

**Revenue Management Ansätze für die Auftragsannahme
in der Make-to-Order Produktion unter Berücksichtigung
von Kundenwertigkeiten**

**Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg**
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (Dr. rer. pol.)

genehmigte Dissertation

von
Nina Lohnert

aus
Eckernförde

2022

Gutachter:in

1. Gutachterin:	Prof. Dr. Kathrin Fischer
2. Gutachter:	Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfgang Kersten
Prüfungsausschussvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Hermann Lödding
Tag der mündlichen Prüfung:	22.11.2022

Creative Commons Lizenzvertrag

Der Text steht, soweit nicht anders gekennzeichnet, unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung 4.0 (CC BY 4.0). Das bedeutet, dass er vervielfältigt, verbreitet und öffentlich zugänglich gemacht werden darf, auch kommerziell, sofern dabei stets der Urheber, die Quelle des Textes und o. g. Lizenz genannt werden. Die genaue Formulierung der Lizenz kann unter <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de> aufgerufen werden.

DOI: <https://doi.org/10.15480/882.4768>

Zusammenfassung

Aufgrund des starken Wettbewerbs im Markt richten sich immer mehr produzierende Unternehmen nach den individuellen Wünschen der Kunden. Als Folge daraus ergibt sich eine sehr große Anzahl an Produktvarianten. Um Kosten und das Marktrisiko zu reduzieren, tendieren Unternehmen zunehmend dazu, nach dem sogenannten Make-to-Order Prinzip zu produzieren, bei welchem die Produktion erst nach Annahme eines Auftrags beginnt. Aufgrund der limitierten Produktionskapazität kann jedoch nicht jeder Auftrag erfüllt werden, sodass Entscheidungen über die Auftragsannahme zu treffen sind. Die Ziele, die ein produzierendes Unternehmen in dieser Situation verfolgt, sind in der Regel zweierlei: Einerseits streben die Unternehmen eine (kurzfristige) Profitmaximierung an. Andererseits ist das Ziel, insbesondere den für das Unternehmen wichtigsten (wiederkehrenden) Kunden einen guten Service zu bieten, da diese langfristig gesehen für den Unternehmenserfolg entscheidend sind. Diese Ziele stehen allerdings meistens in einem Konflikt zueinander, da die wichtigsten Kunden oft durch Preisnachlässe an das Unternehmen gebunden werden.

In dieser Dissertation werden neu entwickelte Revenue Management Ansätze für der Make-to-Order Produktion präsentiert und analysiert, welche neben der Profitmaximierung auch die Kundenwertigkeiten in die Entscheidung über die Auftragsannahme einbeziehen und somit beide konkurrierenden Ziele berücksichtigen. Die entwickelten Ansätze können in sogenannte mengen- und erlösorientierte Revenue Management Strategien unterteilt werden. Alle entwickelten Ansätze verfolgen einen zweistufigen Auftragsannahmeprozess, der zwei gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsmodelle miteinander kombiniert. In der ersten Stufe wird bei den mengenorientierten Ansätzen auf Basis von Buchungslimits und bei den erlösorientierten Ansätzen auf Basis von Bid-Preisen eine vorläufige Annahmeentscheidung getroffen. In der zweiten Stufe wird die Produktionsplanung berücksichtigt, um sicherzustellen, dass nur Aufträge angenommen werden, die spätestens bis zu der vom Kunden angegebenen Deadline fertiggestellt werden können. Um die Kundenwertigkeiten zu berücksichtigen, werden die Kunden verschiedenen Segmenten zugeteilt. Je Kundensegment wird abhängig von dem Kundenwert ein definiertes Servicelevel angestrebt.

Die Performance der entwickelten Strategien wird in drei Fallstudien analysiert, welche sich hinsichtlich ihrer Kundenzusammensetzungen unterscheiden. Darüber hinaus dient unter anderem die bekannte First-Come-First-Served Strategie als Benchmark zu den entwickelten Ansätzen. Es kann gezeigt werden, dass durch die in dieser Dissertation entwickelten Revenue Management Strategien gute Kompromisse zwischen den konkurrierenden Zielen erreicht werden können. Insbesondere die sogenannte Reverse Nested Booking Limit Strategie, bei welcher die Buchungslimits der Kundenwertigkeit nach geschachtelt sind, überzeugt mit den – auch bei sämtlichen im Rahmen von Sensitivitätsanalysen durchgeführten Parametervariationen – konstant besten Servicelevelergebnissen für die wichtigsten Kunden und führt gleichzeitig zu sehr guten Profitergebnissen.

Summary

Due to the strong competition in the market, more and more manufacturing companies focus on the individual wishes of their customers. This results in a very large number of product variants. In order to reduce costs and market risk, companies tend increasingly to produce according to the so-called make-to-order principle where production only begins after an order has been accepted. However, due to limited production capacity, not every order can be fulfilled, so decisions regarding order acceptance have to be made. The objectives pursued by a manufacturing company in this situation are usually twofold: On the one hand, companies strive for (short-term) profit maximization. On the other hand, the aim is to provide good service, especially to the (returning) customers who are most important to the company, as these customers are crucial to the company's success in the long term. However, these objectives are usually in conflict with each other, since the most important customers are often tied to the company by price discounts.

In this dissertation, newly developed revenue management approaches for make-to-order production are presented and analyzed, which, in addition to profit maximization, also include customer value in the decision on order acceptance and thus take both competing objectives into account. The developed approaches can be divided into so-called quantity- and revenue-oriented revenue management strategies. All developed approaches follow a two-stage order acceptance process that combines two mixed-integer linear optimization models. In the first stage, a preliminary acceptance decision is made based on booking limits for the quantity-oriented approaches and on bid prices for the revenue-oriented approaches. In the second stage, production scheduling is taken into account to ensure that only orders that can at the latest be completed by the deadline specified by the customer are accepted. In order to consider customer values, customers are assigned to different segments. For each customer segment, a defined service level is strived for, depending on the customer value.

The performance of the various strategies is analyzed in three case studies, which differ in terms of their customer composition. In addition, the well-known first-come-first-served strategy serves as a benchmark for the developed approaches. It can be shown that good trade-offs between the competing objectives can be achieved by the revenue management strategies developed in this dissertation. In particular, the so-called reverse nested booking limit strategy, in which the booking limits are nested according to customer value, convinces with the consistently best service level results for the most important customers – even with all parameter variations carried out in the context of sensitivity analyses – and at the same time leads to very good profit results.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis.....	ix
Symbolverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
2 Grundlagen der Produktionslogistik	5
2.1 Ziele und Aufgaben.....	5
2.2 Entwicklung der Produktionslogistik.....	8
3 Grundlagen des Revenue Managements	13
3.1 Geschichte und klassische Anwendungsgebiete	13
3.2 Anwendungsvoraussetzungen.....	16
3.3 Traditionelle Instrumente	19
3.3.1 Preisdifferenzierung.....	20
3.3.2 Kapazitätssteuerung.....	22
3.3.3 Überbuchungssteuerung	29
4 Revenue Management in der Make-to-Order Produktion	33
4.1 Überprüfung der Anwendungsvoraussetzungen	33
4.2 Besonderheiten im Vergleich zu klassischen Anwendungsgebieten	36
4.3 Literaturüberblick zum aktuellen Stand der Forschung.....	39
5 Problemstellung, Annahmen und grundsätzliches Vorgehen der entwickelten Ansätze.....	51
5.1 Problemstellung und Annahmen.....	51
5.2 Verwendete Optimierungsmodelle	55
5.2.1 Kapazitätzuweisungsmodell.....	56
5.2.2 Produktionsplanungsmodell	59
5.3 Vergleichsstrategien.....	68
6 Vorstellung der Fallstudien	73
7 Mengenorientierte Ansätze.....	81

7.1	Buchungslimitstrategien.....	81
7.2	Auftragsannahmeprozess	82
7.3	Anwendung der mengenorientierten Ansätze auf die Fallstudien	84
7.4	Standard Nesting vs. Theft Nesting	107
8	Erlösorientierte Ansätze.....	111
8.1	Ermittlung des Bid-Preises.....	111
8.2	Auftragsannahmeprozess	114
8.3	Anwendung der erlösorientierten Ansätze auf die Fallstudien	115
9	Vergleich der mengen- und erlösorientierten Ansätze	133
9.1	Ergebnisvergleich	133
9.2	Sensitivitätsanalysen	140
9.2.1	Variation der angestrebten Servicelevels α_k	143
9.2.2	Variation der zur Verfügung stehenden Kapazität CAP	159
9.2.3	Variation des Strafkostensatzes für Verspätungen PT_k	169
10	Kritik, Limitationen und Ausblick.....	179
11	Fazit	187
	Literaturverzeichnis	191
A	Beispiel zur Erläuterung des Standard und Theft Nestings	201
B	Auftragspezifische Daten beispielhafter Datensätze	203
B.1	Fallstudie 1.....	203
B.2	Fallstudie 2.....	211
B.3	Fallstudie 3.....	219
C	Robustheitsanalysen der Servicelevelergebnisse der mengenorientierten Ansätze	227
C.1	Fallstudie 1.....	227
C.2	Fallstudie 2.....	229
C.3	Fallstudie 3.....	230
D	Robustheitsanalysen der Servicelevelergebnisse der erlösorientierten Ansätze	233
D.1	Fallstudie 1.....	233
D.2	Fallstudie 2.....	235
D.3	Fallstudie 3.....	236
E	Analyse des variierten Strafkostensatzes PT_k	239

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung nach Wiendahl und Wiendahl (2019, S. 284).....	8
Abbildung 2.2: Veränderungen in der Produktion nach Bauernhansl (2017, S. 9).....	9
Abbildung 2.3: Auslösetypen der Produktion nach Stich et al. (2013, S. 53).....	10
Abbildung 2.4: Portfolio zur strategischen Positionierung des KAEP nach Olhager (2003, S. 327)....	12
Abbildung 3.1: Zuordnung der Instrumente des RM zu den Planungsebenen nach Klein und Steinhardt (2008, S. 19) und Hintsches (2012, S. 43).....	19
Abbildung 3.2: Prinzip der Preisdifferenzierung nach Spengler und Rehkopf (2005, S. 128)	21
Abbildung 3.3: Darstellung der einfachen, geschachtelten Buchungslimits (\bar{x}_p , $\bar{x}n_p$) und Schutzlimits ($\bar{x}s_p$) nach Klein und Steinhardt (2008, S. 79).....	25
Abbildung 3.4: Beispiel zur Verdeutlichung des Standard und Theft Nestings.....	26
Abbildung 5.1: Verhältnis zwischen dem Buchungszeitraum und Planungshorizont.....	55
Abbildung 5.2: Vereinfachte und allgemeine Darstellung des Auftragsannahmeprozesses	56
Abbildung 5.3: Auftragsannahmeprozess nach der FCFS Strategie	69
Abbildung 5.4: Auftragsannahmeprozess nach der PPM_ohneRM Strategie.....	70
Abbildung 7.1: Detaillierter Auftragsannahmeprozess bei Verwendung von Buchungslimits.....	85
Abbildung 7.2: Durchschnittliche Ergebnisse der Fallstudie 1	89
Abbildung 7.3: Anzahl der abgelehnten Aufträge durch Buchungslimits (BL), das Produktionsplanungsmodell (PPM) und insgesamt der Fallstudie 1.....	93
Abbildung 7.4: Aufgeschlüsselte Darstellung der angenommenen Aufträge der Fallstudie 1.....	93
Abbildung 7.5: Robustheitsanalyse der Profitergebnisse der Fallstudie 1	94
Abbildung 7.6: Produktionsplan des Datensatzes 228 der Fallstudie 1.....	96
Abbildung 7.7: Durchschnittliche Ergebnisse der Fallstudie 2	98
Abbildung 7.8: Durchschnittliche Ergebnisse der Fallstudie 3	99
Abbildung 7.9: Anzahl der abgelehnten Aufträge durch Buchungslimits (BL), das Produktionsplanungsmodell (PPM) und insgesamt der Fallstudie 2.....	101
Abbildung 7.10: Anzahl der abgelehnten Aufträge durch Buchungslimits (BL), das Produktionsplanungsmodell (PPM) und insgesamt der Fallstudie 3	101

Abbildung 7.11: Aufgeschlüsselte Darstellung der angenommenen Aufträge der Fallstudie 2.....	102
Abbildung 7.12: Aufgeschlüsselte Darstellung der angenommenen Aufträge der Fallstudie 3.....	102
Abbildung 7.13: Robustheitsanalyse der Profitergebnisse der Fallstudie 2	103
Abbildung 7.14: Robustheitsanalyse der Profitergebnisse der Fallstudie 3	104
Abbildung 7.15: Übersicht über planungstechnische Daten der Fallstudien 1, 2 und 3.....	105
Abbildung 7.16: Durchschnittliche benötigte Rechenzeit für den Auftragsannahmeprozess pro Datensatz	106
Abbildung 7.17: Übersicht über den Profit der Fallstudien 1, 2 und 3 bei Verwendung des Standard und Theft Nestings	108
Abbildung 7.18: Übersicht über die ungenutzte Kapazität der Fallstudien 1, 2 und 3 bei Verwendung des Standard und Theft Nestings	108
Abbildung 7.19: Übersicht über die Ablehnungen der Fallstudien 1, 2 und 3 bei Verwendung des Standard und Theft Nestings	109
Abbildung 7.20: Übersicht über die Servicelevels der Fallstudien 1, 2 und 3 bei Verwendung des Standard und Theft Nestings	110
Abbildung 8.1: Beispielhafte Kapazitätsanpassung bezüglich des Auftrags j nach Lohnert und Fischer (2021)	112
Abbildung 8.2: Detaillierter Auftragsannahmeprozess bei Verwendung von Bid-Preisen nach Lohnert und Fischer (2021).....	115
Abbildung 8.3: Durchschnittliche Ergebnisse der Fallstudie 1	117
Abbildung 8.4: Anzahl der abgelehnten Aufträge durch Bid-Preise (BP), das Produktionsplanungsmodell (PPM) und insgesamt der Fallstudie 1	119
Abbildung 8.5: Aufgeschlüsselte Darstellung der angenommenen Aufträge der Fallstudie 1.....	120
Abbildung 8.6: Robustheitsanalyse der Profitergebnisse der Fallstudie 1	120
Abbildung 8.7: Produktionsplan des Datensatzes 228 der Fallstudie 1.....	122
Abbildung 8.8: Durchschnittliche Ergebnisse der Fallstudie 2	123
Abbildung 8.9: Durchschnittliche Ergebnisse der Fallstudie 3	125
Abbildung 8.10: Anzahl der abgelehnten Aufträge durch Aufträge durch Bid-Preise (BP), das Produktionsplanungsmodell (PPM) und insgesamt der Fallstudie 2	126
Abbildung 8.11: Anzahl der abgelehnten Aufträge durch Aufträge durch Bid-Preise (BP), das Produktionsplanungsmodell (PPM) und insgesamt der Fallstudie 3	126
Abbildung 8.12: Aufgeschlüsselte Darstellung der angenommenen Aufträge der Fallstudie 2.....	127
Abbildung 8.13: Aufgeschlüsselte Darstellung der angenommenen Aufträge der Fallstudie 3.....	127
Abbildung 8.14: Robustheitsanalyse der Profitergebnisse der Fallstudie 2	128
Abbildung 8.15: Robustheitsanalyse der Profitergebnisse der Fallstudie 3	128
Abbildung 8.16: Übersicht über planungstechnische Daten der Fallstudien 1, 2 und 3.....	129

Abbildung 8.17: Durchschnittliche benötigte Rechenzeit für den Auftragsannahmeprozess pro Datensatz	130
Abbildung 9.1: Sortierte durchschnittliche Profitergebnisse im Vergleich.....	134
Abbildung 9.2: Sortierte durchschnittlich erreichte Servicelevels im Vergleich	135
Abbildung 9.3: Sortierte durchschnittliche Anzahl an Ablehnungen im Vergleich.....	138
Abbildung 9.4: Sortierte durchschnittlich benötigte Rechenzeit für den Auftragsannahmeprozess pro Datensatz	139
Abbildung 9.5: Durchschnittliche Profitergebnisse bei Variation von α_A	146
Abbildung 9.6: Durchschnittlich ungenutzte Kapazität bei Variation von α_A	147
Abbildung 9.7: Durchschnittlich erreichte Servicelevels bei Variation von α_A	149
Abbildung 9.8: Aufgeschlüsselte Darstellung der Ablehnungen bei Variation von α_A	150
Abbildung 9.9: Durchschnittliche Profitergebnisse bei Variation von α_B und α_C	155
Abbildung 9.10: Durchschnittlich ungenutzte Kapazität bei Variation von α_B und α_C	155
Abbildung 9.11: Durchschnittlich erreichte Servicelevels bei Variation von α_B und α_C	157
Abbildung 9.12: Aufgeschlüsselte Darstellung der Ablehnungen bei Variation von α_B und α_C	158
Abbildung 9.13: Durchschnittliche Profitergebnisse bei Variation von CAP	163
Abbildung 9.14: Durchschnittlich ungenutzte Kapazität bei Variation von CAP	165
Abbildung 9.15: Durchschnittlich erreichte Servicelevels bei Variation von CAP	166
Abbildung 9.16: Aufgeschlüsselte Darstellung der Ablehnungen bei Variation von CAP	167
Abbildung 9.17: Durchschnittlich benötigte Rechenzeit für den Auftragsannahmeprozess pro Datensatz	169
Abbildung 9.18: Analyse des Strafkostensatzes PT_k der Ausgangssituation.....	171
Abbildung 9.19: Durchschnittliche Profitergebnisse bei Variation von PT_k	173
Abbildung 9.20: Summe der verspäteten Tage bei Variation des Strafkostensatzes PT_k	174
Abbildung 9.21: Durchschnittlich ungenutzte Kapazität bei Variation von PT_k	174
Abbildung 9.22: Aufgeschlüsselte Darstellung der Ablehnungen bei Variation von PT_k	175
Abbildung 9.23: Durchschnittlich erreichte Servicelevels bei Variation von PT_k	176
Abbildung 10.1: Gegenüberstellung eines gekoppelten und entkoppelten Schichtsystems nach Lödging, 2016, S. 652.....	181
Abbildung C.1: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments A der Fallstudie 1	227
Abbildung C.2: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments B der Fallstudie 1	228
Abbildung C.3: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments C der Fallstudie 1	228

Abbildung C.4: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments A der Fallstudie 2	229
Abbildung C.5: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments B der Fallstudie 2	229
Abbildung C.6: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments C der Fallstudie 2	230
Abbildung C.7: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments A der Fallstudie 3	230
Abbildung C.8: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments B der Fallstudie 3	231
Abbildung C.9: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments C der Fallstudie 3	231
Abbildung D.1: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments A der Fallstudie 1	233
Abbildung D.2: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments B der Fallstudie 1	234
Abbildung D.3: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments C der Fallstudie 1	234
Abbildung D.4: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments A der Fallstudie 2	235
Abbildung D.5: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments B der Fallstudie 2	235
Abbildung D.6: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments C der Fallstudie 2	236
Abbildung D.7: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments A der Fallstudie 3	236
Abbildung D.8: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments B der Fallstudie 3	237
Abbildung D.9: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments C der Fallstudie 3	237
Abbildung E.1: Analyse des verdoppelten Strafkostensatzes PT_k (Variation 1)	239
Abbildung E.2: Analyse des vervierfachen Strafkostensatzes PT_k (Variation 2)	240
Abbildung E.3: Analyse des versechsfachten Strafkostensatzes PT_k (Variation 3)	241
Abbildung E.4: Analyse des verachtfachten Strafkostensatzes PT_k (Variation 4)	242

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Notationstabelle des deterministischen linearen Modells nach Klein und Steinhardt (2008, S. 109 f.)	24
Tabelle 4.1: Chronologisch sortierter Literaturüberblick zur Kapazitätssteuerung mittels der Methoden des RM in der MTO Produktion.....	48
Tabelle 5.1: Überblick der Kundensegmente und deren Wertigkeiten.....	53
Tabelle 5.2: Notationstabelle des Kapazitätszuweisungsmodells	57
Tabelle 5.3: Notationstabelle des Produktionsplanungsmodells	61
Tabelle 5.4: Notationstabelle des Produktionsplanungsmodells, fortführend	62
Tabelle 5.5: Notationstabelle des Produktionsplanungsmodells, fortführend	63
Tabelle 6.1: Detaillierte Zusammensetzung der Fallstudien	74
Tabelle 6.2: Durchschnittliche Deckungsbeiträge aCM_{qk} (in GE) eines Auftrags der Auftragsgruppe q aus Kundensegment k	77
Tabelle 6.3: Rüstzeiten (in Arbeitstagen) und -kosten (in GE) zwischen Aufträgen aus den verschiedenen Auftragsgruppen	78
Tabelle 7.1: Zusammensetzung der Fallstudien – Anteile der Aufträge je Kundensegment k	84
Tabelle 7.2: Auflistung der einfachen, kapazitätsorientierten Buchungslimits x_{qk} , der einfachen, produktorientierten Buchungslimits x_{qk}^{Pr} im Vergleich zur Nachfrageprognose DF_{qk} und des Zielfunktionswertes	86
Tabelle 7.3: Ergebnisse der einfachen und geschachtelten Buchungslimits	88
Tabelle 7.4: Durchschnittliche und planungstechnische Ergebnisse der Fallstudie 1 und des Datensatzes 228	95
Tabelle 8.1: Multiplikatorensätze für die erlösorientierten Ansätze	114
Tabelle 8.2: Zusammensetzung der Fallstudien – Anteile der Aufträge je Kundensegment k	116
Tabelle 8.3: Durchschnittliche und planungstechnische Ergebnisse der Fallstudie 1 und des Datensatzes 228	121
Tabelle 9.1: Übersicht über die Variation von α_A	143
Tabelle 9.2: Ergebnisse des Kapazitätszuweisungsmodells bei Variation von α_A	144
Tabelle 9.3: Übersicht über die Variation von α_B und α_C	151

Tabelle 9.4: Ergebnisse des Kapazitätszuweisungsmodells bei Variation von α_B und α_C	153
Tabelle 9.5: Übersicht über die Variation von CAP	160
Tabelle 9.6: Ergebnisse des Kapazitätszuweisungsmodells bei Variation von CAP	162
Tabelle 9.7: Übersicht über die Variation von PT_k	172
Tabelle A.1: Vergleich des Standard Nestings und des Theft Nestings	201
Tabelle B.1: Auftragspezifische Daten des Datensatzes 228 der Fallstudie 1	203
Tabelle B.2: Auftragspezifische Daten des Datensatzes 228 der Fallstudie 1, fortführend	204
Tabelle B.3: Rüstzeiten ST_{ji} des Datensatzes 228 der Fallstudie 1	205
Tabelle B.4: Rüstzeiten ST_{ji} des Datensatzes 228 der Fallstudie 1, fortführend	206
Tabelle B.5: Rüstzeit ST_{ji} des Datensatzes 228 der Fallstudie 1, fortführend	207
Tabelle B.6: Rüstkosten SC_{ji} des Datensatzes 228 der Fallstudie 1	208
Tabelle B.7: Rüstkosten SC_{ji} des Datensatzes 228 der Fallstudie 1, fortführend	209
Tabelle B.8: Rüstkosten SC_{ji} des Datensatzes 228 der Fallstudie 1, fortführend	210
Tabelle B.9: Auftragspezifische Daten des Datensatzes 1 der Fallstudie 2	211
Tabelle B.10: Auftragspezifische Daten des Datensatzes 1 der Fallstudie 2, fortführend	212
Tabelle B.11: Rüstzeiten ST_{ji} des Datensatzes 1 der Fallstudie 2	213
Tabelle B.12: Rüstzeiten ST_{ji} des Datensatzes 1 der Fallstudie 2, fortführend	214
Tabelle B.13: Rüstzeit ST_{ji} des Datensatzes 1 der Fallstudie 2, fortführend	215
Tabelle B.14: Rüstkosten SC_{ji} des Datensatzes 1 der Fallstudie 2	216
Tabelle B.15: Rüstkosten SC_{ji} des Datensatzes 1 der Fallstudie 2, fortführend	217
Tabelle B.16: Rüstkosten SC_{ji} des Datensatzes 1 der Fallstudie 2, fortführend	218
Tabelle B.17: Auftragspezifische Daten des Datensatzes 1 der Fallstudie 3	219
Tabelle B.18: Auftragspezifische Daten des Datensatzes 1 der Fallstudie 3, fortführend	220
Tabelle B.19: Rüstzeiten ST_{ji} des Datensatzes 1 der Fallstudie 3	221
Tabelle B.20: Rüstzeiten ST_{ji} des Datensatzes 1 der Fallstudie 3, fortführend	222
Tabelle B.21: Rüstzeit ST_{ji} des Datensatzes 1 der Fallstudie 3, fortführend	223
Tabelle B.22: Rüstkosten SC_{ji} des Datensatzes 1	224
Tabelle B.23: Rüstkosten SC_{ji} des Datensatzes 1, fortführend	225
Tabelle B.24: Rüstkosten SC_{ji} des Datensatzes 1, fortführend	226

Abkürzungsverzeichnis

ATO	Assemble-to-Order
BL	Buchungslimit
BP	Bid-Preis
CV	Variationskoeffizient (engl. Coefficient of Variation)
ERP	Enterprise-Resource-Planning
ETO	Engineer-to-Order
FCFS	First-Come-First-Served (Vergleichsstrategie)
GE	Geldeinheit
i.e.S.	im engeren Sinne
i.w.S.	im weiteren Sinne
KE	Kapazitätseinheit
MTO	Make-to-Order
MTS	Make-to-Stock
NDV	Nesting Based on the Demand Value (Schachtelungsstrategie)
NWCS	Nesting within customer segment (Schachtelungsstrategie)
PBL	Partitioned Booking Limits (einfache Buchungslimits)
PPM	Produktionsplanungsmodell
PPM_ohneRM	Produktionsplanungsmodell ohne Revenue Management (Vergleichsstrategie)
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RM	Revenue Management
RNBL	Reverse Nested Booking Limit (Schachtelungsstrategie)

Symbolverzeichnis

α_k	$k \in K$	Angestrebtes Servicelevel für das Kundensegment k
$A \subseteq J$		Menge aller Aufträge, welche in vorherigen Durchläufen abgelehnt wurden
\bar{A}_{rp}	$r \in Res, p \in P$	Kapazitätsbedarf von Produkt p bezüglich Ressource r
aCM_{qk}	$q \in Q, k \in K$	Durchschnittlicher Deckungsbeitrag eines Auftrags der Auftragsgruppe q aus dem Kundensegment k
b_j	$j \in J \cup Jn$	Startzeitpunkt der Bearbeitung von Auftrag j
B_j^1	$j \in J$	Untere Schranke für den Produktionsbeginn des Auftrags j
B_j^2	$j \in J$	Obere Schranke für den Produktionsbeginn des Auftrags j
<i>Bid-Preis_j</i>	$j \in J$	Bid-Preis für Auftrag j
\overline{CAP}_r	$r \in Res$	Kapazitätsbedarf von Produkt p bezüglich Ressource r
CAP		Zur Verfügung stehende Kapazität
$CAP1$		Angepasste zur Verfügung stehende Kapazität
$CAP2$		Angepasste für die Bearbeitung verfügbare Kapazität
CM_j	$j \in J$	Individueller Deckungsbeitrag des Auftrags j
dev_k	$k \in K$	In Prozentpunkten gemessene Abweichung vom Servicegrad α_k des Kundensegments k
D_j	$j \in J$	Gewünschter Fertigstellungszeitpunkt für Auftrag j
\bar{D}_j	$j \in J$	Deadline für Auftrag j
\overline{DF}_p	$p \in P$	Erwartete Nachfrage bezüglich Produkt p

DF_{qk}	$q \in Q, k \in K$	Erwartete Nachfrage für Aufträge aus der Auftragsgruppe q und dem Kundensegment k
$DF1_{qk}$	$q \in Q, k \in K$	Angepasste erwartete Nachfrage für Aufträge aus der Auftragsgruppe q und dem Kundensegment k
e_j	$j \in J$	Anzahl der Zeiteinheiten, um die Auftrag j verfrüht ist
f_j	$j \in J0 \cup J$	Fertigstellungszeitpunkt des Auftrags j
$H \subseteq J$		Menge aller Aufträge, welche in vorherigen Durchläufen angenommen wurden
J		Menge aller bis zu diesem Durchlauf vorliegenden Aufträge
$J0$		Menge des Dummyauftrags (0) für den Beginn der Produktionsreihenfolge
Jn		Menge des Dummyauftrags ($n + 1$) für das Ende der Produktionsreihenfolge
K		Menge aller Kundensegmente
L_{kj}	$k \in K, j \in J$	Zugehörigkeit: 1, wenn Auftrag j aus Kundesegment k stammt; sonst 0
\bar{L}_{qj}	$q \in Q, j \in J$	Zugehörigkeit: 1, wenn Auftrag j der Auftragsgruppe q angehört; sonst 0
$mProd_q$	$q \in Q$	Maximale Bearbeitungszeit eines Auftrags aus der Auftragsgruppe q
$multi_k$	$k \in K$	Kundenspezifischer Multiplikator für Segment k
P		Menge aller Produkte
$Pdev_k$	$k \in K$	Strafkostensatz je Prozentpunkt Abweichung vom Servicelevel α_k des Kundensegments k
PE_q	$q \in Q$	Strafkostensatz je Zeiteinheit für den verfrühten Produktionsbeginn eines Auftrags aus der Auftragsgruppe q
$Prod_j$	$j \in J$	Tatsächliche Bearbeitungszeit eines Auftrags j
PT_k	$k \in K$	Strafkostensatz je Zeiteinheit für die verspätete Fertigstellung eines Auftrags aus dem Kundensegment k
PU		Strafkostensatz pro (abgeschätzter) ungenutzter Zeiteinheit

Q		Menge aller Auftragsgruppen
R_j	$j \in J$	Regulärer Freigabezeitpunkt für die Produktion von Auftrag j
\bar{R}_j	$j \in J$	Verfrühter Freigabezeitpunkt für die Produktion von Auftrag j (Expresslieferung)
Res		Menge aller Ressourcen
SC_{ji}	$j \in J \cup J,$ $i \in J \cup Jn$	Rüstkosten, wenn Auftrag j unmittelbar vor Auftrag i gefertigt wird
<i>Schattenpreis</i> _{KAPRestriktion}		Schattenpreis der Kapazitätsrestriktion (5.2)
\bar{SP}_p	$p \in P$	Verkaufspreis von Produkt p
ST_{ji}	$j \in J \cup J,$ $i \in J \cup Jn$	Rüstzeit, wenn Auftrag j unmittelbar vor Auftrag i gefertigt wird
t_j	$j \in J$	Anzahl der Zeiteinheiten, um die Auftrag j verspätet ist
u		(Abgeschätzte) ungenutzte Zeiteinheiten
\bar{x}_p	$p \in P$	Einfaches (produktorientiertes) Buchungslimit für Produkt p
x_{qk}	$q \in Q, k \in K$	Einfaches (kapazitätsorientiertes) Buchungslimit für Aufträge aus der Auftragsgruppe q und dem Kundensegment k
x_{qk}^{Pr}	$q \in Q, k \in K$	Einfaches (produktorientiertes) Buchungslimit für Aufträge aus der Auftragsgruppe q und dem Kundensegment k
$\bar{x}\bar{n}_p$	$p \in P$	Geschachteltes Buchungslimit für Produkt p
xn_{qk}	$q \in Q, k \in K$	Geschachteltes Buchungslimit für einen Auftrag der Auftragsgruppe q aus dem Kundensegment k
$\bar{x}\bar{s}_p$	$p \in P$	Schutzlimit des Produkts p
y_{ji} (binär)	$j \in J \cup J,$ $i \in J \cup Jn$	1, wenn Auftrag j unmittelbar vor Auftrag i bearbeitet wird; sonst 0
z_j (binär)	$j \in J \cup J \cup Jn$	1, wenn Auftrag j angenommen wird; sonst 0

1 Einleitung

Die Herstellung eines individuellen Produkts ist heutzutage aus Kundensicht nichts Außergewöhnliches mehr. Dadurch, dass die meisten Märkte gesättigt sind, orientieren sich die produzierenden Unternehmen zunehmend an den Wünschen ihrer Kunden¹, um somit wettbewerbsfähig zu bleiben. Die damit verbundene Variantenvielfalt ist jedoch ein großer Komplexitätstreiber für die Produktionslogistik (Lasch, 2018, S. 25). Darüber hinaus treiben auch die Globalisierung und Internationalisierung die Variantenvielfalt in die Höhe. Erschwerend kommen die immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen hinzu (Pawellek, 2007, S. 46). Um flexibler auf die Kundenwünsche reagieren zu können und gleichzeitig das Marktrisiko zu reduzieren, tendieren viele Unternehmen dazu, die kundenauftragsbezogene Produktion gegenüber der prognosebasierten Produktion auszudehnen (Nebl, 2011, S. 824). Aus diesem Grund finden Prinzipien wie die Make-to-Order (MTO) Produktion immer häufiger Anwendung (Barut & Sridharan, 2005; Dan et al., 2018). Diese Form der Produktion kann auch als Auftragsproduktion bezeichnet werden, denn die Produktion wird erst mit einem vorliegenden Kundenauftrag begonnen (Nebl, 2011, S. 822). Allerdings tendieren nach dem MTO Prinzip produzierende Unternehmen dazu, mehr Aufträge anzunehmen, als es die limitierte Produktionskapazität erlaubt (Wortmann, 1992).

Mithilfe der Methoden des Revenue Managements (RM) werden im Rahmen der vorliegenden Dissertation Ansätze für die MTO Produktion entwickelt, mit welchen die Auftragsannahmeentscheidung unterstützt und die begrenzte Produktionskapazität bestmöglich ausgenutzt werden kann. Die klassische Zielsetzung des RM ist die reine Erlösmaximierung als Approximation der Gewinnmaximierung (Tomczak & Heidig, 2014, S. 5). Jedoch können die für das Unternehmen auf langfristige Sicht wichtigsten Kunden in der Regel Aufträge zu vergünstigten Konditionen erteilen, wodurch die wichtigsten Kunden stärker an das produzierende Unternehmen gebunden werden. Bei RM Ansätzen, welche die klassische Zielsetzung des RM verfolgen, sind die Aufträge der für das Unternehmen wichtigsten Kunden benachteiligt und würden häufiger abgelehnt werden. Dies würde zu einer geringeren Kundenzufriedenheit der wichtigsten Kunden führen. Das Ziel dieser Dissertation ist es daher, RM Ansätze für die MTO Produktion zu entwickeln, mit welchen sowohl die Summe der Deckungsbeiträge maximiert als auch die Kundenzufriedenheit – insbesondere für die wichtigsten

¹ Um die Lesbarkeit zu verbessern, wird in der vorliegenden Arbeit die männliche Form verwendet. Sämtliche personenbezogene Begriffe gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Kunden – berücksichtigt wird. Für letzteres werden die Kunden verschiedenen Segmenten zugeordnet und je Kundensegment ein Servicelevel definiert. Die Erreichung dieser Servicelevels ist dementsprechend ein zweites Ziel, welches aus Unternehmenssicht verfolgt werden sollte, das jedoch in Konkurrenz zu der Maximierung der Summe Deckungsbeiträge steht. Zusätzlich wird in den entwickelten Ansätzen auch eine detaillierte Produktionsplanung bei der Auftragsannahmeentscheidung beachtet, was bei den meisten bisher entwickelten RM Ansätzen nicht oder nur in sehr vereinfachter Form der Fall ist. Durch die Berücksichtigung der Produktionsplanung wird gewährleistet, dass lediglich Aufträge angenommen werden, welche innerhalb der vom Kunden angegebenen Fristen auch tatsächlich fertiggestellt werden können. Es werden verschiedene RM Ansätze entwickelt, welche in sogenannte mengenorientierte und erlösorientierte Ansätze unterteilt werden können und insgesamt einen Beitrag zu einer verbesserten Auftragsannahmeentscheidung leisten.

Die Grundlagen für die in dieser Arbeit betrachteten Thematik werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert. Zuerst wird in Kapitel 2 auf die Grundlagen der Produktionslogistik und in Kapitel 3 auf die Grundlagen des RM eingegangen. In Kapitel 4 werden beide zuvor getrennt voneinander vorgestellten Themengebiete zusammen betrachtet und es wird auf das RM in der MTO Produktion eingegangen. Neben der Überprüfung der Anwendungsvoraussetzungen des RM in der MTO Produktion werden die Besonderheiten dieses Anwendungsgebiets sowie der aktuelle Stand der Forschung aufgezeigt. Die in dieser Arbeit betrachtete Problemstellung wird in Kapitel 5 detailliert vorgestellt. Darüber hinaus werden das grundsätzliche Vorgehen der entwickelten RM Ansätze sowie die dazu gehörigen Optimierungsmodelle erläutert. Zusätzlich werden Vergleichsstrategien eingeführt, welche als Benchmark zu den entwickelten RM Ansätzen fungieren.

