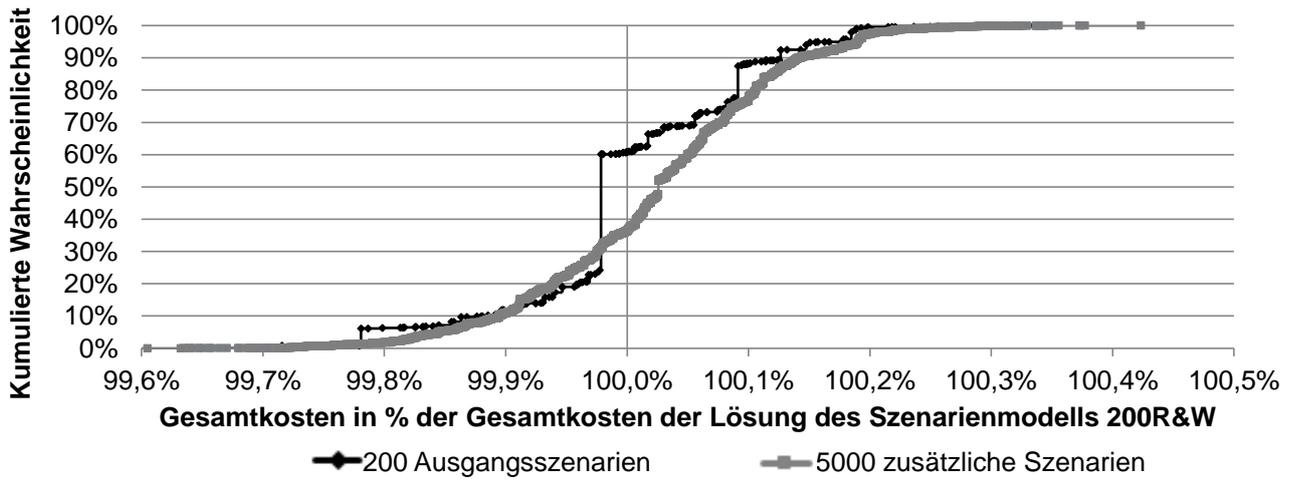


Abbildung A14: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gesamtkosten des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 105)

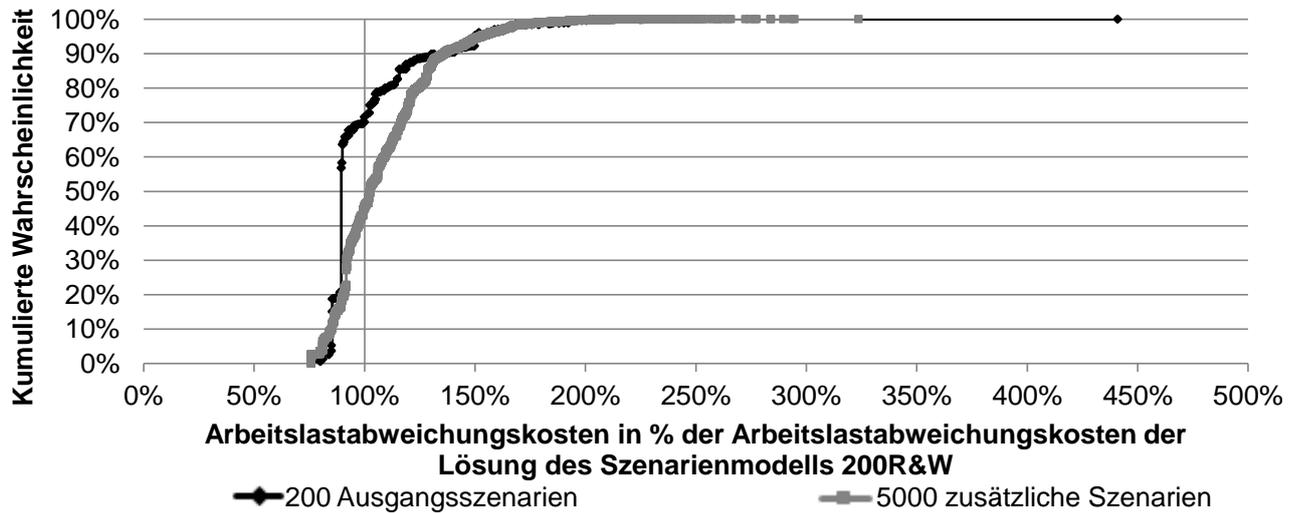


Abbildung A15: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Arbeitslastabweichungskosten des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 108)

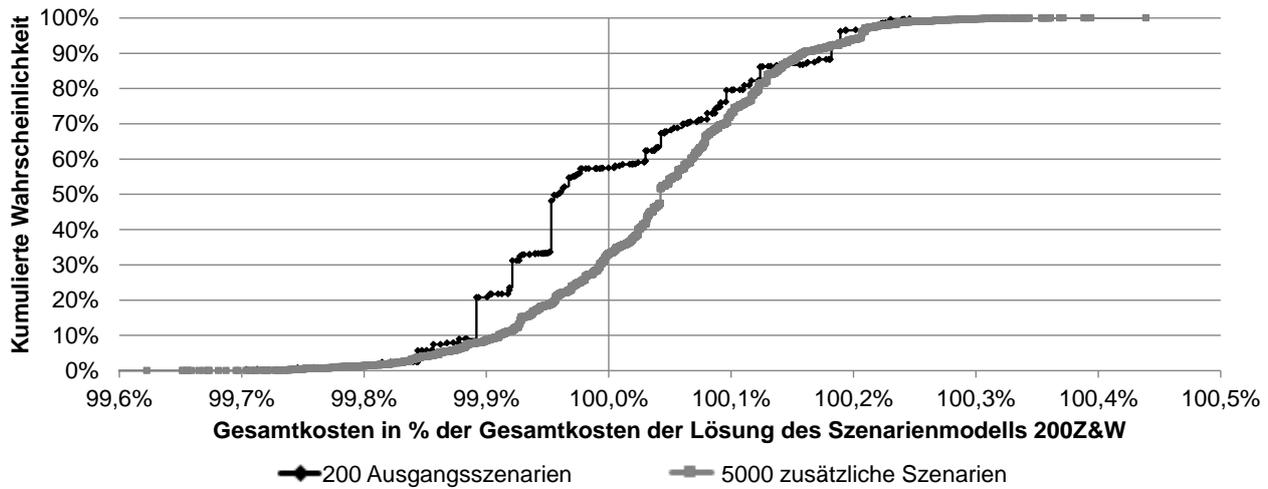


Abbildung A16: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gesamtkosten des Szenarienmodells 200Z&W (A_Kronenbitter 2017, S. 106)

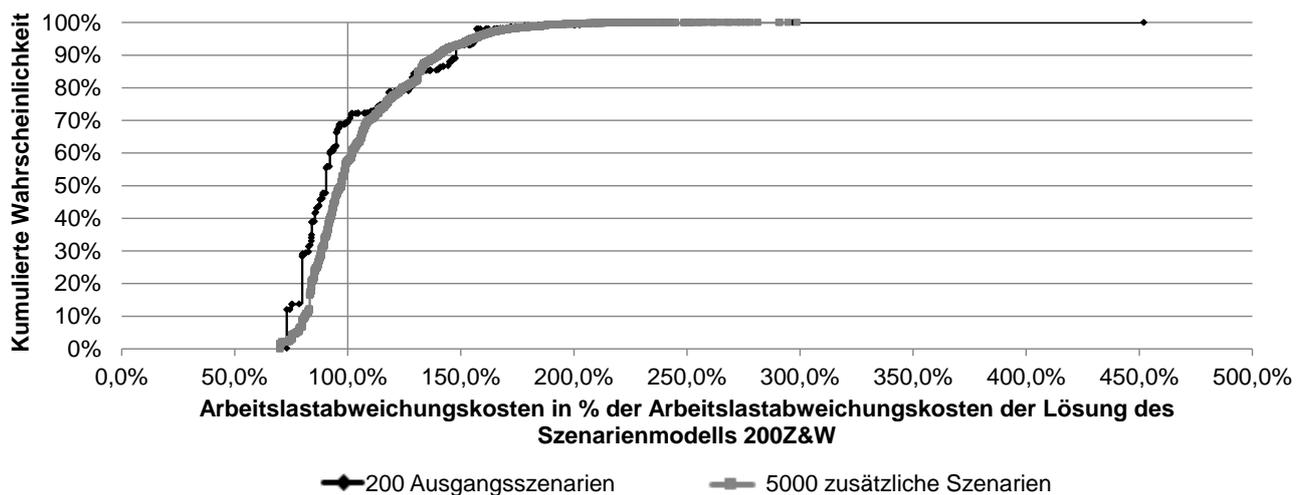


Abbildung A17: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Arbeitslastabweichungskosten des Szenarienmodells 200Z&W (A_Kronenbitter 2017, S. 108)

Für die beiden Modellvarianten 200R&W (199 Szenarien mit repräsentativen Arbeitslasten und Worst-Case-Szenario) und 200Z&W (199 Szenarien mit zufälligen Arbeitslasten und Worst-Case-Szenario) ist ersichtlich, dass die maximalen Arbeitslastabweichungskosten der 200 Szenarien aufgrund der Berücksichtigung der maximalen Arbeitslast durch das Worst-Case-Szenario die maximalen Arbeitslastabweichungskosten der 5000 Szenarien übertreffen (Abbildung A15, Abbildung A17). Somit wird sowohl für 200R&W als auch für 200Z&W Informationsrobustheit bezüglich der Ergebnisrobustheit hinsichtlich der Ergebnisstabilität der Arbeitslastabweichungskosten und bezüglich der Zulässigkeitsrobustheit durch das Worst-Case-Szenario sichergestellt. Kein relevantes Szenario, auch keines, das nicht unter den 5000 betrachteten Szenarien ist,

führt zu höheren Arbeitslastabweichungskosten als das Worst-Case-Szenario. Da das Worst-Case-Szenario lediglich die maximale Arbeitslast und somit die maximalen Arbeitslastabweichungskosten und nicht die maximalen materialbezogenen Eingangskosten repräsentiert (A_Kronenbitter 2017, S. 93 ff.), kommt es vor, dass die maximalen Gesamtkosten unter 5000 Szenarien die maximalen Gesamtkosten unter 200 Szenarien übersteigen (Abbildung A14, Abbildung A16).