Für die Untersuchung der entwickelten RM Ansätze werden in Kapitel 6 die verwendeten Fallstudien präsentiert. Drei Fallstudien, welche sich hinsichtlich ihrer Kundenzusammensetzung unterscheiden, werden eingeführt. Pro Fallstudie werden 500 Datensätze mit unterschiedlichen Auftragsreihenfolgen und -dichten je Tag erzeugt, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse nicht von einer einzelnen zufälligen Auftragsreihenfolge und -dichte abhängen.

In Kapitel 7 werden die mengenorientierten RM Ansätze vorgestellt und auf die Fallstudien angewendet. Neben der Verwendung der einfachen Buchungslimits werden auch unterschiedliche Schachtelungsstrategien eingeführt und analysiert. Darüber hinaus werden zwei Verfahren zur Anpassung von geschachtelten Buchungslimits – das sogenannte Standard Nesting und das sogenannte Theft Nesting – gegenübergestellt und miteinander verglichen. Nach ausführlicher Analyse der mengenorientierten Ansätze werden in Kapitel 8 die erlösorientierten Ansätze vorgestellt. Auch in diesem Kapitel wird zuerst auf die Theorie und anschließend direkt auf die Anwendung der entwickelten Ansätze eingegangen. In Kapitel 9 stehen dann die entwickelten mengen- und erlösorientierten Ansätze im unmittelbaren Vergleich. Es wird herausgearbeitet, welche Strategien anderen überlegen sind und sich mithin am

besten für den praktischen Einsatz eignen. Die stärksten Ansätze werden im Rahmen von Sensitivitätsanalysen tiefgreifender untersucht.

Eine kritische Betrachtung der entwickelten Ansätze und der verwendeten Fallstudien erfolgt in Kapitel 10. Auch Limitationen und Möglichkeiten, wie mit diesen umgegangen werden kann, sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschungsansätze werden im Rahmen dieses Kapitels aufgeführt. Abschließend werden die wichtigsten Erkenntnisse dieser Dissertation in einem Fazit (Kapitel 11) zusammengefasst.

2 Grundlagen der Produktionslogistik

Die Produktionslogistik umfasst die Planung, Koordinierung und Realisierung sowohl der Material- als auch der Informationsflüsse aller für die Produktion erforderlichen Einsatzgüter. Dies bezieht sich auf den gesamten Ablauf vom Wareneingang über den Produktionsprozess inklusive Zwischenlagerung bis hin zum Warenausgang (Lasch & Janker, 2017, S. 73; Nebl, 2011, S. 809; Pfohl, 2018, S. 201). Dabei sind während des Produktionsprozesses Änderungen und in der Regel auch eine damit verbundene Wertsteigerung der Objekte der Produktionslogistik zu verzeichnen (Günther & Tempelmeier, 2016, S. 7). Die Produktionslogistik ist in der Supply Chain Kette zwischen der Beschaffungslogistik und der Distributionslogistik angesiedelt (Bauer, 2014, S. 1) und ist somit ein elementarer Teil der Unternehmenslogistik (Lödding, 2019, S. 107). Da der Erfolg von produzierenden Unternehmen unter anderem stark von der logistischen Leistungsfähigkeit abhängt, steuert eine effiziente Produktionslogistik einen wichtigen Beitrag zum Unternehmenserfolg bei (Bauer, 2021, S. 1701; Pawellek, 2007, S. 5). Demzufolge sind die Ziele der Produktionslogistik aus denen des Unternehmens abzuleiten (Nebl, 2011, S. 810). Die Ziele und Aufgaben der Produktionslogistik werden im nachfolgenden Kapitel 2.1 erläutert. Anschließend wird in Kapitel 2.2 auf die Entwicklung der Produktionslogistik eingegangen.

2.1 Ziele und Aufgaben

Gemäß Bauer (2021, S. 1702) lassen sich die Ziele der Produktionslogistik in zeit-, mengen- und finanzbezogene Ziele unterteilen. Zeitbezogene Ziele umfassen beispielsweise die Reduzierung von Durchlaufzeiten und die Einhaltung von Terminen. Hinsichtlich der Menge können Ziele wie die Bestandsreduzierung oder die Steigerung der Absatzmenge (Bauer, 2021, S. 1702) und damit verbunden die Maximierung der Auslastung der Produktionskapazitäten aufgeführt werden (Nyhuis & Wiendahl, 2012, S. 10). Aus finanzieller Sicht sind die Ziele der Produktionslogistik unter anderem die Erhöhung der Deckungsbeiträge und die Reduzierung von Produktions- und Lagerkosten und folglich die Verbesserung der Liquidität (Bauer, 2021, S. 1702).

Jedoch können nicht alle Ziele konfliktlos erreicht werden, sondern stehen zum Teil in konkurrierender Beziehung zueinander. Um beispielsweise die Lieferbereitschaft zu erhöhen und somit die Einhaltung von Terminen zu gewährleisten, ist es von Vorteil, die Produkte bereits versandfertig zu bevorraten.

Eine hohe Lieferbereitschaft und Termintreue werden aus Kundensicht als guter Service wahrgenommen. Allerdings steigen durch den vorhandenen Lagerbestand die Lagerkosten, was wiederum zu einer Reduzierung der Liquidität führt. Wenn jedoch der Lagerbestand auf ein Minimum reduziert wird, kann die Nachfrage unter Umständen nicht unmittelbar aus dem Bestand befriedigt werden. Dies führt zu längeren Lieferzeiten, wodurch eventuell bereits vereinbarte Liefertermine nicht eingehalten werden können (Bauer, 2021, S. 1702). Folglich sollten bei der Verfolgung der unterschiedlichen Ziele auch die Auswirkungen auf die anderen Ziele und die Wichtigkeit der einzelnen Ziele berücksichtigt werden. Die Relevanz der Ziele kann sich situationsbedingt – wie etwa je nach Fertigungsart – unterscheiden. So ist beispielsweise bei der kundenindividuellen Auftragsfertigung die Minimierung der Durchlaufzeit von großer Bedeutung, da der Kunde bei Verzögerungen in der Produktion unmittelbar betroffen ist, wohingegen bei einer Lagerfertigung der vorhandene Bestand als Puffer zwischen der Produktion und dem Kunden genutzt werden kann (Nyhuis & Wiendahl, 2012, S. 4 f.).

Die gesetzten Ziele bestmöglich zu umzusetzen, ist maßgeblich die Aufgabe der Produktionslogistik (Wiendahl & Wiendahl, 2019, S. 246). Um dies zu erreichen, kann die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) als eine Aufgabe der Produktionslogistik aufgeführt werden. Auch weitere Aufgaben, wie beispielsweise die Layoutplanung, können der Produktionslogistik zugeordnet werden (Lödding, 2019, S. 108). Da diese für den weiteren Verlauf der Arbeit jedoch nicht von Bedeutung sind, wird im Folgenden lediglich ein Überblick über die einzelnen Teilaufgaben der PPS in ihrer zeitlichen Abfolge gegeben.

Im Rahmen der (langfristigen) Produktionsprogrammplanung wird bei einer erwartungsbezogenen Produktion durch Prognoserechnungen abgeschätzt, wann wie viel von welchem Produkt hergestellt werden soll (Plümer & Steinfatt, 2017, S. 194). Die Produktionsaufträge resultieren dabei aus der Losgrößenplanung oder im Falle einer kundenindividuellen Auftragsplanung unmittelbar aus der Kundenanfrage (Pfohl, 2018, S. 2018). Folglich umfasst die Programmplanung der kundenindividuellen Auftragsproduktion maßgeblich die „*Kundenauftragsverwaltung und -abwicklung*“ (Wildemann, 2010, S. 39). Basierend auf dem Ergebnis der Produktionsprogrammplanung wird anschließend im mittelfristigen Zeithorizont die Materialplanung durchgeführt, welche neben der Bedarfsplanung und -ermittlung auch die Bestandsplanung und -ermittlung sowie die Beschaffung der für die Produktion benötigten Materialien beinhaltet (Wiendahl & Wiendahl, 2019, S. 284). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Materialien entweder in Eigenfertigung innerhalb des Unternehmens hergestellt oder als Fremdbezug von einem anderen Unternehmen bzw. Lieferanten bezogen werden können (Lödding, 2016, S. 7).

Nach der Materialplanung folgen ebenfalls im mittelfristigen Zeithorizont die Termin- und Kapazitätsplanung der Produktion (Wiendahl & Wiendahl, 2019, S. 284). Bei der Terminplanung wird die Bearbeitung der Produktionsaufträge zeitlich festgelegt. Dabei sind insbesondere in einer kundenindividuellen Produktion die angegebenen Liefertermine bzw. -wünsche zu berücksichtigen, um die Kunden-

zufriedenheit zu gewährleisten (Pfohl, 2018, S. 218). Basierend auf der Terminplanung werden innerhalb der Kapazitätsplanung die benötigten Kapazitäten ermittelt bzw. die vorhandenen Kapazitäten verwaltet (Bauer, 2021, S. 1701). Unmittelbar daran anschließend ist die Reihenfolgeplanung, bei welcher die Bearbeitungssequenz der Produktionsaufträge festgelegt wird. Dabei können unter anderem die Auslastung der Kapazitäten, die Dringlichkeit der Aufträge und/oder die Rüstzeiten sowie die damit verbundenen Rüstkosten ausschlaggebend sein (Lebefromm, 2003, S. 277). Insbesondere bei hohen sequenzabhängigen Rüstzeiten ist es wichtig, diese in der Planung der Reihenfolge zu berücksichtigen, um den Rüstaufwand minimal zu halten (Lödding, 2019, S. 121 f.).

Die bisher erläuterten Aufgaben sind der Produktionsplanung zuzuordnen. Mit der Auftragsveranlassung erfolgt sowohl der Übergang von der Produktionsplanung zu der Produktionssteuerung als auch von den mittelfristigen zu den kurzfristigen Aufgaben. Im Rahmen der Auftragsveranlassung wird zuerst die Verfügbarkeit aller benötigten Materialien und Kapazitäten überprüft, bevor anschließend bei positiver Evaluierung die Auftragsfreigabe veranlasst wird (Lasch & Janker, 2017, S. 74; Wiendahl & Wiendahl, 2019, S. 284 f.). Falls wider Erwarten die Auftragsfreigabe nicht erteilt wird, wird der betreffende Auftrag zurückgestellt und die Freigabe des nachfolgenden Auftrags geprüft. Dadurch wird eine fortlaufende Produktion gewährleistet (Wiendahl & Wiendahl, 2019, S. 337).

Im Rahmen der Auftragsdurchsetzung wird zunächst ein Auftrag in der Arbeitsverteilung einem konkreten Arbeitsplatz zugeordnet. Des Weiteren wird der Fortschritt der Auftragsbearbeitung erfasst und überwacht (Wiendahl & Wiendahl, 2019, S. 339). Falls es aufgrund von Störungen, wie beispielsweise einem Maschinenausfall, zu einem Rückstand kommt, kann mithilfe einer effizienten Kapazitätssteuerung versucht werden, Abweichungen zwischen dem Ist- und dem Soll-Zustand auszugleichen. So können Planabweichungen zum Beispiel durch Überstunden oder Wochenendarbeit aufgeholt werden (Lödding, 2019, S. 119). Eine weitere Aufgabe der Auftragsdurchsetzung ist die Reihenfolgebildung, bei welcher die tatsächliche Bearbeitungsreihenfolge bestimmt wird, falls es zu Abweichungen von der geplanten Sequenz kommt (Lödding, 2019, S. 119 ff.). Zusätzlich ist die Rückmeldung als Aufgabe der Auftragsdurchsetzung aufzuführen, durch welche die „*Transparenz des Betriebsgeschehens und der Fertigungsprozesse*“ gewährleistet wird. Die Rückmeldung erfolgt in der Regel in rechnergestützten Enterprise-Resource-Planning-Systemen, welche auch ERP-Systeme genannt werden (Bauer, 2021, S. 1701 ff.).

In Abbildung 2.1 sind die zuvor erläuterten Aufgaben der PPS noch einmal übersichtlich zusammengefasst. Der Vollständigkeit halber werden in Abbildung 2.1 auch die Aufgaben der Produktionssteuerung bei Fremdbezug mit aufgeführt, auf welche jedoch nicht näher eingegangen wird, da sie für diese Arbeit nicht von Bedeutung sind.

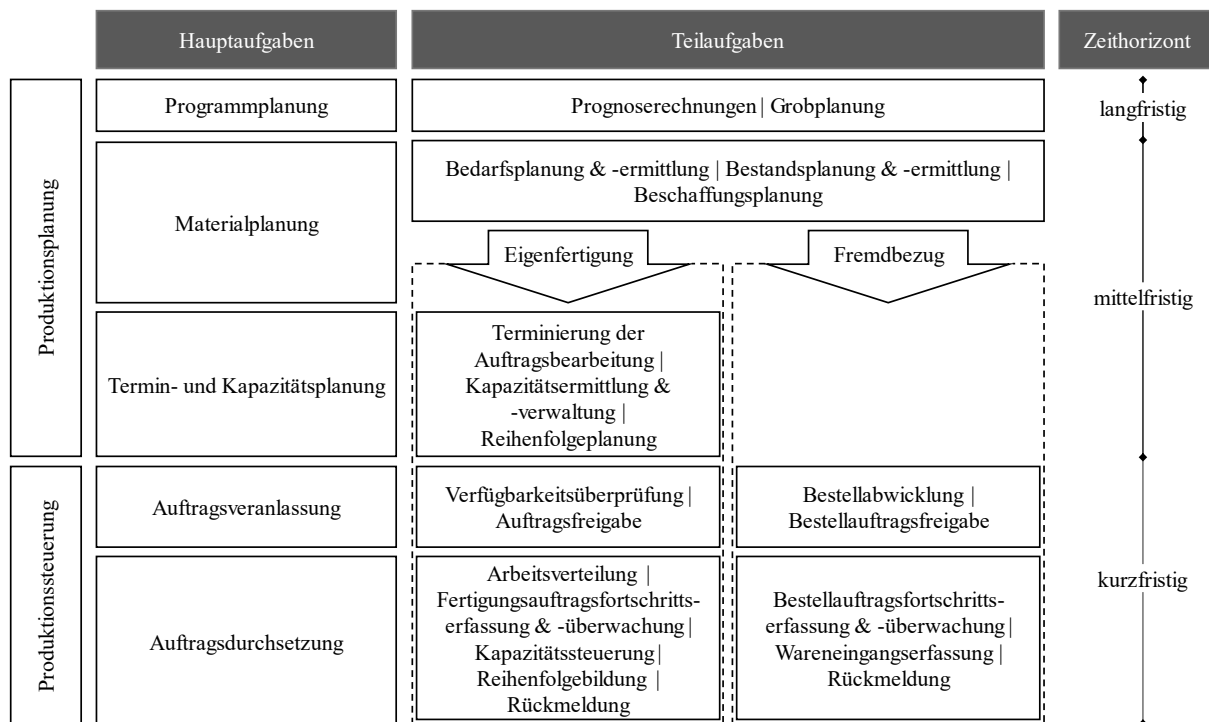


Abbildung 2.1: Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung nach Wiendahl und Wiendahl (2019, S. 284)

2.2 Entwicklung der Produktionslogistik

Während der vergangenen circa 170 Jahre wurden die Produktion und somit auch die Produktionslogistik von vielen Veränderungen geprägt. Demzufolge haben sich auch die Anforderungen an die Produktionslogistik verändert. Der größte Umbruch ist darauf zurückzuführen, dass für die meisten Produkte in den 1960er/70er Jahren ein Wandel vom Verkäufermarkt hin zum Käufermarkt verzeichnet wurde. Der Verkäufermarkt war durch ein für die Nachfrage zu knappes Angebot geprägt. Da weitere Produkte problemlos abgesetzt werden konnten, lag im Verkäufermarkt der Fokus auf der Fertigung (Seeck, 2010, S. 20). Die produzierten Stückzahlen wurden größer und die Produktion wurde nach dem Verrichtungsprinzip untergliedert, sodass Teilbereiche entstanden, welche optimiert werden konnten, um möglichst effizient zu produzieren. Die Anzahl der hergestellten Varianten wiederum war gering (Pawellek, 2007, S. 17). Henry Ford, welcher durch die Einführung der Fließfertigung zwischen 1911 und 1914 die Massenproduktion ermöglichte und etablierte (Lasch & Gießmann, 2009, S. 194), sagte einst: „Any customer can have a car painted any colour that he wants so long as it is black“ (Ford, 1923, S. 73).

Durch die Sättigung eines Marktes wandelte sich der Verkäufermarkt in den heute primär vorherrschenden Käufermarkt (Bauernhansl, 2017, S. 3). Dieser ist durch ein im Verhältnis zur Nachfrage (zu) großes Angebot charakterisiert. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, ist das Produktsortiment an die Kundenwünsche angepasst und zunehmend individueller (Seeck, 2010, S. 20). Seit den 1990er Jahren ist der Begriff „Kundenorientierung“ auch in den Vordergrund der betriebswirtschaftlichen Forschung

der Produktionslogistik gerückt. Durch die Kundenorientierung wird versucht, eine höhere Kundenbindung zu erreichen (Pfohl, 2018, S. 35 f.), weil mittels treuer Kunden Akquisitionskosten eingespart werden können (Pfohl, 2016, S. 10). Darüber hinaus können mit zufriedenen Stammkunden auf lange Sicht höhere Gewinne erwirtschaftet werden, als es durch die ständige Akquisition neuer Kunden möglich wäre (Pfohl, 2018, S. 36). Folglich besitzen Stammkunden einen (langfristig gesehen) höheren Kundenwert für das produzierende Unternehmen. Für weitere Informationen zum Kundenwert wird beispielhaft auf Kumar und George (2007) und von Martens und Hilbert (2011) verwiesen.

Die durch die Kundenorientierung verursachte gestiegene Variantenvielfalt ist ein großer Komplexitätstreiber, welcher sich auch auf die Produktionslogistik auswirkt (Lasch, 2018, S. 25). Auch die Globalisierung und Internationalisierung tragen zu der gestiegenen Variantenzahl bei, da beispielsweise verschiedene Landesausführungen produziert und im internationalen Wettbewerb angeboten werden. Zusätzlich werden die Produktlebenszyklen immer kürzer (Pawellek, 2007, S. 46). Insgesamt hat dies zur Folge, dass das Produktvolumen je Variante immer kleiner geworden ist (Pfohl, 2016, S. 11). Wie sich das Verhältnis von Variantenvielfalt und Produktvolumen je Variante im Laufe der Zeit verändert hat, ist Abbildung 2.2 zu entnehmen.

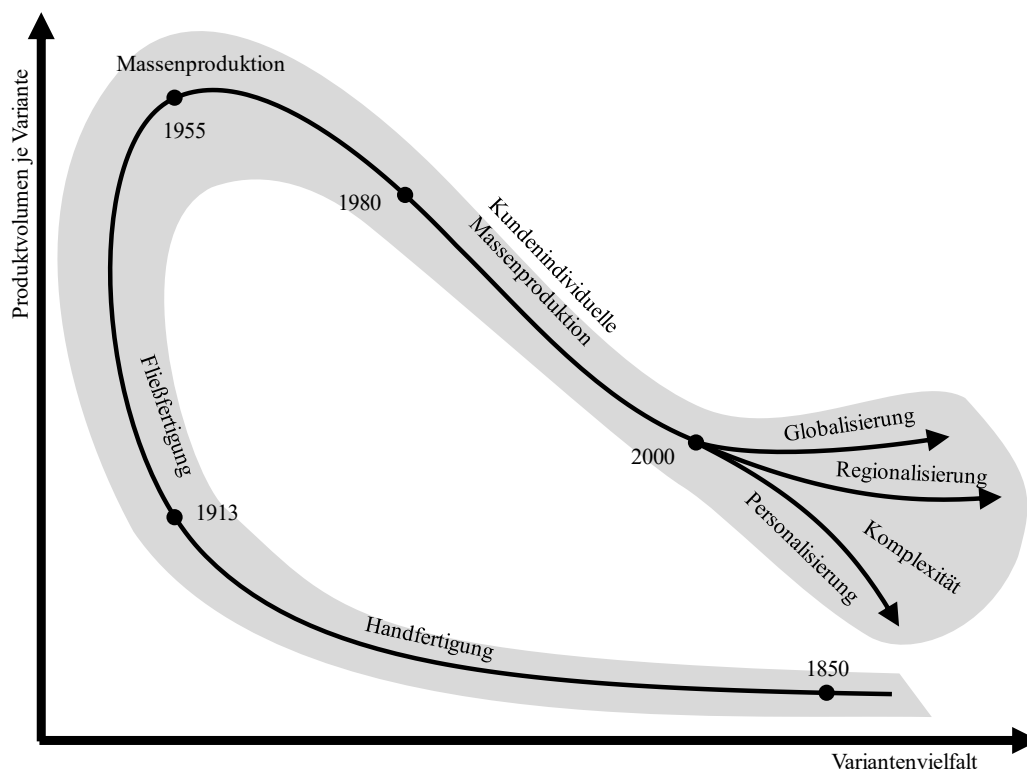


Abbildung 2.2: Veränderungen in der Produktion nach Bauernhansl (2017, S. 9)

Aufgrund der im Markt herrschenden Komplexität und Dynamik ist eine genaue Vorhersage der zukünftigen Nachfrage kaum bis gar nicht mehr möglich (Bauernhansl, 2017, S. 9). Folglich sind Unternehmen meist mit einer hohen Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Nachfrage konfrontiert (Wildemann, 2010, S. 124). Um die Komplexität zu beherrschen und das Risiko der Obsoleszenz der

hergestellten, aber noch nicht verkauften Produkte zu verringern, tendieren kundenindividuell produzierende Unternehmen dazu, den Anteil der kundenauftragsbezogene Produktion gegenüber dem der prognosebasierten Produktion zu vergrößern und somit den Kundenauftragsentkopplungspunkt (KAEP) in die Richtung des Anfangs der Wertschöpfungskette zu verlagern (Nebl, 2011, S. 824; Syska, 2006, S. 77). Unter dem KAEP ist der Zeitpunkt zu verstehen, ab welchem der Produktionsauftrag einem spezifischen Kundenauftrag zugeordnet werden kann (Olhager, 2003). Folglich beginnt ab diesem Zeitpunkt die vom Kunden wahrgenommene Auftragsdurchlaufzeit (Grabner, 2019, S. 200). Je nach Lage des KAEP wird zwischen der Make-to-Stock (MTS), Assemble-to-Order (ATO), Make-to-Order (MTO) und Engineer-to-Order (ETO) Produktion differenziert (s. Abbildung 2.3). Diese verschiedenen Auslösetypen der Produktion werden nachfolgend kurz erläutert.

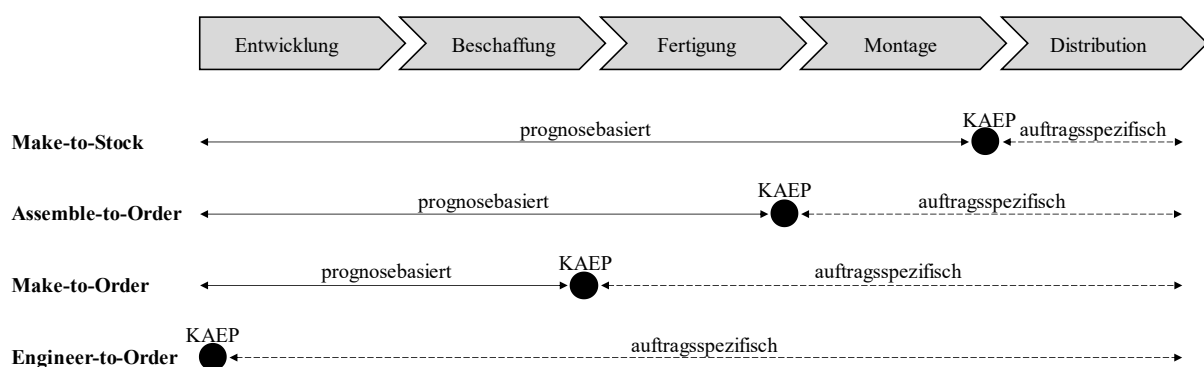


Abbildung 2.3: Auslösetypen der Produktion nach Stich et al. (2013, S. 53)

Die MTS Produktion wird häufig auch als Lagerproduktion bezeichnet, da die Produktion vollständig prognosebasiert und unabhängig von einem konkreten Kundenauftrag durchgeführt wird. Durch diese Art der Produktion können kurze Lieferzeiten erreicht werden, weil die Nachfrage unmittelbar aus dem Bestand befriedigt werden kann (Nebl, 2011, S. 823). Maßgeblich wird die MTS Produktion für geringwertige Standardprodukte verwendet, für welche von den Kunden jedoch auch eine kurze Lieferzeit bzw. sogar zum Teil die sofortige Verfügbarkeit erwartet wird (Stich et al., 2013, S. 53). Aufgrund einer relativ genau prognostizierbaren Nachfrage ist eine vom Kundenauftrag losgelöste Produktion allerdings auch möglich (Syska, 2006, S. 94). Beispiele für Produkte, welche klassischerweise in einer MTS Produktion hergestellt werden, sind Konsumgüter oder Lebensmittel (Grabner, 2019, S. 200).

Auch bei der ATO Produktion wird prognosebasiert gefertigt, allerdings erfolgt die Montage der standardisierten Komponenten auf Basis eines konkreten Kundenauftrags (Syska, 2006, S. 94). Dadurch kann im Vergleich zur MTS Produktion der Lagerbestand reduziert werden, jedoch steigt die Auftragsdurchlaufzeit (Stich et al., 2013, S. 54). Typischerweise werden zum Beispiel Automobile, welche aus verschiedenen Standardkomponenten dem Kundenwunsch entsprechend montiert werden, in einer ATO Produktion hergestellt (Grabner, 2019, S. 200).

Sobald die Produktion erst auf Basis eines konkreten Kundenauftrags begonnen wird, handelt es sich um eine MTO Produktion. Diese wird auch Auftragsproduktion bzw. auftragsbezogene Produktion

genannt (Nebl, 2011, S. 822) und häufig durchgeführt, wenn eine Vorhersage der zukünftigen Nachfrage gar nicht oder nur bedingt und mit sehr großer Unsicherheit möglich ist (Stich et al., 2013, S. 54). Lediglich die Beschaffung der Materialien erfolgt prognosebasiert (Beckmann, 2012, S. 155). Dadurch, dass erst auf Basis einer konkreten Nachfrage produziert wird (Zaerpour et al., 2009), kann das Bestandsniveau auf ein Minimum reduziert werden. Auch das Marktrisiko kann verringert werden, da lediglich die Produkte produziert werden, die nachgefragt werden. Allerdings fallen die Auftragsdurchlaufzeiten im Vergleich zur MTS und ATO Produktion deutlich höher aus (Stich et al., 2013, S. 54). Das MTO Prinzip findet häufig Anwendung, um eine große Variantenanzahl zu geringeren Kosten anbieten zu können. Folglich findet beispielsweise die Produktion von Unikaten meist nach dem MTO Prinzip statt (Gallien et al., 2004). Da die Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten zunehmend steigt, fertigen immer mehr Unternehmen nach dem MTO Prinzip (Barut & Sridharan, 2005; Dan et al., 2018). Hauptsächlich kleine bis mittelständische Unternehmen wenden diese Art der Fertigung an (Stevenson et al., 2005). Werkzeugmaschinen werden beispielsweise in der Regel im Rahmen einer MTO Produktion hergestellt (Grabner, 2019, S. 200).

Bei einer ETO Produktion liegt der KAEP sogar noch vor der Entwicklung des Produkts. Das bedeutet, dass erst auf Basis eines Kundenauftrags das Produkt entwickelt wird und daraufhin erst die benötigten Materialien bestellt und Produktionskapazitäten reserviert werden (Stich et al., 2013, S. 54). Klassischerweise wird dieses Prinzip zum Beispiel im Schiffbau angewendet (Grabner, 2019, S. 200).

Jedes der vorgestellten Prinzipien ist mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen verbunden, die gegeneinander abgewogen werden sollten. Um den für ein Unternehmen passenden Auslösetyp der Produktion zu wählen, kann das Portfolio zur strategischen Positionierung des KAEP von Olhager (2003) herangezogen werden, welches in Abbildung 2.4 dargestellt ist. Ausschlaggebend sind die Variabilität der Nachfrage und das von der Kundschaft erwartete Verhältnis zwischen der Durchlaufzeit und der Lieferzeit. Wenn die Kunden eine im Vergleich zur Produktionsdurchlaufzeit kürzere Lieferzeit erwarten und folglich das Verhältnis dieser beiden Kennzahlen größer als eins ist, bietet sich insbesondere bei einer geringen Variabilität der Nachfrage eine Produktion nach dem MTS Prinzip an. Dadurch können Skaleneffekte in der Produktion genutzt werden. Bei einer höheren Variabilität der Nachfrage ist eine ATO Produktion von Vorteil, um Lagerbestände zu reduzieren.

Sobald von dem Kunden keine kürzere Lieferzeit als die Produktionsdurchlaufzeit erwartet und folglich das Verhältnis dieser beiden Kennzahlen kleiner als eins ist, kann neben der MTS und ATO Produktion auch eine Produktion nach dem MTO Prinzip von Vorteil sein. Insbesondere bei einer hohen Variabilität der Nachfrage kommt dieses Prinzip primär zum Einsatz (Olhager, 2003).

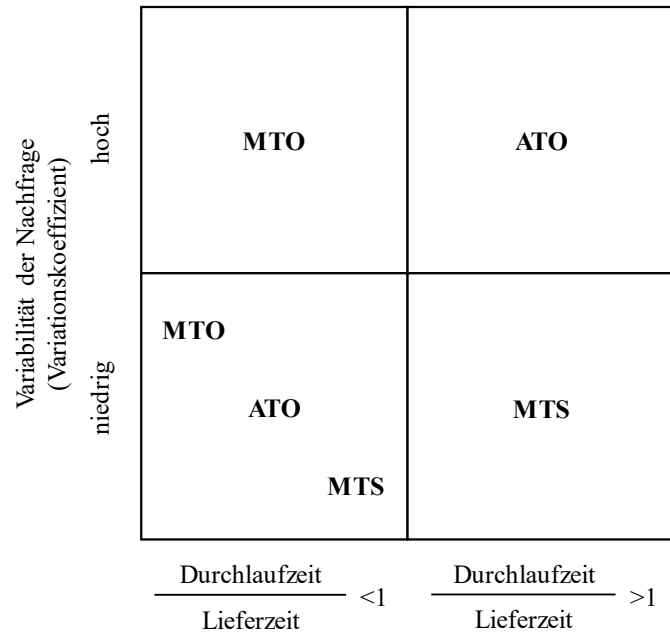


Abbildung 2.4: Portfolio zur strategischen Positionierung des KAEP nach Olhager (2003, S. 327)

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass die Produktionslogistik einen wichtigen Beitrag zum Unternehmenserfolg beisteuert (Bauer, 2021, S. 1701). Durch die zunehmende Kundenorientierung ist die Anzahl an Produktvarianten und damit auch die Komplexität, mit welcher sich produzierende Unternehmen auseinandersetzen müssen, deutlich gestiegen (Lasch, 2018, S. 25). Um das Marktrisiko zu reduzieren, versuchen Unternehmen die kundenauftragsbezogene Produktion gegenüber der prognosebasierten Produktion auszudehnen (Nebf, 2011, S. 824). Folglich werden Prinzipien wie die MTO Produktion immer häufiger verwendet (Barut & Sridharan, 2005; Dan et al., 2018). Jedoch tendieren nach dem MTO Prinzip produzierende Unternehmen dazu, mehr Aufträge anzunehmen, als es die limitierte Produktionskapazität erlaubt (Wortmann, 1992). Um die limitierte Kapazität bestmöglich einzusetzen, können Methoden des Operations Research, wie beispielsweise das RM, angewendet werden. Die Grundlagen des RM werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

3 Grundlagen des Revenue Managements

Das RM ist eine der erfolgreichsten und bekanntesten Methoden des Operations Research (Kimms & Klein, 2007). Aufgrund der durch den Einsatz von RM Methoden verzeichneten Erfolge wird das RM immer weitläufiger anerkannt und angewendet (Anderson & Blair, 2004). Eine einheitliche, alles umfassende Definition des RM existiert in der Literatur jedoch nicht. Meist variieren diese, da viele Definitionen unmittelbar den betrachteten Anwendungsfall mit aufgreifen (Klein & Steinhardt, 2008, S. 6; Spengler & Rehkopf, 2005). Eine für den in dieser Arbeit betrachteten Kontext der MTO Produktion passende Definition stammt von Klein (2001) und lautet wie folgt:

„Revenue Management umfasst eine Reihe von quantitativen Methoden zur Entscheidung über Annahme oder Ablehnung unsicherer, zeitlich verteilt eintreffender Nachfrage unterschiedlicher Wertigkeit. Dabei wird das Ziel verfolgt, die in einem begrenzten Zeitraum verfügbare, unflexible Kapazität möglichst effizient zu nutzen.“
(Klein, 2001, S. 248)

Folglich soll mithilfe des RM die richtige Menge an Kapazitätseinheiten zum richtigen Zeitpunkt zum richtigen Preis an den richtigen Kunden verkauft werden (Capocchi, 2019, S. 104; Guadix et al., 2010). Das RM stellt dazu unterschiedliche Instrumente bereit, um die limitierte Kapazität (in der Regel) erlösmaximierend zu nutzen (Sucky, 2009).

Bevor die traditionellen Instrumente vorgestellt werden, wird zunächst in Kapitel 3.1 auf die Geschichte des RM eingegangen. Des Weiteren werden klassische Anwendungsgebiete des RM aufgeführt. Anschließend werden in Kapitel 3.2 die Voraussetzungen, welche für eine erfolgreiche Anwendung des RM möglichst erfüllt sein sollten, erläutert. Nachfolgend werden in Kapitel 3.3 die traditionellen Instrumente des RM erklärt. Dabei wird der Fokus auf der Kapazitätssteuerung liegen, da diese die Grundlage für die in den späteren Kapiteln vorgestellten Ansätze darstellt.

3.1 Geschichte und klassische Anwendungsgebiete

Der Ursprung des RM ist auf den Passagiertransport der Luftfahrtbranche zurückzuführen und wurde durch die Deregulierung des amerikanischen Luftverkehrs, welche im Jahr 1978 stattfand, ausgelöst. Durch die Deregulierung wurde den Fluggesellschaften ermöglicht, eigenständig über die Ticketpreise

zu entscheiden (Defregger & Kuhn, 2007; Klein & Steinhardt, 2008, S. 2). Zuvor wurden diese von der damaligen U.S. amerikanischen Zivilluftfahrtbehörde (engl. Civil Aeronautics Board) kontrolliert und strikt auf Basis von Standardpreisen und Profitabilitätszielen reguliert (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 6 f.). Die Idee hinter der Deregulierung war es, neue Wettbewerber zu motivieren sowie diesen den Markteintritt zu erleichtern (Phillips, 2021, S. 181). Dies führte dazu, dass unter anderem Low-Cost Carriern, wie beispielsweise der Fluggesellschaft PeopleExpress, der Markteintritt ermöglicht wurde. Dieser Anbieter stach insbesondere durch die niedrigen Ticketpreise hervor und sprach damit gezielt die preissensitiven Freizeitreisenden an, gewann jedoch auch Geschäftsreisende als Kunden (Klein & Steinhardt, 2008, S. 2). Die Ticketpreise von PeopleExpress waren teilweise bis zu 70% geringer als die der großen Wettbewerber im Markt. Dies war unter anderem dadurch möglich, dass der im Ticketpreis enthaltene Service auf ein Minimum reduziert wurde. So mussten Passagiere beispielsweise für die Gepäckaufgabe oder Mahlzeiten während des Fluges extra bezahlen. Durch diese Strategie konnte PeopleExpress wachsen und drang unter anderem in den Markt der seit langer Zeit etablierten Fluggesellschaft American Airlines ein (Phillips, 2021, S. 181 f.).

Die Strategie von American Airlines musste überdacht und angepasst werden, damit PeopleExpress nicht noch weiter in den Markt von American Airlines vordringen und diese Fluggesellschaft vom Markt verdrängen würde. Eine Ticketpreissenkung auf ein zu PeopleExpress vergleichbares Niveau war jedoch ausgeschlossen, da somit die Kosten von American Airlines nicht gedeckt gewesen wären (Phillips, 2021, S. 181 f.). Stattdessen führte American Airlines damaliger CEO, Robert Crandall, neben dem Normaltarif einen weiteren, deutlich günstigeren Spezialtarif ein. Mit diesem Spezialtarif konnten zum Teil sogar die Ticketpreise von PeopleExpress unterboten werden (Klein & Steinhardt, 2008, S. 3). Ermöglicht wurde dieser Spezialtarif durch den von Robert Crandall genutzten Fakt, dass in einem zum Teil bereits ausgebuchten Flugzeug ein weiterer, bisher ungenutzter Sitzplatz Grenzkosten von nahezu null aufweist. Somit konnte auch American Airlines günstige Tickets für die preissensitiven Freizeitreisenden anbieten. Allerdings sollte darauf geachtet werden, dass die Geschäftskunden nicht ebenfalls die für die Freizeitkunden angedachten Spezialtarife buchten (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 7 f.). Dies wurde erreicht, indem der Spezialtarif an verschiedene Bedingungen geknüpft war. So wurde der Spezialtarif beispielsweise nur bis zwei Wochen vor dem Abflug angeboten und auch lediglich den Kunden, die einen Aufenthalt über Samstagnacht an ihrem Zielort planten. Da diese Bedingungen in der Regel Geschäftskunden davon ausschlossen, den Spezialtarif zu buchen, ging der Plan auf und American Airlines konnte Freizeitreisende zu dem vergünstigten Tarif und Geschäftskunden zu dem Normaltarif befördern (Phillips, 2021, S. 182). Damit die in der Regel zu einem späteren Zeitpunkt eintreffende Nachfrage der Geschäftskunden weiterhin bedient werden konnte und es zu keiner Umsatzverdrängung kam, war die Anzahl der zu dem Spezialtarif angebotenen Sitzplätze mithilfe von Instrumenten des RM zu begrenzen (Klein & Steinhardt, 2008, S. 3). Dies ist auch heutzutage weiterhin der Fall.

Da die Kunden den von American Airlines angebotenen Service gegenüber dem auf ein Minimum gekürzten Service von PeopleExpress bevorzugten (Phillips, 2021, S. 182), konnte American Airlines den Umsatz nach dem ersten Jahr, in dem die Methoden des RM eingesetzt wurden, um ungefähr 15% steigern (Klein & Steinhardt, 2008, S. 4). Dies war der erste Erfolg des RM, welches zu diesem Zeitpunkt auch häufig Yield Management genannt wurde (Phillips, 2021, S. 182).

Auch andere Fluggesellschaften machten sich dieses Konzept zu Nutze, neben Tickets zum Normaltarif in einer begrenzten Anzahl Tickets zum vergünstigten Spezialtarif anzubieten. Dadurch, dass die mit diesem Konzept verbundenen zusätzlichen Kosten sehr gering ausfielen, konnten andere Fluggesellschaften ebenfalls mithilfe des Einsatzes von RM Instrumenten eine Umsatzsteigerung erreichen (Klein & Steinhardt, 2008, S. 4). Kurze Zeit später wurden die Methoden des RM auch in anderen Branchen aus dem Dienstleistungssektor angewandt (Phillips, 2021, S. 183). Neben dem Passagiertransport der Luftfahrtbranche zählen heutzutage die Hotellerie und der Mietwagenverleih zu den traditionellen und meist erforschten Anwendungsgebieten des RM (Chiang et al., 2007). Für beispielhafte Publikationen, welche zeigen, dass das RM in den zuvor genannten Anwendungsgebieten bereits sehr früh und immer noch in der Forschung thematisiert wird, wird für den Passagiertransport der Luftfahrtbranche auf Chatwin (1998), Talluri (2001), Frank et al. (2006), Aydın et al. (2013) und Karbassi Yazdi et al. (2020) verwiesen. Für die Hotellerie können beispielhaft die Publikationen von Hadjinicola und Panayi (1997), Vinod (2004) sowie von Binesh et al. (2021) und für den Mietwagenverleih die Publikationen von Geraghty und Johnson (1997), Haensel et al. (2012) sowie von Li et al. (2021) aufgeführt werden.

In der Hotellerie wird die begrenzte Anzahl an Zimmern zu unterschiedlichen Preisen pro Nacht, beispielsweise abhängig von der Zimmerausstattung, dem Buchungskanal, über welche die Buchung getätigt wurde, der Hotelauslastung, dem Wochentag und/oder der Länge des Aufenthalts angeboten (Sensen, 2018, S. 49 ff.). Insbesondere sollten in der Hotellerie auch Verbundeffekte durch unterschiedlich lange Aufenthalte bei der Buchungsannahme bzw. -ablehnung berücksichtigt werden. So kann zum Beispiel ein Aufenthalt über eine Nacht einen anderen Aufenthalt über mehrere Nächte verhindern. Darüber hinaus nehmen Hotelgäste meist noch weitere hotelinterne Leistungen, wie Restaurants, Wellnessbereiche, Tagungsräume etc., in Anspruch. Dadurch zusätzlich generierten Erlöse sollten ebenfalls bei der Entscheidung hinsichtlich der Annahme einer Buchungsanfrage beachtet werden (Klein & Steinhardt, 2008, S. 31 f.).

Ähnlich verhält es sich bei dem Mietwagenverleih. Auch dort kann der Mietzeitraum unterschiedlich lang sein, Zusatzleistungen, wie beispielsweise verschiedene Versicherungsoptionen, können dazu gebucht und unterschiedliche Fahrzeugkategorien (z.B. Kleinwagen, Kombi, Limousine etc.) können ausgesucht werden (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 531 f.). Wenn die gewünschte Kategorie nicht verfügbar ist, können Kunden auch kostenlose Upgrades und demnach ein Fahrzeug einer höheren Kategorie angeboten werden (Klein & Steinhardt, 2008, S. 36). Eine Besonderheit dieses Anwendungsgebiete-

tes ist die in einer gewissen Hinsicht flexible Kapazität, da die Mietwagen über unterschiedliche Standorte des Mietwagenverleihs verteilt werden können. Ferner können Kunden, welche Mietwagen an unterschiedlichen Orten abholen und zurückgeben, die Kapazitätsstruktur in gewisser Weise beeinflussen. All diese Aspekte und noch weitere sollten bei der Entscheidung hinsichtlich der Annahme einer Buchungsanfrage berücksichtigt werden (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 531 f.). Durch Preisanreize kann auch die Nachfrage über die verschiedenen Standorte hinweg beeinflusst werden (Chiang et al., 2007).

Neben diesen traditionellen Anwendungsgebieten sind die Methoden des RM heutzutage in einer Vielzahl an unterschiedlichen Branchen zu finden. Dies spiegelt sich auch in wissenschaftlichen Publikationen wider. So können beispielsweise Restaurants (z. B. Bertsimas & Shioda, 2003; Tang et al., 2019), Casinos (z. B. Hendler & Hendler, 2004; Metters et al., 2008), Kreuzfahrten (z. B. Lieberman & Dieck, 2002; Sturm & Fischer, 2019) und Sportevents (z. B. Bouchet et al., 2016; Drayer et al., 2012) im Bereich der Freizeitgestaltung als weitere Anwendungsgebiete des RM genannt werden. Im Transportgeschäft können unter anderem die Linienschifffahrt mit dem Containertransport (z. B. Ting & Tzeng, 2004; Zurheide & Fischer, 2015), die Luftfracht (z. B. Barz & Gartner, 2016; Kasilingam, 1997) oder der Bahnverkehr (z. B. Kraft et al., 2000; Wang et al., 2012) genannt werden. Weitere Beispiele sonstiger Anwendungsgebiete sind der Einzelhandel (z. B. Lippman, 2003; Mild et al., 2009) und die Werbebranche (z. B. Chakraborty et al., 2021; Roels & Fridgeirsdottir, 2009). Auch die (MTO) Produktion stellt ein Anwendungsgebiet des RM dar. Auf das RM in der MTO Produktion wird in Kapitel 4 genauer eingegangen. Einen Überblick über weitere Anwendungsgebiete und wissenschaftliche Beiträge zu diesen bieten beispielsweise Chiang et al. (2007) sowie Talluri und Van Ryzin (2004, Kap. 10). Die Diversität der dargestellten Branchen zeigt, dass die Methoden des RM in ganz unterschiedlichen Bereichen anwendbar sind. Jedoch sollten dafür gewisse Voraussetzungen erfüllt sein. Auf diese Voraussetzungen wird im nachfolgenden Unterkapitel eingegangen.

3.2 Anwendungsvoraussetzungen

Damit die Methoden des RM angewendet werden können, gibt es verschiedene Anwendungsvoraussetzungen. Es kann bereits vorab festgehalten werden, dass nicht alle Voraussetzungen zwangsläufig erfüllt sein müssen und dass die Kriterien zum Teil sehr eng miteinander verknüpft sind (Klein & Steinhardt, 2008, S. 9). Die Voraussetzungen können in kapazitätsbezogene und nachfragebezogene Kriterien unterschieden werden (Rehkopf & Spengler, 2005).

Eine zu erfüllende Bedingung hinsichtlich der Kapazität ist, dass diese fix sein sollte. Anpassungen der Kapazität sollten, wenn überhaupt möglich, mit sehr hohen zusätzlichen Kosten verbunden und in der Regel sprunghaft sein. So kann beispielsweise die Anschaffung eines weiteren Flugzeugs, bei dem jeder

Sitzplatz einer Kapazitätseinheit entspricht, als sprunghafte und sehr kostenintensive Kapazitätsanpassung angesehen werden. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass eine solche Anpassung meist eine gewisse Vorlaufzeit benötigt (Klein & Steinhardt, 2008, S. 12 f.). Jedoch sind in manchen Situationen auch nicht so kostenintensive Anpassungen der Kapazität möglich, weshalb in der Literatur von einer „*weitgehend*“ fixen Kapazität gesprochen wird (s. bspw. Klein & Steinhardt, 2008, S. 8; Sucky, 2009; Tomczak & Heidig, 2014, S. 4). So kann zum Beispiel durch den Einsatz eines größeren Flugzeugs, welches sich bereits in der Flotte einer Fluggesellschaft befindet, die Kapazität erweitert werden. Auch diese Änderung der Kapazität benötigt allerdings einen gewissen zeitlichen Vorlauf (Klein & Steinhardt, 2008, S. 13). Folglich besteht zumindest kurzfristig nicht die Möglichkeit, die Kapazität an die Nachfrage anzupassen (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 14).

Darüber hinaus sollte die Kapazität knapp sein und nicht zur Befriedung der vollständigen Nachfrage ausreichen. Nur bei Erfüllung dieser kapazitätsbezogenen Voraussetzung ist die Entscheidung hinsichtlich einer Annahme oder Ablehnung einer Buchungsanfrage und folglich einer effizienten Kapazitätssteuerung von Relevanz (Sucky, 2009).

Zugleich sollte die Kapazität verderblich und der damit verbundene Service bzw. das dem Kunden angebotene Produkt nicht lagerfähig sein. Dies bedeutet, dass ungenutzte Kapazität nicht noch im Nachhinein verwendet werden kann (Spengler & Rehkopf, 2005). Bei den meisten Anwendungsbereichen des RM ist das angebotene Produkt an ein bestimmtes Datum gekoppelt. Nach diesem Datum steht das Produkt entweder nicht mehr zur Verfügung oder ist weniger wert. Wenn beispielsweise ein Sitzplatz eines Flugzeugs beim Abflug an einem bestimmten Tag leer ist, kann diese ungenutzte Kapazitätseinheit nicht im Nachhinein verwendet werden. Als Beispiel für einen Wertverlust eines Produkts nach einem bestimmten Zeitpunkt kann die Saisonware der Modebranche genannt werden (Rehkopf & Spengler, 2005). Insgesamt hat dies eine Schmälerung des maximal möglichen Umsatzes zur Folge (Tomczak & Heidig, 2014, S. 5).

Darüber hinaus sind die mit der Bereitstellung der Kapazität verbundenen hohen Fixkosten im Vergleich zu den niedrigen Grenzkosten eines weiteren, angebotenen Produkts als kapazitätsbezogene Anwendungsvoraussetzung aufzuführen (Klein & Steinhardt, 2008, S. 14). Dies ist der Aspekt, der es ermöglicht, neben dem Normaltarif einen deutlich günstigeren Spezialtarif anzubieten, um somit ansonsten ungenutzte Kapazitätseinheiten besser auszulasten (s. Kapitel 3.1). Folglich kann anstatt der Gewinnmaximierung die Erlösmaximierung als Approximation dieser verfolgt werden (Tomczak & Heidig, 2014, S. 5).

Diese zuvor aufgeführten kapazitätsbezogenen Voraussetzungen resultieren insgesamt in einer mangelnden operativen Flexibilität (Klein & Steinhardt, 2008, S. 12). Flexibilität kann dabei als die Fähigkeit, sich an sich verändernde Umweltbedingungen anzupassen, verstanden werden (Günther & Tempelmeier, 2016, S. 4).

Als nachfragebezogenes Anwendungskriterium ist die Heterogenität der Nachfrage und die damit verbundene unterschiedliche Zahlungsbereitschaft aufzuführen. Ohne diese wäre es nicht möglich, die im Grundsatz gleiche Leistung – bspw. den Passagiertransport von A nach B – zu unterschiedlich hohen Preisen zu verkaufen und sich somit die Preisdifferenzierung zu Nutze zu machen (Klein & Steinhardt, 2008, S. 9). Umso diverser die Zahlungsbereitschaft ist, desto größer ist das Potenzial, die Kapazität erlösmaximierend zu nutzen (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 13). Neben der Heterogenität der Nachfrage kann diese in der Regel auch als stochastisch bzw. stark schwankend und unsicher beschrieben werden, was eine effiziente Kapazitätsauslastung verkompliziert (Spengler & Rehkopf, 2005). Dies bezieht sich sowohl auf die Höhe der Nachfrage insgesamt als auch auf die zeitliche Verteilung der Nachfrage (Klein & Steinhardt, 2008, S. 15). Aufgrund der damit einhergehenden Komplexität besteht das Risiko, falsche Entscheidungen zu treffen. Folglich ist es wichtig, geeignete Methoden, wie beispielsweise die des RM, für eine effiziente Kapazitätssteuerung zu nutzen (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 13).

Zusätzlich ist als wesentliche Anwendungsvoraussetzung die Möglichkeit der Buchung im Voraus – also vor der eigentlichen Leistungserbringen – zu erwähnen (Li & Pang, 2017). Als Beispiel dafür kann die Buchung eines Flugtickets vor dem Abflug aufgeführt werden (Spengler & Rehkopf, 2005). Wegen dieser Tatsache ist stets zu überlegen, wie viel Kapazität noch für die später eintreffende, jedoch schwankende, unsichere und heterogene Nachfrage zu reservieren ist (Rehkopf & Spengler, 2005).

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Notwendigkeit der Integration eines externen Faktors (Sucky, 2009). Der externe Faktor kann dabei entweder eine Person, wie beispielsweise der Nachfrager selber, oder ein Objekt von materieller oder immaterieller Natur sein. Für materielle Objekte können Transportgüter und für immaterielle Objekte konkrete Informationen als Beispiel genannt werden. Durch die Kombination dieses externen Faktors und der internen Produktionsfaktoren, wie zum Beispiel Arbeitskräfte oder Maschinen, welche auch im Rahmen der RM Literatur unter den zur Verfügung stehenden Ressourcen zusammengefasst werden, ist die eigentliche Leistungserstellung möglich. Dies führt zu am Markt absetzbaren Produkten, welche bereits im Voraus verkauft, jedoch nicht im Voraus hergestellt werden können (Klein & Steinhardt, 2008, S. 10). Folglich handelt es sich bei den angebotenen Leistungen in der Regel um Dienstleistungen, welche durch die Eigenschaft der zeitgleichen Produktion und Konsumierung charakterisiert sind (Leimeister, 2020, S. 447).

Ferner sollte es für eine erfolgreiche Anwendung des RM möglich sein, das angebotene Leistungsprogramm zu standardisierten Produkten zusammenzufassen. Allerdings muss die Gesamtleistung nicht zwangsläufig nur ein standardisiertes Produkt umfassen, sondern kann auch aus einzelnen standardisierten Teilprodukten bestehen, wie es zum Beispiel bei Pauschalreisen der Fall ist (Klein & Steinhardt, 2008, S. 16 f.). Im Falle einer sehr großen Anzahl an Produkten – beispielsweise durch vollständig individuelle Produkte – ist es sinnvoll, ähnliche Produkte zusammenzufassen, um so die Anzahl der Produkte auf eine handhabbare Anzahl zu verringern (Gallego & Topaloglu, 2019, S. 70). Durch ein standardisiertes Leistungsprogramm wird eine Prognose der Nachfrage, beispielsweise auf Basis von

historischen Daten, möglich (Harris & Pinder, 1995). Darüber hinaus erfordern auch einige Instrumente des RM die Definition von standardisierten Produkten (Klein & Steinhardt, 2008, S. 17). Auf die traditionellen Instrumente des RM wird im nachfolgenden Kapitel eingegangen.

3.3 Traditionelle Instrumente

Zu den traditionellen Instrumenten des RM, welche auch als RM im engeren Sinne (i.e.S.) bezeichnet werden, gehören die segmentorientierte Preisdifferenzierung, die Kapazitätssteuerung und die Überbuchungssteuerung (Gallego & Topaloglu, 2019, Part I; Kimms & Klein, 2005). Bevor auf diese in den nachfolgenden Unterkapiteln näher eingegangen wird, wird zunächst eine Abgrenzung zwischen den Instrumenten des RM i.e.S. und im weiteren Sinne (i.w.S.) und denen des Marketings und Produktionsmanagements anhand der Zugehörigkeit zu den verschiedenen Planungsebenen (strategisch, taktisch, operativ) vorgenommen. Diese weisen zum Teil sehr starke Interdependenzen auf (Klein & Steinhardt, 2008, S. 18 ff.). Die Instrumente des Marketings und des Produktionsmanagements bilden eine Basis, auf welcher die Instrumente des RM aufbauen (Kimms & Klein, 2005). Einen Überblick dazu bietet Abbildung 3.1. Dabei ist festzuhalten, dass die Darstellung nicht allgemeingültig ist, sondern branchenspezifisch unterschiedlich ausfallen kann (Hintsches, 2012, S. 43; Klein & Steinhardt, 2008, S. 18).

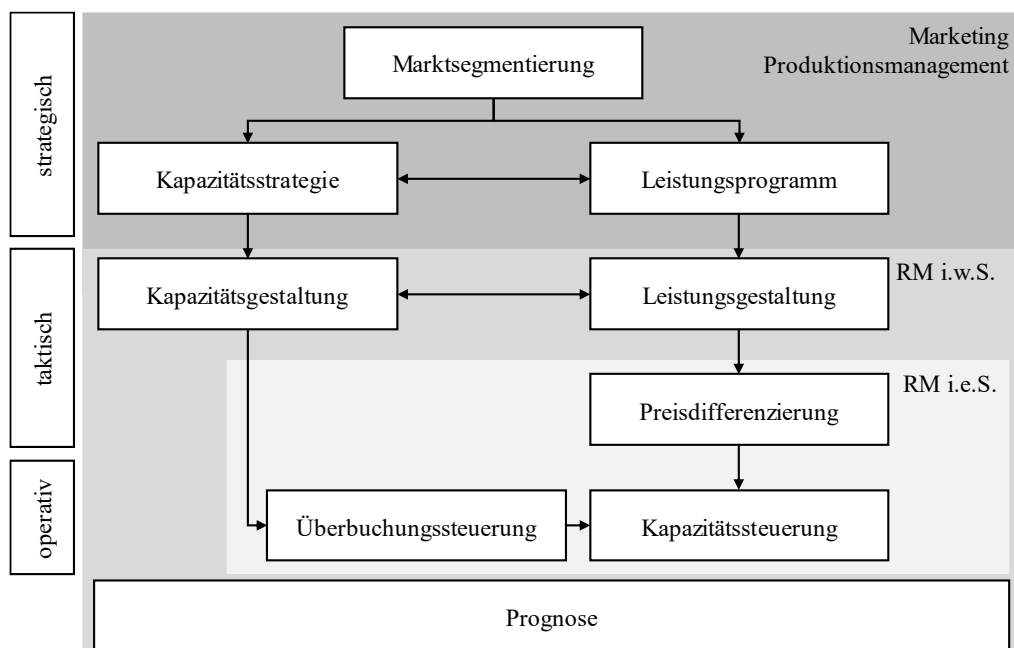


Abbildung 3.1: Zuordnung der Instrumente des RM zu den Planungsebenen nach Klein und Steinhardt (2008, S. 19) und Hintsches (2012, S. 43)

Der strategischen Planungsebene sind die Instrumente des Marketings und des Produktionsmanagements zuzuordnen. Die Basis bildet die Marktsegmentierung, mithilfe derer der Gesamtmarkt in unterschiedliche Marktsegmente unterteilt wird. Innerhalb eines Marktsegments können die Kunden als homogen beschrieben werden, jedoch sind die einzelnen Marktsegmente disjunkt zueinander und somit

sind die Kundengruppen voneinander abgrenzbar (Hintsches, 2012, S. 43 f.; Meffert et al., 2018, S. 116). Darauf aufbauend werden die Kapazitätsstrategie und das Leistungsprogramm ebenfalls in der strategischen Planungsebene determiniert (Klein & Steinhardt, 2008, S. 18). Durch die Festlegung der Kapazitätsstrategie werden die eingesetzten Produktionsfaktoren bzw. Ressourcen, welche unter anderem Arbeitskräfte und Maschinen umfassen, quantifiziert (Lebefromm, 2003, S. 86). Neben der Quantität der Produktionsfaktoren wird auch über die Qualität dieser entschieden (Hintsches, 2012, S. 44). Eine Fluggesellschaft hat demnach beispielsweise zu bestimmen, wie viele Flugzeuge insgesamt und von den verschiedenen Flugzeugtypen anzuschaffen sind (Klein & Steinhardt, 2008, S. 20).

Durch die Definition des Leistungsprogramms wird der Umfang der angebotenen Leistungen festgelegt (Meffert et al., 2018, S. 100). Dies betrifft sowohl die Programmbreite als auch die Programmtiefe. Eine Fluggesellschaft hat folglich bei der Festlegung ihrer Programmbreite beispielsweise zu überlegen, ob neben dem angebotenen Flug auch weitere Leistungen, wie zum Beispiel die Wege zum und/oder vom Flughafen, mit abgedeckt werden sollen. Für die Programmtiefe ist festzulegen, ob die im Rahmen der Programmbreite definierten Leistungen, wie beispielsweise der Flug, hinsichtlich des dabei angebotenen Services und der Qualität noch weiter differenziert werden sollen (Klein & Steinhardt, 2008, S. 19).

Aufbauend auf den in der strategischen Ebene getroffenen Entscheidungen werden in der taktischen Planungsebene die Kapazitäts- und Leistungsgestaltung definiert. Diese können dem RM i.w.S. zugeordnet werden (Kimms & Klein, 2005). So wird im Rahmen der Leistungsgestaltung das zuvor festgelegte Leistungsprogramm weiter konkretisiert, sodass am Markt absetzbare Produkte definiert werden können (Hintsches, 2012, S. 44). Das sogenannte Schedule Design, bei dem festgelegt wird, welche Flugverbindung wie häufig und wann angeboten werden soll (Barnhart & Cohn, 2004), kann als Beispiel für die Leistungsgestaltung einer Fluggesellschaft genannt werden (Klein & Steinhardt, 2008, S. 20). Im Rahmen der Kapazitätsgestaltung wird die zuvor gewählte Kapazitätsstrategie unter Berücksichtigung des Leistungsprogramms weiter konkretisiert. Eine Fluggesellschaft bestimmt beispielsweise, welcher Flugzeugtyp auf welcher Verbindung eingesetzt werden soll. Dabei wird auch von dem sogenannten Fleet Assignment gesprochen (Klein & Steinhardt, 2008, S. 20).

In der taktisch-operativen Planungsebene kommen die Instrumente des RM i.e.S. zum Einsatz (Kimms & Klein, 2005). Der Erfolg dieser Instrumente hängt von den in den höheren Planungsebenen getroffenen Entscheidungen ab (Klein & Steinhardt, 2008, S. 22). Ferner ist festzuhalten, dass sowohl für die Instrumente des RM i.e.S. als auch für die anderen zuvor genannten Instrumente eine geeignete Prognose der entscheidungsrelevanten Daten benötigt wird, auf dessen Basis geplant werden kann (Kimms & Klein, 2005).

3.3.1 Preisdifferenzierung

Die segmentorientierte Preisdifferenzierung baut auf der Marktsegmentierung auf. Die Idee hinter dieser Preisdifferenzierung ist, die gleiche Kernleistung in den verschiedenen Segmenten zu unterschiedlichen

Preisen anzubieten und somit die variierende Zahlungsbereitschaft der Kunden bestmöglich auszunutzen (Hintsches, 2012, S. 45). Das Prinzip der Preisdifferenzierung wird in Abbildung 3.2 verdeutlicht, welche auf der Annahme basiert, dass die Nachfrage größer wird, wenn der Preis sinkt. In der linken Graphik wird die Leistung nur zu einem Preis angeboten. In diesem Beispiel kann mit einem Preis von 50 GE der maximale Umsatz erreicht werden. Wenn die Leistung jedoch in verschiedenen Segmenten zu unterschiedlichen Preisen angeboten wird, wie es in der rechten Graphik der Abbildung 3.2 dargestellt ist, kann der realisierte Umsatz noch weiter erhöht werden. In der RM Literatur wird in diesem Fall auch von einem Produkt je Preis gesprochen, sodass in der rechten Graphik der Abbildung 3.2 vier Produkte angeboten werden, obwohl diese die identische Kernleistung umfassen (Spengler & Rehkopf, 2005). Ferner ist festzuhalten, dass die Preisunterschiede nicht auf unterschiedlich hohe Produktionskosten zurückzuführen sind (Klein & Steinhardt, 2008, S. 42). Durch die Variation der Preise kann zum einen zusätzliche Nachfrage generiert und zum anderen zusätzliche Konsumentenrente abgeschöpft werden (Kimms & Klein, 2005).

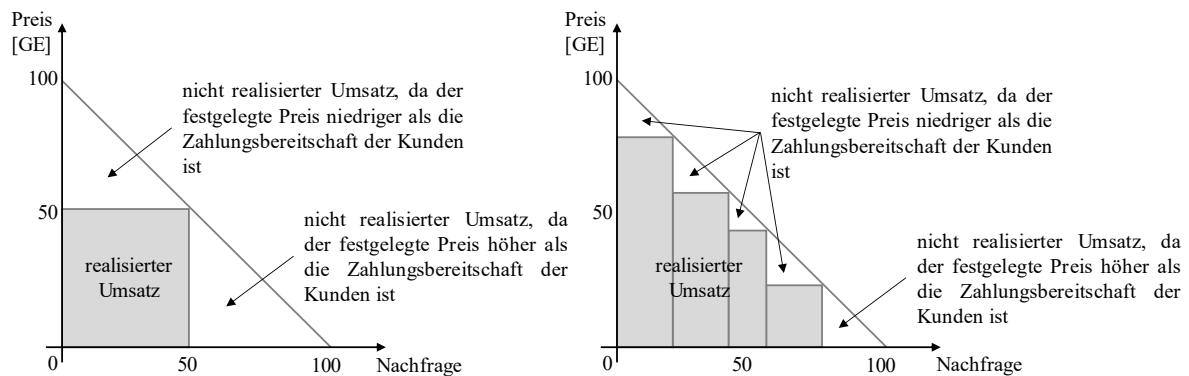


Abbildung 3.2: Prinzip der Preisdifferenzierung nach Spengler und Rehkopf (2005, S. 128)

Bei einer perfekten Preisdifferenzierung wird jedem Kunden entsprechend der individuellen Zahlungsbereitschaft der maximale Preis abverlangt. Aufgrund von organisatorischen und juristischen Gründen ist eine perfekte Preisdifferenzierung jedoch meist ausgeschlossen. Stattdessen kann die Segmentierung auf Basis von räumlichen, zeitlichen, personenbezogenen oder leistungsbezogenen Aspekten vollzogen werden (Klein & Steinhardt, 2008, S. 43 ff.).

Bei einer räumlichen Preisdifferenzierung können die Preise beispielsweise abhängig von dem Ort des Leistungserwerbs oder der Leistungsanspruchnahme variiert werden. Werden die Preise zum Beispiel abhängig von dem Zeitpunkt des Erwerbs festgesetzt, wird von einer zeitlichen Preisdifferenzierung gesprochen. Die personenbezogene Preisdifferenzierung bezieht Daten des Nachfragers, wie beispielsweise Alter, Geschlecht oder Beruf, bei der Preisgestaltung mit ein. Bei der leistungsbezogenen Preisdifferenzierung werden zusätzliche Produktmerkmale, welche jedoch nicht die Kernleistung betreffen, zur Differenzierung hinzugezogen. So kann die Unterscheidung zwischen der Business und Economy Klasse als Beispiel genannt werden (Klein & Steinhardt, 2008, S. 46 f.).

Eine unterschiedliche Bepreisung der Segmente ist jedoch nur sinnvoll, wenn klar voneinander getrennte Segmente definiert werden können und ein Wechsel der Kunden zwischen den verschiedenen Segmenten nicht oder nur eingeschränkt möglich ist (von Martens, 2009, S. 18). Um den Wechsel eines Kunden von einem Segment zu einem anderen und somit die Kannibalisierung des hochwertigeren Produkts zu verhindern, werden effektive Wechselbarrieren, auch Fences genannt, benötigt (Klein & Steinhardt, 2008, S. 44). Diese können beispielsweise unterschiedliche Stornierungsmöglichkeiten umfassen (Sucky, 2009). Aber auch andere Bedingungen, wie beispielsweise eine Mindestaufenthaltsdauer oder, wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, eine gewisse Vorlaufzeit bis zur Leistungserbringung oder ein Aufenthalt übers Wochenende am Zielort, können als Wechselbarrieren fungieren (Defregger & Kuhn, 2007; Klein & Steinhardt, 2008, S. 59; Phillips, 2021, S. 182; Spengler & Rehkopf, 2005).

Der Vollständigkeit halber kann neben der segmentorientierten Preisdifferenzierung auch die mengenorientierte Preisdifferenzierung, bei welcher der Durchschnittspreis von der erworbenen Menge abhängt, genannt werden. Mengenrabatte sind ein Beispiel für eine solche Preisdifferenzierung (Sucky, 2009). Aufgrund der Tatsache, dass der Gesamtpreis nicht proportional mit der erworbenen Menge ansteigt, wird die mengenorientierte Preisdifferenzierung auch als nichtlineare Preisbildung beschrieben (Klein & Steinhardt, 2008, S. 45).

3.3.2 Kapazitätssteuerung

Neben der Preisdifferenzierung zählt auch die Kapazitätssteuerung zu den wichtigsten Instrumenten des RM (Sucky, 2009). Mithilfe dieser soll die Nachfrage bezüglich der verschiedenen Produkte in optimaler Weise der limitierten Kapazität zugeteilt werden (Capocchi, 2019). Folglich stellt die Kapazitätssteuerung ein Instrument zur Annahme- bzw. Ablehnungsentscheidung von Buchungsanfragen dar und unterstützt somit die Umsetzung der segmentorientierten Preisdifferenzierung (Klein & Steinhardt, 2008, S. 69).

Es gibt verschiedene Varianten der Kapazitätssteuerung. Grundsätzlich kann zwischen der mengen- und der erlösorientierten Steuerung differenziert werden (Klein & Steinhardt, 2008, S. 76). Im Folgenden soll die Annahmeentscheidung als mengenorientierte Steuerung anhand von Buchungslimits und als erlösorientierte Steuerung mithilfe von Bid-Preisen erläutert werden. Diese Ansätze werden in weiterentwickelter und an den Anwendungskontext angepasster Form in Kapitel 7 und Kapitel 8 verwendet.

Wie bereits eingangs in Kapitel 3.3 erwähnt, basiert die Kapazitätssteuerung auf einer geeigneten Nachfrageprognose der verschiedenen Produkte (Kimms & Klein, 2005). Dabei ist eine klassische Annahme, dass die Nachfrage nach den unterschiedlichen Produkten unabhängig voneinander ist. Wird das gewünschte Produkt nicht angeboten, verlässt der Nachfrager das System und weicht nicht auf ein Substitut oder ähnliches aus (Gallego & Topaloglu, 2019, S. 3). Eine weitere Annahme der klassischen Kapazitätssteuerung ist, dass kein Upgrade (beispielsweise von Kunden in die nächsthöhere Kategorie) möglich ist. Das bedeutet, dass der Verkauf der verschiedenen Produkte getrennt voneinander betrachtet

wird. Stornierungen oder ähnliches werden in der klassischen Kapazitätssteuerung ebenfalls nicht berücksichtigt. Falls diese mit einbezogen werden sollen, kann auf das Instrument der Überbuchungssteuerung (s. Kapitel 3.3.3) zurückgegriffen werden. Außerdem wird der Wettbewerb zwischen den verschiedenen Anbietern ausgeklammert. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass die Preise der verschiedenen Produkte nicht über den Buchungszeitraum variiert werden² (Klein & Steinhardt, 2008, S. 84 f.).

Bei der mengenorientierten Kapazitätssteuerung wird die limitierte Kapazität in Kontingente unterteilt, sodass jedem Produkt ein spezifisches Kapazitätskontingent zugewiesen wird (Capocchi, 2019, S. 141). Diese Kontingente können auch als einfache Buchungslimits beschrieben werden, anhand derer die Annahmeentscheidungen getroffen werden. Sofern noch ein ausreichend großes Buchungslimit für das angefragte Produkt vorhanden ist, wird die Buchung angenommen. Falls das Buchungslimit erschöpft ist, wird die Buchung abgelehnt (Sucky, 2009).

Für den Fall, dass die Produkte unterschiedlich hohe Kapazitätsbedarfe aufweisen, kann zwischen produktorientierten und kapazitätsorientierten Buchungslimits unterschieden werden. Produktorientierte Buchungslimits geben die Anzahl der absetzbaren Produkte wieder, wohingegen kapazitätsorientierte Buchungslimits die reservierten Kapazitätseinheiten hinsichtlich eines Produkts angeben. Durch die Multiplikation der produktorientierten Buchungslimits mit dem jeweiligen Kapazitätsbedarf können diese in kapazitätsorientierte Buchungslimits umgerechnet werden. Im traditionellen Anwendungsgebiet des RM, dem Passagiertransport der Luftfahrt, entspricht eine Buchungsanfrage einer Person genau einem Sitzplatz und somit genau einer Kapazitätseinheit. Folglich sind die produkt- und kapazitätsorientierten Buchungslimits identisch. In anderen Anwendungsbereichen kann dies jedoch auch unterschiedlich ausfallen. Nach der Annahme einer Buchungsanfrage müssen bei der Verwendung von produktorientierten Buchungslimits letztere um die nachgefragten Mengeneinheiten des Produkts reduziert werden. Bei der Verwendung von kapazitätsorientierten Buchungslimits müssen diese dementsprechend um den benötigten Kapazitätsbedarf reduziert werden (Klein & Steinhardt, 2008, S. 129 f.). Eine Möglichkeit, einfache Buchungslimits zu berechnen, bietet das deterministische lineare Modell nach Klein und Steinhardt (2008, S. 109 f.), welches nachfolgend erläutert wird. Dabei werden produktorientierte Buchungslimits ermittelt.

Die verschiedenen angebotenen Produkte p sind in der Menge P und die zur Leistungserstellung benötigten Ressourcen r in der Menge Res enthalten. Die Kapazität, welche je Ressource r zur Verfügung steht, wird mithilfe des Parameters \overline{CAP}_r abgebildet. Den Kapazitätsbedarf von Produkt p hinsichtlich der Ressource r spiegelt der Parameter \overline{A}_{rp} wider. Die stochastische Nachfrage bezüglich des Produkts

² Wird die Leistung nur zu einem Preis angeboten, welcher wiederum im Laufe der Zeit variiert wird, kann auf das Dynamic Pricing zurückgegriffen werden. Das Dynamic Pricing kann als ein Instrument des RM i.w.S. aufgeführt werden. Für Literatur zum Dynamic Pricing wird beispielhaft auf Capocchi (2019, Kap. 7), Gallego und Topaloglu (2019, Kap. 9), Klein und Steinhardt (2008, Kap. 5), Talluri und Van Ryzin (2004, Kap. 5) verwiesen.

p wird in dem deterministischen linearen Modell durch die erwartete Nachfrage \overline{DF}_p ersetzt. Darüber hinaus wird zur Bestimmung der einfachen Buchungslimits \bar{x}_p noch der Verkaufspreis \overline{SP}_p des Produkts p benötigt. Eine Übersicht über die verwendete Notation bietet die Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Notationstabelle des deterministischen linearen Modells nach Klein und Steinhardt (2008, S. 109 f.)

Mengen		
P		Menge aller Produkte
Res		Menge aller Ressourcen
Parameter		
\bar{A}_{rp}	$r \in Res, p \in P$	Kapazitätsbedarf von Produkt p bezüglich Ressource r
\overline{CAP}_r	$r \in Res$	Zur Verfügung stehende Kapazität von Ressource r
\overline{DF}_p	$p \in P$	Erwartete Nachfrage bezüglich Produkt p
\overline{SP}_p	$p \in P$	Verkaufspreis von Produkt p
Variablen		
\bar{x}_p	$p \in P$	Einfaches (produktorientiertes) Buchungslimit für Produkt p

Das Modell setzt sich aus der Zielfunktion (3.1) und den Nebenbedingungsgruppen (3.2) bis (3.4) zusammen.

$$\max \sum_{p \in P} \overline{SP}_p \cdot \bar{x}_p \quad (3.1)$$

$$\sum_{p \in P} \bar{A}_{rp} \cdot \bar{x}_p \leq \overline{CAP}_r \quad \forall r \in Res \quad (3.2)$$

$$\bar{x}_p \leq \overline{DF}_p \quad \forall p \in P \quad (3.3)$$

$$\bar{x}_p \geq 0 \quad \forall p \in P \quad (3.4)$$

Mithilfe der Zielfunktion (3.1) wird die Summe der Erlöse maximiert. Dazu werden die Verkaufspreise \overline{SP}_p mit den einfachen Buchungslimits \bar{x}_p multipliziert und anschließend über alle Produkte summiert. Durch die Restriktionsgruppe (3.2) wird garantiert, dass für jede Ressource r die zur Verfügung stehende Kapazität \overline{CAP}_r nicht überschritten wird. Die Restriktionsgruppe (3.3) verhindert, dass für ein Produkt p das einfache Buchungslimit \bar{x}_p die erwartete Nachfrage \overline{DF}_p übersteigt. Durch die Nebenbedingungsgruppe (3.4) wird die Nicht-Negativität der Variablen \bar{x}_p gewährleistet.