Sowohl für 200R&W als auch für 200Z&W ist erkennbar, dass Abweichungen zwischen den entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen unter 200 und 5000 Szenarien bestehen. Bei 200 Szenarien ist der Einfluss einzelner Szenarien mit relativ hohen Wahrscheinlichkeiten im Vergleich zu den anderen Szenarien auf die Wahrscheinlichkeitsverteilungen stärker als unter 5000 Szenarien (A_Kronenbitter 2017, S. 97 f.). Bei 200R&W führt insbesondere ein einzelnes Szenario mit einer relativ hohen Wahrscheinlichkeit zu einer entsprechend hohen Abweichung zwischen den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Gesamtkosten und der Arbeitslastabweichungskosten, was in Abbildung A14 und Abbildung A15 deutlich zu erkennen ist (A_Kronenbitter 2017, S. 108). Das Szenarienmodell 200R&W wird als Standardvariante des Szenarienmodells verwendet, da keine eindeutigen Nachteile gegenüber 200Z&W ersichtlich sind und prinzipiell Vorteile durch die repräsentative Abbildung der Arbeitslasten, insbesondere bei mehr Auftragskonfigurationen der Kundenaufträge in der Datenbasis, zu erwarten sind (vgl. A_Strunz 2017, S. 142).

Ein höherer Informationsstand als bei 200R&W kann bei der Optimierung durch die Betrachtung von 500 anstelle von 200 Ausgangsszenarien unter Verwendung repräsentativer Arbeitslasten durch die Modellvariante 500R&W berücksichtigt werden (Abbildung A18, Abbildung A19). Durch das Worst-Case-Szenario wird unabhängig von der Anzahl der Szenarien bei der Optimierung und somit auch für 500R&W Informationsrobustheit bezüglich der Ergebnisrobustheit hinsichtlich der Ergebnisstabilität der Arbeitslastabweichungskosten und bezüglich der Zulässigkeitsrobustheit erreicht. Daher übersteigen die Arbeitslastabweichungskosten unter keinem der 5000 Szenarien diejenigen unter dem Worst-Case-Szenario (Abbildung A19). Hinsichtlich der Ergebnishöhe von 500R&W im Vergleich zu 200R&W zeigt sich jedoch, dass CPLEX für 200R&W die aus Anwendungsgesichtspunkten maximale Rechenlaufzeit von zehn Stunden ausnutzt und eine Lösungsgütetoleranz von unter 0,01 % erreicht wird, wogegen für 500R&W trotz einer erhöhten Rechenlaufzeit von 25 Stunden aufgrund der höheren Problemkomplexität eine Lösungsgütetoleranz von lediglich 0,01 % erzielt wird

(Tabelle A7 Spalte 4). Entsprechend fallen die Gesamtkosten und Arbeitslastabweichungskosten für 500R&W unter 5000 Szenarien höher als für 200R&W aus (Tabelle A9 Spalte 5). Die bessere Ergebnishöhe und die aus Anwendungsgesichtspunkten auf zehn Stunden gesetzte Rechenlaufzeitbeschränkung sprechen daher für 200R&W als Standardvariante des Szenarienmodells zur weiteren Betrachtung. (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 96 ff.)

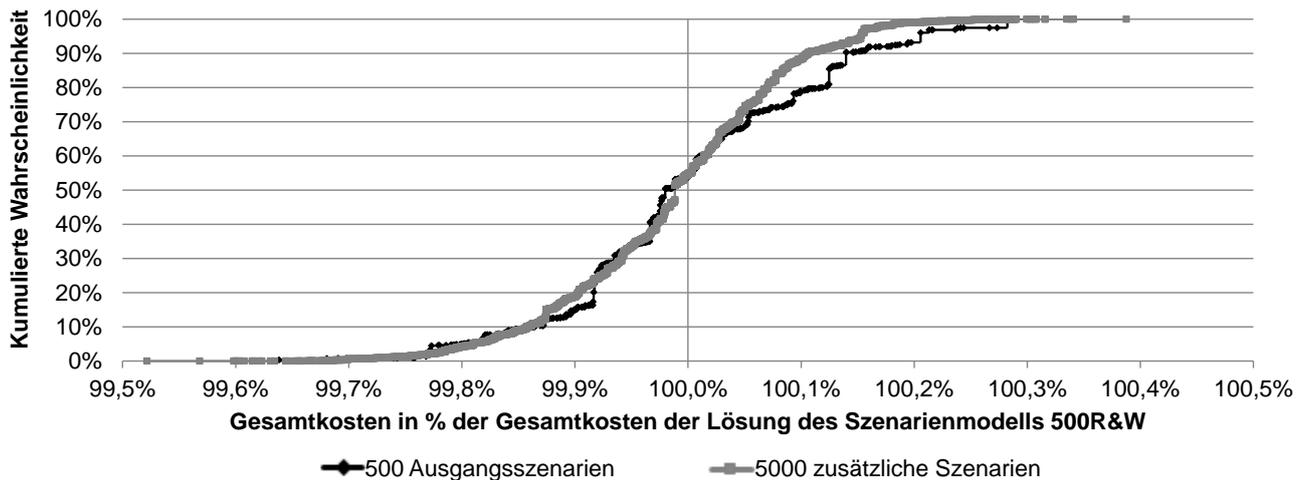


Abbildung A18: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gesamtkosten des Szenarienmodells 500R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 98)

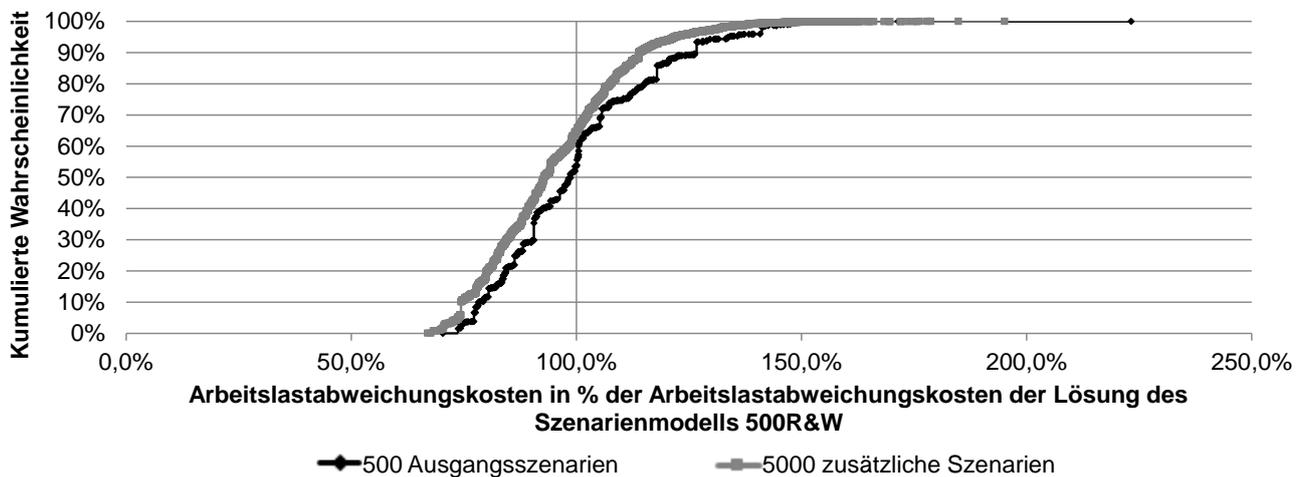


Abbildung A19: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Arbeitslastabweichungskosten des Szenarienmodells 500R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 100)

Vergleich der Ergebnisse des Szenarienmodells, des Erwartungswertmodells und der realen Einplanung bei Airbus

Tabelle A11: Anteil übereinstimmender Zuordnungen der Aufträge nach Produktmodellen zu Standorten sowie zu Standorten und Monaten in % (A_Kronenbitter 2017, S. 140)

	Vergleich der Standardvariante des Szenarienmodells mit der Standardvariante des Erwartungswertmodells	Vergleich der Standardvariante des Szenarienmodells mit den realen Zuordnungen
Standort-Zuordnung gesamt	96,8750	80,4688
Standort-Zuordnung A319	100,0000	62,5000
Standort-Zuordnung A320	94,6667	70,6667
Standort-Zuordnung A321	100,0000	100,0000
Standort-Monat-Zuordnung gesamt	37,5000	29,6875
Standort-Monats-Zuordnung A319	12,5000	25,0000
Standort-Monats-Zuordnung A320	40,0000	24,0000
Standort-Monats-Zuordnung A321	37,7778	40,0000