Allgemein birgt die Verwendung von einfachen Buchungslimits jedoch das Risiko von Umsatzverlusten bzw. Umsatzverdrängungen. Für den Fall, dass die erwartete Nachfrage für höherwertige Anfragen (d.h. für höherwertige Produkte) nicht eintritt und folglich für die höherwertigen Anfragen zu viel Kapazität reserviert wird, führt dies dazu, dass Kapazität ungenutzt bleibt. Allerdings hätte diese Kapazität für

niederwertige Anfragen (d.h. für niederwertige Produkte) genutzt werden können. Folglich kommt es zum Umsatzverlust. Falls jedoch die Nachfrage nach höherwertigen Produkten unterschätzt und demnach zu viel Kapazität für niederwertige Anfragen reserviert wurde, sodass höherwertige Anfragen abgelehnt werden, führt dies zur Umsatzverdrängung (von Martens, 2009, S. 9). Um das Risiko der Umsatzverdrängung zu verringern, wird häufig von einer Schachtelung der einfachen Buchungslimits Gebrauch gemacht. Dabei wird der Nachfrage nach höherwertigen Produkten Zugriff auf die Kontingente der jeweils niederwertigeren Produkte ermöglicht. Das geschachtelte Buchungslimit des hochwertigsten Produkts entspricht der gesamten zur Verfügung stehenden Kapazität, wohingegen das geschachtelte Buchungslimit des niederwertigsten Produkts lediglich das einfache Buchungslimit dieses Produkts umfasst (Phillips, 2021, S. 187 f.). Das Prinzip der geschachtelten Buchungslimits soll mithilfe von Abbildung 3.3 verdeutlicht werden. Das Beispiel ist an den Anwendungsfall des Passagiertransports der Luftfahrtbranche angelehnt, weshalb auf der X-Achse die Kontingente in Sitzplätzen angegeben werden. Auf der Y-Achse wird der Verkaufspreis in Geldeinheiten pro Kapazitätseinheit (GE/KE) abgebildet. Die geschachtelten Buchungslimits werden dabei als $\bar{x}n_p$ bezeichnet. In dem Beispiel werden drei verschiedene Produkte P_1 , P_2 und P_3 angeboten. P_1 spiegelt das hochwertigste Produkt, P_3 das niederwertigste Produkt wider.

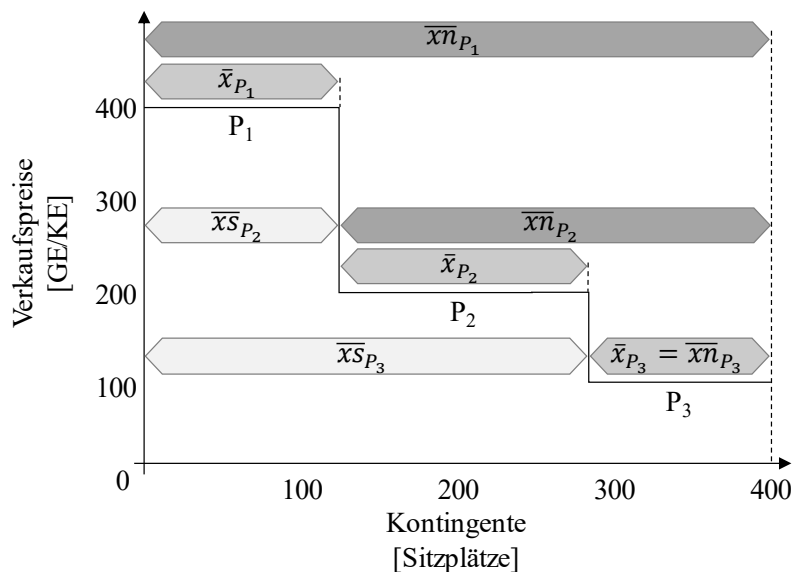


Abbildung 3.3: Darstellung der einfachen, geschachtelten Buchungslimits (\bar{x}_p , $\bar{x}n_p$) und Schutzlimits ($\bar{x}s_p$) nach Klein und Steinhardt (2008, S. 79)

Die Buchungslimits können auch in sogenannte Schutzlimits überführt werden. Wie es die Bezeichnung bereits suggeriert, wird mit einem Schutzlimit $\bar{x}s_p$ die damit verbundene Kapazität vor dem Zugriff des Produkts p geschützt. Folglich entspricht das Schutzlimit $\bar{x}s_p$ eines Produkts p der Kapazität abzüglich der einfachen Buchungslimits $\bar{x}_{p'}$ aller höherwertigen Produkte p' . Für das hochwertigste Produkt p'

existiert kein Schutzlimit, da diesem Produkt p' auf die vollständige Kapazität zugreifen kann und folglich keine Kapazität vor dem Zugriff dieses Produkts p' geschützt werden muss (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 30). Auch dieses Prinzip wird in Abbildung 3.3 veranschaulicht.

Bei Annahme einer Buchungsanfrage sind die Buchungslimits zu reduzieren. Bei einfachen Buchungslimits wird lediglich das Buchungslimit des nachgefragten Produkts reduziert. Bei Verwendung von geschachtelten Buchungslimits kann die Anpassung der Buchungslimits entweder nach dem sogenannten Standard Nesting oder dem sogenannten Theft Nesting erfolgen (Capocchi, 2019, S. 150; Klein & Steinhardt, 2008, S. 132 ff.; Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 30). Zunächst wird die Anpassung der Buchungslimits gemäß dem Standard Nesting, nachfolgend die des Theft Nestings erläutert. Dabei wird zur Verdeutlichung ein kleines Beispiel verwendet, in welchem die vier Produkte P_1 bis P_4 existieren (s. Abbildung 3.4). P_1 stellt das hochwertigste und P_4 das niederwertigste Produkt dar. In dem Beispiel ist das einfache Buchungslimit \bar{x}_p für jedes Produkt gleich eins (orangener Abschnitt in Abbildung 3.4). Die Schachtelung ist in Abbildung 3.4 im blauen Abschnitt dargestellt. In dem Beispiel treffen nacheinander zwei Anfragen nach Produkt P_2 ein (grüner und gelber Abschnitt in Abbildung 3.4). Der Kapazitätsbedarf jeder Anfrage entspricht einer Kapazitätseinheit.

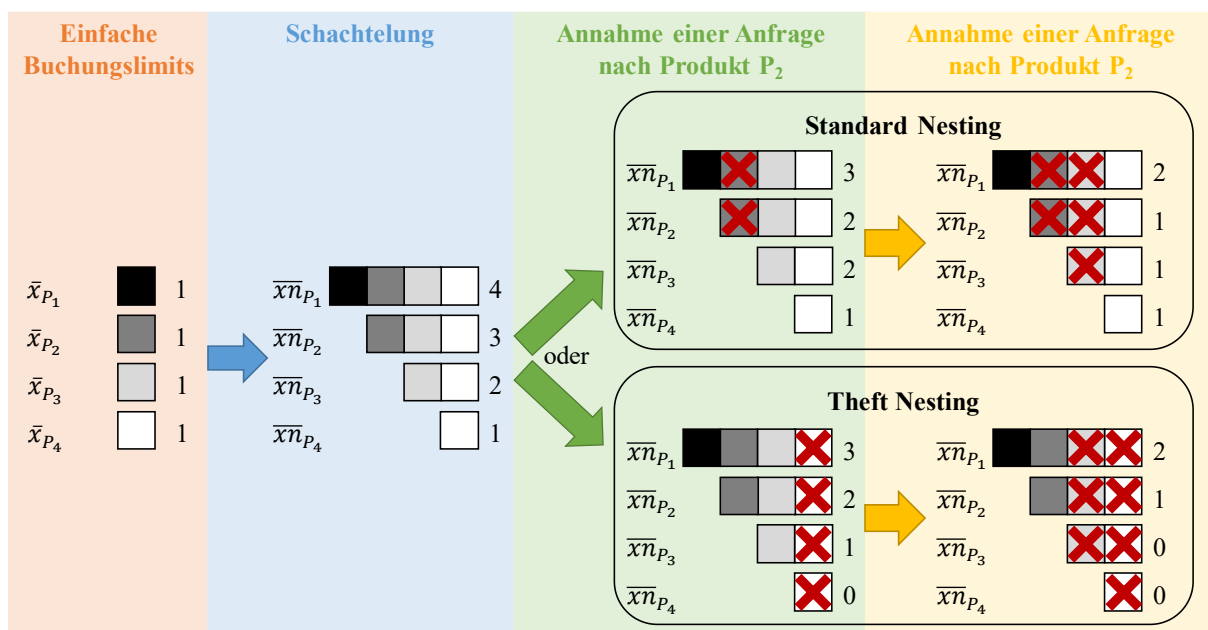


Abbildung 3.4: Beispiel zur Verdeutlichung des Standard und Theft Nestings

Wird die Buchungsanfrage eines Produkts p angenommen, ist beim Standard Nesting zum einen das zugehörige geschachtelte Buchungslimit \bar{x}_{n_p} zu reduzieren. Zum anderen sind die geschachtelten Buchungslimits $\bar{x}_{n_{p'}}$ aller höherwertigen Produkte p' ebenfalls zu vermindern, da das Buchungslimit \bar{x}_{n_p} Teil der geschachtelten Buchungslimits $\bar{x}_{n_{p'}}$ der höherwertigen Produkte p' ist. Eine Anpassung der Buchungslimits $\bar{x}_{n_{p''}}$ der niederwertigen Produkte p'' erfolgt lediglich, wenn diese größer als das geschachtelte Buchungslimit \bar{x}_{n_p} des Produkts p sind. In diesem Fall wird durch die Annahme der

Buchungsanfrage des Produkts p von der Schachtelung der Buchungslimits Gebrauch gemacht und es wird Kapazität genutzt, welche gemäß der einfachen Buchungslimits für ein niederwertiges Produkt p'' reserviert war. Da die genutzte Kapazitätseinheit jedoch auch nicht mehr dem niederwertigen Produkt p'' zur Verfügung steht, ist das zugehörige geschachtelte Buchungslimit $\bar{x}n_{p''}$ ebenfalls zu reduzieren (Klein & Steinhardt, 2008, S. 132). Hinsichtlich des zuvor eingeführten Beispiels bedeutet dies, dass beim Standard Nesting bei der ersten angenommenen Anfrage nach Produkt P_2 (grüner Abschnitt in Abbildung 3.4) das Buchungslimit $\bar{x}n_{P_2}$ um eins reduziert wird. Folglich wird das einfache Buchungslimit \bar{x}_{P_2} genutzt. Da das einfache Buchungslimit \bar{x}_{P_2} jedoch auch Teil des geschachtelten Buchungslimits $\bar{x}n_{P_1}$ des höherwertigen Produkts P_1 ist, wird auch dieses um eins reduziert. Bei der Annahme der zweiten Anfrage nach Produkt P_2 (gelber Abschnitt in Abbildung 3.4) wird von der Schachtelung der Buchungslimits Gebrauch gemacht. Dies kann daran erkannt werden, dass bei der Reduzierung des Buchungslimits $\bar{x}n_{P_2}$ um eins das Buchungslimits $\bar{x}n_{P_3}$ des niederwertigen Produkts P_3 ohne Anpassung mit einem Wert von zwei größer wäre. Demzufolge ist das Buchungslimit $\bar{x}n_{P_3}$ ebenfalls um eins zu reduzieren. Weiterhin ist auch das Buchungslimit $\bar{x}n_{P_1}$ des höherwertigen Produkts P_1 zu verringern. Das Buchungslimit $\bar{x}n_{P_4}$ bleibt unverändert.

Bei dem Theft Nesting hingegen werden neben der Reduzierung des Buchungslimits des zugehörigen Produkts $\bar{x}n_p$ und aller höherwertigen Produkte $\bar{x}n_{p'}$ direkt auch die Buchungslimits der niederwertigen Produkte $\bar{x}n_{p''}$ verringert. Folglich werden immer alle Buchungslimits reduziert (Gallego & Topaloglu, 2019, S. 33). Somit wird durch die Annahme der Buchungsanfrage hinsichtlich des Produkts p unmittelbar Kapazität der niederwertigen Produkte p'' gestohlen, bevor die eigentlich dem Produkt p zugewiesene Kapazität verwendet wird (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 30). Demzufolge werden mithilfe des Theft Nestings tendenziell eher Buchungsanfragen der niederwertigen Produkte abgelehnt, in der Hoffnung, dass mehr Kapazität für Anfragen nach höherwertigen Produkten genutzt werden kann (Phillips, 2021, S. 189). Bezogen auf das Beispiel aus Abbildung 3.4 bedeutet dies, dass bei beiden Annahmen der Anfragen bezüglich des Produkts P_2 unmittelbar von der Schachtelung Gebrauch gemacht wird. Folglich sind alle geschachtelten Buchungslimits $\bar{x}n_p$ um eins zu reduzieren. Zuerst wird das einfache Buchungslimit \bar{x}_{P_4} des niederwertigsten Produkts P_4 verwendet (grüner Abschnitt in Abbildung 3.4). Für die Annahme der zweiten Anfrage wird das einfache Buchungslimit \bar{x}_{P_3} des Produkts P_3 genutzt. Aus diesem Grund steht nach der Annahme der zweiten Anfrage nach Produkt P_2 keine Kapazität mehr für die niederwertigen Produkte P_3 und P_4 zur Verfügung, was bei Verwendung des Standard Nestings noch der Fall ist (gelber Abschnitt in Abbildung 3.4). Ein weiteres, größeres Beispiel zum Vergleich des Standards Nestings und des Theft Nestings ist dem Anhang A zu entnehmen.

Das Theft Nesting bietet sich an, wenn die Nachfrage in aufsteigender Wertigkeit und somit zuerst die Nachfrage nach den niederwertigen und anschließend nach den höherwertigen Produkten eintrifft. Das Standard Nesting hingegen kann ebenfalls angewendet werden, wenn die Nachfrage in einer beliebigen

bzw. ungewissen Reihenfolge eintritt (Klein & Steinhardt, 2008, S. 134 f.). Da nicht immer davon ausgegangen werden kann, dass zuerst die Nachfrage der niederwertigen und anschließend die der höherwertigen Produkte eintritt, können in der Regel mit dem Standard Nesting in der Praxis größere Erfolge erzielt werden (Gallego & Topaloglu, 2019, S. 33; Phillips, 2021, S. 189).

Wie bereits zuvor erwähnt, kann neben der mengenorientierten Kapazitätssteuerung auch eine erlösorientierte Kapazitätssteuerung für die Annahme- bzw. Ablehnungsentscheidung der Buchungsanfragen verwendet werden. Dabei wird eine Preisuntergrenze bestimmt, anhand derer die Annahmeentscheidung getroffen wird. Entspricht der Erlös einer Anfrage mindestens dieser Preisuntergrenze, wird die Buchungsanfrage angenommen. Folglich werden die verschiedenen Produkte zwei Teilmengen in Abhängigkeit der Preisuntergrenze und der jeweiligen Erlöse pro Produkt zugeordnet. In der einen Teilmenge sind die Produkte, deren Erlös mindestens der Preisuntergrenze entspricht und die bei ausreichender Kapazität angenommen werden, in der anderen Teilmenge sind die Produkte, bei welchen der Erlös die Preisuntergrenze unterschreitet und die folglich abgelehnt werden. Innerhalb der zwei Teilmengen gibt es keine Priorisierung der verschiedenen Produkte (Klein & Steinhardt, 2008, S. 80). Die erlösorientierte Steuerung kann für den Anwender vom Prinzip her als einfacher empfunden werden, da lediglich der Erlös einer Buchungsanfrage mit der Preisuntergrenze zu vergleichen ist. Für eine effektive erlösorientierte Kapazitätssteuerung sollte die Preisuntergrenze jedoch regelmäßig, beispielsweise nach jeder Buchung und/oder innerhalb bestimmter Zeitabschnitte, neu bestimmt werden. Je nach verbleibender Zeit vom Buchungshorizont und zur Verfügung stehender Kapazität kann die Preisuntergrenze variieren (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 31 f.). Darüber hinaus ist anzumerken, dass die notwendigen Neuberechnungen der Preisuntergrenze mit Aufwand verbunden sind (Klein & Steinhardt, 2008, S. 104).

Als Preisuntergrenze können sogenannte Bid-Preise fungieren, die als Approximation der Opportunitätskosten dienen. Eine genaue Bestimmung der Opportunitätskosten ist sehr komplex, weshalb die Verwendung einer Approximation in der Literatur weit verbreitet ist (s. bspw. Hintsches et al., 2010; Klein & Steinhardt, 2008, S. 76; Phillips, 2021, S. 248). Ausschlaggebend für die Berechnung der Bid-Preise sind die Schattenpreise der Kapazitätsrestriktionen eines linearen Modells (Phillips, 2021, S. 248). So können mithilfe der Restriktionsgruppe (3.2) Schattenpreise bezüglich der Kapazität der einzelnen Ressourcen r ermittelt werden (Gallego & Topaloglu, 2019, S. 55). Wird der Schattenpreis einer Ressource r mit dem Kapazitätsbedarf \bar{A}_{rp} eines Produkts p multipliziert und anschließend über alle benötigten Ressourcen r summiert, kann die Preisuntergrenze, welche gemäß der erlösorientierten Steuerung ausschlaggebend für die Annahmeentscheidung ist, errechnet werden (Hintsches et al., 2010). Ist der Kapazitätsbedarf aller Produkte identisch, so ergibt sich ein allgemeingültiger Bid-Preis, andernfalls existiert pro Produkt p jeweils ein Bid-Preis. Zusätzlich sollte noch überprüft werden, ob im Allgemeinen ausreichend Kapazität für die Annahme der Buchungsanfrage vorhanden ist (Gallego & Topaloglu, 2019, S. 57).

Um die Effektivität der ausgeführten Kapazitätssteuerung zu messen, wird als Benchmark in der RM Literatur häufig die Annahmeentscheidung nach dem First-Come-First-Served (FCFS) Prinzip hinzugezogen (s. bspw. Amaruchkul et al., 2007; Balakrishnan et al., 1996; Barut & Sridharan, 2005; Graf & Kimms, 2011; Hintsches et al., 2010; Rizzo et al., 2020). Dabei werden die Anfragen in der Reihenfolge, in der sie eintreffen, akzeptiert, bis die Kapazität erschöpft ist (Balakrishnan et al., 1996). FCFS kann als gieriges, bzw. „greedy“ Verfahren beschrieben werden, da bei vorhandener Kapazität Anfragen direkt akzeptiert werden, statt zu warten und die Kapazität für eventuell später eintreffende höherwertigere Nachfrage zu reservieren (Rizzo et al., 2020).

3.3.3 Überbuchungssteuerung

Die Überbuchungssteuerung zählt ebenfalls zu den Instrumenten des RM i.e.S. (Kimms & Klein, 2005) und fand sogar bereits vor der Verbreitung des RM Einsatz (Klein & Steinhardt, 2008, S. 149). Talluri und Van Ryzin (2004, S. 129) beschreiben die Überbuchungssteuerung daher als das älteste Instrument des RM. Mithilfe von gezielter Überbuchung der Kapazität soll Stornierungen und sogenannten No-Shows entgegengewirkt werden. Bei beiden wird die gebuchte Leistung nicht in Anspruch genommen, jedoch wird der Leistungsanbieter bei Stornierungen im Vorwege über die Nichtinanspruchnahme informiert, was bei No-Shows ausbleibt (Phillips, 2021, S. 273). Früher durften Stornierungen häufig kostenfrei vom Kunden durchgeführt werden und auch No-Shows wurden meist nicht bestraft. Schätzungen nach zu urteilen, führte dies bei American Airlines dazu, dass circa 50% der getätigten Buchungen nicht zur Leistungsbeanspruchung führten. Bei Abflug blieben ohne Überbuchung meist bis zu 15% der Sitzplätze ungenutzt (Smith et al., 1992).

Die größte Herausforderung der Überbuchungssteuerung ist, das richtige Maß der Überbuchung zu ermitteln. Wenn die Kapazität zu sehr überbucht wird und zum Zeitpunkt der Leistungsanspruchnahme mehr Kunden als erwartet erscheinen, sodass manchen von ihnen die Leistung verwehrt werden muss, hat dies negative Konsequenzen für den Anbieter (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 130). Es kommt zu sogenannten Denied Boardings, welche für den Anbieter mit Kosten verbunden sind. Den Kunden, denen die Leistungsanspruchnahme verwehrt wird, wird in der Regel eine Kompensation und ein Rabatt für zukünftige Buchungen angeboten bzw. eine Entschädigung gezahlt (Gallego & Topaloglu, 2019, S. 83). In den meisten Ländern ist die Höhe der an den Kunden zu zahlenden Entschädigungen gesetzlich festgehalten (Klein & Steinhardt, 2008, S. 151). Jedoch können für den Leistungsanbieter die Kosten des Denied Boardings unterschiedlich hoch ausfallen. Wenn ein Kunde beispielsweise noch auf einen späteren Flug am gleichen Tag umgebucht werden kann und somit nur eine Verspätung von einigen Stunden erfährt, wird ihm als Kompensation beispielsweise auf Kosten der Fluggesellschaft eine Mahlzeit am Flughafen ausgegeben. Wenn jedoch ein Kunde bei dem letzten Flug des Tages nicht mitgenommen werden kann, muss dem Kunden auf Kosten der Fluggesellschaft eine Hotelübernachtung bezahlt werden. Dazu kommt generell noch das verletzte Vertrauen des Kunden in den Leistungsanbieter, was sich eventuell bei späteren Buchungen des Kunden auf die Wahl des Leistungsanbieters

auswirken kann. Mithilfe von Auktionen können jedoch auch die Kunden identifiziert werden, die eine Verwehrung der Leistung eher akzeptieren. Folglich kann damit die Anzahl der unfreiwilligen Denied Boardings reduziert werden (Gallego & Topaloglu, 2019, S. 83 f.). Um allgemein die Anzahl der Stornierungen und No-Shows zu reduzieren, wurde zudem bei manchen Anbietern die Rückerstattungs-politik an bestimmte Bedingungen oder Produkte geknüpft (Klein & Steinhardt, 2008, S. 150).

Neben Stornierungen und No-Shows kann es beispielsweise in der Hotelbranche oder dem Mietwagenverleih zu Verkürzungen oder Verlängerungen der Aufenthaltsdauer bzw. des Mietzeitraums kommen. Auch diese beeinflussen die Auslastungen der Kapazität (von Martens, 2009, S. 14). Folglich kann die Überbuchungssteuerung ebenfalls eingesetzt werden, wenn die zukünftig zur Verfügung stehende Kapazität mit Unsicherheit behaftet ist (Phillips, 2021, S. 276).

Generell bietet sich das Instrument der Überbuchungssteuerung an, wenn die Kapazität verderblich ist und die Buchung der Leistung vor der Inanspruchnahme eintritt, was allgemein zu den Anwendungsvoraussetzungen des RM zählt (s. Kapitel 3.2). Des Weiteren sollten Stornierungen bzw. die spontane Nichtinanspruchnahme möglich sein, denn wenn die Leistung immer in Anspruch genommen wird, ist eine Überbuchung der Kapazität nicht sinnvoll. Ferner sollten die Kosten, die bei der Leistungsverweh- rung direkt und indirekt an den Kunden zu zahlen sind, relativ gering sein. Aus diesem Grund ist eine Überbuchung nicht in allen Anwendungsbereichen des RM geeignet. Kreuzfahrten werden beispielsweise in der Regel nicht überbucht, da eine direkte Kompensation durch gleichwertige Kreuz- fahrten hinsichtlich der Ausstattung, der Reiseziele und des Zeitraums häufig nicht möglich ist. Ferner wird das Vertrauen in den Anbieter sehr stark negativ beeinflusst, wenn für einen Kunden der geplante Urlaub wegen einer Überbuchung nicht stattfinden kann. Um trotzdem eine hohe Kapazitätsauslastung zu erreichen, werden die Stornierungsgebühren und die Preise im Allgemeinen von den Anbietern meist recht hoch angesetzt (Phillips, 2021, S. 276 f.).

Insgesamt wird schnell deutlich, dass die Überbuchungssteuerung sehr eng mit der Kapazitätssteuerung verknüpft ist und diese beeinflusst, wie es auch die Abbildung 3.1 der Zuordnung der Instrumente des RM zu den Planungsebenen bereits verdeutlicht hat. Wenn Überbuchungen erlaubt sind, können bei der mengenorientierten Kapazitätssteuerung die geschachtelten Buchungslimits – zumindest das geschach- telte Buchungslimit des hochwertigsten Produkts – die zur Verfügung stehende Kapazität übersteigen (Gallego & Topaloglu, 2019, S. 83). Bei der erlösorientierten Steuerung können Stornierungen einen starken Effekt auf die ermittelte Preisuntergrenze ausüben. Mit der Annahme einer Buchungsanfrage steigt in der Regel die Preisuntergrenze, da die begrenzte Kapazität weiter verknappt wird. Durch eine Stornierung sinkt die Preisuntergrenze wiederum (Phillips, 2021, S. 223). Folglich sollten generell bei der Anwendung der Überbuchungssteuerung die Vor- und Nachteile im betrachteten Anwendungsgebiet gegeneinander abgewogen werden.

Alles in allem bietet das RM für viele verschiedene Dienstleistungsbranchen und Branchen mit Dienstleistungscharakter vielversprechende Instrumente, mit deren Hilfe die begrenzte Kapazität erlösmaximierend genutzt werden kann. Inwiefern die Anwendung des RM im Bereich der MTO Produktion möglich ist und welche Forschungsergebnisse in diesem Bereich bereits erzielt wurden, wird im Rahmen des nachfolgenden Kapitels erörtert.

4 Revenue Management in der Make-to-Order Produktion

Um zu zeigen, dass das RM in der MTO Produktion anwendbar ist, wird in Kapitel 4.1 auf die Erfüllung der Anwendungsvoraussetzungen eingegangen. Anschließend werden in Kapitel 4.2 die Besonderheiten des RM in der MTO Produktion im Vergleich zu den klassischen Anwendungsgebieten aufgezeigt. Der aktuelle Stand der Forschung des in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsgebiets wird in Kapitel 4.3 vorgestellt.

4.1 Überprüfung der Anwendungsvoraussetzungen

Auch in diesem Kapitel werden, wie in Kapitel 3.2, zuerst die kapazitätsbezogenen und anschließend die nachfragebezogenen Anwendungsvoraussetzungen betrachtet und darüber hinaus auf ihre Erfüllung in der MTO Produktion untersucht. Als erste Voraussetzung wird die einer „*weitgehend*“ fixen Kapazität überprüft. Auf den ersten Blick scheint diese Voraussetzung für die MTO Produktion nicht zwangsläufig erfüllt, da zum Beispiel durch Überstunden oder durch Fremdvergabe von Aufträgen die Produktionskapazität flexibel erweiterbar wirkt. Allerdings ist dies in der Regel nur sehr begrenzt möglich (Harris & Pinder, 1995). Eine Fremdvergabe von Aufträgen ist meist mit einer bestimmten Mindestmenge verknüpft (Hintsches, 2012, S. 60) und auch Überstunden sind oftmals nur in einem begrenzten Umfang – wenn überhaupt – möglich und vertretbar (Harris & Pinder, 1995). Folglich kann nicht spontan die Produktionskapazität erweitert werden, sondern es bedarf einer gewissen Vorlaufzeit (Hintsches, 2012, S. 60). Auch die interne Erweiterung der Kapazität durch Zukauf von beispielsweise weiteren Maschinen ist kurzfristig nicht praktikabel. Zusätzlich wird in der Regel neben neuen Maschinen noch weiteres geschultes Personal zur Bedienung der Maschinen benötigt. Demnach ist eine Kapazitätserhöhung auch in der Produktion sprunghaft und kostenintensiv (Barut & Sridharan, 2005). Ein Überangebot sollte vermieden werden, da dies mit verlorenem Deckungsbeitragspotenzial gleichgesetzt werden kann (Hintsches, 2012, S. 60). Oftmals ist eine Erweiterung des Kapazitätsumfangs daher eher ausgeschlossen (Barut & Sridharan, 2005). Die enge Verplanung der Kapazität in Kombination mit der schwankenden Nachfrage führt jedoch zu Kapazitätsengpässen, in denen nicht die vollständige Nachfrage bedient werden kann (Guhlich et al., 2015b, Hintsches et al., 2010). Folglich ist eine Entscheidung bezüglich der Annahme bzw. Ablehnung von Produktionsaufträgen von Relevanz, da nicht alle Aufträge angenommen und bearbeitet werden können (Sucky, 2009). Generell kann die Kapazität in der MTO Produktion somit kurzfristig gesehen als „*weitgehend*“ fix und knapp im Vergleich zur Nachfrage

betrachtet werden (Spengler & Rehkopf, 2005). Erschwerend kommt hinzu, dass nach dem MTO Prinzip produzierende Unternehmen dazu tendieren, mehr Aufträge anzunehmen, als es die begrenzte Kapazität erlaubt (Wortmann, 1992).

Darüber hinaus kann die Produktionskapazität als verderblich angesehen werden, da ungenutzte Maschinenstunden nicht zu einem späteren Zeitpunkt genutzt werden können (Barut & Sridharan, 2005). Zwar ist das Produkt selber in der Regel lagerfähig, aber nicht die Fähigkeit, dies zu produzieren (Hintsches et al., 2010). Zusätzlich kann auch das Produkt obsolet werden und somit an Wert verlieren. Demzufolge kann ebenfalls das hergestellte Produkt in gewisser Hinsicht als verderblich betrachtet werden (Kroll, 1999). Dadurch, dass in der MTO Produktion die Vorratsproduktion per Definition ausgeschlossen ist, können bisher ungenutzte Maschinenstunden auch nicht für zukünftige, noch nicht eingetroffene Aufträge verwendet werden (Rehkopf & Spengler, 2005).

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, wird das MTO Prinzip oftmals eingesetzt, um Kosten einzusparen (Gallien et al., 2004). Bereits dieser Aspekt kann als Indikator für hohe Kosten in der Produktion angesehen werden. Aufgrund der hohen Fixkosten, welche mit der Bereitstellung der Kapazität verbunden sind, wird diese sehr dicht verplant. Ungenutzte Kapazitäten sind nicht nur verderblich, sondern auch sehr kostspielig (Guhlich et al., 2015b). Folglich kann der erste Teil der kapazitätsbezogenen Voraussetzung – die hohen Fixkosten im Vergleich zu niedrigen Grenzkosten – als erfüllt erachtet werden. Jedoch sind die variablen Kosten in der Produktion nicht vernachlässigbar und besitzen meist einen signifikanten Anteil an den Gesamtkosten, weshalb nicht von niedrigen Grenzkosten ausgegangen werden kann. Dies bedeutet jedoch nicht, dass das RM in der MTO Produktion aus diesem Grund nicht anwendbar ist. Vielmehr folgt daraus, dass die variablen Kosten bei der Auftragsannahmeentscheidung berücksichtigt werden sollten (Spengler & Rehkopf, 2005). Insgesamt können somit alle kapazitätsbezogenen Voraussetzungen als hinreichend erfüllt betrachtet werden. Nachfolgend wird die Erfüllung der nachfragebezogenen Kriterien überprüft.

Das Prinzip der MTO Produktion wird, wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, insbesondere bei einer hohen Variantenvielfalt angewendet. Aufgrund dieser kann die Nachfrage als heterogen beschrieben werden. Im Extremfall werden sogar Unikate hergestellt, welche zu einem individuell vereinbarten Preis verkauft werden und folglich einen individuellen Wert für das produzierende Unternehmen besitzen (Müller-Bungart, 2007, S. 14). Ferner ist es ebenfalls möglich, das gleiche Produkt zu unterschiedlich hohen Preisen zu verkaufen (Barut & Sridharan, 2005). Nicht nur die Nachfrage an sich, sondern auch die Kundschaft kann als heterogen beschrieben werden. Sie kann unter anderem hinsichtlich ihrer strategischen Bedeutung und somit ihres Kundenwertes für das Unternehmen, der Zahlungsbereitschaft und auch bezüglich ihrer zeitlichen Flexibilität bzw. Toleranz angesichts der gewünschten Lieferzeiten differenziert werden (Guhlich et al., 2015b). Demnach kann auch dieses Anwendungskriterium als erfüllt angesehen werden.

Neben der Heterogenität der Nachfrage ist eine weitere Voraussetzung, dass die Nachfrage mit Unsicherheit behaftet ist und als schwankend und stochastisch bezeichnet werden kann. Dieses Kriterium ist bei der MTO Produktion ebenfalls erfüllt. Aufgrund der unsicheren Nachfrage werden die Produkte nicht im Voraus produziert, sondern erst mit einem angenommenen Kundenauftrag (Guhlich et al., 2015b). Auch Schwankungen der Nachfrage sind in der MTO Produktion zu beobachten (Defregger & Kuhn, 2007). Diese Schwankungen beziehen sich zum einen auf die Wertigkeit und zum anderen auf die zeitliche Verteilung der Nachfrage (Spengler & Rehkopf, 2005). Folglich sind die Instrumente des RM hilfreich, um eine effiziente Kapazitätsbelegung zu unterstützen bzw. zu ermöglichen (Hintsches, 2012, S. 59).

Die Möglichkeit der Vorausbuchung ist ebenfalls ein Kriterium für eine erfolgreiche Anwendung des RM. Auch in der MTO Produktion werden Aufträge vor der eigentlichen Leistungserstellung, der Produktion des gefragten Produkts, erteilt. Trotz des Zeitverzugs bis zum Produktionsbeginn ist die Auftragsannahmeentscheidung in der Regel unmittelbar zu treffen (Harris & Pinder, 1995). Meist werden darüber hinaus mit dem Auftrag gewünschte Liefertermine angegeben, sodass die Leistungserstellung möglichst bis zu einem bestimmten Zeitpunkt erfolgen soll (Spengler & Rehkopf, 2005). Dementsprechend wird die Leistung, ein Produkt innerhalb eines bestimmten Zeitraums herzustellen, im Voraus gebucht (Rehkopf & Spengler, 2005).

Wie bereits zuvor mehrfach erwähnt, wird die Produktion nach dem MTO Prinzip erst durch einen angenommenen Auftrag angestoßen. Dadurch ist die Integration eines externen Faktors, welche eine weitere Anwendungsvoraussetzung widerspiegelt, gegeben (Müller-Bungart, 2007, S. 13). Folglich werden für die Produktion kundenindividuelle Informationen benötigt. Diese können sich unter anderem auf die Qualität, Quantität und die Produktausprägungen im Allgemeinen beziehen. Auch Angaben zu gewünschten Lieferterminen können bei der Auftragsannahmeentscheidung von großer Relevanz sein (Hintsches et al., 2010; Rehkopf, 2006, S. 45).

Ein standardisiertes Leistungsprogramm scheint insbesondere bei der Anfertigung von Unikaten zunächst nicht gegeben zu sein (Hintsches, 2012, S. 63). Wenn jedoch lediglich der benötigte Kapazitätsbedarf der verschiedenen, herzustellenden Produkte betrachtet wird, können im Endeffekt auch individuelle Produkte in Clustern zusammengefasst und somit kann ein standardisiertes Leistungsprogramm definiert werden. Dies ist notwendig für die Erstellung von Nachfrageprognosen (Müller-Bungart, 2007, S. 14). Aufgrund der Schwankungen, Heterogenität und generellen Unsicherheit der Nachfrage sind genaue Vorhersagen nicht möglich (Bauernhansl, 2017, S. 9). Mithilfe von historischen Daten kann die zukünftige Nachfrage jedoch abgeschätzt werden (Harris & Pinder, 1995). Aufgrund der Verwendung von ERP-Systemen in der Produktionslogistik, aber auch allgemein des Supply Chain Managements und des Customer Relationship Managements liegen zahlreiche Daten vor, welche für Prognosen genutzt werden können (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 17). Ferner ist es ebenfalls möglich,

Produktionsdaten, wie beispielsweise Bearbeitungszeiten, aus ähnlichen, bereits in der Vergangenheit hergestellten Produkten abzuleiten (Hintsches, 2012, S. 63).

Somit sind auch die nachfragebezogenen Voraussetzungen erfüllt. Demzufolge ist die Anwendung des RM in der MTO Produktion möglich (Spengler & Rehkopf, 2005). Jedoch bringt das Anwendungsgebiet der MTO Produktion auch einige Besonderheiten im Vergleich zu den klassischen Anwendungsgebieten mit sich, welche im folgenden Unterkapitel diskutiert werden.

4.2 Besonderheiten im Vergleich zu klassischen Anwendungsgebieten

Bei der Überprüfung der Anwendungsvoraussetzungen ist bereits eine Besonderheit der MTO Produktion deutlich geworden. Bei den klassischen Anwendungsgebieten sind die variablen Kosten im Vergleich zu den hohen Fixkosten vernachlässigbar. Wie bereits im vorherigen Kapitel kurz erläutert, sollten die variablen Kosten in der MTO Produktion jedoch berücksichtigt werden, da diese oftmals einen signifikanten Anteil der Gesamtkosten ausmachen (Spengler & Rehkopf, 2005). Allerdings ist es in der MTO Produktion einfacher, einem Auftrag die durch diesen Auftrag verursachten variablen Kosten zuzuordnen, als es beispielsweise bei einem Passagier im Passagiertransport der Luftfahrtbranche der Fall ist (Klein & Steinhardt, 2008, S. 35). Durch die notwendige Berücksichtigung der variablen Kosten kann wiederum nicht mehr die Erlösmaximierung als Approximation für die Gewinnmaximierung angestrebt werden, stattdessen sollte die Deckungsbeitragsmaximierung als Zielsetzung verfolgt werden (Hintsches, 2012, S. 65). Dies bedeutet weiterhin, dass das RM in der MTO Produktion angewendet werden kann, jedoch auch, dass es aufgrund der im Vergleich zu den klassischen Anwendungsgebieten zusätzlichen Berücksichtigung von Kosten komplexer ist (Rehkopf & Spengler, 2005).

Eine weitere Besonderheit im Vergleich zum Passagiertransport der Luftfahrtbranche ist der unbegrenzte Zeithorizont. Dies ermöglicht in der MTO Produktion eine größere Flexibilität der Kapazitätsnutzung, wohingegen in dem Passagiertransport der Luftfahrtbranche die Kapazitätsnutzung eines bestimmten Fluges mit dem Abflugzeitpunkt endet (Hintsches, 2012, S. 64). Jedoch ist der Aspekt des unbegrenzten Zeithorizonts nicht im Vergleich zu allen klassischen Anwendungsgebieten eine Besonderheit. Beispielsweise kann in der Hotellerie ebenfalls von einem „zeitlich offenen Entscheidungsfeld“ gesprochen werden (Klein & Steinhardt, 2008, S. 35). Im Gegensatz zu der Hotellerie, wo die Übernachtungen und somit die Kapazitätsnutzung fest eingeplant sind, bleibt in der MTO Produktion die Kapazitätsnutzung allerdings in gewisser Hinsicht flexibel. Solange der dem Kunden genannte Fertigstellungszeitpunkt eingehalten wird, kann der Produktionsbeginn im Laufe der Zeit noch verschoben werden (Guhlich et al., 2015b). Der Kunde erhält dementsprechend das Versprechen, dass das Produkt innerhalb eines bestimmten Zeitraums fertiggestellt wird (Hintsches, 2012, S. 64). Eine Verschiebung von Produktionsdaten kann zum Beispiel von Vorteil sein, wenn dadurch die Annahme eines weiteren Auftrags, der beispielsweise schon zu einem früheren Zeitpunkt fertiggestellt werden muss, ermöglicht

wird (Guhlich et al., 2015b). Darüber hinaus ist eine Besonderheit in der MTO Produktion, dass Verspätungen erlaubt sind. Diese sind jedoch mit Kosten für das produzierende Unternehmen verbunden (Barut & Sridharan, 2005). Dabei sollte berücksichtigt werden, dass Verspätungen einen negativen Einfluss auf die Kundenzufriedenheit haben können (Guhlich et al., 2015b). Folglich bedarf es einer guten Einschätzung, von welchem Kunden eine verspätete Fertigstellung eher geduldet wird. Im Passagiertransport der Luftfahrtbranche kommt eine (signifikante) Verspätung in der Regel nur vor, wenn ein Passagier aufgrund der Überbuchung auf einen späteren Flug umgebucht wird. Dieser Fall sollte jedoch möglichst mit einer effizienten Überbuchungssteuerung vermieden werden. Insgesamt bedeutet dies für die MTO Produktion, dass nach der Annahme eines Auftrags, eine Integration dessen in die Produktionsplanung notwendig ist (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 575 f.). Somit ist neben der klassischen Annahmeentscheidung auch eine Planungsentscheidung erforderlich, wenn das Produkt zu einem bestimmten Zeitpunkt fertiggestellt werden soll (Guhlich et al., 2015b).

Bei der Überprüfung der Anwendungsvoraussetzungen wurde bereits gezeigt, dass die Kapazität ebenfalls, wie in den klassischen Anwendungsgebieten, verderblich ist. Allerdings gilt dies nicht zwangsläufig für alle für die Produktion notwendigen Ressourcen. Manche Ressourcen, wie beispielsweise Materialien, sind lagerfähig und stehen somit auch zu einem späteren Zeitpunkt noch zur Verfügung. In einigen Branchen, wie zum Beispiel der Hightech-Industrie, können jedoch auch Materialien schnell an Wert verlieren und somit in gewisser Weise ebenfalls verderblich sein (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 575). Gleiches gilt für die hergestellten Produkte. Im klassischen Dienstleistungsbereich kann das angebotene Produkt nicht gelagert werden, wohingegen in der MTO Produktion die Lagerung des Endprodukts in der Regel möglich ist. Allerdings kann die Leistung – also die Produktion an sich – nicht gelagert werden (Hintsches et al., 2010).

Ein deutlicher Unterschied im Vergleich zum Passagiertransport der Luftfahrtbranche ist der unterschiedliche Kapazitätsbedarf je Buchung bzw. Auftrag. Im Passagiertransport der Luftfahrtbranche entspricht eine Buchungsanfrage genau einer Kapazitätseinheit – nämlich einem Sitzplatz –, wohingegen der Kapazitätsbedarf in der Produktion von Auftrag zu Auftrag sehr stark variieren kann (Hintsches, 2012, S. 65). Folglich bietet sich in der MTO Produktion bei der mengenorientierten Kapazitätssteuerung aufgrund des unterschiedlichen Kapazitätsbedarfs eher die Verwendung von kapazitätsorientierten als von produktorientierten Buchungslimits an (Klein & Steinhardt, 2008, S. 79). Dazu kommt noch der Aspekt, dass in der Produktion mit unterschiedlichen Maschinen bzw. Technologien das gleiche Produkt unterschiedlich schnell hergestellt werden kann (ebd. 2008, S. 35).

Darüber hinaus ist das Verhältnis zu den Kunden in der MTO Produktion anders, als es bei den klassischen Anwendungsgebieten der Fall ist. In den klassischen Anwendungsgebieten kann die Geschäftsbeziehung in der Regel als Business-to-Customer beschrieben werden, wohingegen in der MTO Produktion hauptsächlich im Business-to-Business Bereich Aufträge erteilt werden (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 575). Aufgrund von kundenindividuellen Preisverhandlungen sollten die Kunden

folglich bei der Kapazitätssteuerung berücksichtigt werden und es sollten nicht nur kundenanonyme Entscheidungen getroffen werden. Somit ist es die Aufgabe des Vertriebs, die individuelle Zahlungsbereitschaft bei Preisverhandlungen bestmöglich auszunutzen (Hintsches, 2012, S. 65). In der Regel kommt in der MTO Produktion der die Kapazitätssteuerung erschwerende Aspekt hinzu, dass die wichtigen Kunden, welche einen hohen Kundenwert aufweisen, aufgrund von beispielsweise Rahmenverträgen Aufträge zu vergünstigten Konditionen erteilen können (Sucky, 2009). Allerdings tragen insbesondere Kunden mit einem hohen Kundenwert zur langfristigen Sicherung des Unternehmens bei, da ein Großteil des Gesamtumsatzes aus den durch diese Kunden generierten Umsätzen besteht (Pfohl, 2018, S. 36), wie es bereits in Kapitel 2.2 kurz thematisiert wurde. Bei einer reinen Deckungsbeitragsmaximierung könnte es demzufolge dazu kommen, dass vorwiegend die Aufträge der Kunden mit einem hohen Kundenwert aufgrund des im Verhältnis zu weniger wichtigen Kunden geringeren Deckungsbeitrags abgelehnt werden. Um dies zu verhindern, sollten auch Serviceziele für die verschiedenen Kunden(-segmente) angestrebt werden. Folglich ist ein Kompromiss zwischen den konkurrierenden Zielen zu finden, um auf der einen Seite die Deckungsbeitragsmaximierung zu verfolgen und auf der anderen Seite die Beziehung besonders zu den wichtigen Kunden mit einem hohen Kundenwert zu bewahren. Auf diese Besonderheit der MTO Produktion weist insbesondere Sucky (2009) deutlich hin, aber auch Mohaupt und Hilbert (2013, 2014) heben die in der MTO Produktion divergierenden Kunden- und Nachfragewertigkeiten und den damit verbundenen Zielkonflikt hervor.

Ein weiterer Unterschied zu den klassischen Anwendungsgebieten ist, dass der externe Faktor in der MTO Produktion nicht der Kunde selber ist, welcher beispielsweise im Passagiertransport der Luftfahrtbranche befördert wird, sondern, dass der Kunde lediglich Informationen weitergibt, wodurch die Produktion ermöglicht wird (Klein & Steinhardt, 2008, S. 34). Dadurch, dass eine Auftragsbestätigung in der MTO Produktion vom Kunden direkt mit einem Kauf verbunden wird und in der Regel auch keine Stornierungsmöglichkeit geboten wird, kommt es in der MTO Produktion zu einer sehr geringen Stornierungsquote. Sollte es dennoch von Seiten des Kunden zu einer Stornierung kommen, wird häufig trotzdem der vollständige Rechnungsbetrag fällig. Im Vergleich dazu wird im Passagiertransport der Luftfahrtbranche der Kauf eines Flugtickets vom Kunden häufig eher als Reservierung wahrgenommen, welche einen für den Kunden zum Teil nicht ganz so verbindlichen Charakter besitzt (Hintsches, 2012, S. 65). Somit entfällt aufgrund der in der MTO Produktion vorherrschenden geringen Stornierungsquote in den meisten Fällen die Verwendung der Überbuchungssteuerung (Hintsches, 2012, S. 65; Sucky, 2009). Auch in den nachfolgenden Kapiteln wird daher das RM Instrument der Überbuchungssteuerung nicht weiter betrachtet.

Abschließend sind deutliche Unterschiede im Vergleich zu den klassischen Anwendungsgebieten erkennbar. Folglich können die klassischen Ansätze des RM nicht ohne Anpassungen in der MTO Produktion angewendet werden. Durch die Notwendigkeit von Anpassungen ist die Anwendung des RM in der MTO Produktion zum Teil komplexer. Allerdings bieten die Unterschiede und Besonderheiten auch

Potenziale, die ausgeschöpft werden können (Baykasoğlu et al., 2020; Hintsches, 2012, S. 65). Inwieweit dieses Anwendungsfeld bereits erforscht ist, wird im nachfolgenden Kapitel thematisiert.

4.3 Literaturüberblick zum aktuellen Stand der Forschung

In den letzten 25 Jahren wurden bereits einige RM Ansätze, welche sich auf das Anwendungsgebiet der MTO Produktion beziehen, entwickelt. Nach wie vor zählt die MTO Produktion jedoch zu den jüngeren Anwendungsgebieten des RM (Klein & Steinhardt, 2008, S. 33). Nachfolgend wird ein Überblick über verschiedene RM Ansätze, die eine Unterstützung der Auftragsannahmeentscheidung in der MTO Produktion bieten, gegeben. Zuerst werden Ansätze der mengenorientierten und anschließend der erlösorientierten Kapazitätssteuerung präsentiert. Dabei wird darauf eingegangen, ob eine konkrete Produktionsplanung, d.h. eine Festlegung der Bearbeitungsreihenfolge der angenommenen Aufträge, und/oder der Service gegenüber dem Kunden thematisiert wird.

Mengenorientierte Kapazitätssteuerung

Zu den ersten Autoren, die sich dem RM in der MTO Produktion widmen, zählen Balakrishnan et al. (1996). In der betrachteten Problemstellung werden die zu fertigenden Produkte basierend auf ihrem Deckungsbeitrag pro benötigter Kapazitätseinheit zwei disjunkten Prioritätsklassen zugeordnet. Aufträge der höherwertigeren Prioritätsklasse sind bei ausreichender Kapazität immer anzunehmen. Durch einen Decision Tree Ansatz wird ermittelt, wie viel Kapazität ausschließlich für die Aufträge der höherwertigen Prioritätsklasse zu reservieren und folglich vor dem Zugriff der Aufträge aus der niederwertigen Prioritätsklasse zu schützen ist. Demzufolge kann dieser Ansatz der mengenorientierten Kapazitätssteuerung zugeordnet werden. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen auch Barut und Sridharan (2005). Sie erweitern den Decision Tree Ansatz von Balakrishnan et al. (1996) unter anderem dahingehend, dass die Bearbeitung eines Auftrags nicht in einem Stück, sondern auch mit Unterbrechungen in verschiedenen Perioden erfolgen darf. Die Produktionsplanung der angenommenen Aufträge erfolgt dabei so nah wie möglich an dem vereinbarten Liefertermin. Folglich handelt es sich um eine Rückwärtsterminierung der angenommenen Aufträge. Darüber hinaus warnen die Autoren davor, dass bei einer im Vergleich zur Nachfrage sehr knappen Kapazität diese vollständig für die höherwertige Prioritätsklasse reserviert werden kann und es folglich dazu kommen kann, dass alle Aufträge der niederwertigen Prioritätsklasse abgelehnt werden. Eine mögliche Folge dessen ist die Eliminierung eines vorhandenen Marktsegments für das produzierende Unternehmen. Um dies zu verhindern, weisen die Autoren im Ausblick darauf hin, dass für die niederwertige Prioritätsklasse ein Mindest-Servicelevel eingeführt werden könnte. Diese Idee wird als Erweiterung des bestehenden Ansatzes von Sharifyazdi und Modarres (2007) aufgegriffen. Das Servicelevel wird dabei als Anteil der angenommenen Aufträge einer Klasse definiert. Darüber hinaus ermöglichen Sharifyazdi und Modarres (2007) auch die Betrachtung von mehr als zwei Klassen. Mithilfe des erweiterten Decision Tree Ansatzes werden Schutzlimits ermittelt. Für

die höchste Klasse ist kein Schutzlimit vorhanden, sodass Aufträge dieser Klasse Zugriff auf die vollständige Kapazität erhalten.

Den konkreten Anwendungsfall eines Betonproduzenten untersuchen Elimam und Dodin (2001). Jedoch steht dabei nicht nur die Auftragsannahmeentscheidung im Vordergrund, sondern auch die Ermittlung von optimalen Preisen bzw. Preisnachlässen von vier verschiedenen Tarifklassen, um somit die Nachfrage, insbesondere auch außerhalb der Hochsaison, zu beeinflussen. Die verschiedenen Tarifklassen unterscheiden sich beispielsweise darin, wie flexibel der Kunde hinsichtlich der Lieferzeit ist bzw. wie weit im Voraus die Buchungsanfrage gestellt wird. Mithilfe eines nichtlinearen Modells wird neben den optimierten Preisentscheidungen ermittelt, wie viel Kapazität für welche Tarifklasse zu reservieren ist. Auch Elimam und Dodin (2001) ermöglichen durch eine Schachtelung der Buchungslimits Aufträgen der höchsten Tarifklasse, auf die vollständige Kapazität zuzugreifen.

Kuhn und Defregger (2004) bilden zur Ermittlung einer optimalen Auftragsannahmepolitik die betrachtete Problemstellung als Markov-Entscheidungsprozess ab. Dabei wird der Anwendungsfall eines Papierherstellers betrachtet, bei welchem die eingehenden Aufträge jeweils einer von zwei unterschiedlichen Auftragsklassen zugeordnet werden können. Aufträge der höherwertigen Auftragsklasse müssen sofort bearbeitet und können auf Grund dessen nur angenommen werden, wenn die Maschine zum Zeitpunkt des Auftragseingangs verfügbar ist. Sofern die Maschine verfügbar ist, ist es optimal, einen solchen Auftrag anzunehmen. Aufträge der niederwertigen Auftragsklasse hingegen müssen bei Annahme nicht zwangsläufig unmittelbar bearbeitet werden, sondern können auch erst am nachfolgenden Tag gestartet werden. An einem Arbeitstag kann entweder ein Auftrag der höherwertigen oder der niederwertigen Auftragsklasse oder gar kein Auftrag eintreffen. Da die Wahrscheinlichkeiten für diese drei Ereignisse als bekannt vorausgesetzt werden, kann mithilfe des Markov-Entscheidungsprozesses eine optimale Auftragsannahmepolitik, welche abhängig davon ist, ob die Maschine zum Zeitpunkt des Auftragseingangs belegt oder verfügbar ist, bestimmt werden.

Defregger und Kuhn (2007) betrachten ein nach dem MTO Prinzip produzierendes Unternehmen, welches zusätzlich über begrenzte Lagerkapazität verfügt. Der Lagerbestand kann bei Bedarf auch zur unmittelbaren Erfüllung des Auftrags verwendet. Es handelt sich folglich bei der betrachteten Problemstellung nicht um eine reine MTO Produktion. Mithilfe einer Heuristik wird ermittelt, ob ein Auftrag angenommen oder abgelehnt werden soll. Bei Annahme ist zu entscheiden, ob der Auftrag auf der Maschine neu gefertigt oder aus dem aktuellen Lagerbestand bedient werden soll. Für die Auftragsannahmeentscheidung werden die eintreffenden Aufträge basierend auf dem relativen Deckungsbeitrag verschiedenen Klassen zugeordnet. Abhängig von der zugeordneten Klasse wird die Annahmeentscheidung getroffen. Es ist auch möglich, dass die Aufträge einer Klasse nur teilweise angenommen bzw. abgelehnt werden. In diesem Fall ist der aktuelle Lagerbestand und die Zeit, in welcher die Produktionsmaschine noch ausgebucht ist, maßgeblich für die endgültige Entscheidung. Über diesen Ansatz hinaus führt Defregger (2009) eine empirische Studie durch, um das Potenzial des RM für produzierende

Unternehmen, insbesondere auf die deutsche Papier-, Stahl- und Aluminiumproduktion bezogen, aufzuzeigen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass für einen Großteil der befragten Unternehmen Potenzial zur Profitsteigerung durch den Einsatz der Methoden des RM gesehen wird. Allerdings werden bei circa der Hälfte der Unternehmen, bei denen das Potenzial des RM festgestellt wird, zum Zeitpunkt der Befragung keine Methoden des RM angewendet. Auch der Einfluss der Unternehmensgröße wird von Defregger (2009) untersucht. Die Unternehmensgröße hat keinen signifikanten Einfluss darauf, ob zum Zeitpunkt der Befragung Methoden des RM bereits eingesetzt werden oder nicht. Allerdings beeinflusst die Größe des Unternehmens das Potenzial, welches durch die Methoden des RM ausgeschöpft werden kann. Bei größeren Unternehmen wird ein größeres Potenzial festgestellt.

Den speziellen Anwendungsfall der Herstellung von Fenstern und Türen betrachten Kumar und Frederick (2007). Dabei werden exemplarisch zwei verschiedene Fenstertypen eines U.S. amerikanischen Hausbauzulieferers betrachtet und drei verschiedene Kundensegmente gebildet, die von dem vom Kunden ausgewählten Distributionskanal abhängig sind. Der Kunde kann sich zwischen der direkten Produktion und anschließenden Lieferung, der direkten Produktion und Lieferung über ein Distributionszentrum und dem unmittelbaren Lagerverkauf entscheiden. Mithilfe einer Decision Tree Analyse wird ermittelt, wie viel Kapazität für die Produktion der Fenster, welche anschließend über das Lager verkauft werden und somit dem höchsten Preissegment zugeordnet sind, zu reservieren ist.

Auf den Aspekt, dass von den produzierenden Unternehmen – insbesondere auf langfristige Sicht – wichtige Kunden häufig vergünstigt ordern können und somit geringere Preise als die weniger wichtigen Kunden zu bezahlen haben, fokussiert sich Sucky (2009). Bei einer reinen Deckungsbeitragsmaximierung kann es passieren, dass vornehmlich diese wichtigen Kunden bei der Auftragsannahmeentscheidung vernachlässigt werden und somit ein angestrebtes Servicelevel nicht erreicht werden kann. Folglich sollte ein Kompromiss zwischen den monetären und serviceorientierten Zielen gefunden werden. Sucky (2009) präsentiert eine mengenorientierte Kapazitätssteuerung zur Unterstützung der Auftragsannahmeentscheidung. Um sowohl das Ziel der Deckungsbeitragsmaximierung als auch der Wahrung eines bestimmten Servicelevels zu berücksichtigen, wird in der Zielfunktion des zur Ermittlung der einfachen Buchungslimits notwendigen Optimierungsmodells zunächst die Maximierung des Deckungsbeitrags angestrebt. Statt der herkömmlichen Schachtelung, bei welcher die höherwertige Nachfrage Zugriff auf die Kontingente der niederwertigen Nachfrage besitzt, empfiehlt Sucky (2009), die Buchungslimits in umgekehrter Reihenfolge und somit an dem Kundenwert orientiert zu schachteln. Diese Idee wird in dem mengenorientierten Ansatz, welcher in Kapitel 7 vorgestellt wird, erneut aufgegriffen. Modarres et al. (2012) legen den Fokus auf die Berücksichtigung von Unsicherheiten. In dem entwickelten Ansatz werden sowohl die Produktionskapazität als auch die Nachfrage als stochastisch angesehen. Aufgrund der Unsicherheit bezüglich der tatsächlichen Produktionskapazität ist es möglich, dass ein zuvor angenommener Auftrag im Nachhinein wieder abgelehnt werden muss. Zum Ausgleich wird dem betroffenen Kunden eine Kompensation, welche als Strafkosten in dem Ansatz integriert ist, angeboten.

Mithilfe von Simulationen werden Buchungslimits für verschiedene Kundensegmente ermittelt. Dabei wird auch das Risiko einer möglichen Stornierung seitens des produzierenden Unternehmens integriert. Auch in der von Modarres et al. (2012) betrachteten Problemsituation erbringen die wichtigen Kunden pro Auftrag einen geringeren Erlös als die weniger wichtigen. Im Falle einer Stornierung aufgrund von Kapazitätsknappheit sind zunächst immer die Aufträge der weniger wichtigen Kunden zu stornieren, was wiederum auch mit geringeren Strafkosten für das Unternehmen verbunden ist.

Erlösorientierte Kapazitätssteuerung

Gallien et al. (2004) präsentieren einen erlösorientierten Ansatz zur Kapazitätssteuerung. Im ersten Schritt wird mithilfe einer einfachen Liefertermin-Regel (Earliest Due Date Schedule) ermittelt, ob ein Auftrag noch in die Produktionsplanung integriert werden könnte, sodass dieser rechtzeitig fertiggestellt wird. Wenn dies der Fall ist, wird im zweiten Schritt überprüft, ob durch die Annahme des Auftrags mindestens die Opportunitätskosten gedeckt werden können. Bei einem positiven Ergebnis wird der Auftrag angenommen und andernfalls abgelehnt. Zur Ermittlung der Opportunitätskosten wird eine Bellmansche Funktionalgleichung aufgestellt. Da die exakte Berechnung der Opportunitätskosten sehr rechenintensiv ist, werden von Gallien et al. (2004) darüber hinaus zwei verschiedene Heuristiken präsentiert, mit deren Hilfe die Opportunitätskosten approximiert und somit schneller ermittelt werden können.

Ein großer Anteil der RM Literatur in der MTO Produktion bezieht sich auf die Eisen und Stahl erzeugende Industrie. So widmen sich Rehkopf und Spengler (2005), Spengler und Rehkopf (2005), Rehkopf (2006), Spengler et al. (2007), Hintsches et al. (2010), Hintsches (2012) und Volling et al. (2012) diesem Anwendungsgebiet und präsentieren erlösorientierte Ansätze für die Auftragsannahmeentscheidung. Rehkopf und Spengler (2005) analysieren zunächst ausführlich die Anwendbarkeit des RM in der MTO Produktion. Da im Produktionsprozess der Eisen und Stahl erzeugenden Industrie mehrere Maschinen, welche jeweils eine knappe Ressource darstellen, involviert sind, wird die betrachtete Problemsituation als Netzwerkproblem abgebildet. Anschließend wird ein ganzzahliges lineares Optimierungsmodell aufgestellt. Drei verschiedene Ansätze zur Approximation der Opportunitätskosten werden in der Veröffentlichung aufgezeigt. Bei dem ersten Ansatz wird das ganzzahlige lineare Modell zwei Mal gelöst, wobei beim zweiten Mal die verfügbaren Ressourcen um den Kapazitätsbedarf des eintreffenden Auftrags reduziert werden. Durch die Differenz der beiden Zielfunktionswerte können die Opportunitätskosten approximiert werden. Entspricht der Deckungsbeitrag des eintreffenden Auftrags mindestens den approximierten Opportunitätskosten, wird dieser angenommen und andernfalls abgelehnt. Bei dem zweiten Ansatz wird durch die LP Relaxation die Ganzzahligkeit des Modells vernachlässigt. Ferner wird wie beim vorherigen Ansatz verfahren: Das Optimierungsmodell wird zwei Mal gelöst und die Differenz der Zielfunktionswerte bildet die Approximation der Opportunitätskosten ab.

Der dritte Ansatz ist der klassische Bid-Preis-Ansatz, bei welchem die Schattenpreise der Ressourcenrestriktionen mit dem jeweiligen Ressourcenbedarf des eintreffenden Auftrags multipliziert und anschließend über alle Ressourcen aufsummiert werden. Der daraus resultierende Bid-Preis dient als weitere Möglichkeit, die Opportunitätskosten anzunähern. Spengler und Rehkopf (2005) formulieren darüber hinaus eine Bellmansche Funktionalgleichung für diesen konkreten Anwendungsfall, weisen jedoch darauf hin, dass die exakte Lösung dieser Gleichung aufgrund der Komplexität in realen Anwendungsfällen kaum in vertretbaren Rechenzeiten ermittelbar ist und somit die Approximation der Opportunitätskosten von großer Bedeutung ist.

Sowohl Rehkopf (2006) als auch Spengler et al. (2007) stellen das Problem als multidimensionales Rucksackproblem dar und entwickeln eine Greedy-Heuristik, durch welche eine weitere Möglichkeit der Approximation der Opportunitätskosten präsentiert wird. Anhand eines Fallbeispiels, welches auf realen Daten eines deutschen Stahlherstellers basiert, konnte im Vergleich zu der Benchmark-Strategie FCFS in verschiedenen untersuchten Szenarien eine Deckungsbeitragssteigerung bei Verwendung einer erlösorientierten Kapazitätssteuerung gezeigt werden.

Spengler et al. (2009) konzentrieren sich auf die Bestimmung eines Zeitpunktes zur Aktualisierung des Bid-Preises. Mithilfe einer Analyse von Nachfragedaten und der allgemeinen Verfügbarkeit von Informationen zur Nachfrage kann ein Zeitpunkt abgeschätzt werden, an dem die Aktualisierung des Bid-Preises sinnvoll ist. Sofern die bis zu dem Zeitpunkt tatsächliche Nachfrage niedriger als die Vorhersage ist, wird der aktualisierte Bid-Preis verringert sein. Für den Fall, dass die tatsächliche Nachfrage größer als die prognostizierte ist, wird der Bid-Preis steigen. Auch Volling et al. (2012) betrachten den Anwendungsfall der Eisen und Stahl erzeugenden Industrie und legen den Fokus auf die Bestimmung des optimalen Zeitpunktes zur Aktualisierung des Bid-Preises. In dem Ansatz von Volling et al. (2012) werden dazu neuronale Netzwerke verwendet. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass so auch nichtlineare Beziehungen zwischen dem Bid-Preis und der erwarteten Nachfrage berücksichtigt werden können. Da sich die Buchungsperiode und die anschließende Produktionsperiode in dem untersuchten Anwendungsfall nicht überschneiden, wird keine sofortige Produktionsplanung benötigt.

Hintsches et al. (2010) und Hintsches (2012) stellen die Problemsituation der Eisen und Stahl verarbeitenden Industrie ebenfalls als Netzwerkproblem dar und nutzen den klassischen Bid-Preis-Ansatz, bei welchem die Schattenpreise der Ressourcenrestriktionen eines deterministischen linearen Modells in die Berechnung der approximierten Opportunitätskosten einfließen. Um potenzielle Fehler in der Nachfrageprognose auszugleichen, werden mehrere Nachfrageszenarien in einem Randomized Linear Programming Ansatz berücksichtigt. Somit wird pro Szenario ein Bid-Preis ermittelt. Zur Bestimmung des am Ende für die Auftragsannahmeentscheidung maßgeblichen Bid-Preises wird der Durchschnitt der über die verschiedenen Szenarien ermittelten Bid-Preise gebildet. Darüber hinaus wird in Hintsches (2012) die Produktionsplanung für die angenommenen Aufträge nach einer Rückwärts-terminierung und somit basierend auf dem spätesten Liefertermin durchgeführt.

Losgelöst von einem konkreten Anwendungsfall approximiert Jalora (2006) die Opportunitätskosten ebenfalls für eine erlösorientierte Kapazitätssteuerung. Dabei wird ein Zeitraum über mehrere Perioden hinweg betrachtet. Für jede Periode werden die approximierten Opportunitätskosten ermittelt. Ein Auftrag wird angenommen, sobald der Profit dieses Auftrags die Opportunitätskosten in mindestens einer Periode deckt. Eingeplant wird der Auftrag anschließend in die Periode, welche die geringsten Opportunitätskosten vorweist. Sofern ein Auftrag vor dem gewünschten Lieferzeitpunkt fertiggestellt wird, betrachtet Jalora (2006) als Besonderheit zusätzlich die anfallenden Lagerkosten. In verschiedenen Problemsituationen wird zwischen Lagern von Drittanbietern und einem zusätzlichen eigenen Lager unterschieden. Darüber hinaus wird auch die Dimensionierung eines eigenen Lagers thematisiert.

Fan und Chen (2008) präsentieren einen erlösorientierten Ansatz für eine Situation, in der zur Produktion verschiedene Maschinentypen zur Verfügung stehen. Nicht jeder Maschinentyp ist für die Herstellung aller bestellten Produkte geeignet. Es gibt flexible Maschinentypen, die für die Produktion mehrerer Produkte adäquat sind, und spezialisierte Maschinentypen, die auf die Produktion eines bestimmten Produkts beschränkt sind. Mithilfe eines Stochastic Dynamic Programming Modells wird die betrachtete Problemstellung modelliert. Der minimale Schattenpreis einer für den eintreffenden Auftrag passenden Maschine fungiert als Bid-Preis. Sofern der Erlös des Auftrags mindestens dem Bid-Preis entspricht, wird dieser der Maschine, welche für den Auftrag passend ist und den minimalen Schattenpreis aufweist, zugeordnet. Eine genauere Produktionsplanung wird nicht weiter thematisiert.

Martínez und Arredondo (2010) berücksichtigen in ihrem erlösorientierten Ansatz, dass eine Ablehnung eines Auftrags negative Konsequenzen auf die Beziehung zu dem Kunden haben kann. Um diese negativen Folgen abzubilden, entstehen bei der Ablehnung eines Auftrags Strafkosten, die im Entscheidungsprozess der Auftragsannahme bzw. -ablehnung mit abgewogen werden. Zur Ermittlung des Bid-Preises wird ein Stochastic Dynamic Programming Modell aufgestellt, welches mit einem Reinforcement Learning Ansatz gelöst wird.

Wu et al. (2010) legen den Fokus neben der Auftragsannahmeentscheidung auf die Kapazitätsauslastung. Mithilfe eines Chance Constraint Ansatzes wird die präferierte Kapazitätsauslastung in das Optimierungsmodell integriert, um somit das Risiko einer niedrigen Auslastung zu verringern. Ein Dynamic Programming Algorithmus bietet die Möglichkeit, die Opportunitätskosten zu approximieren und somit eine erlösorientierte Kapazitätssteuerung durchzuführen. Im Ausblick weisen auch Wu et al. (2010) für zukünftige Arbeiten darauf hin, dass es von großer Bedeutung ist, wichtigen Kunden ein gewisses Servicelevel anzubieten.

Einen Ansatz zum kundenwertorientierten RM präsentieren Mohaupt und Hilbert (2013). Die Kunden werden unterschiedlichen Kundensegmenten zugewiesen. Abhängig von dem zugewiesenen Kundensegment werden neben den eintreffenden Aufträgen auch zukünftig erwartete Aufträge und somit mit

diesem Kundensegment verbundene zukünftige Einnahmen in der Zielfunktion eines linearen Optimierungsmodells berücksichtigt. Die getroffene Entscheidung hinsichtlich der Annahme bzw. Ablehnung von Aufträgen eines Kundensegments wirkt sich positiv bzw. negativ auf diese zukünftig erwarteten Einnahmen aus. Folglich ist eine langfristige kundenwertorientierte Perspektive in diesem Ansatz integriert. Um neben der langfristigen Perspektive auch die kurzfristige in dem Ansatz adäquat zu beachten, wird mithilfe einer Nebenbedingung die Erreichung eines Mindestprofits durch die in dem betrachteten Zeitraum angenommenen Aufträge garantiert. Um die Opportunitätskosten zu approximieren, wird das lineare Optimierungsmodell zwei Mal gelöst, wie es auch unter anderem in Rehkopf und Spengler (2005) durchgeführt wird. Der Bid-Preis berechnet sich aus der Differenz der Zielfunktionswerte, wenn der Auftrag angenommen bzw. abgelehnt wird. Für die Annahme eines Auftrags muss die Summe aus dem mit diesem Auftrag erzielten Profit, den erwarteten zukünftigen Einnahmen und der Veränderungen des Kundenwerts (in monetären Einheiten ausgedrückt) mindestens dem Bid-Preis entsprechen.

Özdemir-Akyıldırım et al. (2014) legen ihren Fokus auf die Verarbeitung von retournierten Produkten, welche für die Befriedigung der Nachfrage von überholten Produkten und Ersatzteilen dienen. Die Retouren können entweder zum Wiederverkauf aufbereitet werden oder es können nur Teile des retournierten Produkts für die zukünftige Produktion nach dem MTO-Prinzip aufbereitet werden oder das retournierte Produkt kann vollständig recycelt werden. Da die Nachfrage die Anzahl der retournierten Produkte übersteigt, können die retournierten Produkte und folglich auch die Einzelteile dieser Produkte als knappe Ressourcen angesehen werden. Özdemir-Akyıldırım et al. (2014) formulieren die Problemsituation als einen Markov-Entscheidungsprozess. Weil dieser bei Problemen von realistischer Größe nicht mehr in einer annehmbaren Zeit exakt gelöst werden kann, bilden die Autoren die Problemsituation darüber hinaus mithilfe eines linearen Optimierungsmodells ab und präsentieren verschiedene heuristische Ansätze zur Approximation der Opportunitätskosten.

Die Problemsituation eines Flexible Flow Shop Produktionssystems mit verschiedenen Maschinengruppen betrachten Guhlich et al. (2015a). Mithilfe eines linearen Optimierungsmodells kann anhand der Schattenpreise der Ressourcenrestriktionen ein Bid-Preis bestimmt werden. Um die Unsicherheiten der Nachfrage zu berücksichtigen, wird ein Randomized Linear Programming Ansatz durchgeführt, in welchem verschiedene Nachfrageszenarien berücksichtigt werden. Der über die verschiedenen Szenarien ermittelte durchschnittliche Bid-Preis wird für die Auftragsannahmeentscheidung verwendet. Die Produktion der Aufträge erfolgt nach dem „No-Wait“-Prinzip, bei welchem die Aufträge unmittelbar nach ihrer Auftragsfreigabe gestartet werden.

Guhlich et al. (2018) untersuchen die Problemsituation eines Flexible Job Shops, bei welchem neben der Nachfrage auch die tatsächliche Produktionszeiten als stochastisch angenommen werden. Aufgrund von beispielsweise Maschinenausfällen kann die tatsächliche Produktionszeit von der erwarteten abweichen. Damit nichtlineare Abhängigkeiten des verfügbaren Workloads und der Produktionszeiten adäquat abgebildet werden können, verwenden Guhlich et al. (2018) sogenannte Clearing-Functions. Durch

diese wird der maximale Output einer Maschine als (nichtlineare) Funktion der Arbeitslast über einen bestimmten Zeitraum modelliert. Wie bei Guhlich et al. (2015a) wird der Bid-Preis mithilfe eines Randomized Linear Programming Ansatz, bei welchem ein zugrundeliegendes lineares Optimierungsmodell mit verschiedenen Nachfrageszenarien gelöst wird, bestimmt. Die angenommenen Aufträge werden nach dem FCFS Prinzip durchgeführt.

Einen Anwendungsfall im Themenbereich der Nachhaltigkeit, bei welchem durch Instandhaltung bzw. Regeneration von Komponenten komplexer Investitionsgüter diese wiederverwendet werden können, studiert Herde (2018). Investitionsgüter weisen in der Regel am Ende des Produktlebenszyklus weiterhin einen hohen Wert auf. Durch eine Wiederverwendung von Komponenten können Kosten eingespart und natürliche Ressourcen geschont werden. Mit einem erlösorientierten Ansatz werden die knappen Ressourcen der erneuerbaren Kapazitäten und Lagerteilen effizient gesteuert und eingesetzt. Auch hier sind die Schattenpreise eines linearen Optimierungsmodells ausschlaggebend für die Berechnung von Bid-Preisen. Statt einer detaillierten Produktionsplanung wird diese durch die Zusammenfassung einiger Prozessschritte in stark vereinfachter Form berücksichtigt. Der Zeithorizont ist in Perioden unterteilt. Mithilfe eines Allokationsalgorithmus werden die Aufträge in bestimmten Perioden eingeplant.