Tabelle A12: Einhaltung der Antizipation des Car-Sequencing für das Produktmodell A321 am Standort Hamburg je Monat (A_Kronenbitter 2017, S. XIX)

	Szenarienmodell 200R&W (Standardvariante)	Erwartungswertmodell (Standardvariante)	Reale Einplanung	Sequenzierungsregel
Monat 4	0,68	0,64	0,64	0,81
Monat 5	0,70	0,70	0,50	0,89
Monat 6	0,62	0,65	0,81	0,77

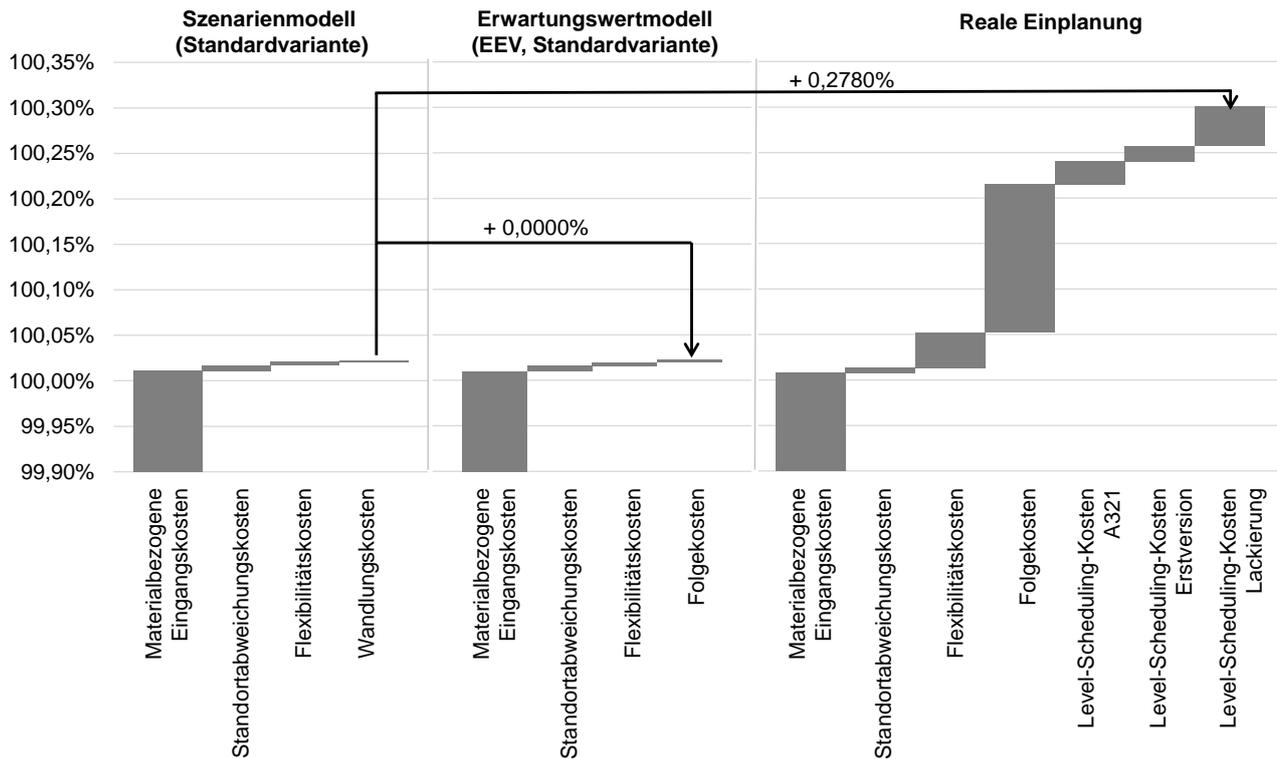


Abbildung A20: Gesamtkosten der Auftragseinplanung des Szenarienmodells, des Erwartungswertmodells und der realen Einplanung unter 5000 zusätzlichen Szenarien (Tabelle A9, Tabelle A10)

Ergebnisse der Arbeitslastabweichungskosten

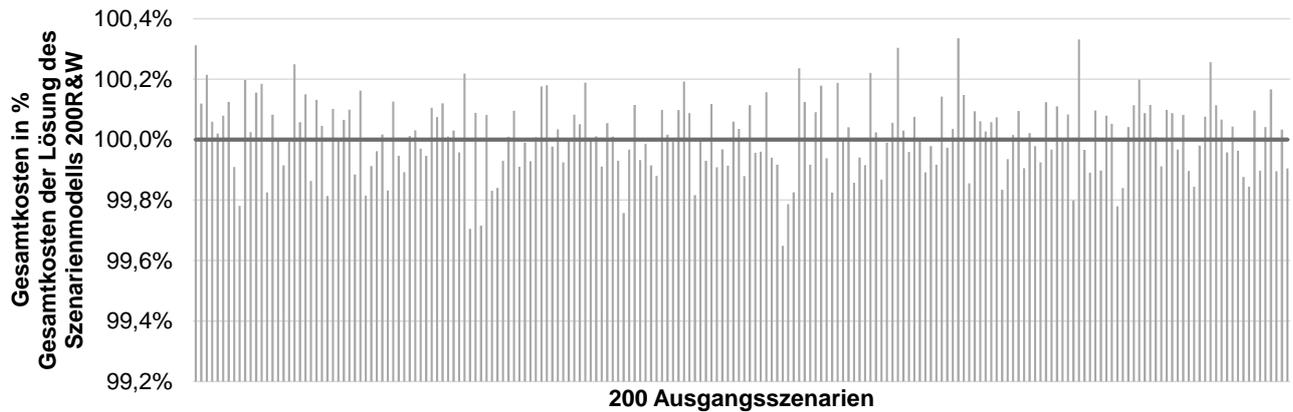


Abbildung A21: Gesamtkosten je Ausgangsszenario des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 90)

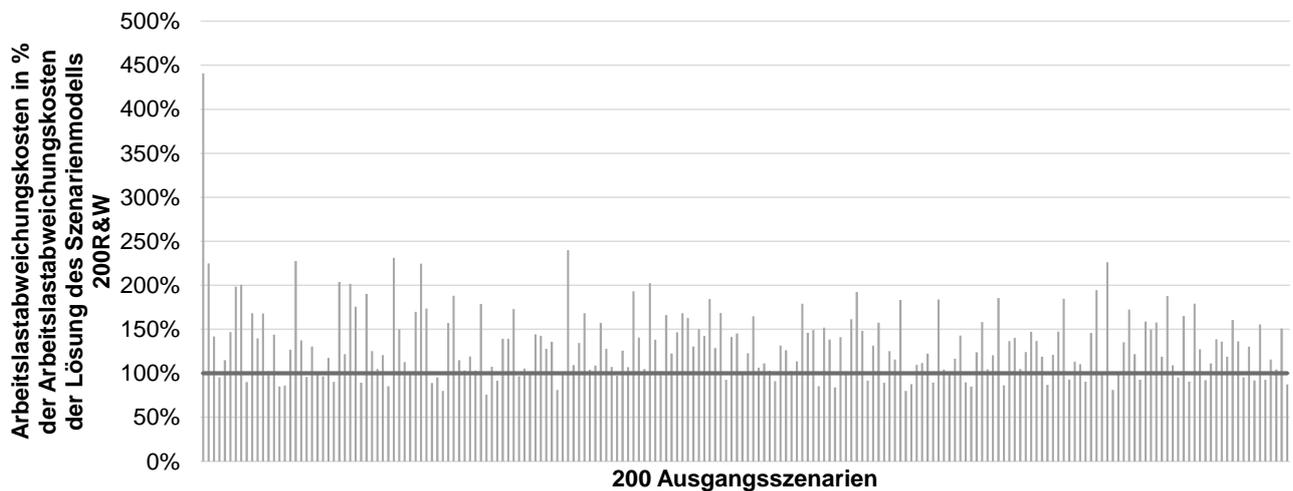


Abbildung A22: Arbeitslastabweichungskosten je Ausgangsszenario des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 91)

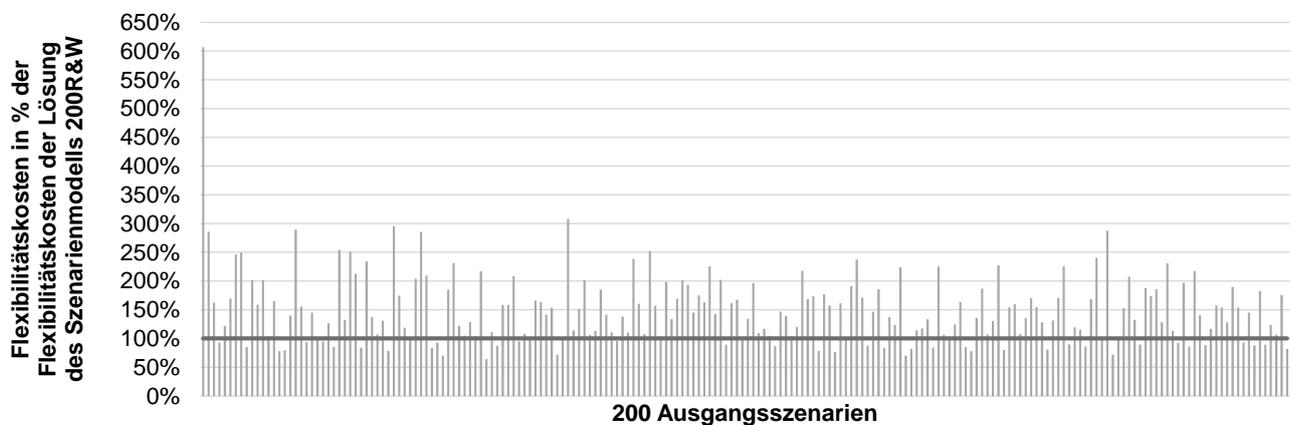


Abbildung A23: Flexibilitätskosten je Ausgangsszenario des Szenarienmodells 200R&W (A_Kronenbitter 2017, S. 92)

Tabelle A13: Arbeitslastabweichungen je Standort und Monat unter 200 Szenarien in % (A_Kronenbitter 2017, S. 123, S. 149)

Standort	Monat	Szenarienmodell 200R&W (Standardvariante)		Szenarienmodell 200R&W ohne Wand- lungskosten		Szenarienmodell 200R&W ohne Wand- lungskosten mit inte- grierten Folgekosten		Erwartetes Ergebnis des Erwartungswertmodells (Standardvariante) für 200R&W (EEV)	
		Erwartungs- wert	Maximum	Erwartungs- wert	Maximum	Erwartungs- wert	Maximum	Erwartungs- wert	Maximum
Hamburg	4	-0,0127	0,3191	-0,0173	0,0056	-0,0419	0,0749	-0,0970	0,1013
	5	-0,0325	-0,0061	-0,0244	0,0412	-0,0654	0,0565	-0,0121	0,0519
	6	-0,0758	-0,0129	-0,0675	0,216	-0,0258	0,1456	-0,0202	0,1268
Toulouse	4	-0,0506	0,4525	-0,0161	-0,002	-0,0386	0,2833	-0,0092	0,3108
	5	-0,0067	-0,0067	-0,0572	0,1237	-0,0162	0,3777	-0,0105	0,3552
	6	0,003	0,1574	-0,0753	0,4055	0,0000	0,0000	-0,0335	0,0167
Tianjin	4	0,7506	0,8359	0,3505	1,1875	0,069	0,8906	0,2218	0,2891
	5	0,2051	0,3516	0,2954	0,4063	0,2954	0,4063	0,3505	1,1875
	6	-0,0756	0,5688	0,4264	0,4875	0,4109	0,4813	0,4888	0,5938
Summe positiver Abweichungen		0,9587	2,6852	1,0723	2,8732	0,7753	2,7161	1,0611	3,033

Tabelle A14: Arbeitslastabweichungen je Standort und Monat unter 5000 Szenarien in % (A_Kronenbitter 2017, S. 126, S. 159)

Standort	Monat	Szenarienmodell 200R&W (Standardvariante)		Szenarienmodell 200R&W ohne Wand- lungskosten		Szenarienmodell 200R&W ohne Wand- lungskosten mit inte- grierten Folgekosten		Erwartetes Ergebnis des Erwartungswertmodells (Standardvariante) für 200R&W (EEV)	
		Erwartungs- wert	Maximum	Erwartungs- wert	Maximum	Erwartungs- wert	Maximum	Erwartungs- wert	Maximum
Hamburg	4	-0,0164	0,2317	-0,023	0,0056	-0,057	0,0749	-0,1023	0,0846
	5	-0,0297	-0,0061	-0,0359	0,0412	-0,0743	0,0565	-0,0237	0,0519
	6	-0,0837	-0,0129	-0,0733	0,1385	-0,015	0,1397	-0,0157	0,1268
Toulouse	4	-0,0504	0,4525	-0,0151	-0,002	0,0004	0,2833	-0,0693	0,2046
	5	-0,0067	-0,0067	-0,0132	0,1237	-0,0272	0,3777	-0,0112	0,3552
	6	0,0308	0,15	-0,0666	0,4055	0	0	-0,0176	0,0167
Tianjin	4	0,7405	0,8359	0,3786	1,1875	0,0988	0,8906	0,1403	0,2891
	5	0,1562	0,3516	0,2987	0,4063	0,2987	0,4063	0,3786	1,1875
	6	-0,0511	0,5688	0,3585	0,4875	0,3476	0,4813	0,4872	0,5937
Summe positiver Abweichungen		0,9275	2,5904	1,0358	2,7957	0,7456	2,7102	1,0061	2,9101

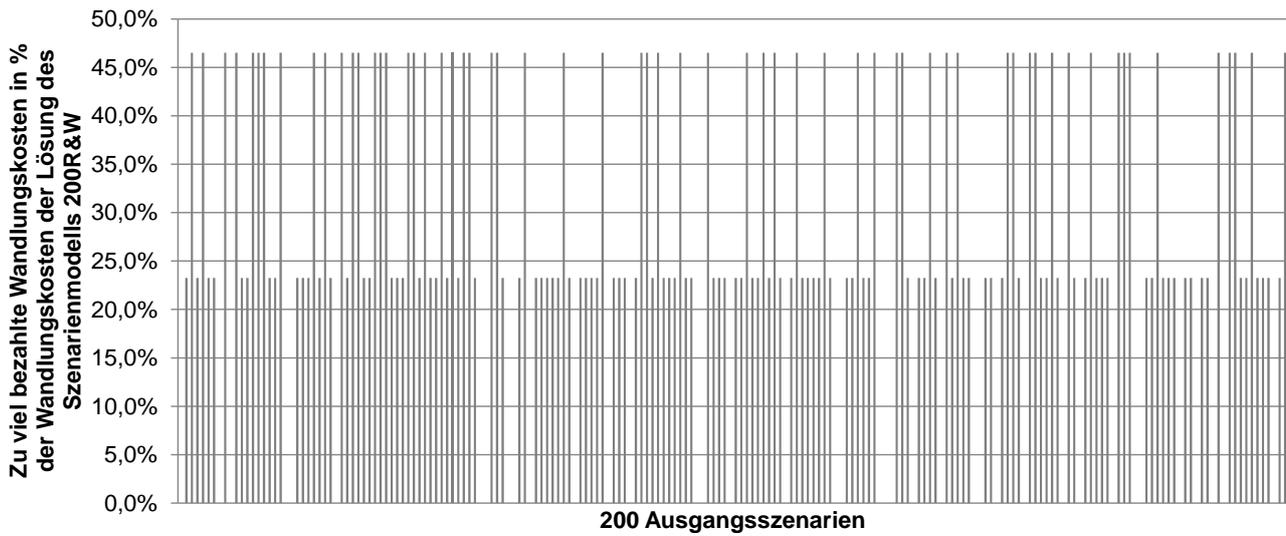


Abbildung A24: Zu viel bezahlte Wandlungskosten je Ausgangsszenario des Szenarienmodells 200R&W (vgl. A_Kronenbitter 2017, S. 93)

Ergebnisse der Level-Scheduling-Kosten

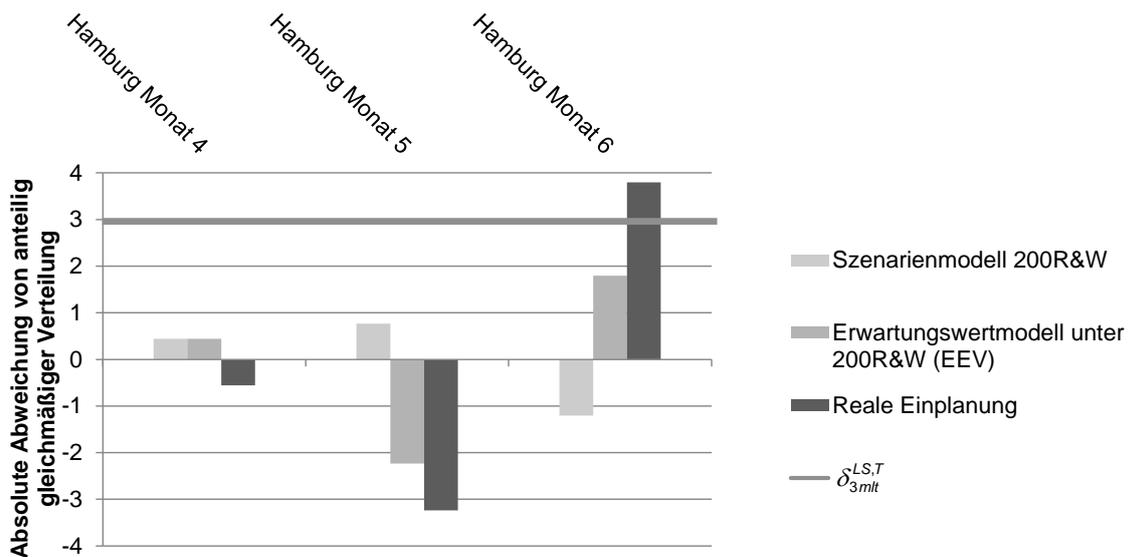


Abbildung A25: Abweichungen des Produktmodells A321 von der anteilig gleichmäßigen Verteilung (A_Kronenbitter 2017, S. 143)