Baykasoğlu et al. (2020) untersuchen den Anwendungsfall bei der Herstellung von Brautkleidern. Hierbei ist insbesondere die Einhaltung von zugesagten Lieferterminen wichtig, da es bei Verspätungen dazu kommen kann, dass das Kleid erst nach dem Hochzeitstermin fertiggestellt wird. Eine weitere Besonderheit ist, dass Kunden in der Regel nur einmalig bei dem Brautmodengeschäft bestellen. Um für gute Empfehlungen von ehemaligen Kunden zu sorgen, soll bei der Auftragsannahmeentscheidung darauf geachtet werden, dass ein definiertes Servicelevel eingehalten wird. Das Servicelevel bemisst sich laut Baykasoğlu et al. (2020) als Anteil der innerhalb der vereinbarten Lieferzeiten fertiggestellten Brautkleider. Darüber hinaus wird auch berücksichtigt, dass eine Auftragsablehnung die zukünftige Nachfrage (beispielsweise aufgrund von ausbleibenden Empfehlungen) negativ beeinflussen kann. Ein Fokus der Autoren liegt unter anderem auf der Interaktion mit dem Kunden während des Verhandlungsprozesses bezüglich des Liefertermins und des Preises. Um die Stochastik und Dynamik der betrachteten Problemsituation abzubilden, nutzen Baykasoğlu et al. (2020) einen Simulationsansatz, mit welchem unter anderem der Bid-Preis ermittelt wird. Die angenommenen Aufträge werden abhängig von dem Liefertermin und dem Preis eingeplant, sodass Aufträge mit dem frühesten Liefertermin und dem höchsten Preis zuerst bearbeitet werden. Der Ansatz wird sowohl auf ein fiktives als auch auf ein reales Fallbeispiel, mit Daten eines türkischen Brautmodengeschäftes, angewendet.

Insgesamt zeigt dieser Literaturüberblick zur Kapazitätssteuerung im Anwendungsgebiet der MTO Produktion, dass bereits verschiedene Ansätze mit unterschiedlichen Schwerpunkten entwickelt wurden.³ Ein chronologischer Überblick über die zuvor vorgestellten Veröffentlichungen (zuzüglich der Veröffentlichungen von Lohnert und Fischer (2019a, 2019b, 2021)) ist in Tabelle 4.1 dargestellt. In den letzten beiden Spalten wird angegeben, ob in den Veröffentlichungen neben der Auftragsannahmeentscheidung auch eine konkrete Produktionsplanung der angenommenen Aufträge erstellt wird und ob der Service gegenüber den Kunden in den präsentierten Ansätzen berücksichtigt wird. Zur Berücksichtigung letzteren können zum Beispiel angestrebte (Mindest-)Servicelevels und/oder der Kundenwert in die Auftragsannahmeentscheidung einbezogen werden. Auffällig ist, dass die Mehrheit der Ansätze erlösorientiert sind und nur wenige mengenorientierte Ansätze existieren. Dies ist vermutlich unter anderem darauf zurückzuführen, dass insbesondere für einen mengenorientierten Ansatz die Definition eines standardisierten Leistungsprogramms erforderlich ist. Sobald ein Produktspektrum jedoch lediglich abhängig von dem benötigten Kapazitätsbedarf definiert wird, ist dies auch in der MTO Produktion durchaus möglich.

Auch die Berücksichtigung der Auswirkungen der Auftragsannahmeentscheidung auf die Kunden findet nur selten in den präsentierten Ansätzen statt. Stattdessen wird in mehreren Veröffentlichungen auf dieses Thema hingewiesen und deren Wichtigkeit für zukünftige Arbeiten im Ausblick betont (s. bspw. Balakrishnan et al., 1996; Wu et al., 2010). In einigen Veröffentlichungen wird ein einzuhaltendes Mindest-Servicelevel definiert, um zu verhindern, dass durch zu viele Ablehnungen ein für das produzierende Unternehmen bestehendes Marktsegment eliminiert wird (s. bspw. Baykasoğlu et al., 2020; Sharifyazdi & Modarres, 2007; Sucky, 2009). Auf die gegensätzliche Kunden- und Nachfragewertigkeit geht lediglich Sucky (2009) ein. Ansätze für diese Forschungslücke, bei der sowohl die gegensätzlichen Ziele der Deckungsbeitragsmaximierung und Wahrung angestrebter Servicelevels beachtet werden als

³ Neben Ansätzen zur Kapazitätssteuerung in der MTO Produktion werden in der Literatur teilweise auch Ansätze in der ATO Produktion untersucht. So beschäftigen sich beispielsweise Harris und Pinder (1995) mit dem Anwendungsgebiet der ATO Produktion und zählen generell zu den ersten Autoren, die sich dem RM in der Produktion widmen. Guhlich et al. (2015b) beziehen sich ebenfalls auf die ATO Produktion, bei der neben der Montagekapazität auch Materialien als limitierte Ressourcen berücksichtigt werden. Abedi und Zhu (2020) präsentieren einen RM Ansatz zur Unterstützung der Auftragsannahmeentscheidung für eine hybride Produktionsstrategie, bei der sowohl nach dem MTO als auch nach dem MTS Prinzip gefertigt wird. Auch RM Ansätze in der Produktion, welche sich auf das Pricing beziehen, werden von verschiedenen Forschern präsentiert (s. bspw. Hall et al., 2009; Maglaras, 2006; Scherrer & Griffin, 2009). Für einen Literaturüberblick zum RM in der Produktion im Allgemeinen wird auf Kubickova (2022) verwiesen.

Tabelle 4.1: Chronologisch sortierter Literaturüberblick zur Kapazitätssteuerung mittels der Methoden des RM in der MTO Produktion

Quelle		Kapazitätssteuerung		Berücksichtigung der / des	
		Erlös-orientiert	Mengen-orientiert	Produktions-planung	Service / Kundenwertes
Balakrishnan et al.	1996		✓		
Elimam und Dodin	2001		✓		
Gallien et al.	2004	✓		✓	
Kuhn und Defregger	2004		✓		
Barut und Sridharan	2005		✓	✓	
Rehkopf und Spengler	2005	✓			
Spengler und Rehkopf	2005	✓			
Jalora	2006	✓		✓	
Rehkopf	2006	✓			
Defregger und Kuhn	2007		✓		
Kumar und Frederick	2007		✓		
Sharifyazdi und Modarres	2007		✓		✓
Spengler et al.	2007	✓			
Fan und Chen	2008	✓			
Defregger	2009		✓		
Spengler et al.	2009	✓			
Sucky	2009		✓		✓
Hintsches et al.	2010	✓			
Martínez und Arredondo	2010	✓			✓
Wu et al.	2010	✓			
Hintsches	2012	✓		✓	
Modarres et al.	2012		✓		✓
Volling et al.	2012	✓			
Mohaupt und Hilbert	2013	✓			✓
Özdemir-Akyıldırım et al.	2014	✓			
Guhlich et al.	2015a	✓		✓	
Guhlich et al.	2018	✓		✓	
Herde	2018	✓		✓	
Lohnert und Fischer	2019a		✓	✓	✓
Lohnert und Fischer	2019b		✓	✓	✓
Baykasoğlu et al.	2020	✓		✓	✓
Lohnert und Fischer	2021	✓		✓	✓

auch eine konkrete Produktionsplanung ermittelt wird, werden in dieser Arbeit präsentiert. Eine Berücksichtigung von gewünschten Lieferterminen, Deadlines und sequenzabhängigen Rüstkosten ist bei der Produktionsplanung mit inbegriffen. Ein Teil dieser Ansätze ist bereits in Veröffentlichungen von Lohnert und Fischer (2019a, 2019b, 2021) beschrieben. So wird in Lohnert und Fischer (2019b) ein mengenorientierter Ansatz zur Kapazitätssteuerung beschrieben, welcher in Lohnert und Fischer (2019a) um verschiedene Schachtelungsstrategien der Buchungslimits ergänzt wird. Ein erlösorientierter Ansatz wird in Lohnert und Fischer (2021) vorgestellt. Auf diese Ansätze wird in den Kapiteln 7 und 8 detailliert eingegangen.

5 Problemstellung, Annahmen und grundsätzliches Vorgehen der entwickelten Ansätze

In diesem Kapitel werden zuerst in 5.1 die betrachtete Problemstellung und getroffenen Annahmen erläutert. Anschließend werden in 5.2 die Optimierungsmodelle vorgestellt, welche in den entwickelten RM Ansätzen zur Kapazitätssteuerung zum Einsatz kommen. Die Optimierungsmodelle werden in den Kapiteln 7 und 8, bei der Präsentation der mengen- und erlösorientierten Ansätze, erneut aufgegriffen. Darüber hinaus wird in den späteren Kapiteln auch genauer erläutert, inwiefern die verwendeten Optimierungsmodelle die zu treffenden Auftragsannahme- und Planungsentscheidungen unterstützen. In diesem Kapitel sollen lediglich die Modelle und das grundsätzliche Vorgehen der entwickelten RM Ansätze erklärt werden. Um die mit den mengen- und erlösorientierten Ansätzen erzielten Ergebnisse mit anderen Strategien vergleichen zu können, werden in Kapitel 5.3 Vergleichsstrategien vorgestellt.

5.1 Problemstellung und Annahmen

Betrachtet wird ein kleines, nach dem MTO Prinzip produzierendes Unternehmen, welches bereits seit längerer Zeit besteht und demzufolge einen zum Teil gefestigten Kundenstamm besitzt. Die Kundschaft kann in verschiedene Kundensegmente unterteilt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die für das Unternehmen wichtigsten Kunden Aufträge bspw. aufgrund von Rahmenverträgen zu vergünstigten Konditionen stellen können und somit eine geringere Nachfragewertigkeit als andere Kundensegmente aufweisen, weil sie letztlich weniger bezahlen. Die Nachfragewertigkeit ist also abhängig vom relativen Deckungsbeitrag eines Auftrags, welcher je Zeiteinheit erwirtschaftet wird, definiert. Folglich besteht ein Konflikt zwischen den Zielen der Deckungsbeitragsmaximierung und der Gewährleistung der Kundenzufriedenheit, insbesondere für die wichtigsten Kunden.

Um die Kundenzufriedenheit sicherzustellen, wird für jedes Kundensegment ein angestrebtes Servicelevel definiert. Das Servicelevel eines Kundensegments ist dabei als Anteil der angenommenen Aufträge aus allen Aufträgen dieses Segments definiert. Das in der Auftragsproduktion vorherrschende diametrale Verhältnis zwischen dem angestrebten Servicelevel eines Kundensegments und dem mit einem Auftrag aus diesem Kundensegment zu erwirtschaftenden Deckungsbeitrag wird auch von Sucky (2009) betont. Im Folgenden werden drei beispielhafte Kundensegmente betrachtet: A, B und C. Diese Kundensegmente werden bereits in diesem Kapitel eingeführt, um die Problemstellung verständlicher

zu beschreiben. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze können jedoch auch ohne Weiteres auf eine Unterteilung der Kunden in eine andere Anzahl an Kundensegmenten angewendet werden.

Es wird angenommen, dass Kunden, welche dem Segment A angehören und im Folgenden auch „A-Kunden“ genannt werden, die wichtigsten Kunden des produzierenden Unternehmens sind. Diese Kunden haben mit dem Unternehmen einen Rahmenvertrag abgeschlossen, durch welchen es ihnen ermöglicht wird, zu besseren Konditionen zu bestellen. Folglich ist die Nachfragewertigkeit dieses Kundensegments als „gering“ einzustufen. Da insbesondere jedoch die A-Kunden langfristig gesehen zur Erwirtschaftung von höheren Gewinnen beitragen, besitzen diese Kunden einen hohen Kundenwert für das produzierende Unternehmen. Der Kundenwert bezieht sich auf die vollständige voraussichtliche Dauer der Geschäftsbeziehung und beachtet somit sowohl vergangene als auch zukünftige Beiträge dieses Kunden bzw. Kundensegments zur Erreichung der Unternehmensziele (Gupta et al., 2006; Halfmann & Rennhak, 2006, S. 15). Die Bewertung des Kundenwertes kann entweder auf Basis von individuellen Kunden oder von Kundensegmenten erfolgen (Gupta et al., 2006). Für die Abschätzung des zukünftigen Nutzens eines Kunden(-segments) sollten auch geplante Änderungen (bspw. im Geschäftsmodell) und angestrebte Entwicklungen des produzierenden Unternehmens sowie mögliche Reaktionen der Konkurrenz einbezogen werden (Berger et al., 2006). Ferner sind sowohl monetäre als auch nicht-monetäre Kundenwertpotenziale zu berücksichtigen. Somit kann beispielsweise auch das Weiterempfehlungsverhalten eines Kunden indirekt zur Erreichung der Unternehmensziele beitragen. Zusätzlich ist auch die Kundenloyalität ein wichtiger Aspekt, der bei der Festlegung des Kundenwertes nicht zu vernachlässigen ist. Die Kundenloyalität beeinflusst sowohl den monetären als auch den nicht-monetären Nutzen eines Kunden und wirkt sich auf die Dauer der Geschäftsbeziehung aus (Halfmann & Rennhak, 2006, S. 16). Aus diesem Grund ist es wichtig, insbesondere den A-Kunden ein hohes Servicelevel zu bieten. Durch die Berücksichtigung des Kundenwertes und dass bei der Kapazitätssteuerung darauf geachtet wird, Kapazität insbesondere für die wertvollsten Kunden, die A-Kunden, zu reservieren, können die in den Kapiteln 7 und 8 vorgestellten RM Ansätzen auch als Ansätze des sogenannten kundenwertorientierten RM bezeichnet werden (von Martens & Hilbert, 2011).

Die zu dem Kundensegment B zugeordneten Kunden, im Folgenden auch „B-Kunden“ genannt, haben keinen Rahmenvertrag mit dem Unternehmen abgeschlossen. Es wird angenommen, dass diese Kunden jedoch bereits in der Vergangenheit Aufträge erteilt haben. Insgesamt ist der direkte und indirekte Beitrag zur Erreichung der Unternehmensziele von Kunden aus diesem Segment geringer als bei den A-Kunden. Sowohl die Nachfragewertigkeit als auch der Kundenwert der B-Kunden wird als „mittel“ eingestuft. Neukunden gehören dem Kundensegment C an und werden im Folgenden auch als „C-Kunden“ bezeichnet. Aufgrund ihrer schwachen Verhandlungspositionen bezahlen diese Kunden die höchsten Preise. Folglich ist die Nachfragewertigkeit von Kunden aus diesem Segment als „hoch“ anzusehen. Da der zukünftige Wert dieser Kunden noch nicht abgeschätzt werden kann, wird der

Kundenwert als „gering“ eingestuft. Einen Überblick über die verschiedenen Kundensegmente und deren unterschiedlichen Wertigkeiten bietet die Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Überblick der Kundensegmente und deren Wertigkeiten

	Kundensegmente		
	A	B	C
Kundenwert	hoch	mittel	gering
Nachfragewertigkeit	gering	mittel	hoch

Die von den Kunden gestellten Aufträge können, basierend auf ihrer Bearbeitungszeit, in unterschiedliche Auftragsgruppen unterteilt werden. Aufgrund von historischen Daten und Erfahrungswerten kann davon ausgegangen werden, dass selbst bei der Produktion von Unikaten die Bearbeitungszeit abgeschätzt werden kann. Im Folgenden wird beispielhaft zwischen „kurzen“, „mittleren“ und „langen“ Aufträgen unterschieden. Jedoch sind die in dieser Arbeit präsentierten Ansätze auch auf eine andere Gruppierung der Aufträge anwendbar.

Die verschiedenen Produkte im Sinne des RM setzen sich aus der Kombination eines Kundensegments und einer Auftragsgruppe zusammen. Mit den eingeführten beispielhaften Kundensegmenten und Auftragsgruppen können somit neun unterschiedliche Produkte definiert werden. Da angenommen wird, dass innerhalb eines Kundensegments je Zeiteinheit die kurzen Aufträge lukrativer als die mittleren und diese wiederum lukrativer als die langen Aufträge sind, kann festgehalten werden, dass mit einem kurzen Auftrag eines C-Kunden je Zeiteinheit der höchste Betrag und mit einem langen Auftrag eines A-Kunden je Zeiteinheit am wenigsten erwirtschaftet werden kann. Darüber hinaus wird die Annahme getroffen, dass auf Basis von historischen Daten die zukünftige Nachfrage hinsichtlich der verschiedenen Produkte abgeschätzt werden kann.

Wenn ein Kunde das produzierende Unternehmen hinsichtlich eines potenziellen Auftrags kontaktiert, wird diesem ein individueller Preis für das nachgefragte Produkt genannt. Der Kunde kann diesen Preis entweder akzeptieren oder ablehnen. Jegliche Art von Preisverhandlungen sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Folglich wird der Einfachheit halber davon ausgegangen, dass die Kunden mit dem individuellen Preis einverstanden sind. Bei der Anfrage gibt der Kunde ein gewünschtes Lieferdatum und eine Deadline an. Sollte ein Auftrag erst nach dem gewünschten Lieferdatum fertiggestellt werden, gilt dieser Auftrag als verspätet und der Kunde erhält zur Entschädigung einen Preisnachlass je verspäteter Zeiteinheit. Spätestens bis zur Deadline muss ein angenommener Auftrag jedoch fertiggestellt werden. Es wird davon ausgegangen, dass die für die Produktion benötigten Materialien erst nach der Auftragsannahmeentscheidung bestellt werden. Aufgrund von Verträgen mit Lieferanten wird angenommen, dass die Materialien immer lieferbar sind. Neben dem Standardversand besteht die Möglichkeit, einen Expressversand zu wählen, welcher wiederum mit zusätzlichen Kosten verbunden ist. Somit ist im Vergleich zu einer Materiallieferung mit dem Standardversand auch eine verfrühte

Bereitstellung der Materialien und demzufolge ein verfrühter Produktionsbeginn möglich. Die einzige limitierte Ressource ist die Produktionskapazität.

Es wird davon ausgegangen, dass im Produktionsprozess lediglich eine Maschine, auf welcher ein Engpass herrscht, vorhanden ist. Demzufolge ist es möglich, den Produktionsprozess als ein sogenanntes „single machine environment“ abzubilden (Jalora, 2006, S. 16 f.). Generell kann es sein, dass weitere Produktionsschritte vor und/oder nach dieser Maschine erfolgen. Mithilfe einer Mittelpunktterminierung könnten ausgehend von den festgesetzten Terminen auf der Engpassmaschine vorherige Produktionsschritte durch eine Rückwärtsterminierung und nachfolgende Produktionsschritte durch eine Vorwärtsterminierung eingeplant werden (Schuh et al., 2012, S. 48). Im Folgenden werden weitere Produktionsschritte jedoch vernachlässigt. Es wird angenommen, dass die Produktion lediglich die Bearbeitung eines Auftrags auf der Engpassmaschine umfasst. Eine parallele Bearbeitung von Aufträgen wird zudem ausgeschlossen. Sobald ein Auftrag angefangen wird, wird dieser ohne Unterbrechung fertiggestellt. Zwischen den Aufträgen fallen sequenzabhängige Rüstzeiten und damit verbundene sequenzabhängige Rüstkosten an.

Mithilfe einer effizienten Kapazitätssteuerung soll ermittelt werden, welcher Auftrag anzunehmen und welcher abzulehnen ist. Neben der Maximierung der Summe der Deckungsbeiträge ist das Ziel die Einhaltung der für jedes Kundensegment angestrebten Servicelevels, um somit einen guten Kompromiss zwischen den konkurrierenden Zielen zu erreichen. Damit bei angenommenen Aufträgen die Fertigstellung bis spätestens zur Deadline gewährleistet werden kann, ist es notwendig, eine Produktionsplanung, bei welcher die zuvor genannten Aspekte berücksichtigt werden, durchzuführen. Die Besonderheit ist, dass die ermittelten Produktionsdaten flexibel bleiben und bei Bedarf – beispielsweise aufgrund eines neu eingetroffenen Auftrags – eine Produktionsplanung mit modifizierten Daten erfolgen kann. Lediglich die Auftragsannahmeentscheidung kann nicht revidiert werden. Der Buchungszeitraum, in welchem die Aufträge fortlaufend eintreffen, und der Planungshorizont, in welchem die Produktion stattfindet, überlappen sich fast vollständig. Dadurch können neue Aufträge eintreffen, während zeitgleich früher eingetroffene und angenommene Aufträge bereits abgearbeitet werden. Zwischen dem Buchungszeitraum und dem Planungshorizont ist lediglich eine Verschiebung im Umfang der benötigten Zeit für eine Standardlieferung vorhanden. Wenn für eine Standardlieferung beispielsweise drei Tage benötigt werden, ist der Buchungszeitraum im Verhältnis zum Planungshorizont um drei Tage nach vorne gezogen, um so zu gewährleisten, dass theoretisch – auch ohne zwangsläufige Zuhilfenahme einer Expresslieferung – der volle Planungshorizont genutzt werden kann. Das Verhältnis zwischen dem Buchungszeitraum und Planungshorizont ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

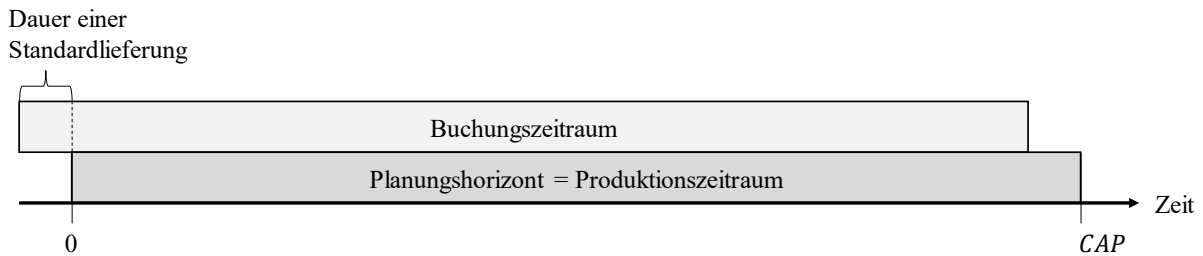


Abbildung 5.1: Verhältnis zwischen dem Buchungszeitraum und Planungshorizont

5.2 Verwendete Optimierungsmodelle

Die Auftragsannahmeentscheidung wird über einen zweistufigen Prozess, welcher auftragsweise durchgeführt wird, ermittelt. Dieser Prozess wird in vereinfachter und allgemeiner Form in Abbildung 5.2 dargestellt. In der ersten Instanz wird bei der mengenorientierten Steuerung mithilfe von Buchungslimits und bei der erlösorientierten Steuerung mithilfe eines Bid-Preises eine vorläufige Auftragsannahmeentscheidung getroffen (1. Hürde). Zur Ermittlung der Buchungslimits und des Bid-Preises wird das Kapazitätszuweisungsmodell, welches in Kapitel 5.2.1 erläutert wird, verwendet. Nur wenn gemäß der ersten Hürde die Auftragsannahmeentscheidung positiv ausfällt, wird der Auftrag in der zweiten Instanz in das Produktionsplanungsmodell integriert, andernfalls wird der Auftrag unmittelbar abgelehnt. Das Produktionsplanungsmodell wird in Kapitel 5.2.2 vorgestellt und dient der Überprüfung, ob der Auftrag unter Einhaltung der vom Kunden angegebenen Fristen in die Produktionsplanung integriert werden kann und ob dies lohnend ist. Ausschließlich wenn ein Auftrag auch laut der optimalen Lösung des Produktionsplanungsmodells angenommen werden soll, fällt die endgültige Auftragsannahmeentscheidung positiv aus. Anhand der Abbildung 5.2 ist zu erkennen, dass das Produktionsplanungsmodell mehrfach durchgeführt wird. Der genaue Ablauf des Auftragsannahmeprozesses und die damit verbundene Verwendung der nachfolgend erläuterten Optimierungsmodelle wird in den Kapiteln 7 und 8 aufgeführt, da dieser zum Teil bei der mengen- und erlösorientierten Steuerung unterschiedlich verläuft. Der Ansatz, für die Auftragsannahmeentscheidung mit den Buchungslimits bzw. dem Bid-Preis (und folglich (indirekt) mit dem Kapazitätszuweisungsmodell) eine erste Hürde im Auftragsannahmeprozess zu generieren und das Produktionsplanungsmodell als zweite Hürde zu verwenden, ist bei beiden Ansätzen jedoch identisch.

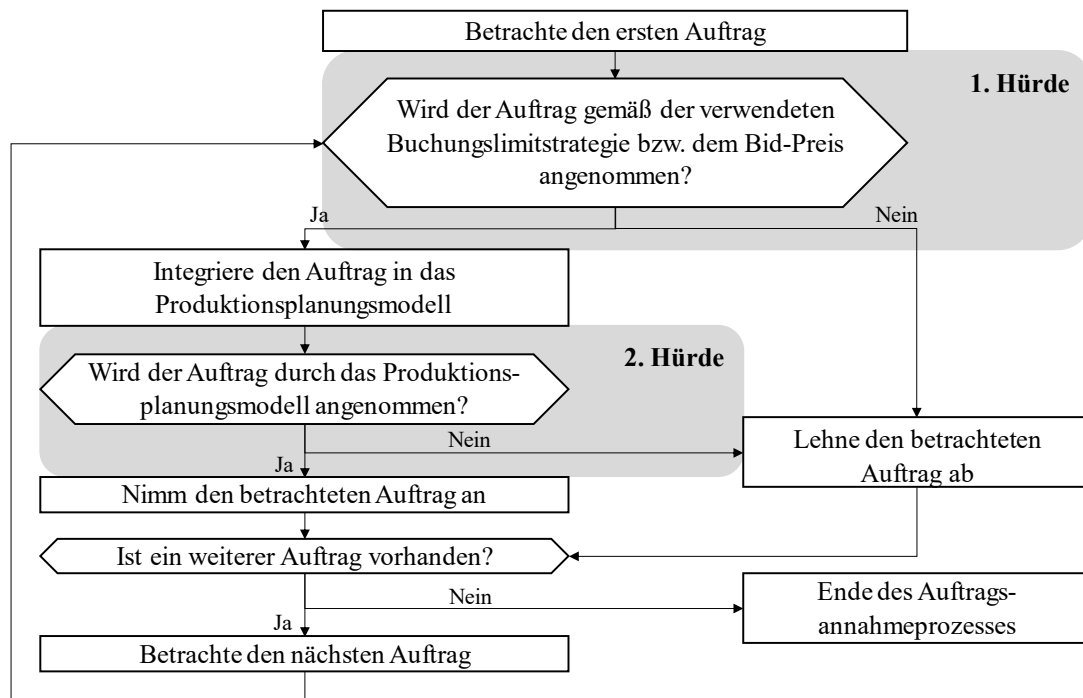


Abbildung 5.2: Vereinfachte und allgemeine Darstellung des Auftragsannahmeprozesses

5.2.1 Kapazitätszuweisungsmodell

Das Kapazitätszuweisungsmodell basiert auf dem deterministischen linearen Modell nach Klein und Steinhardt (2008, S. 109 f.), welches bereits in Kapitel 3.3.2 vorgestellt wurde, und wird auch in den Veröffentlichungen von Lohnert und Fischer (2019a, 2019b, 2021) verwendet. Um es an die betrachtete Problemstellung anzupassen, wurden an dem Modell nach Klein und Steinhardt (2008, S. 109 f.) einige Veränderungen vorgenommen: Da lediglich eine limitierte Ressource – konkret eine Produktionsmaschine – betrachtet wird, fällt die Menge der Ressourcen Res in diesem Modell weg. Auf dieser Maschine steht die in Zeiteinheiten gemessene Kapazität CAP zur Verfügung. Auch die Menge der Produkte P ist in dem Kapazitätszuweisungsmodell nicht vorhanden. Stattdessen werden die Mengen K (für die Kundensegmente k) und Q (für die Auftragsgruppen q) eingeführt. Wie bereits in 5.1 erläutert, stellt die Kombination einer Auftragsgruppe q und eines Kundensegments k ein Produkt im Sinne des RM dar. Die Nachfrageprognose für ein Produkt qk wird durch den Parameter DF_{qk} abgebildet und gibt an, wie viele Aufträge aus der Auftragsgruppe q und dem Kundensegment k innerhalb des betrachteten Planungshorizonts erwartet werden. Der durchschnittliche Deckungsbeitrag, der bei Annahme eines Auftrags der Auftragsgruppe q und des Kundensegments k erwirtschaftet werden kann, ist aCM_{qk} . Darüber hinaus spiegelt $mProd_q$ die maximale Bearbeitungszeit eines Auftrags der Auftragsgruppe q wider. Es wird die maximale und nicht die durchschnittliche Bearbeitungszeit verwendet, um die tatsächliche (zu dem Zeitpunkt noch unbekannt) Bearbeitungszeit nicht zu unterschätzen und somit immer eine zulässige Lösung zu ermitteln.

Im Gegensatz zu dem in Kapitel 3.3.2 vorgestellten Modell werden mithilfe des Kapazitätszuweisungsmodells kapazitätsorientierte anstatt produktorientierte Buchungslimits berechnet. Somit wird anhand

der Variablen x_{qk} festgehalten, wie viel Kapazität auf der Maschine für Aufträge aus der Auftragsgruppe q und dem Kundensegment k zu reservieren ist. Mit einer Division des Buchungslimits x_{qk} durch die maximale Bearbeitungszeit $mProd_q$ der zugehörigen Auftragsgruppe q kann das kapazitätsorientierte Buchungslimit x_{qk} in das produktorientierte Buchungslimit x_{qk}^{Pr} überführt werden. Das produktorientierte Buchungslimit x_{qk}^{Pr} gibt die Anzahl anzunehmender Aufträge aus der Auftragsgruppe q und dem Kundensegment k wieder.

Vollständig neu kommt hinzu, dass für jedes Kundensegment k ein bestimmtes Servicelevel α_k angestrebt wird. Abweichungen von diesen Servicelevels α_k sind erlaubt, werden jedoch durch die Variablen dev_k festgehalten und in der Zielfunktion mit dem fiktiven Strafkostensatz $Pdev_k$ multipliziert. Die verwendete Notation wird in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Notationstabelle des Kapazitätszuweisungsmodells

Mengen		
K		Menge aller Kundensegmente
Q		Menge aller Auftragsgruppen
Parameter		
α_k	$k \in K$	Angestrebtes Servicelevel für das Kundensegment k
aCM_{qk}	$q \in Q, k \in K$	Durchschnittlicher Deckungsbeitrag eines Auftrags der Auftragsgruppe q aus dem Kundensegment k
CAP		Zur Verfügung stehende Kapazität
DF_{qk}	$q \in Q, k \in K$	Erwartete Nachfrage für Aufträge aus der Auftragsgruppe q und dem Kundensegment k
$mProd_q$	$q \in Q$	Maximale Bearbeitungszeit eines Auftrags aus der Auftragsgruppe q
$Pdev_k$	$k \in K$	Strafkostensatz je Prozentpunkt Abweichung vom Servicelevel α_k des Kundensegments k
Variablen		
dev_k	$k \in K$	In Prozentpunkten gemessene Abweichung vom Servicegrad α_k des Kundensegments k
x_{qk}	$q \in Q, k \in K$	Einfaches (kapazitätsorientiertes) Buchungslimit für Aufträge aus der Auftragsgruppe q und dem Kundensegment k

Das Kapazitätszuweisungsmodell setzt sich aus der Zielfunktion (5.1) und den Nebenbedingungen (5.2) bis (5.6) zusammen.

$$\max \sum_{q \in Q} \sum_{k \in K} aCM_{qk} \cdot \frac{x_{qk}}{mProd_q} - \sum_{k \in K} Pdev_k \cdot dev_k \quad (5.1)$$

$$\sum_{q \in Q} \sum_{k \in K} x_{qk} \leq CAP \quad (5.2)$$

$$\frac{x_{qk}}{mProd_q} \leq DF_{qk} \quad \forall q \in Q, k \in K \quad (5.3)$$

$$\sum_{q \in Q} \frac{x_{qk}}{mProd_q} \geq (\alpha_k - dev_k) \cdot \sum_{q \in Q} DF_{qk} \quad \forall k \in K \quad (5.4)$$

$$dev_k \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (5.5)$$

$$x_{qk} \geq 0 \quad \forall q \in Q, k \in K \quad (5.6)$$

Mithilfe der Zielfunktion (5.1) wird die Summe der Deckungsbeiträge abzüglich der Strafkosten, welche durch Abweichungen von den Servicelevels α_k entstehen, maximiert. Dafür wird im ersten Teil der Zielfunktion der durchschnittliche Deckungsbeitrag aCM_{qk} mit dem produktorientierten Buchungslimit, welches sich aus der Division des kapazitätsorientierten Buchungslimits x_{qk} durch die maximale Bearbeitungszeit $mProd_q$ ergibt, multipliziert und über alle Auftragsgruppen q und Kundensegmente k aufsummiert. Im zweiten Teil der Zielfunktion wird die von dem Servicelevel α_k ermittelte Abweichung dev_k mit dem fiktiven Strafkostenfaktor $Pdev_k$ multipliziert und über alle Kundensegmente k addiert. Somit können mit dieser Zielfunktion neben der Maximierung der Deckungsbeiträge Abweichungen von den definierten Servicelevels α_k bestraft und letztlich minimiert werden.

Durch die Nebenbedingung (5.2) wird, ähnlich wie in der Nebenbedingungsgruppe (3.2), die Einhaltung der zur Verfügung stehenden Kapazität CAP garantiert. Dadurch, dass die kapazitätsorientierten Buchungslimits x_{qk} bereits direkt die für das Produkt qk zu reservierende Kapazität widerspiegeln, können, im Gegensatz zu der Restriktionsgruppe (3.2), bei dieser Restriktion die Buchungslimits x_{qk} unmittelbar über alle Kundensegmente k und Auftragsgruppen q summiert werden. Die Nebenbedingungsgruppe (5.3) kann inhaltlich mit der Nebenbedingungsgruppe (3.3) gleichgesetzt werden. Durch diese Restriktionsgruppe wird verhindert, dass das produktorientierte Buchungslimit, welches durch die Division von x_{qk} durch $mProd_q$ ermittelt wird, die zugehörige Nachfrageprognose DF_{qk} übersteigt.

Abweichungen von dem angestrebten Servicelevel α_k werden mittels der Restriktionsgruppe (5.4) festgestellt. Auf der linken Seite der Ungleichung wird ermittelt, wie viele Aufträge des Kundensegments k gemäß der berechneten Lösung angenommen werden. Auf der rechten Seite der Ungleichung kann durch die Multiplikation des Servicelevels α_k mit der Summe der Nachfrageprognose DF_{qk} über alle Auftragsgruppen q ermittelt werden, wie viele Aufträge eines Kundensegments k angenom-

men werden müssten, um das angestrebte Servicelevel α_k einzuhalten. Bei dieser Nebenbedingungsgruppe handelt es sich um sogenannte „weiche“ Restriktionen. Durch die Subtraktion der Variable dev_k von α_k werden Unterschreitungen von dem angestrebten Servicelevel α_k ermöglicht. Erfasste Abweichungen wiederum werden, wie bereits erläutert, in der Zielfunktion (5.1) berücksichtigt. Wird das angestrebte Servicelevel α_k erreicht oder sogar überschritten, nimmt die Variable dev_k den Wert 0 an.

Durch die Restriktionsgruppen (5.5) und (5.6) wird die Nicht-Negativität der Variablen dev_k und x_{qk} gewährleistet.

5.2.2 Produktionsplanungsmodell

Das Produktionsplanungsmodell basiert auf dem sogenannten „Order Acceptance and Scheduling“ Modell aus Thevenin et al. (2016). Auch dieses Modell wurde an die betrachtete Problemstellung angepasst. Während Thevenin et al. (2016) eine Zielfunktion zur Minimierung von Kosten verwenden, wird in dem Produktionsplanungsmodell die Maximierung des Profits abzüglich fiktiver Kosten für Abweichungen von den angestrebten Servicelevels und ungenutzte Produktionskapazität vorgenommen. Ferner wurden verschiedene Nebenbedingungsgruppen ergänzt, um so beispielsweise die angestrebten Servicelevels in dem Produktionsplanungsmodell zu berücksichtigen oder den Produktionszeitraum auf die zur Verfügung stehende Kapazität zu begrenzen. Die Veränderungen im Vergleich zu dem Modell nach Thevenin et al. (2016) werden in der nachfolgenden Beschreibung des Produktionsplanungsmodells im Detail in Fußnoten erläutert.

Das Produktionsplanungsmodell wird in ähnlicher Form ebenfalls in den Veröffentlichungen von Lohnert und Fischer (2019a, 2019b) und in identischer Form in der Veröffentlichung von Lohnert und Fischer (2021) verwendet. Bevor das Optimierungsmodell erläutert wird, wird zunächst die Notation eingeführt. Ein Teil der Notation ist bereits aus dem Kapazitätszuweisungsmodell bekannt und wird folglich nicht erneut definiert, sondern lediglich am Ende der Notationserläuterung in den Tabellen 5.3 bis 5.5 mit aufgeführt.