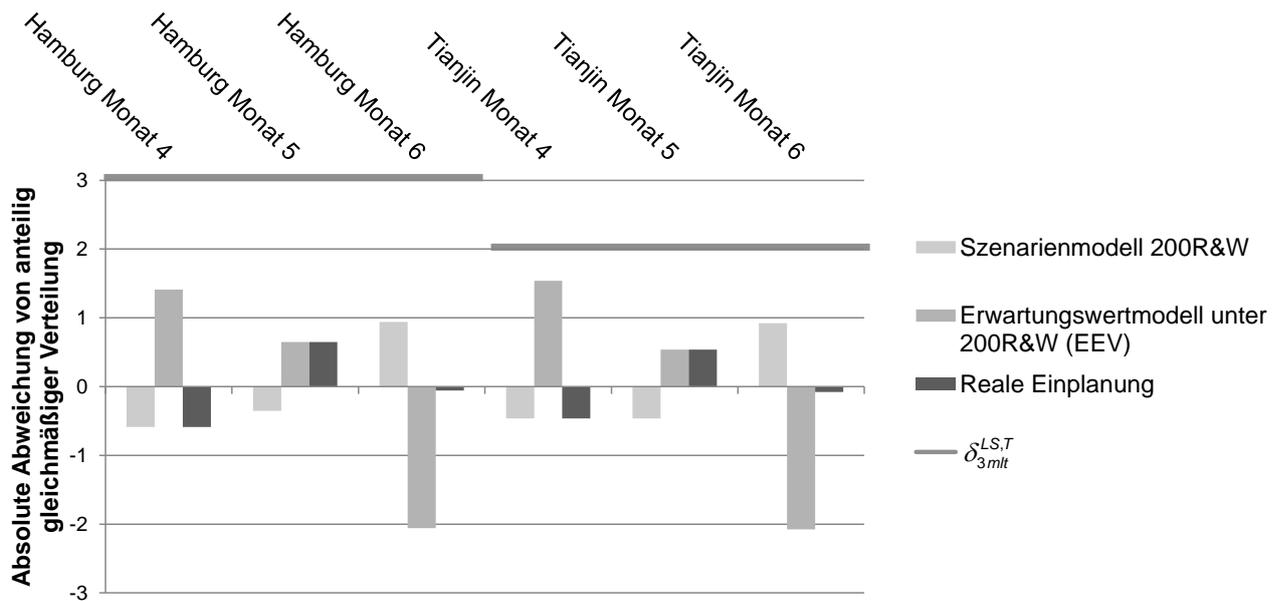


Abbildung A26: Abweichungen des Produktmodells A319 von der anteilig gleichmäßigen Verteilung (A_Kronenbitter 2017, S. 143)

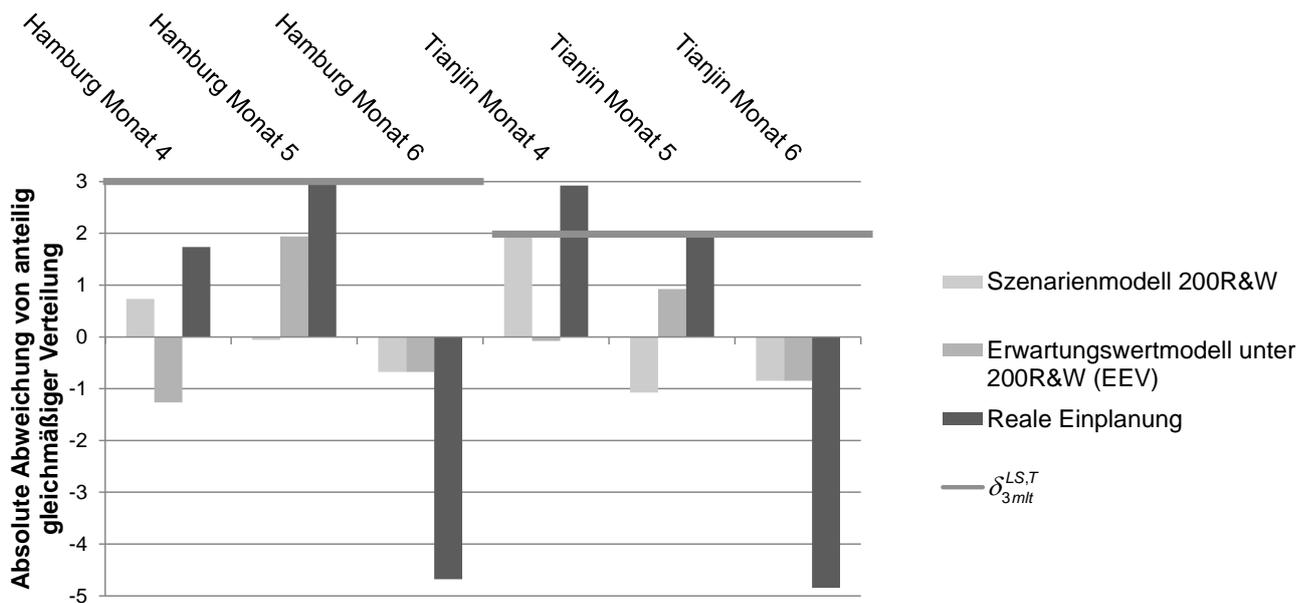


Abbildung A27: Abweichungen des Produktmodells A320 von der anteilig gleichmäßigen Verteilung mit der Kostenschwelle entsprechend dem Produktmodell A319 (A_Kronenbitter 2017, S. 144)

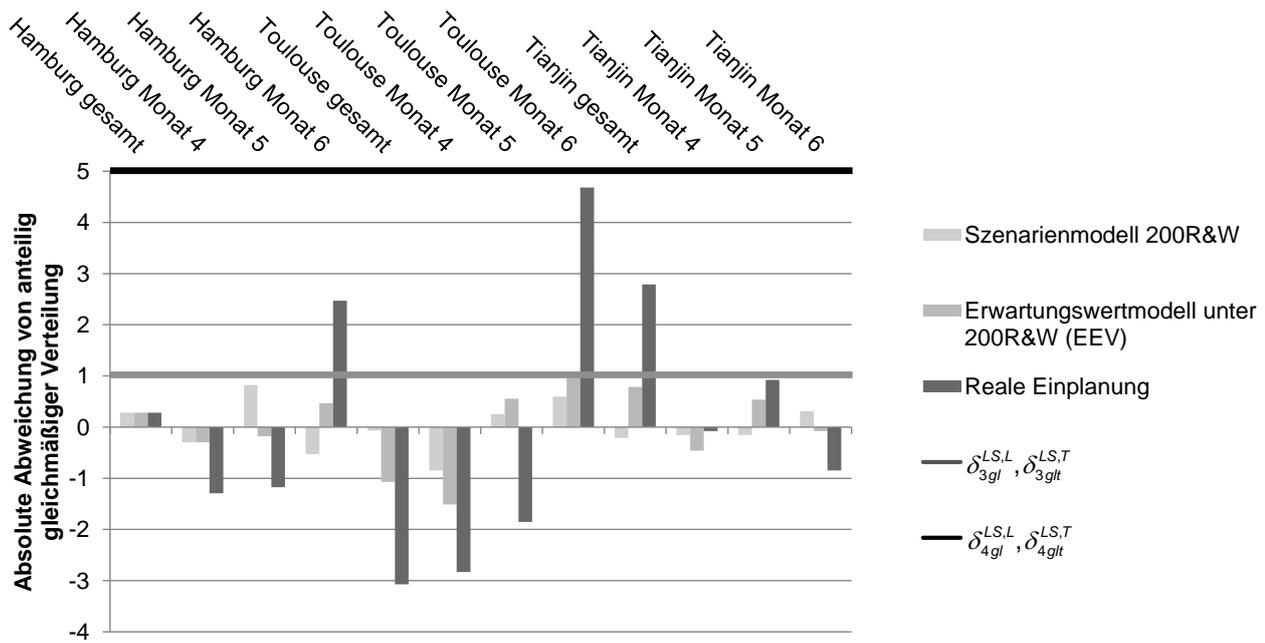


Abbildung A28: Abweichungen der Anzahl an Lackiertagen von der anteilig gleichmäßigen Verteilung (A_Kronenbitter 2017, S. 145)

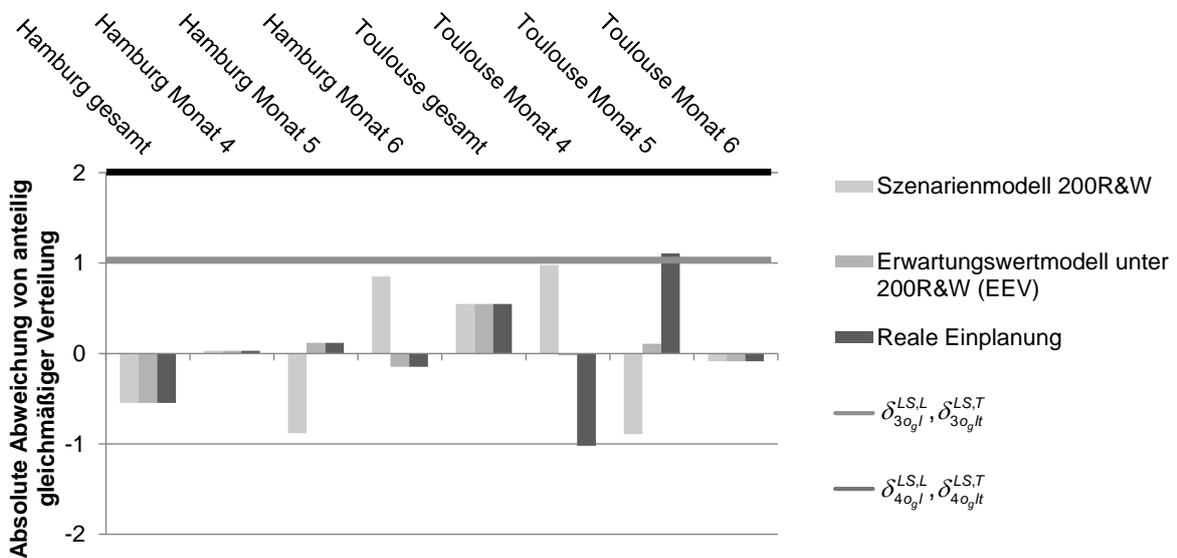


Abbildung A29: Abweichungen der Erstversion von der anteilig gleichmäßigen Verteilung (A_Kronenbitter 2017, S. 146)