Neben den bereits aus dem Kapazitätszuweisungsmodell bekannten Mengen K und Q werden in dem Produktionsplanungsmodell fünf weitere Mengen verwendet. In der Menge J sind alle aktuell vorliegenden Aufträge enthalten. An dieser Stelle sei noch einmal betont, dass die Aufträge fortlaufend eintreffen und das Produktionsplanungsmodell mehrfach durchlaufen wird (s. Abbildung 5.2). Die Mengen A und H sind Teilmengen von J und enthalten die Aufträge, welche bereits in vorherigen Durchläufen abgelehnt (A) bzw. angenommen (H) wurden. Ferner werden die Mengen J_0 und J_n benötigt, um mithilfe von Dummyaufträgen die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge abbilden zu können. So kann gewährleistet werden, dass jeder Auftrag genau einen Vorgänger und einen Nachfolger besitzt. In J_0 ist der Dummyauftrag 0 enthalten, welcher der Vorgänger des ersten Auftrags ist, wohingegen in J_n der Dummyauftrag $n + 1$ enthalten ist, welcher den Nachfolger des letzten Auftrags darstellt.

Zu jedem Auftrag gehören, wie in der Problemstellung bereits erläutert, spezifische Daten. So wird bei Annahme eines Auftrags j – in diesem Fall nimmt die binäre Variable z_j den Wert 1 an – mit diesem der individuelle Deckungsbeitrag CM_j erwirtschaftet. Dieser schwankt um den durchschnittlichen Deckungsbeitrag aCM_{qk} der zugehörigen Auftragsgruppe q und des zugehörigen Kundensegments k . Sofern der Auftrag j aus dem Kundensegment k stammt, besitzt der Parameter L_{kj} den Wert 1 und andernfalls 0. Nach dem gleichen Prinzip kann mit dem Parameter \bar{L}_{qj} festgehalten werden, ob der Auftrag j zu der Auftragsgruppe q gehört ($\bar{L}_{qj} = 1$), bzw. ob dies nicht der Fall ist ($\bar{L}_{qj} = 0$).

Die tatsächliche Bearbeitungszeit $Prod_j$ eines Auftrags j entspricht höchstens der maximalen Bearbeitungszeit $mProd_q$ der zugehörigen Auftragsgruppe q . Ferner bildet D_j den gewünschten Fertigstellungszeitpunkt und \bar{D}_j die Deadline des Auftrags j ab. Durch die Variable f_j wird der Fertigstellungszeitpunkt des Auftrags j gekennzeichnet. Sofern ein Auftrag verspätet und somit nach dem gewünschten Fertigstellungszeitpunkt D_j beendet wird, fallen je verspäteter Zeiteinheit die Strafkosten PT_k des zugehörigen Kundensegments k an. Dieser Strafkostensatz ist von dem Kundensegment k abhängig, da durch Verspätung unmittelbar die Kunden betroffen sind. Die anfallenden Strafkosten können als Preisnachlass für den Kunden und somit als Entschädigung verstanden werden. Abhängig vom Kundensegment k fällt die Entschädigung je verspäteter Zeiteinheit unterschiedlich hoch aus. Die Anzahl der verspäteten Zeiteinheiten eines Auftrags j wird mithilfe der Variable t_j festgehalten.

Unter Verwendung des Standardversands stehen die Materialien so zur Verfügung, dass der Auftrag j ab dem Zeitpunkt R_j bearbeitet werden kann. Mit einer Expresslieferung kann der Auftrag j bereits verfrüht zum Zeitpunkt \bar{R}_j begonnen werden. Somit spiegelt R_j den regulären und \bar{R}_j den verfrühten Freigabezeitpunkt des Auftrags j wider. Der Produktionsbeginn eines Auftrags j wird durch die Variable b_j abgebildet. Um den Beginn b_j eines Auftrags j zu einem späteren Zeitpunkt festhalten zu können, werden die Parameter B_j^1 als untere Schranke und B_j^2 als obere Schranke eingeführt. B_j^1 wird zunächst der Wert 0 und B_j^2 eine ausreichend große Zahl, wie bspw. der Wert der zur Verfügung stehenden Kapazität CAP , zugewiesen. Bei Bedarf können diese Werte verändert werden, um somit die Variable b_j auf einen bestimmten Wert zu zwingen.

Im Falle eines verfrühten Bearbeitungsbeginns werden mithilfe der Variablen e_j die Anzahl der verfrühten Zeiteinheiten wiedergegeben. Je verfrühter Zeiteinheit fallen die Strafkosten PE_q der zugehörigen Auftragsgruppe q an. Dieser Strafkostensatz ist abhängig von der Auftragsgruppe q , da angenommen wird, dass der Umfang der Materiallieferung von der Auftragsgruppe q abhängt und folglich auch die Versandkosten für eine Expresslieferung dementsprechend ausfallen.

Wird der Auftrag j unmittelbar vor Auftrag i gefertigt, nimmt die Binärvariable y_{ji} den Wert 1 an. In dem Fall entstehen die Rüstkosten SC_{ji} und die Rüstzeit ST_{ji} wird benötigt. Um ungenutzte Produktionszeit und somit Stillstandszeiten der Maschine zu vermeiden, werden diese abgeschätzt und durch die Variable u festgehalten. Diese werden je ungenutzter Zeiteinheit mit dem fiktiven Strafkostensatz PU bewertet. Eine Übersicht der in dem Produktionsplanungsmodell verwendeten Notation wird in den Tabellen 5.3 bis 5.5 gegeben.

Tabelle 5.3: Notationstabelle des Produktionsplanungsmodells

Mengen		
$A \subseteq J$		Menge aller Aufträge, welche in vorherigen Durchläufen abgelehnt wurden ⁴
$H \subseteq J$		Menge aller Aufträge, welche in vorherigen Durchläufen angenommen wurden ⁴
J		Menge aller bis zu diesem Durchlauf vorliegenden Aufträge
J_0		Menge des Dummyauftrags (0) für den Beginn der Produktionsreihenfolge
J_n		Menge des Dummyauftrags ($n + 1$) für das Ende der Produktionsreihenfolge
K		Menge aller Kundensegmente ⁴
Q		Menge aller Auftragsgruppen ⁴
Parameter		
α_k	$k \in K$	Angestrebtes Servicelevel für das Kundensegment k ⁴
B_j^1	$j \in J$	Untere Schranke für den Produktionsbeginn des Auftrags j ⁴
B_j^2	$j \in J$	Obere Schranke für den Produktionsbeginn des Auftrags j ⁴
CM_j	$j \in J$	Individueller Deckungsbeitrag des Auftrags j ⁴
CAP		Zur Verfügung stehende Kapazität ⁴
D_j	$j \in J$	Gewünschter Fertigstellungszeitpunkt für Auftrag j
\bar{D}_j	$j \in J$	Deadline für Auftrag j

⁴ Dieser Teil der Notation wurde im Vergleich zum Modell nach Thevenin et al. (2016) neu hinzugefügt.

Tabelle 5.4: Notationstabelle des Produktionsplanungsmodells, fortführend

Parameter		
L_{kj}	$k \in K, j \in J$	Zugehörigkeit: 1, wenn Auftrag j aus Kundensegment k stammt; sonst 0 ⁵
\bar{L}_{qj}	$q \in Q, j \in J$	Zugehörigkeit: 1, wenn Auftrag j der Auftragsgruppe q angehört; sonst 0 ⁵
$Pdev_k$	$k \in K$	Strafkostensatz je Prozentpunkt Abweichung vom Servicelevel α_k des Kundensegments k ⁵
PE_q	$q \in Q$	Strafkostensatz je Zeiteinheit für den verfrühten Produktionsbeginn eines Auftrags aus der Auftragsgruppe q ⁶
$Prod_j$	$j \in J$	Tatsächliche Bearbeitungszeit eines Auftrags j
PT_k	$k \in K$	Strafkostensatz je Zeiteinheit für die verspätete Fertigstellung eines Auftrags aus dem Kundensegment k ⁶
PU		Strafkostensatz je (abgeschätzter) ungenutzter Zeiteinheit ⁵
R_j	$j \in J$	Regulärer Freigabezeitpunkt für die Produktion von Auftrag j
\bar{R}_j	$j \in J$	Verfrühter Freigabezeitpunkt für die Produktion von Auftrag j (Expresslieferung)
SC_{ji}	$j \in J \cup Jn,$ $i \in J \cup Jn$	Rüstkosten, wenn Auftrag j unmittelbar vor Auftrag i gefertigt wird
ST_{ji}	$j \in J \cup Jn,$ $i \in J \cup Jn$	Rüstzeit, wenn Auftrag j unmittelbar vor Auftrag i gefertigt wird
Variablen		
b_j	$j \in J \cup Jn$	Startzeitpunkt der Bearbeitung von Auftrag j
dev_k	$k \in K$	In Prozentpunkten gemessene Abweichung vom angestrebten Servicelevel α_k für das Kundensegment k ⁵
e_j	$j \in J$	Anzahl der Zeiteinheiten, um die Auftrag j verfrüht ist
f_j	$j \in J \cup Jn$	Fertigstellungszeitpunkt des Auftrags j

⁵ Dieser Teil der Notation wurde im Vergleich zum Modell nach Thevenin et al. (2016) neu hinzugefügt.⁶ In der Modellformulierung nach Thevenin et al. (2016) gibt es für jeden Auftrag j einen individuellen Strafkostensatz.

Tabelle 5.5: Notationstabelle des Produktionsplanungsmodells, fortführend

Variablen		
t_j	$j \in J$	Anzahl der Zeiteinheiten, um die Auftrag j verspätet ist
u		(Abgeschätzte) ungenutzte Zeiteinheiten ⁷
y_{ji} (binär)	$j \in J0 \cup J,$ $i \in J \cup Jn$	1, wenn Auftrag j unmittelbar vor Auftrag i bearbeitet wird; sonst 0
z_j (binär)	$j \in J0 \cup J \cup Jn$	1, wenn Auftrag j angenommen wird; sonst 0 ⁸

Das Produktionsplanungsmodell setzt sich aus der Zielfunktion (5.7) und den Restriktionen (5.8) bis (5.27) zusammen.

$$\begin{aligned} \max \sum_{j \in J} CM_j \cdot z_j - \sum_{j \in J0 \cup J} \sum_{i \in J \cup Jn: i \neq j} SC_{ji} \cdot y_{ji} & \quad (5.7) \\ - \sum_{q \in Q} \sum_{j \in J} PE_q \cdot \bar{L}_{qj} \cdot e_j - \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} PT_k \cdot L_{kj} \cdot t_j & \\ - \sum_{k \in K} Pdev_k \cdot dev_k - PU \cdot u & \end{aligned}$$

$$f_j = b_j + Prod_j \quad \forall j \in J \quad (5.8)$$

$$t_j \geq f_j - D_j - \bar{D}_j \cdot (1 - z_j) \quad \forall j \in J \quad (5.9)$$

$$e_j \geq R_j - b_j - \bar{D}_j \cdot (1 - z_j) \quad \forall j \in J \quad (5.10)$$

$$b_j \geq f_i + ST_{ij} \cdot y_{ij} - \bar{D}_i \cdot (1 - y_{ij}) \quad \forall j \in J \cup Jn, i \in J0 \cup J: i \neq j \quad (5.11)$$

$$b_j \geq \bar{R}_j \quad \forall j \in J \quad (5.12)$$

$$f_j \leq \bar{D}_j \quad \forall j \in J \quad (5.13)$$

$$z_j - \sum_{i \in J \cup Jn: i \neq j} y_{ji} = 0 \quad \forall j \in J0 \cup J \quad (5.14)$$

$$z_j - \sum_{i \in J0 \cup J: i \neq j} y_{ij} = 0 \quad \forall j \in J \cup Jn \quad (5.15)$$

$$\sum_{j \in J \setminus A} L_{kj} \cdot z_j \geq (\alpha_k - dev_k) \cdot \sum_{j \in J} L_{kj} \quad \forall k \in K \quad (5.16)$$

$$\max\{\bar{R}_j + Prod_j | j \in J\} - \sum_{j \in J} \bar{R}_j \cdot y_{0j} - \sum_{j \in J} Prod_j \cdot z_j - \sum_{j \in J0 \cup J} \sum_{i \in J \cup Jn: i \neq j} ST_{ji} \cdot y_{ji} \leq u \quad (5.17)$$

$$z_j = 1 \quad \forall j \in H \cup J0 \cup Jn \quad (5.18)$$

⁷ Dieser Teil der Notation wurde im Vergleich zum Modell nach Thevenin et al. (2016) neu hinzugefügt.

⁸ In dem Modell von Thevenin et al. (2016) nimmt die Binärvariable z_j den Wert 1 an, wenn der Auftrag j abgelehnt wird. Die Bedeutung dieser Variable wurde für das Produktionsplanungsmodell verändert, um die Modellformulierung und den Output verständlicher und intuitiver zu gestalten. Diese veränderte Definition der Variable z_j zieht Änderungen in der Modellformulierung nach sich, auf welche in weiteren Fußnoten ebenfalls hingewiesen wird.

$$z_j = 0 \quad \forall j \in A \quad (5.19)$$

$$b_j \geq B_j^1 \quad \forall j \in J \quad (5.20)$$

$$b_j \leq B_j^2 \quad \forall j \in J \quad (5.21)$$

$$b_{n+1} \leq CAP \quad (5.22)$$

$$dev_k \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (5.23)$$

$$b_j, e_j, f_j, t_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (5.24)$$

$$u \geq 0 \quad (5.25)$$

$$y_{ji} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \cup J, i \in J \cup Jn: i \neq j \quad (5.26)$$

$$z_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \cup J \cup Jn \quad (5.27)$$

Die Zielfunktion (5.7)⁹ maximiert die Summe der Deckungsbeiträge der angenommenen Aufträge abzüglich diverser, zum Teil fiktiver Kosten. Die realen Kosten setzen sich aus den Rüstkosten und den Strafkosten für verfrühte Produktionsbeginne und verspätete Fertigstellungen zusammen. Hinzu kommen die fiktiven Strafkosten für Abweichungen von den angestrebten Servicelevels und ungenutzte Produktionszeit.

Die korrekte Bearbeitungsdauer eines jeden Auftrags j wird durch die Nebenbedingungsgruppe (5.8) garantiert. In dieser wird festgehalten, dass der Fertigstellungszeitpunkt f_j exakt dem Produktionsbeginn b_j zuzüglich der Produktionsdauer $Prod_j$ entspricht. Verspätungen werden durch die Restriktionsgruppe (5.9)¹⁰ ermittelt. Dazu wird von dem Fertigstellungszeitpunkt f_j der gewünschte Fertigstellungszeitpunkt D_j abgezogen, um die Anzahl der verspäteten Zeiteinheiten t_j zu ermitteln. Die Deadline \bar{D}_j

⁹ In dem Modell nach Thevenin et al. (2016) wird eine Zielfunktion verwendet, durch welche Rüstkosten, Kosten für verfrühte Produktionsbeginne und verspätete Fertigstellungen sowie Strafkosten für Ablehnungen minimiert werden. Im Gegensatz dazu wird in dem hier vorgestellten Produktionsplanungsmodell die Maximierungsziel-funktion (5.7) verwendet, bei welcher zusätzlich Deckungsbeiträge, Strafkosten für Abweichungen von den angestrebten Servicelevels α_k sowie ungenutzte Produktionskapazität berücksichtigt werden. Die Strafkosten für Ablehnungen sind in dem Produktionsplanungsmodell nicht mehr enthalten, um Ablehnungen nicht doppelt zu bestrafen, denn Ablehnungen werden, wenn es dadurch zu Abweichungen von den angestrebten Servicelevels α_k kommt, bereits durch den vorletzten Term in der Zielfunktion (5.7) berücksichtigt.

¹⁰ Im Vergleich zu dem Modell nach Thevenin et al. (2016) wurde der letzte Term der Nebenbedingungsgruppe (5.9) ergänzt. Durch diesen Term wird die Verspätungsvariable t_j bei Ablehnung des Auftrags j unmittelbar auf den Wert 0 gezwungen. Darüber hinaus wird mittels dieser Formulierung der Sonderfall, wenn der gewünschte Fertigstellungszeitpunkt D_j so vom Kunden angegeben wird, dass der Auftrag j nicht innerhalb des regulären Zeitfensters bearbeitet werden kann, d.h. wenn $D_j - R_j < Prod_j \leq \bar{D}_j - \bar{R}_j$, korrekt abgedeckt. Der zuvor beschriebene Sonderfall führt in der Modellformulierung nach Thevenin et al. (2016) dazu, dass die Variable e_j auch bei Ablehnung des Auftrags j einen von Null verschiedenen Wert annehmen würde. Um zusätzliche Ablehnungsstrafkosten zu vermeiden (s. Fußnote 9), wird ein solcher Auftrag, wenn möglich, immer angenommen. Folglich beeinflusst diese Formulierung die Auftragsannahmeentscheidung in ungewünschter

fungiert in dieser Nebenbedingungsgruppe als eine ausreichend große Zahl und sorgt dafür, dass im Falle einer Ablehnung eines Auftrags ($z_j = 0$) die rechte Seite der Ungleichung negativ wird. Eine negative rechte Seite entsteht ebenfalls, wenn ein Auftrag nicht verspätet ist und demzufolge der Fertigstellungszeitpunkt f_j einen kleineren Wert als der gewünschte Fertigstellungszeitpunkt D_j besitzt. Durch die Nichtnegativitätsbedingungsgruppe der Variable t_j (5.24) und dadurch, dass der Wert von t_j durch die Zielfunktion minimiert wird, nimmt t_j in diesem Fall den Wert 0 an. Nach dem gleichen Prinzip wird durch die Restriktionen (5.10)¹¹ die Anzahl der verfrühten Zeiteinheiten e_j ermittelt: Von dem regulären Freigabezeitpunkt R_j wird der Produktionsbeginn b_j subtrahiert. Erneut dient die Deadline \bar{D}_j als ausreichend große Zahl, damit die Variable e_j im Falle einer Ablehnung des Auftrags j ($z_j = 0$) der Wert 0 zugewiesen wird.

Der Produktionsbeginn b_j und der Fertigstellungszeitpunkt f_j werden durch die Restriktionsgruppen (5.11) bis (5.13) weiter eingegrenzt. Anhand der Nebenbedingungsgruppe (5.11) wird garantiert, dass der Produktionsbeginn b_j des Auftrags j frühestens nach dem Fertigstellungszeitpunkt f_i und der Rüstzeit ST_{ij} des unmittelbaren Vorgängers i ($y_{ij} = 1$) stattfinden darf. Sollte der Auftrag i nicht (unmittelbar) vor Auftrag j bearbeitet werden ($y_{ij} = 0$), wird die Deadline \bar{D}_i erneut als ausreichend große Zahl subtrahiert. Dadurch wird garantiert, dass der Produktionsbeginn b_j des Auftrags j nur von dem unmittelbaren Vorgänger i ($y_{ij} = 1$) beeinflusst wird. Ferner wird mittels der Restriktionsgruppe (5.12)¹² gewährleistet, dass die Bearbeitung des Auftrags j nicht vor dem verfrühtem Freigabezeitpunkt \bar{R}_j beginnt. Dass der Fertigstellungszeitpunkt f_j maximal der Deadline \bar{D}_j entspricht und demzufolge eine Fertigstellung nach der Deadline \bar{D}_j nicht zulässig ist, wird mithilfe der Restriktionsgruppe (5.13)¹² geregelt.

Die Restriktionsgruppen (5.14)¹³ und (5.15)¹³ verknüpfen die Variablen z_j und y_{ji} bzw. y_{ij} miteinander. Sobald Auftrag j angenommen ist und demnach z_j den Wert 1 annimmt, wird dieser Auftrag in die

Weise. In manchen Fällen führt der beschriebene Sonderfall sogar dazu, dass mit dem Modell nach Thevenin et al. (2016) keine zulässige Lösung ermittelt werden kann. Die hier vorgeschlagene Änderung behebt dieses Problem.

¹¹ Auch bei der Nebenbedingungsgruppe (5.10) wurde der letzte Term im Vergleich zu dem Modell nach Thevenin et al. (2016) ergänzt, um den in der vorherigen Fußnote beschriebenen Sonderfall korrekt abzudecken. Im Falle einer Ablehnung des Auftrags j wird die Variable e_j unmittelbar auf den Wert 0 gezwungen.

¹² Durch die Veränderungen in den Nebenbedingungsgruppen (5.9) und (5.10) können die Restriktionsgruppen (5.12) und (5.13) im Vergleich zu dem Modell nach Thevenin et al. (2016) vereinfacht werden. In der Modellformulierung nach Thevenin et al. (2016) werden in diesen Nebenbedingungsgruppen die Variablen b_j und f_j eines abgelehnten Auftrags j so gewählt, dass der Auftrag unmittelbar zum gewünschten Zeitpunkt d_j fertiggestellt wird. Somit nehmen – abgesehen von dem in der Fußnote 10 beschriebenen Sonderfall – die Variablen e_j und t_j für einen abgelehnten Auftrag j den Wert 0 an. Hierbei ist es wichtig zu beachten, dass auch für einen abgelehnten Auftrag j ein Produktionsbeginn b_j und Fertigstellungszeitpunkt f_j angegeben werden. Bei Ablehnung eines Auftrags j können die Werte von b_j und f_j ignoriert werden. Diese Anmerkung gilt sowohl für das Modell nach Thevenin et al. (2016) als auch für das hier vorgestellte Produktionsplanungsmodell.

¹³ Durch die veränderte Definition der Variable z_j (s. Fußnote 8) wurden die Nebenbedingungsgruppen (5.14) und (5.15) im Vergleich zu dem Modell nach Thevenin et al. (2016) umformuliert. Inhaltlich wurden keine Veränderungen an diesen Restriktionsgruppen vorgenommen.

Produktionsreihenfolge aufgenommen. Hierbei regeln die Nebenbedingungen (5.14), dass ein angenommener Auftrag j genau einen Nachfolger besitzt und es folglich aus allen potenziellen Nachfolgern ($i \in J \cup Jn: i \neq j$) lediglich einen tatsächlichen Nachfolger i gibt ($y_{ji} = 1$). Damit der letzte (reale) Auftrag auch exakt einen Nachfolger besitzt, wird der Dummyauftrag $n + 1$ aus der Menge Jn benötigt. Nach dem gleichen Prinzip wird durch die Restriktionsgruppe (5.15) festgelegt, dass ein angenommener Auftrag j exakt einen Vorgänger besitzt. Durch den Dummyauftrag 0 aus der Menge $J0$ wird gewährleistet, dass auch der erste (reale) Auftrag einen Vorgänger besitzt. Sollte der Auftrag j abgelehnt werden ($z_j = 0$), wird mittels der Restriktionsgruppen (5.14) und (5.15) geregelt, dass dieser Auftrag nicht in die Reihenfolgebildung aufgenommen wird und folglich die Variablen y_{ij} bzw. y_{ji} für alle potenziellen Vorgänger- bzw. Nachfolgerbeziehungen auf den Wert 0 gezwungen werden.

Die Berücksichtigung der angestrebten Servicelevels α_k ist in den Restriktionen (5.16)¹⁴ wiederzufinden. Für jedes Kundensegment k wird auf der linken Seite der Ungleichung ermittelt, wie viele Aufträge dieses Kundensegments k angenommen werden. Aufträge, welche bereits zuvor abgelehnt wurden und demnach in der Teilmenge A enthalten sind, werden dabei direkt ausgeklammert. Diese Anzahl wird in ein Größer-Gleich-Verhältnis zu der rechten Seite der Ungleichung gesetzt. In dieser wird, ähnlich wie in der Restriktionsgruppe (5.4) des Kapazitätszuweisungsmodells, ermittelt, wie viele Aufträge anzunehmen sind, um das Servicelevel α_k einzuhalten. Um festzustellen, wie viele Aufträge zum Zeitpunkt der Durchführung des Modells von einem Kundensegment k gestellt wurden, wird die Summe über alle Aufträge $j \in J$ des Zugehörigkeitsparameters L_{kj} gebildet. Abweichungen von den Servicelevels α_k sind erlaubt, werden jedoch durch die Variablen dev_k dokumentiert, welche wiederum in der Zielfunktion in Verbindung mit den fiktiven Strafkosten $Pdev_k$ berücksichtigt werden.

Durch die Restriktion (5.17)¹⁵ wird die ungenutzte Produktionszeit u abgeschätzt. Der betrachtete Zeitraum wird durch den verfrühten Freigabezeitpunkt \bar{R}_j des ersten Auftrags j , welcher den Dummyauftrag 0 als unmittelbaren Vorgänger besitzt ($y_{0j} = 1$), und den maximalen frühestmöglichen Fertigstellungszeitpunkt eingegrenzt. Dieser entspricht der maximalen Zahl, welche sich aus der Addition des frühestmöglichen Freigabezeitpunkt \bar{R}_j und der Produktionszeit $Prod_j$ von allen Aufträgen $j \in J$ ergibt. Von diesem betrachteten Zeitraum werden von allen angenommenen und eingeplanten Aufträgen die Bearbeitungszeiten und Rüstzeiten abgezogen, sodass das Ergebnis die Approximation der ungenutzten Produktionszeit ist. Es handelt sich dabei um eine Abschätzung, da der maximale frühestmögliche Fertigstellungszeitpunkt nicht dem tatsächlichen Ende des betrachteten Zeitraums entsprechen muss. Dieser wird durch die Variable b_{n+1} wiedergegeben. Wird jedoch die Variable b_{n+1} als Ende des betrachteten Zeitraums eingesetzt, kann dies Auswirkungen auf die Annahmeentscheidung eines

¹⁴ Diese Nebenbedingungsgruppe ist neu im Vergleich zum Modell nach Thevenin et al. (2016), da in diesem Modell keine Servicelevels betrachtet werden.

¹⁵ Diese Restriktion ist im neu im Vergleich zum Modell nach Thevenin et al. (2016).

Auftrags haben, was an dieser Stelle nicht gewollt ist. Unter Verwendung der Variable b_{n+1} kann es von Vorteil sein, einen neuen Auftrag j abzulehnen, falls dieser Auftrag j nur mit einer zeitlichen Lücke nach dem vorerst letzten Auftrag eingeplant werden kann und es somit in der Folge zu ungenutzter Produktionszeit kommt. Allerdings ist es möglich, dass diese Lücke durch einen zu einem späteren Zeitpunkt eintreffenden Auftrag wieder gefüllt werden kann. Wird statt der Variable b_{n+1} der maximale, frühestmögliche Fertigstellungszeitpunkt aller Aufträge – unabhängig, ob diese angenommen oder abgelehnt werden – verwendet, so hat die ungenutzte Produktionszeit keine Auswirkung auf die Auftragsannahmeentscheidung, sondern lediglich auf die Produktionsplanung.

Dass eine Auftragsannahmeentscheidung nicht revidiert werden kann, wird durch die Restriktionsgruppen (5.18)¹⁶ und (5.19)¹⁶ garantiert. Alle in vorherigen Durchläufen angenommenen Aufträge sind in der Teilmenge H enthalten. Für Aufträge dieser Teilmenge wird die Variable z_j in den Nebenbedingungen (5.18) auf den Wert 1 gezwungen. Gleiches gilt für die Dummyaufträge 0 und $n + 1$. Aufträge, welche in vorherigen Durchläufen abgelehnt wurden und folglich in der Teilmenge A enthalten sind, werden durch die Restriktionsgruppe (5.19) weiterhin abgelehnt.

Die Möglichkeit, den Produktionsbeginn b_j des Auftrags j auf einen bestimmten Zeitpunkt zu zwingen, wird mithilfe der Restriktionsgruppen (5.20)¹⁶ und (5.21)¹⁶ geboten. Wenn dies für den Auftrag j gewollt ist, muss den Parametern B_j^1 und B_j^2 der entsprechende Zeitpunkt des Produktionsbeginns zugewiesen werden. Anschließend wird durch die Nebenbedingungen (5.20) und (5.21) die Variable b_j des Auftrags j auf den entsprechenden Wert gesetzt. Sofern der Produktionsbeginn des Auftrags j unter Berücksichtigung der anderen Nebenbedingungsgruppen frei gewählt werden kann und soll, wird bei Verwendung des Wertes 0 für den Parameter B_j^1 und des Wertes der Kapazität CAP (als ausreichend große Zahl) für den Parameter B_j^2 keine weitere Einschränkung für den Produktionsbeginn b_j des Auftrags j gebildet.

Durch die Restriktion (5.22)¹⁷ wird sichergestellt, dass die in Zeiteinheiten gemessene Kapazität des betrachteten Planungshorizonts CAP nicht überschritten wird. Dazu darf das Ende des Produktionszeitraums und folglich der Wert der Variable b_{n+1} des Dummyauftrags $n + 1$ maximal der Kapazität CAP entsprechen.

Der Wertebereich der Variablen wird mithilfe der Nebenbedingungsgruppen (5.23) bis (5.27) festgesetzt. Die Restriktionen (5.23)¹⁶ bis (5.25)¹⁷ sorgen für die Nichtnegativität der kontinuierlichen Variablen und die Nebenbedingungen (5.26) und (5.27) für den binären Charakter der Variablengruppen z_j und y_{ji} .

¹⁶ Diese Nebenbedingungsgruppe ist neu im Vergleich zum Modell nach Thevenin et al. (2016).

¹⁷ Diese Restriktion ist neu im Vergleich zum Modell nach Thevenin et al. (2016).

5.3 Vergleichsstrategien

Um die Effektivität einer Kapazitätssteuerung beurteilen zu können, wird in der Literatur häufig, wie bereits in Kapitel 3.3.2 kurz erwähnt, als Vergleichsstrategie die Annahmeentscheidung nach der FCFS-Politik durchgeführt. Auch in dieser Arbeit wird das durch die FCFS-Strategie erzielte Ergebnis als Benchmark herangezogen. Damit die Ergebnisse, welche mit den RM Ansätzen erzielt werden, unmittelbar verglichen werden können, wird die FCFS-Strategie bereits in diesem Kapitel eingeführt. Somit sind diese Vergleichsstrategie sowie der dazugehörige Ablauf schon bekannt und können in den nachfolgenden Kapiteln direkt angewendet werden.

Bei der FCFS-Strategie wird ein Auftrag j zum frühestmöglichen Zeitpunkt, bzw. unmittelbar nach dem vorherigen Auftrag eingeplant, sofern die Deadline \bar{D}_j eingehalten wird. Ist dies nicht möglich, wird ein Auftrag j abgelehnt ($z_j = 0$). Für den ersten Auftrag j bedeutet dies, dass dieser zum verfrühten Freigabezeitpunkt \bar{R}_j begonnen wird. Zunächst wird von diesem Zeitpunkt ausgehend die Rüstzeit ST_{0j} vom Dummyauftrag 0 und dem ersten Auftrag j angerechnet und anschließend die Bearbeitungszeit $Prod_j$ hinzuaddiert. Das Ergebnis daraus spiegelt den Fertigstellungszeitpunkt f_j wider. Anschließend wird der Auftrag j zum Vorgänger i für den nächsten Auftrag. Der nächste eintreffende Auftrag j' wird entweder unmittelbar nach der Fertigstellung des Vorgängers i eingeplant oder, sofern der neue Auftrag j' zu dem Zeitpunkt noch nicht begonnen werden kann, direkt zu dem dazugehörigen verfrühten Freigabezeitpunkt $\bar{R}_{j'}$. Weiterhin muss geprüft werden, ob ausgehend vom frühestmöglichen Zeitpunkt, zu dem der Auftrag eingeplant werden kann – also der spätere Zeitpunkt aus dem Fertigstellungszeitpunkt f_i des Vorgängers i und dem verfrühten Freigabezeitpunkt $\bar{R}_{j'}$ –, die Fertigstellung bis spätestens zur Deadline $\bar{D}_{j'}$ gewährleistet werden kann. Dazu wird von diesem frühestmöglichen Zeitpunkt die Rüstzeit $ST_{ij'}$ und die Bearbeitungszeit $Prod_{j'}$ hinzuaddiert und geprüft, ob der errechnete Fertigstellungszeitpunkt $f_{j'}$ die Deadline $\bar{D}_{j'}$ nicht überschreitet. Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass nicht über den betrachteten Planungshorizont, welcher sich vom Zeitpunkt 0 bis zum Kapazitätssende CAP erstreckt, hinaus geplant wird. Somit sollte der Fertigstellungszeitpunkt $f_{j'}$ zuzüglich des Rüstvorgangs zum Dummyauftrag $n + 1$ nicht größer als das Ende des betrachteten Planungshorizonts, welcher CAP entspricht, sein. Wird sowohl die Deadline $\bar{D}_{j'}$ als auch der Planungshorizont eingehalten, wird der Auftrag j' angenommen und zum Vorgänger i für den nächsten eintreffenden Auftrag. Folglich werden die Auftragsannahmeentscheidungen in der Reihenfolge getroffen, in welcher die Aufträge eintreffen. Diese Reihenfolge spiegelt sich auch – mit Ausnahme der abgelehnten Aufträge – in der Bearbeitungsreihenfolge wider. Der detaillierte Ablauf des Auftragsannahmeprozesses ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

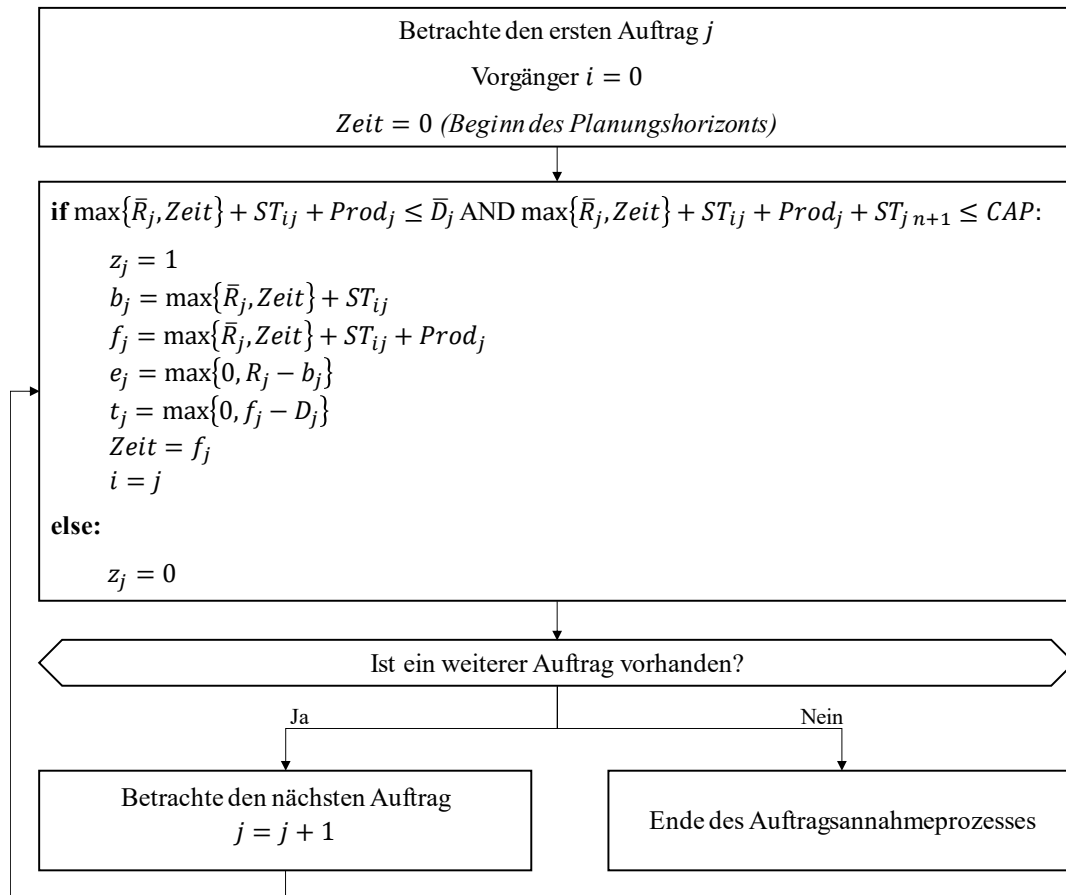


Abbildung 5.3: Auftragsannahmeprozess nach der FCFS Strategie

Verfrühte Produktionsbeginne und verspätete Fertigstellungen werden ebenfalls dokumentiert, um diese mit den zugehörigen Strafkostenfaktoren PT_k bzw. PE_q zu bewerten. Der resultierende Profit ergibt sich aus der Summe der Deckungsbeiträge der angenommenen Aufträge abzüglich der Rüstkosten und der Strafkosten für verspätete Fertigstellungen und verfrühte Produktionsbeginne. Fiktive Kosten werden in dem Profitergebnis nicht berücksichtigt. Dieses Ergebnis wird im späteren Verlauf der Arbeit mit den Profitergebnissen, welche durch die Verwendung der RM Ansätze erzielt werden, verglichen. Darüber hinaus berechnen sich die erreichten Servicelevels der verschiedenen Kundensegmente jeweils aus dem Anteil der angenommenen Aufträge aus einem Kundensegment.