A10 Fall II: Optionen

Tabelle A15: Übersicht der Muss-Optionsgruppen mit anonymisierten Bezeichnungen und Codes in Fall II (vgl. A_Hao 2017, S. VII)

Muss-Optionsgruppe g		Muss-Optionen o_g mit Optionscodes o			Individuell / Additiv $\Phi_g = 0 / 1$	Anzahl der Konfigurationen im Variantenbaum
1	Audio	1	Radio 1	yPd	0	5
		2	Radio 2 mit Navigation	yPr		
		3	Radio 1 mit CD-Wechsler	yU7		
		4	Radio 3 mit USB	yUM		
		5	Radio 2 mit DVD-Wechsler	yUP		
2	Dachinnenverkleidung	1	Dachinnenverkleidung Stoff dunkelgrau	y96	0	2
		2	Dachinnenverkleidung Stoff schwarz	yU6		
3	Fahrwerk	1	Standardfahrwerk	Mrr	0	3
		2	Sportfahrwerk	Q9M		
		3	Komfortfahrwerk	Q9y		
4	Getriebe	1	Frontschaltgetriebe	QP7	0	3
		2	Automatikgetriebe	QPK		
		3	Mechanisches Getriebe	QUU		
5	Klimatisierung	1	Klimaanlage	y97	0	2
		2	Klimatisierungsautomatik	y9U		
6	Reifen	1	Winterreifen M&S	MQy	0	3
		2	Ganzjahresreifen	v7P		
		3	Sommerreifen	v7U		
7	Räder	1	Serienräder	MQd	0	13
		2	Sport-Speichenräder 18 Zoll	MQM		
		3	Alu-Räder 12 Speichen 17 Zoll	Pyv		
		4	Alu-Räder 6 Doppelspeichen 17 Zoll	QQv		
		5	Sport-Räder 18 Zoll	r9U		
		6	Sport-Doppelspeichenräder 18 Zoll	rKQ		
		7	Sport-Speichenräder 18 Zoll	rKU		
		8	Alu-Räder 5 Doppelspeichen 18 Zoll	vd9		
		9	Alu-Räder 5 Doppelspeichen 17 Zoll	vQ9		
		10	Alu-Räder 5 Doppelspeichen 16 Zoll	vr9		
		11	Alu-Räder 5 Doppelspeichen Lang 18 Zoll	vU7		
		12	Alu-Räder 5 Doppelspeichenrad 17 Zoll	vUU		

		13	Alu-Räder 10 Speichen 16 Zoll	yyv		
8	Reifendruck-überwachung	1	Reifendruckverlustwarner	Qrr	0	2
		2	Reifendruckkontrolle High Line / Mid Line	Qry		
						14.040

Tabelle A16: Übersicht der Kann-Optionen mit anonymisierten Bezeichnungen und Codes in Fall II (A_Hao 2017, S. VIII f.)

Kann-Optionen mit Optionscodes O		
1	Sommerräder montiert	MyP
2	Sport-Styling	rrP
3	Geschwindigkeitsregelanlage	QQ7
4	Vorrichtung für Anhänger	yy7
5	Schließanlage mit Infrarotfernbedienung	997
6	Navigationsgerätevorrichtung	y79
7	Winterkomplett-Alu-Räder 10 Speichen 16 Zoll	dvr
8	Sitzheizung Fahrersitz	9rd
9	Navigationsgerät	y7K
10	Assistent Fahrspurerkennung	QrM
11	Kollisionswarner mit aktivem Bremsengriff	Py9
12	Multifunktionslenkrad	QQP
13	4 Jahre kostenfreie Kartendaten-Updates	y7P
14	Zusatzheizung	PP9
15	Automatische Kindersitzerkennung	6U9
16	Fußgängerschutz	6M7
17	Scheibenwaschanlage beheizt	9ry
18	Nebelscheinwerfer	6dr
19	Feuerlöscher	M9P
20	12V Steckdose im Laderaum	6dy
21	Fußmatten - Velours	6UP
22	Kältemittelverdichter	p7K
23	Smartphone-Integration CarPlay	pyM
24	Tagfahrlicht	Pyr
25	Innen- und Außenspiegel automatisch abblendbar	PQK
26	Sonnenblende mit Zusatzfunktion	yQd
27	Lederlenkrad mit Schalthebel	P97
28	Fernbedienung für Zusatzheizung	pPQ
29	Vorrüstung für Smartphone	pPP
30	Soundsystem	9U7
31	Wegfall - Verbandkasten	MdQ
32	Direktstart	p7d
33	Telefonmodul Bluetooth	drK
34	Gepäcknetze Sitz links und rechts	P9M
35	Müdigkeitserkennungsfunktion	yd9
36	Vorrüstung für Mobiltelefon mit universeller Schnittstelle	d9M
37	Notrufsystem	dQr
38	Regensensor	dQy
39	Winterkomplett-Stahl-Räder 16 Zoll	UvP
40	Insassenschutz	PKK
41	Fußmatten - Sport	6PM
42	Fondgurtüberwachung	67U

43	Lordosenstütze verstellbar	6PP
44	Universelle Kommunikationsschnittstelle	yU9
45	Totwinkelassistent	PdQ
46	Glasschiebedach	QUd
47	DAB-Tuner	ydr
48	DVD-Player 1	6rP
49	Brillenfach	PU9
50	Vorrüstung für iPhone	PM7
51	Einstiegschiene beleuchtet	6Py
52	Ladekabel	Pdy
53	Winterkomplett-Alu-Räder 10 Speichen 17 Zoll	PvK
54	DVD-Player 2	6rd
55	Verkehrszeichenerkennung	yUd
56	Scheinwerferreinigung	M77
57	Fernlichtassistent	M79
58	Armlehne klappbar hinten	Q77
59	Ablagebox unter Fahrersitz rechts	KdK
60	Behälter an Fahrer- / Beifahrersitz	KdP
61	Lenkradschaltung	QP9
62	Komfort-Lenkung	PUd
63	Glas dunkel getönt	9Q7
64	Komfort-Diebstahlschutz	99P
65	Einbruchwarnung	yyU
66	Elektrisch verstellbarer Fahrersitz mit Memory	PQP
67	DVD-Player 3	6ry
68	DVD-Player 4	yUQ

A11 Fall II: Ergebnisse der Planauftragsgenerierung

Tabelle A17: Rechenlaufzeiten zur Planauftragsgenerierung (A_Hao 2017, S. 74)

	Anzahl an Planaufträgen	Laufzeit für Muss-Optionen in s	Laufzeit für Kann-Optionen in s	Laufzeit Zusteuerung in min	Laufzeit Teileauflösung in min	Laufzeit gesamt in min
Markt 1	2.665	6	2	40	8	48
Markt 2	48.545	6	133	760	147	910
Markt 3	25.590	6	59	398	80	479

Tabelle A18: Teileanzahl der generierten Planaufträge (A_Hao 2017, S. 73)

	Minimale Teileanzahl	Maximale Teileanzahl	Durchschnittliche Teileanzahl
Markt 1	2.749	2.929	2.825
Markt 2	2.756	3.039	2.866
Markt 3	2.759	2.991	2.855

A12 Fall II: Ergebnisse der Auftragseinplanung

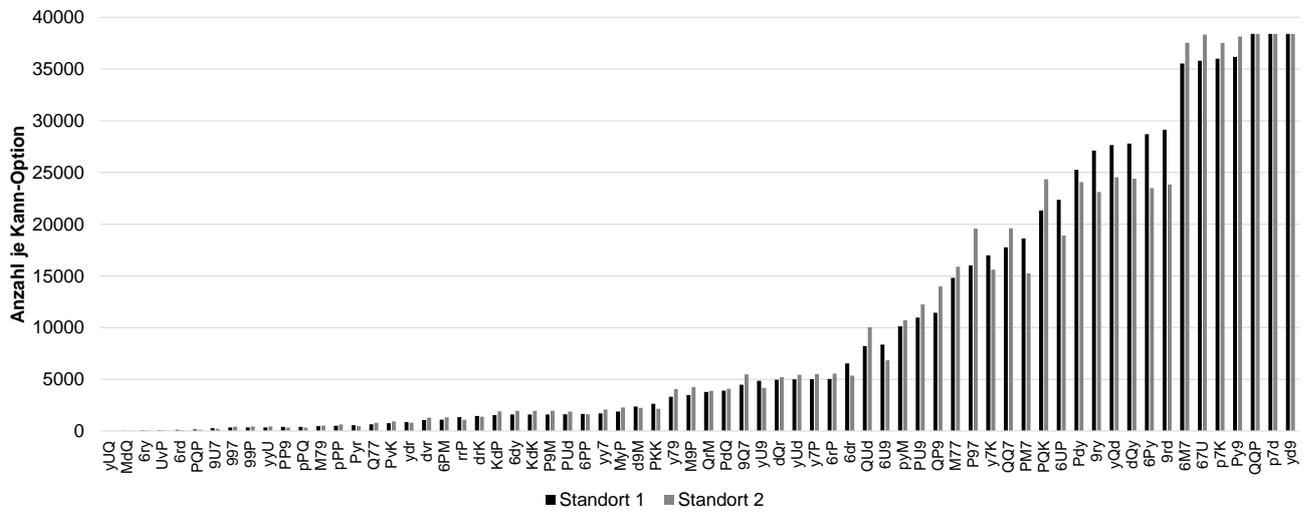


Abbildung A30: An Standorten eingeplante Anzahl an Kann-Optionen für $\beta=1,1$ (A_Hao 2017, S. 84)

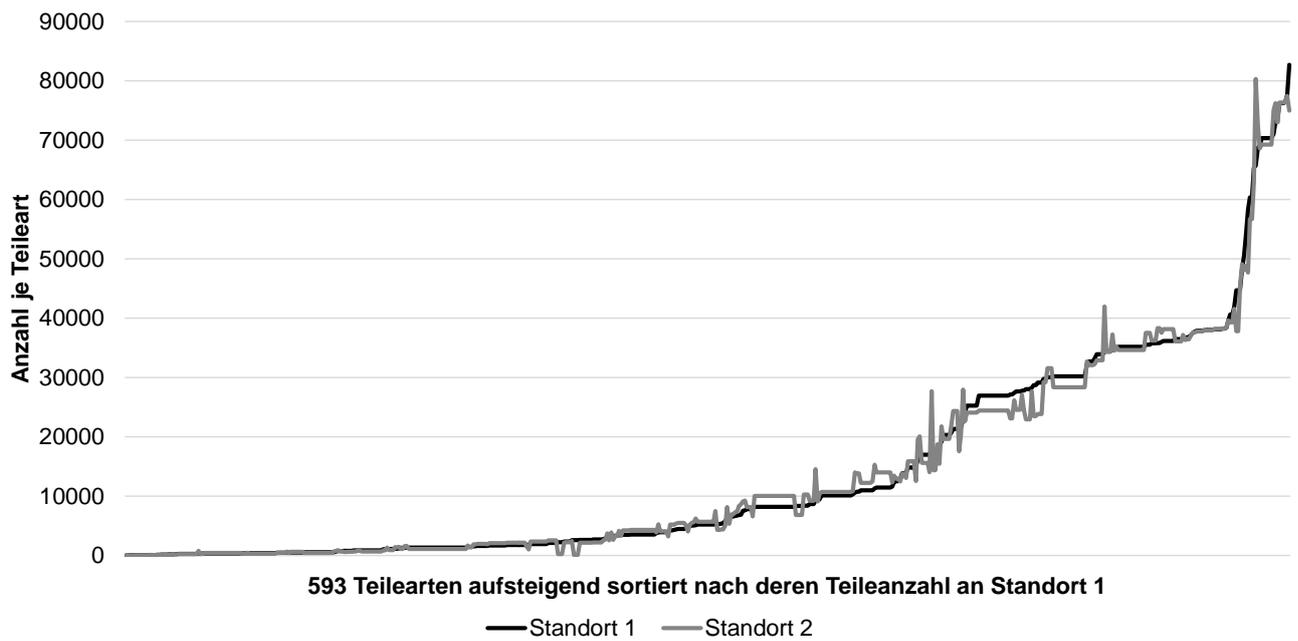


Abbildung A31: An Standorten eingeplante Anzahl an Teilen je Teileart mit unterschiedlicher Teileanzahl unter 100.000 je Standort für $\beta=1,1$ (vgl. A_Hao 2017, S. 88 f.)

Tabelle A19: Ergebnisse der Auftragseinplanung für $\beta=2,0$ (A_Hao 2017, S. 82)

	Anzahl der zugeordneten Aufträge			Materialbezogene Eingangskosten in Mio. Euro (teilweise)	Distributionskosten in Mio. Euro			Gesamtkosten in Mio. Euro
	Markt 1	Markt 2	Markt 3		Markt 1	Markt 2	Markt 3	
Standort 1 (in Markt 1)	2.665	28.303	7.432	8,18	0,00	33,81	14,14	80,56
Standort 2 (in Markt 2)	0	20.242	18.158	11,58	0,00	0,00	12,85	
Summe	76.800			19,76	60,81			

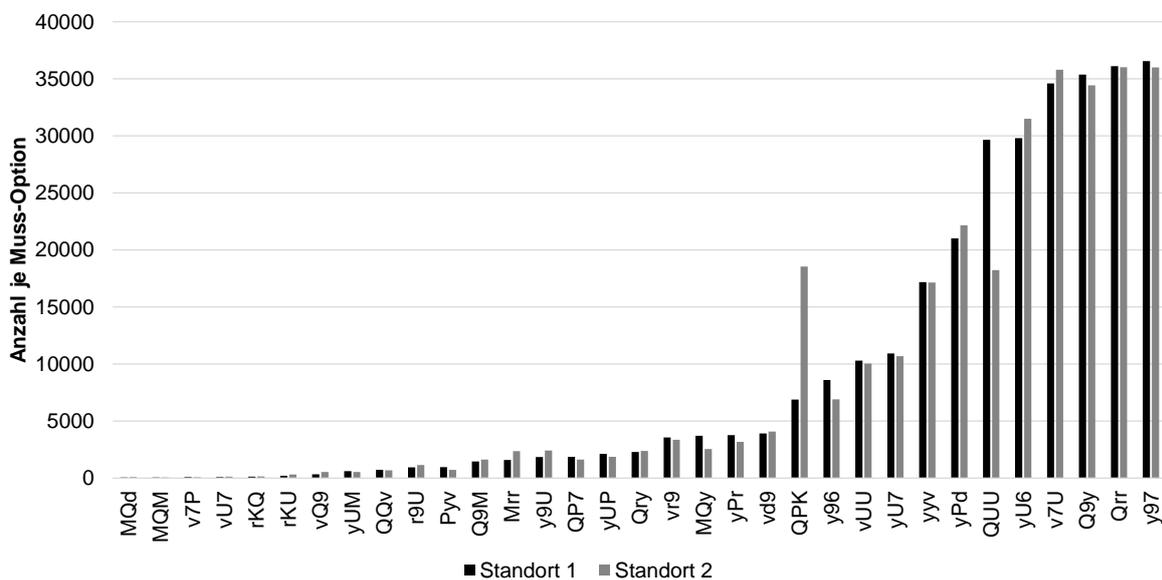


Abbildung A32: An Standorten eingeplante Anzahl an Muss-Optionen für $\beta=2,0$ (A_Hao 2017, S. 83)

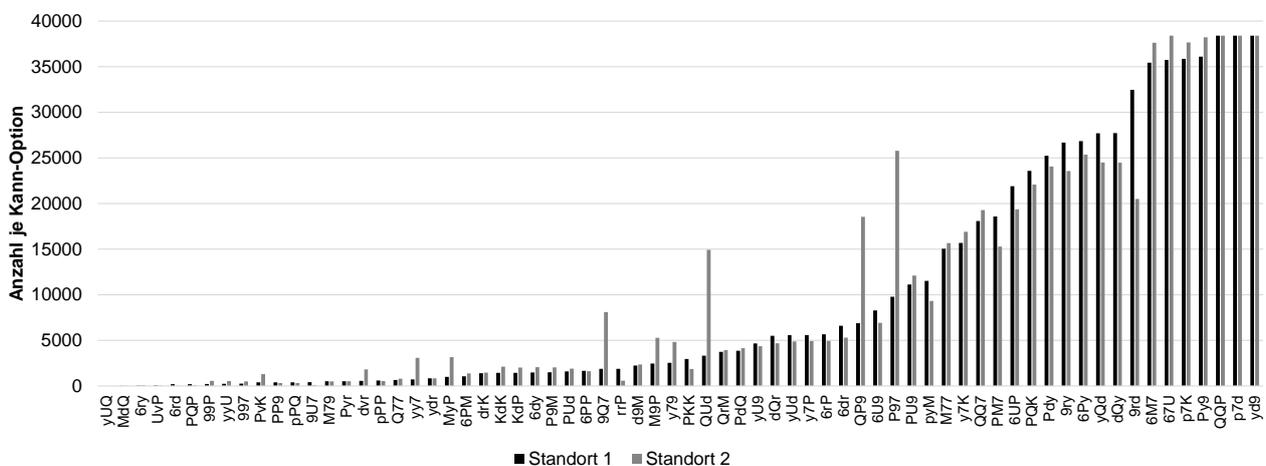


Abbildung A33: An Standorten eingeplante Anzahl an Kann-Optionen für $\beta=2,0$ (A_Hao 2017, S. 87)

A13 Fall II: Ergebnisse der Kundenauftragszuordnung

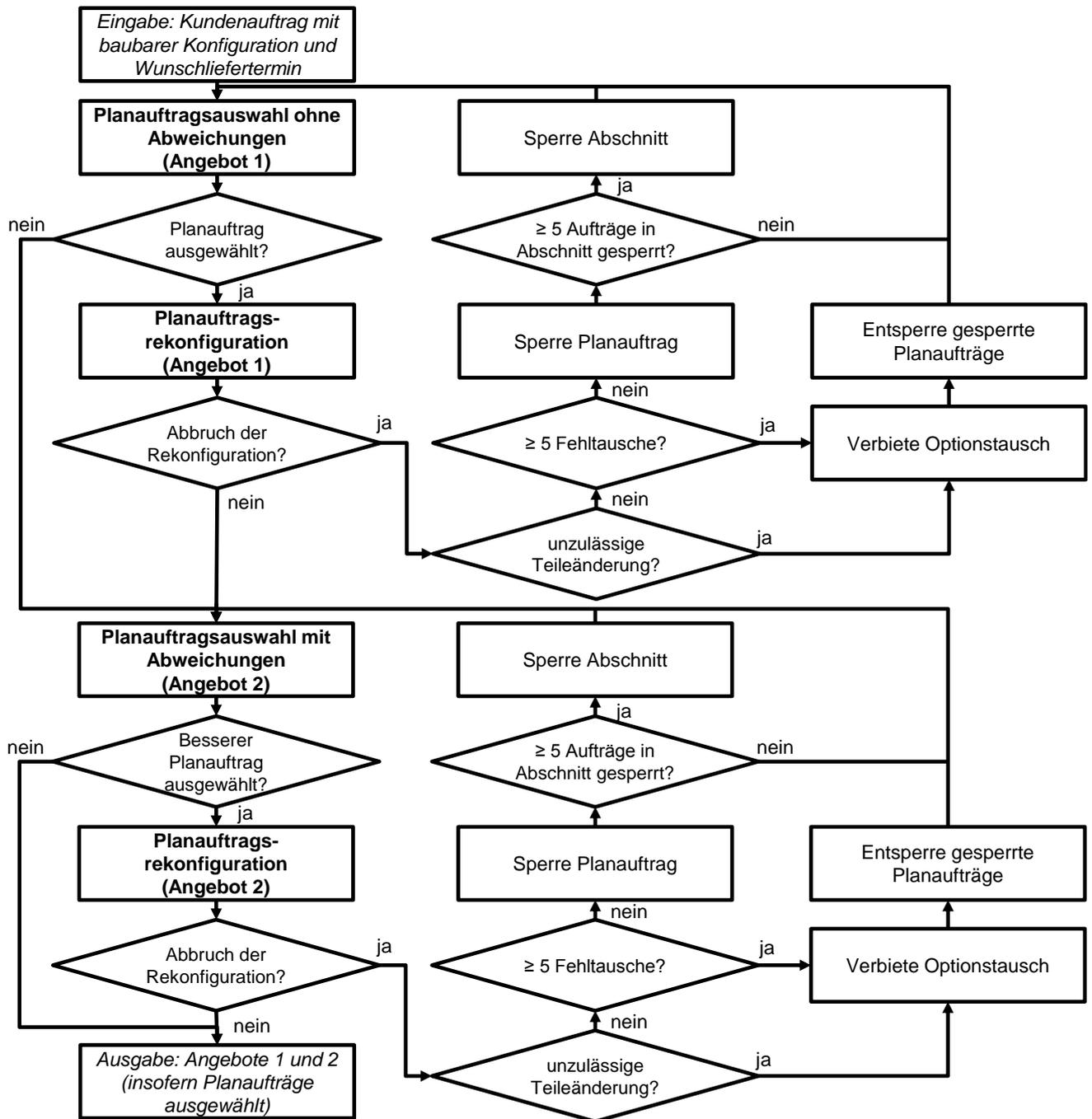


Abbildung A34: Ablaufdiagramm der Kundenauftragszuordnung (vgl. A_Hao 2017, S. 102 f.)

Tabelle A20: Durchschnittliche Kosten der Kundenauftragszuordnung (A_Hao 2017, S. 105 f.)

Modell-variante	Angebot	Terminverzögerungskosten in Euro	Änderungskosten in Euro	Tauschkosten in Euro	Umbaukosten in Euro	Rekonfigurationskosten in Euro	Gesamtkosten in Euro
1 (Standard)	1	199,00	99,45	8,01	9,00	116,46	315,46
	2	51,67	6,71	6,28	12,00	24,99	76,66
	1/2	137,50	64,33	7,48	11,20	83,00	220,50
2 (ohne Umbauten)	1	210,50	104,73	8,69	0,00	113,41	323,91
	2	90,98	11,35	6,25	0,00	17,60	108,58
	1/2	152,00	69,03	8,00	0,00	77,03	229,03
3 (ohne Tausche)	1	238,00	141,33	0,00	13,00	154,33	392,33
	2	92,24	29,22	0,00	32,76	61,98	154,22
	1/2	163,00	98,08	0,00	24,00	122,08	285,08
4 (ohne Umbauten / ohne Tausche)	1	258,00	151,63	0,00	0,00	151,63	409,63
	2	128,57	41,67	0,00	0,00	41,67	170,24
	1/2	187,50	108,30	0,00	0,00	108,30	295,80
5 (kurzfristiger Liefertermin)	1	1022,50	157,83	5,57	49,60	213,00	1235,50
	2	332,65	4,18	5,70	69,59	79,48	412,13
	1/2	788,50	103,78	5,26	56,50	165,54	954,04

Tabelle A21: Einhaltung der gewünschten Liefertermine und durchschnittliche Ausnutzung der einzelnen Rekonfigurationsflexibilitätsarten (A_Hao 2017, S. 108)

Modell-variante	Angebot	Einhaltung der gewünschten Liefertermine in %	Anzahl an Änderungen	Anzahl an Tauschen	Anzahl der Tauschpartner	Anzahl an Umbauten	Anzahl an Abweichungen	Summe der Akzeptanzwerte
1 (Standard)	1	78,00	3,84	1,55	0,66	0,09	0,00	0,00
	2	90,00	0,25	1,20	0,55	0,12	3,03	0,85
	1/2	83,00	2,48	1,44	0,64	0,11	1,82	0,51
2 (ohne Umbauten)	1	77,00	4,04	1,68	0,70	0,00	0,00	0,00
	2	88,52	0,43	1,20	0,56	0,00	2,92	0,82
	1/2	82,00	2,66	1,54	0,68	0,00	1,78	0,50
3 (ohne Tausche)	1	74,00	5,46	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00
	2	87,93	1,10	0,00	0,00	0,31	2,84	0,83
	1/2	80,00	3,78	0,00	0,00	0,23	1,65	0,48
4 (ohne Umbauten / ohne Tausche)	1	72,00	5,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	87,30	1,59	0,00	0,00	0,00	2,62	0,80
	1/2	79,00	4,17	0,00	0,00	0,00	1,65	0,50
5 (kurzfristiger Liefertermin)	1	7,00	6,07	1,07	0,36	0,49	0,00	0,00
	2	51,02	0,16	1,08	0,45	0,67	3,02	0,84
	1/2	25,00	3,99	1,00	0,39	0,55	1,48	0,41

Tabelle A22: Weitere Auswertung der Kundenauftragszuordnung (A_Hao 2017, S. 104, S. 107)

Modell-variante	Angebot	Durchschnittliche Rechenlaufzeit je Kundenauftrag für Planauftragsauswahl und -rekonfiguration in s	Anzahl an ausgewählten und rekonfigurierten Aufträgen von 100	Anzahl an ausgewählten und rekonfigurierten Aufträgen mit verbotenen Tauschen wegen mindestens fünf Durchläufen mit nicht erfolgreichen Tauschen bzw. Fehltauschen aufgrund der Baubarkeitsregeln oder der Beschränkungen der Sequenz der Optionen nach Abbildung A34	Anzahl an ausgewählten und rekonfigurierten Aufträgen mit verbotenen Tauschen wegen Änderung programmorientierter Teilebedarfe (unzulässige Teileänderung) nach Abbildung A34
1 (Standard)	1	113,27	100	3	60
	2	115,85	60	0	7
2 (ohne Umbauten)	1	106,28	100	3	57
	2	114,21	61	0	7
3 (ohne Tausche)	1	58,29	100	0	0
	2	106,40	58	0	0
4 (ohne Umbauten / ohne Tausche)	1	55,47	100	0	0
	2	112,05	63	0	0
5 (kurzfristiger Liefertermin)	1	131,01	100	9	74
	2	126,44	49	0	9

Lebenslauf

Persönliches

Name: Jens Bürgin

Geburtsdatum: 29.02.1988

Geburtsort: Lörrach

Ausbildung

- | | |
|-------------------|--|
| 10/2012 – 09/2014 | Studium Wirtschaftsingenieurwesen (Master of Science) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) |
| 09/2013 – 12/2013 | Auslandsstudium Wirtschaftsingenieurwesen an der University of Massachusetts Amherst |
| 10/2008 – 09/2012 | Studium Wirtschaftsingenieurwesen (Bachelor of Science) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) |
| 09/2010 – 04/2011 | Auslandsstudium der chinesischen Sprache und Wirtschaft an der Peking University |

Berufstätigkeit

- | | |
|-------------------|--|
| 10/2014 – 09/2018 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik (wbk) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) |
| 03/2014 – 08/2014 | Masterarbeit bei der Daimler AG |
| 06/2012 – 08/2012 | Bachelorarbeit bei der SAP AG |
| 04/2012 – 05/2012 | Praktikum bei The Boston Consulting Group |
| 05/2011 – 09/2011 | Praktika bei chinesischen Unternehmen in China |

Forschungsberichte aus dem wbk
Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkanteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünffachsignen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme: Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer Untersuchungen beim Fräsen

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungs-elementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuenger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindelantriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90
Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91
Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92
Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93
Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94
Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95
Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96
Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97
Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98
Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmäzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management-Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönzheimer

Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und ganzheitlichen Produktionssystemen

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen in Trockenbearbeitungsprozessen

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere geometrische Maschinenbeurteilung

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspannung auf den Bereich der Mikrobearbeitung

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzsälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für μ MIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptronischen Kugelgewindetriebe

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit
der Kundenauftragskonfigurationen