Zusätzlich wird in einer weiteren Vergleichsstrategie das in Kapitel 5.2.2 vorgestellte Produktionsplanungsmodell als einzige Hürde für die Auftragsannahmeentscheidung verwendet. Folglich entfällt bei dieser Strategie die RM-Hürde (erste Hürde in Abbildung 5.2), in welcher gemäß den Buchungslimits bzw. dem Bid-Preis eine erste, vorläufige Entscheidung getroffen wird. Auf diese Weise soll der Einfluss der RM-Hürde, welche die klassischen Instrumente des RM nutzt, im Vergleich sichtbar gemacht werden. Diese Vergleichsstrategie wird in den folgenden Kapiteln „PPM_ohneRM“ genannt.

Bis auf den Wegfall der ersten Hürde unterscheidet sich der Auftragsannahmeprozess der Strategie PPM_ohneRM nicht von den in den Kapiteln 7 und 8 vorgestellten Auftragsannahmeprozessen. In den Kapiteln 7 und 8 kommt die Erläuterung der RM-Hürde noch hinzu. Der Prozess wird auftragsweise

durchgeführt. Zu Beginn ist die Menge J leer. Diese wird Auftrag für Auftrag gefüllt. Nach dem Hinzufügen eines Auftrags j zu der Menge J wird das Produktionsplanungsmodell durchgeführt und geprüft, ob der Auftrag j angenommen oder abgelehnt werden sollte. Bei Annahme wird der Auftrag j zur Teilmenge H , bei Ablehnung zur Teilmenge A hinzugefügt. Somit kann gewährleistet werden, dass die Auftragsannahmeentscheidung bei nachfolgenden Durchläufen des Produktionsplanungsmodells bestehen bleibt (s. Nebenbedingungsgruppen (5.18) bzw. (5.19)). Anschließend wird der nächste Auftrag in die Menge J aufgenommen und das Produktionsplanungsmodell erneut gelöst, sodass die nächste Auftragsannahmeentscheidung getroffen werden kann.

Die Produktionsdaten bleiben bis kurz vor dem Produktionsbeginn flexibel und können noch variieren. Erst wenn für einen Auftrag j die Materialien bereits bestellt sind, wird der Produktionsbeginn b_j dieses Auftrags j festgeschrieben. Dazu werden die Parameter B_j^1 und B_j^2 auf den aktuell geplanten Produktionsbeginn und folglich den zuletzt ermittelten Wert der Variablen b_j gesetzt. Durch die Restriktionsgruppen (5.20) und (5.21) wird sichergestellt, dass die Variable b_j bei weiteren Durchläufen des Produktionsplanungsmodells keinen anderen Wert, als den fest geplanten Produktionsbeginn annehmen kann. Wenn beispielsweise bei einer Standardlieferung die Materialien innerhalb von drei Tagen geliefert werden, dann werden mithilfe der Parameter B_j^1 und B_j^2 alle Produktionsbeginnvariablen b_j , welche in drei (oder weniger) Tagen angesetzt sind, festgeschrieben. Dadurch wird gewährleistet, dass Aufträge, zu welchen die Materialien bereits bestellt sind, wie geplant bearbeitet werden und die Materialien nicht erst noch gelagert werden müssen. Der detaillierte Auftragsannahmeprozess unter Verwendung der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM ist in Abbildung 5.4 aufgeführt.

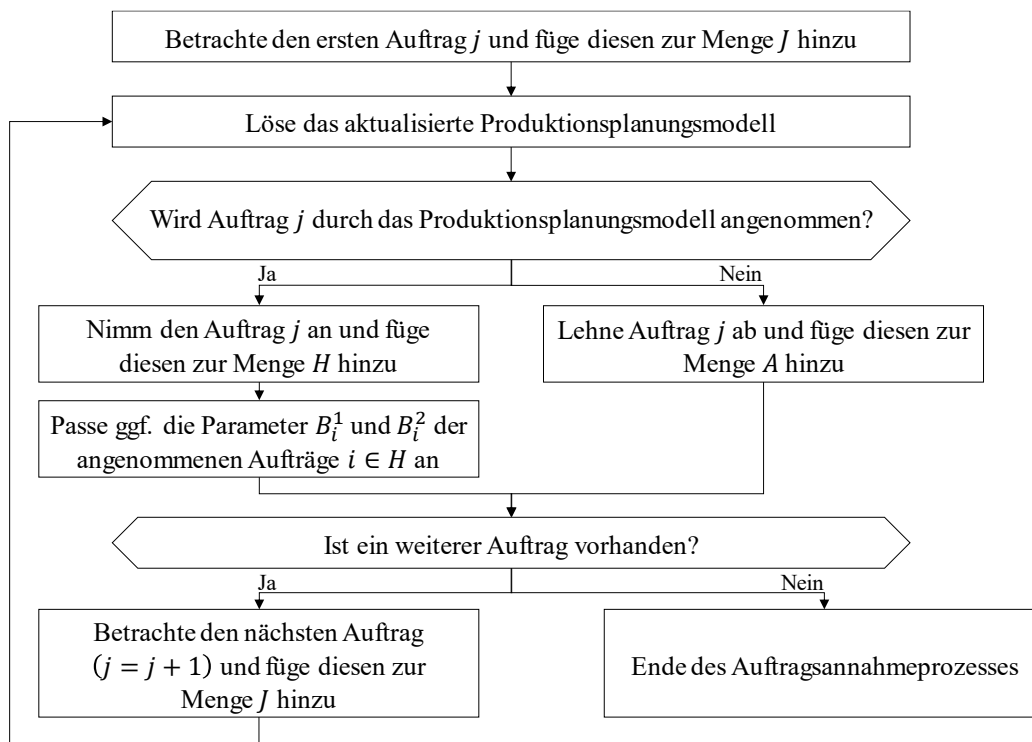


Abbildung 5.4: Auftragsannahmeprozess nach der PPM_ohneRM Strategie

Nachdem in diesem Kapitel die Problemstellung, das grundsätzliche Vorgehen inklusive der verwendeten Optimierungsmodelle und die Vergleichsstrategien vorgestellt wurden, werden im nachfolgenden Kapitel die Fallstudien vorgestellt. Anschließend werden in den Kapiteln 7 und 8 die mengen- und erlösorientierten Ansätze präsentiert und direkt auf die Fallstudien angewendet. Bei der Vorstellung der daraus resultierenden Ergebnisse werden die mit den Vergleichsstrategien erzielten Ergebnisse als Benchmark mit aufgeführt und analysiert.

6 Vorstellung der Fallstudien

In diesem Kapitel werden drei verschiedenen Fallstudien, auf welche die in den nachfolgenden Kapiteln präsentierten Ansätze angewendet werden, vorgestellt. Die Fallstudien beruhen auf fiktiven Daten, wobei jedoch stets darauf geachtet wurde, die Daten möglichst realitätsnah zu wählen. Alle Fallstudien umfassen jeweils 40 Aufträge. Wie bereits in Kapitel 5.1 erwähnt wurde, existieren drei Kundensegmente (A, B und C) und drei Auftragsgruppen (kurz, mittel und lang). Die drei Fallstudien unterscheiden sich in ihrer Kundenzusammensetzung. Alle weiteren Daten wurden für alle Fallstudien nach dem gleichen Prinzip generiert und werden nachfolgend erläutert.

Bei der Ausgangsfallstudie (Fallstudie 1) wird angenommen, dass es sich um ein am Markt bereits gut etabliertes, produzierendes Unternehmen mit einem festen Kundenstamm handelt. Infolgedessen werden 50% der insgesamt 40 Aufträge von A-Kunden, den für das Unternehmen wichtigsten Kunden, erteilt. 30% der Aufträge stammen von Kunden aus dem Segment B. Die restlichen 20% der Aufträge werden von C-Kunden und demzufolge von Neukunden gestellt. Eine Situation, in welcher ein produzierendes Unternehmen noch nicht so lange besteht und aus diesem Grund einen noch nicht so gefestigten Kundenstamm besitzt, wird in der Fallstudie 2 untersucht. Es wird angenommen, dass lediglich 20% aller Aufträge von A-Kunden erteilt werden. Die Hälfte der Aufträge wird in dieser Fallstudie von B-Kunden gestellt. Die restlichen 30% der Aufträge stammen von Neukunden aus dem Segment C. Die Fallstudie 3 spiegelt eine relativ ausgewogene Kundenzusammensetzung wider. So stammen 35% der Aufträge von Kunden aus dem Segment A und jeweils 32,5% der Aufträge von B- und C-Kunden. Darüber hinaus wird über alle Fallstudien hinweg angenommen, dass es sich bei dem Großteil der insgesamt 40 Aufträge um kurze Aufträge handelt und lange Aufträge eher seltener vorkommen. Dies bedeutet, dass aus jedem Kundensegment k circa 50% kurze Aufträge, 35% mittlere Aufträge und 15% lange Aufträge erteilt werden. Eine detaillierte Zusammensetzung der Fallstudien, welche neben den prozentualen Anteilen auch die Anzahl der gestellten Aufträge je Kundensegment k und Auftragsgruppe q aufzeigt, ist in Tabelle 6.1 gegeben.

Tabelle 6.1: Detaillierte Zusammensetzung der Fallstudien

	A			B			C		
	kurz	mittel	lang	kurz	mittel	lang	kurz	mittel	lang
Fallstudie 1	10	7	3	6	4	2	4	3	1
	50%	35%	15%	50%	33,3%	16,7%	50%	37,5%	12,5%
	50%			30%			20%		
Fallstudie 2	4	3	1	10	7	3	6	4	2
	50%	37,5%	12,5%	50%	35%	15%	50%	33,3%	16,7%
	20%			50%			30%		
Fallstudie 3	7	5	2	6	5	2	6	5	2
	50%	35,7%	14,3%	46,2%	38,5%	15,4%	46,2%	38,5%	15,4%
	35%			32,5%			32,5%		

Damit die Ergebnisse besser analysiert werden können, wird angenommen, dass die tatsächliche Nachfrage der erwarteten Nachfrage und demnach der Nachfrageprognose DF_{qk} entspricht. Somit können die verschiedenen Strategien unter optimalen Bedingungen, bei welcher die Nachfrage bekannt ist, besser miteinander verglichen und analysiert werden. Die tatsächliche Nachfrage ist folglich in der Tabelle 6.1 aufgeführt. Jedoch ist lediglich die Anzahl der erwarteten Aufträge je Kundensegment k und Auftragsgruppe q und nicht die Reihenfolge und die zeitliche Verteilung der Aufträge bekannt. Damit die Ergebnisse der verschiedenen Strategien nicht auf einer einzigen, zufälligen und womöglich nicht repräsentativen Auftragsreihenfolge und zeitlichen Verteilung basieren, werden pro Fallstudie mehrere Datensätze mit zufälliger Auftragsreihenfolge und Auftragsdichte pro Tag erzeugt. Dabei wird der Auftragseingangstag eines jeden Auftrags mit einer diskreten Gleichverteilung bestimmt. Anschließend werden die Aufträge nach dem Auftragseingangstag sortiert. Somit entstehen zufällige Auftragsreihenfolgen und Auftragsdichten pro Tag. Für jede Fallstudie ist eine beispielhafte Auftragsreihenfolge und -dichte dem Anhang B zu entnehmen. Die notwendige Anzahl der verwendeten Datensätze wird, wie von Lorscheid et al. (2012) vorgeschlagen, sukzessive ermittelt. Über die Ergebnisse (bezogen auf den Profit und die erreichten Servicelevels der Kundensegmente A, B und C) werden jeweils der Mittelwert und der Variationskoeffizient¹⁸ gebildet. Gemäß Lorscheid et al. (2012) ist es sinnvoll, den Variationskoeffizienten zu verwenden, da dieser dimensionslos ist und die Ergebnisse folglich leichter – auch über unterschiedliche Daten und Einheiten hinweg – miteinander verglichen werden können. Bei steigender Anzahl verwendeter Datensätze werden die Veränderungen der Mittelwerte und Variationskoeffizienten beobachtet. Sobald sich die Mittelwerte und die Variationskoeffizienten stabilisiert haben und somit eine Erhöhung der Anzahl der Datensätze nicht mehr zu einer nennenswerten Veränderung der Werte führt, können (mit der dann vorherrschenden Standardabweichung) verlässliche Aussagen

¹⁸ Zur Ermittlung des Variationskoeffizienten wird die Standardabweichung durch den Mittelwert dividiert.

über die mit den verschiedenen Strategien erzielten Ergebnisse getroffen werden. In dieser Arbeit werden 500 Datensätze pro Fallstudie verwendet. In den nachfolgenden Kapiteln wird auf die Ergebnisse genauer eingegangen.

Die drei Auftragsgruppen unterscheiden sich in ihrer Bearbeitungsdauer. Ein kurzer Auftrag wird in einer Zeitspanne von 0,25 Tagen bis 0,5 Tagen bearbeitet. Die Angabe der Tage bezieht sich hier und im Folgenden auf einen Arbeitstag, welcher acht Stunden umfasst. Die Bearbeitung eines mittleren Auftrags kann zwischen 0,6 Tagen und einem Tag beanspruchen. Um einen langen Auftrag handelt es sich, wenn für die Bearbeitung eines Auftrags zwischen 1,1 Tagen und 1,5 Tagen benötigt werden. Die Daten des Parameters $mProd_q$, der maximalen Bearbeitungszeit eines Auftrags der Auftragsgruppe q , ergeben sich aus der jeweils oberen Intervallgrenze der Bearbeitungszeiten. Die tatsächlichen Bearbeitungszeiten $Prod_j$ eines Auftrags j aus der Auftragsgruppe q werden zufällig auf Basis einer Gleichverteilung in dem zu der Auftragsgruppe q zugehörigen Intervall generiert. Folglich ist die Summe der Bearbeitungszeiten über alle Aufträge ($\sum_{j \in J} Prod_j$) bei den Fallstudien leicht unterschiedlich. Über die 500 Datensätze innerhalb einer Fallstudie ist die Summe der Bearbeitungszeiten über alle Aufträge jedoch stets identisch, da in den 500 Datensätzen dieselben 40 Aufträge enthalten sind und sich nur die Reihenfolge und Auftragsdichte pro Tag verändert. Bei der ersten Fallstudie beträgt die Summe der Bearbeitungszeiten über alle Aufträge 28 Tage, bei der zweiten Fallstudie 27,2 Tage und bei der dritten Fallstudie 27,1 Tage. Die Bearbeitungszeiten der einzelnen Aufträge der drei Fallstudien können ebenfalls dem Anhang B entnommen werden. Die Kapazität des Planungshorizonts CAP wird auf 20 Arbeitstage festgelegt. Mit 20 Tagen soll exemplarisch ein Planungshorizont von einem Monat mit fünf Arbeitstagen (à acht Stunden) pro Woche abgebildet werden. Demnach übersteigt bei allen Fallstudien die Nachfrage die Kapazität und es ist nicht möglich, alle Aufträge anzunehmen.

Abhängig von dem zufällig generierten Auftragseingangstag werden die Daten für den regulären und verfrühten Freigabezeitpunkt (R_j und \bar{R}_j) erzeugt. Es wird angenommen, dass die Materialien bei einer Standardlieferung innerhalb von drei Tagen und bei einer Expresslieferung innerhalb von einem Tag zur Verfügung stehen. Folglich ergibt sich der reguläre Freigabezeitpunkt R_j eines Auftrags j aus dem Auftragseingangstag zuzüglich drei Tagen und der verfrühte Freigabezeitpunkt \bar{R}_j aus dem Auftragseingangstag zuzüglich eines Tages. Des Weiteren wird der Produktionsbeginn von Aufträgen, welche in drei (oder weniger) Tagen geplant sind, mithilfe der Parameter B_j^1 und B_j^2 festgehalten, um zu garantieren, dass bestellte Materialien wie geplant benötigt und verarbeitet werden. Damit auch der Beginn des Planungshorizonts direkt genutzt werden kann und keine Produktionskapazität aufgrund von nicht vorhandenen Materialien verfällt, ist der Buchungszeitraum, in welchem Aufträge eintreffen können, zeitlich gesehen um drei Tage nach vorne versetzt. Dies entspricht der Dauer einer Standardlieferung von Materialien. Bis auf die zeitliche Versetzung des Buchungszeitraums ist dieser

von der Länge her identisch zum Planungshorizont, in welchem die Produktion stattfindet. Zur Veranschaulichung kann die Abbildung 5.1 aus dem vorherigen Kapitel herangezogen werden.

Bei einem verfrühten Produktionsbeginn eines Auftrags j werden die Zeiteinheiten, um die der Auftrag j verfrüht ist, mit dem Strafkostenfaktor PE_q der zugehörigen Auftragsgruppe q bewertet. Da angenommen wird, dass für einen kurzen Auftrag am wenigsten und für einen langen Auftrag am meisten Materialien benötigt werden und ein verfrühter Produktionsbeginn durch eine schnellere Lieferung der Materialien ermöglicht wird, spiegelt sich dies in der Höhe der Strafkostensätze PE_q wider. PE_{kurz} wird auf 10 GE, PE_{mittel} auf 20 GE und PE_{lang} auf 30 GE festgesetzt.

Die Daten der gewünschten Fertigstellungszeitpunkte D_j und der Deadlines \bar{D}_j werden nach einem ähnlichen Prinzip wie die Freigabezeitpunkte R_j und \bar{R}_j generiert, jedoch wird dabei die individuelle Bearbeitungszeit $Prod_j$ ebenfalls berücksichtigt. Der gewünschte Fertigstellungszeitpunkt D_j ergibt sich aus dem regulären Freigabezeitpunkt R_j zuzüglich der vierfachen Bearbeitungszeit $Prod_j$. Das Ergebnis wird anschließend auf ganze Tage gerundet. Diese Faktorisierung wird gewählt, um in der Produktionsplanung einen gewissen Entscheidungsspielraum zu gewähren, damit ein Auftrag nicht sofort bearbeitet werden muss. Die Deadline \bar{D}_j ergibt sich aus dem auf ganze Tage gerundeten Ergebnis des Freigabezeitpunktes R_j zuzüglich der neunfachen Bearbeitungszeit $Prod_j$. Dadurch, dass die Bearbeitungszeiten $Prod_j$ bei der Generierung der Daten für D_j und \bar{D}_j integriert werden, ergeben sich individuelle Fristen. Ferner ist es möglich, dass ein später eintreffender Auftrag aufgrund einer kürzeren Bearbeitungsdauer auch frühere Fristen als ein zuvor eingetroffener Auftrag besitzen kann.

Sobald ein Auftrag j nach dem gewünschten Fertigstellungszeitpunkt D_j beendet wird, gilt dieser als verspätet. Die verspäteten Zeiteinheiten werden mit dem Strafkostensatz PT_k des zugehörigen Kundensegments k multipliziert. Da Verspätungen unmittelbar die Kunden betreffen und somit auch die Kundenzufriedenheit beeinflussen, werden die zugehörigen Strafkostenfaktoren PT_k im Vergleich zu den Strafkostensätzen PE_q (für einen verfrühten Produktionsbeginn) höher angesetzt. Für Aufträge der Kunden aus dem Segment A ist der Strafkostenfaktor PT_A mit 60 GE am höchsten. Verspätungen eines Auftrags aus dem Kundensegment B werden mit 40 GE ($= PT_B$) je verspäteter Zeiteinheit bestraft. Bei Neukunden fallen Strafkosten von 20 GE ($= PT_C$) je verspäteter Zeiteinheit an.

Für die durchschnittlichen Deckungsbeiträge aCM_{qk} werden die in Tabelle 6.2 aufgeführten Werte angenommen. Bei der Generierung dieser Daten wurde darauf geachtet, dass diese so gewählt sind, wie es in den Annahmen (s. Kapitel 5.1) beschrieben wurde und folglich je Zeiteinheit ein kurzer Auftrag lukrativer als ein mittlerer und dieser wiederum lukrativer als ein langer Auftrag ist. Inklusive der Berücksichtigung der Nachfragewertigkeit der verschiedenen Kundensegmente impliziert dies, dass mit einem kurzen Auftrag eines C-Kunden je Zeiteinheit am meisten und mit einem langen Auftrag aus dem Kundensegment A je Zeiteinheit am wenigsten GE erwirtschaftet werden kann. Um die individuellen

Preise und die sich daraus ergebenden individuellen Deckungsbeiträge CM_j zu simulieren, wird angenommen, dass die Deckungsbeiträge CM_j auf Basis einer Gleichverteilung um $\pm 10\%$ des durchschnittlichen Deckungsbeitrags aCM_{qk} der zugehörigen Auftragsgruppe q und des zugehörigen Kundensegments k schwanken. Die zufällig generierten, individuellen Deckungsbeiträge der drei Fallstudien können dem Anhang B entnommen werden.

Tabelle 6.2: Durchschnittliche Deckungsbeiträge aCM_{qk} (in GE) eines Auftrags der Auftragsgruppe q aus Kundensegment k

Segment k Gruppe q	A	B	C
kurz	350	375	400
mittel	690	740	790
lang	1020	1095	1170

Die Rüstzeiten ST_{ij} werden abhängig von den maximalen Bearbeitungszeiten $mProd_q$ der aufeinanderfolgenden Aufträge gewählt. Es wird angenommen, dass diese sich aus 2,5% der maximalen Bearbeitungszeit der Auftragsgruppe q des vorangehenden Auftrags i und des nachfolgenden Auftrags j zusammensetzen. Das Ergebnis wird auf die zweite Nachkommastelle gerundet. Da auch vor dem ersten bzw. nach dem letzten Auftrag und demzufolge zwischen dem Dummyauftrag 0 und dem ersten Auftrag bzw. dem letzten Auftrag und dem Dummyauftrag $n + 1$ gerüstet wird, setzt sich in diesen Fällen die Rüstzeit lediglich aus 2,5% der maximalen Bearbeitungszeit $mProd_q$ des ersten bzw. letzten Auftrags zusammen. Aufgrund der Tatsache, dass zum Teil auch Unikate gefertigt werden und sich somit selbst zwei Aufträge der gleichen Auftragsgruppe unterscheiden können, wird auch zwischen der Bearbeitung zweier Aufträge aus derselben Auftragsgruppe q gerüstet. Folglich ergeben sich insgesamt Rüstzeiten zwischen etwa 6 Minuten ($\cong 0,01$ Arbeitstagen) und 36 Minuten ($\cong 0,07$ Arbeitstagen). Mit einem angenommenen Kostensatz¹⁹ von 14,60 GE pro Stunde können die Rüstzeiten in Rüstkosten umgerechnet werden. Die resultierenden Rüstzeiten und -kosten sind in der Tabelle 6.3 aufgeführt.

¹⁹ Der Kostensatz lehnt sich an den Tariflohn der Holz und Kunststoff verarbeitenden Industrie der IG Metall aus dem Jahr 2017 an (IG Metall, 2017). Die Holz und Kunststoff verarbeitende Industrie wurde als Beispiel für eine nach dem MTO Prinzip fertige Branche gewählt. Es wurde der über alle Tarifgebiete gerundete Mittelwert der Tarife der geringsten Lohngruppe gewählt, da davon ausgegangen wird, dass Rüstarbeiten prinzipiell eher von Berufsanfängern durchgeführt werden. Die Daten stammen aus dem Jahr 2017, da in diesem Jahr die Grundlage für die Daten der Fallstudien geschaffen worden ist.

Tabelle 6.3: Rüstzeiten (in Arbeitstagen) und -kosten (in GE) zwischen Aufträgen aus den verschiedenen Auftragsgruppen

von \ auf		kurz	mittel	lang	$n + 1$
0	<i>Zeit / Kosten</i>	0,01 / 1,46	0,03 / 2,92	0,04 / 4,38	0 / 0
kurz	<i>Zeit / Kosten</i>	0,03 / 2,92	0,04 / 4,38	0,05 / 5,84	0,01 / 1,46
mittel	<i>Zeit / Kosten</i>	0,04 / 4,38	0,05 / 5,84	0,06 / 7,30	0,03 / 2,92
lang	<i>Zeit / Kosten</i>	0,05 / 5,84	0,06 / 7,30	0,07 / 8,76	0,04 / 4,38

Bei den zuvor aufgeführten Kosten (PE_q, PT_k, SC_{ji}) und den Deckungsbeiträgen (aCM_{qk}, CM_j) handelt es sich um tatsächlich anfallende Kosten bzw. erwirtschaftete Deckungsbeiträge. Darüber hinaus existieren die fiktiven Strafkostensätze $Pdev_k$ und PU , welche notwendig sind, um Abweichungen von den angestrebten Servicelevels α_k und ungenutzte Produktionszeiten zu vermeiden. Bei allen Fallstudien wird angestrebt mindestens 90% aller eintreffenden Aufträge der A-Kunden ($\alpha_A = 0,9$), mindestens 50% aller eintreffenden Aufträge der B-Kunden ($\alpha_B = 0,5$) und mindestens 30% aller eintreffenden Aufträge der C-Kunden ($\alpha_C = 0,3$) anzunehmen. Abweichungen von diesen Servicelevels werden mit dem Strafkostensatz $Pdev_k$ bewertet. Da die Servicelevels und folglich auch Abweichungen davon in Prozentwerten (zwischen 0 und 1) angegeben sind, fallen die damit zu multiplizierenden Strafkostenfaktoren $Pdev_k$ deutlich höher aus. Durch höhere Werte sollen sowohl die daraus resultieren Strafkosten in eine zum Teil vergleichbare Größenordnung der anderen Strafkosten gebracht werden als auch dem Ziel, die angestrebten Servicelevels α_k neben der Maximierung der Summe der Deckungsbeiträge zu erreichen, mehr Nachdruck verliehen werden. Für die A-Kunden wird ein Strafkostensatz $Pdev_k$ von 10.000 GE festgelegt. Je prozentualer Abweichung vom Servicelevel α_B fallen die Strafkosten von 5.000 GE ($= Pdev_B$) an. Bei Neukunden wird die prozentuale Abweichung vom Servicegrad α_C mit 250 GE ($= Pdev_C$) bestraft. Die unterschiedlich hohen Kosten sind an den Kundenwert der verschiedenen Segmente und folglich an die Wichtigkeit der Kunden für das Unternehmen gekoppelt. Die Strafkosten $Pdev_C$ sind bewusst deutlich niedriger angesetzt, weil Aufträge von C-Kunden aufgrund der höheren Deckungsbeiträge und der Maximierung der Summe der Deckungsbeiträge bereits bevorzugt angenommen werden.

Da ungenutzte Zeiteinheiten mit verlorenem Deckungsbeitragspotenzial gleichzusetzen sind, sollte die Kapazität optimal ausgelastet werden. Aus diesem Grund werden ungenutzte Zeiteinheiten mit dem Strafkostensatz PU bewertet. Um PU einen Wert zuzuweisen, welcher in etwa dem erwarteten Deckungsbeitrag pro Zeiteinheit entspricht, berechnet sich dieser angelehnt an den Zielfunktionswert des Kapazitätszuweisungsmodells wie in Gleichung 6.1 dargestellt.

$$PU = \frac{\sum_{q \in Q} \sum_{k \in K} a_{CM_{qk}} \frac{x_{qk}}{m_{Prod_q}}}{CAP} \quad (6.1)$$

In den nachfolgenden Kapiteln werden die mengen- und erlösorientierten Ansätze zur Kapazitätssteuerung präsentiert. Diese werden anschließend auf die in diesem Kapitel vorgestellten Fallstudien angewendet und analysiert.

7 Mengenorientierte Ansätze

Bei der mengenorientierten Kapazitätssteuerung dienen Buchungslimits als erste Hürde im zweistufigen Auftragsannahmeprozess. Diese können entweder direkt als einfache Buchungslimits oder in geschachtelter Form verwendet werden. Verschiedene Verwendungsmöglichkeiten der Buchungslimits werden in Kapitel 7.1 vorgestellt. Der detaillierte Auftragsannahmeprozess bei Verwendung der mengenorientierten Kapazitätssteuerung wird in Kapitel 7.2 präsentiert. In Kapitel 7.3 werden die durch die mengenorientierten Ansätze resultierenden Ergebnisse – auch im Vergleich zu den mit den Benchmark-Strategien aus Kapitel 5.3 erzielten Ergebnissen – vorgestellt und analysiert. Abschließend erfolgt in Kapitel 7.4 ein Vergleich der Ergebnisse der Schachtelungsstrategien bei Verwendung des Standard Nestings und des Theft Nestings.

7.1 Buchungslimitstrategien

Anhand des Kapazitätszuweisungsmodells, welches im Rahmen des Kapitels 5.2.1 vorgestellt wurde, können für die verschiedenen Kundensegmente k und Auftragsgruppen q die einfachen Buchungslimits x_{qk} ermittelt werden. Die Verwendung dieser Buchungslimits x_{qk} ohne jegliche Schachtelung wird fortan als „PBL“ (engl. Partitioned Booking Limits) bezeichnet. Geschachtelte Buchungslimits xn_{qk} können aus den einfachen Buchungslimits x_{qk} abgeleitet werden, wie es in Kapitel 3.3.2 bereits erläutert wurde. Nachfolgend werden drei verschiedene Schachtelungsstrategien präsentiert.

Eine Möglichkeit ist, die Buchungslimits der Nachfragewertigkeit nach zu schachteln. Hierfür werden die Produkte qk basierend auf ihrem durchschnittlichen Deckungsbeitrag pro Zeiteinheit sortiert. Für die Bildung der hierarchischen Rangfolge ist die Nachfragewertigkeit des Kundensegments k das übergeordnete Kriterium. Als untergeordnetes Kriterium dient die Auftragsgruppe q . Durch die getroffenen Annahmen ist die Nachfragewertigkeit des Kundensegments C am höchsten und die des Kundensegments A am niedrigsten. Darüber hinaus ist innerhalb eines Kundensegments pro Zeiteinheit ein kurzer Auftrag lukrativer als ein mittlerer und dieser wiederum lukrativer als ein langer Auftrag. Diese Annahmen spiegeln sich auch in der Rangfolge der Produkte qk wider. Folglich ist ein kurzer Auftrag eines C-Kunden in der Rangfolge an oberster Stelle und ein langer Auftrag eines Kunden aus dem Segment A an unterster Stelle angesiedelt. Das geschachtelte Buchungslimit $xn_{kurz,C}$ entspricht demnach der Kapazität CAP und beinhaltet alle einfachen Buchungslimits x_{qk} , wohingegen das

geschachtelte Buchungslimit $x_{n_{lang,A}}$ dem einfachen Buchungslimit $x_{lang,A}$ entspricht. Diese Strategie wird im Folgenden als „NDV“ (engl. Nesting Based on the Demand Value) bezeichnet.

Die im Folgenden „RNBL“ (engl. Reverse Nested Booking Limit) genannte Schachtelungsstrategie baut auf der Idee der „*umgekehrt geschachtelte[n] Buchungslimits*“ von Sucky (2009, S. 91) auf. Weiterhin ist das Kundensegment k das übergeordnete und die Auftragsgruppe q das untergeordnete Schachtelungskriterium. Die Rangfolge der Auftragsgruppen innerhalb eines Kundensegments bleibt die gleiche wie bei der NDV Strategie, jedoch werden die Kundensegmente nicht nach der Nachfragewertigkeit, sondern nach dem Kundenwert sortiert. Somit ist ein kurzer Auftrag aus dem Segment A am höchsten und ein langer Auftrag aus dem Segment C am niedrigsten in der Rangfolge angeordnet.

Eine weitere Schachtelungsmöglichkeit ist, lediglich innerhalb der Kundensegmente und nicht segmentübergreifend zu schachteln. Diese Strategie wird im Folgenden „NWCS“ (engl. Nesting Within Customer Segment) genannt. Somit können jeweils kurze Aufträge auf die Buchungslimits der mittleren und langen Aufträge des gleichen Kundensegments zugreifen. Lange Aufträge haben immer nur die Möglichkeit, auf ihr einfaches Buchungslimit zuzugreifen. Demzufolge gibt es bei dieser Schachtelungsstrategie keine Bevorzugung eines Kundensegments gegenüber einem anderen Segment, wie es bei den zuvor vorgestellten Schachtelungsstrategien der Fall ist. Ferner existiert kein geschachteltes Buchungslimit $x_{n_{qk}}$, welches den Zugriff auf die vollständige Kapazität CAP ermöglicht.

7.2 Auftragsannahmeprozess

Der Auftragsannahmeprozess ist bis auf die Anpassung der Buchungslimits bei allen Strategien (PBL, NDV, RNBL, NWCS) identisch. Bei der Verwendung der einfachen Buchungslimits x_{qk} (PBL) ist nur das zu dem gefragten Produkt qk zugehörige Buchungslimit x_{qk} um den benötigten Kapazitätsbedarf anzupassen, wohingegen bei den geschachtelten Buchungslimits $x_{n_{qk}}$ und folglich bei den Strategien NDV, RNBL und NWCS zum Teil eine Anpassung mehrerer Buchungslimits $x_{n_{qk}}$ notwendig ist. Eine Anpassung kann dabei entweder nach dem Standard Nesting oder dem Theft Nesting erfolgen, welche in Kapitel 3.3.2 bereits erläutert wurden. In der Literatur (bspw. Gallego & Topaloglu, 2019, S. 33; Klein & Steinhardt, 2008, S. 134 f.; Phillips, 2021, S. 189; Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 31) wird insbesondere das Standard Nesting empfohlen, wenn die Nachfrage nicht in aufsteigender Wertigkeit („*low before high*“), sondern in beliebiger bzw. unbekannter Reihenfolge eintrifft. Das Standard Nesting wird auch in der Praxis häufiger verwendet, da es meist zu besseren Ergebnissen führt (Gallego & Topaloglu, 2019, S. 33; Phillips, 2021, S. 189). Da in der in dieser Arbeit betrachteten Problemsituation die Reihenfolge der Nachfrage ungewiss ist, wird in dieser Arbeit primär ebenfalls das Standard Nesting verwendet. Jedoch wird in Kapitel 7.4 auch auf die Ergebnisse bei Verwendung des Theft

Nestings eingegangen, um die Hypothese aus der Literatur, dass das Standard Nesting bei beliebiger Reihenfolge der Nachfrage zu besseren Ergebnissen führt, zu untersuchen.

Bevor der Auftragsannahmeprozess begonnen werden kann, ist in der Vorbereitung die Ermittlung der einfachen Buchungslimits x_{qk} mithilfe des Kapazitätszuweisungsmodells (s. Kapitel 5.2.1) und die Wahl einer Buchungslimitstrategie (PBL, NDV, RNBL oder NWCS) notwendig. Sofern eine Schachtelungsstrategie (NDV, RNBL oder NWCS) ausgewählt wird, ist anschließend die Ermittlung der geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} erforderlich.

Nach der Vorbereitung wird der Auftragsannahmeprozess auftragsweise durchgeführt. Zuerst wird der eintreffende Auftrag j zu der zu Beginn des Auftragsannahmeprozesses noch leeren Menge J hinzugefügt und der passenden Auftragsgruppe q sowie dem zugehörigen Kundensegment k zugeordnet. Anschließend wird überprüft, ob der Auftrag j gemäß dem zugehörigen Buchungslimit x_{qk} (bzw. xn_{qk} , wenn geschachtelte Buchungslimits verwendet werden) vorläufig angenommen werden sollte. Dazu wird die Bearbeitungszeit $Prod_j$ des Auftrags j zuzüglich 5% der maximalen Bearbeitungszeit $mProd_q$ der zugehörigen Auftragsgruppe q mit dem Buchungslimit x_{qk} bzw. xn_{qk} verglichen. Ist das Buchungslimit x_{qk} bzw. xn_{qk} kleiner als die Summe aus $Prod_j$ und $5\% \cdot mProd_q$ der zugehörigen Auftragsgruppe q , wird der Auftrag j abgelehnt und zur Teilmenge A hinzugefügt. Die Berücksichtigung von 5% der maximalen Bearbeitungszeit $mProd_q$ ist notwendig, um die sequenzabhängigen Rüstzeiten ST_{ij} zu approximieren und diese bei der Belegung der Kapazität zu berücksichtigen. Da die Produktionsreihenfolge sich noch ändern kann, ist die Verwendung der angenäherten Rüstzeiten an dieser Stelle ausreichend. Die tatsächlich anfallenden Rüstzeiten ST_{ij} zwischen den Aufträgen i und j werden zu einem späteren Zeitpunkt in dem Produktionsplanungsmodell berücksichtigt. Die Rüstzeiten werden mit 5% der maximalen Bearbeitungszeit approximiert, da sich die tatsächliche Rüstzeit ST_{ij} in den verwendeten Fallstudien aus jeweils 2,5% der maximalen Bearbeitungszeit $mProd_q$ der Auftragsgruppe q des vorherigen Auftrags i und des nachfolgenden Auftrags j zusammensetzt (s. Kapitel 6). Sollten sich die Rüstzeiten nicht nach dem zuvor beschriebenen Schema zusammensetzen, sind diese in geeigneter Weise zu approximieren.

Bei einer vorläufigen Annahme des Auftrags j wird das aktualisierte Produktionsplanungsmodell (s. Kapitel 5.2.2) gelöst und überprüft, ob der Auftrag j gemäß der optimalen Lösung angenommen werden sollte ($z_j = 1$) oder nicht ($z_j = 0$). Diese Auftragsannahmeentscheidung ist endgültig. Folglich wird der Auftrag j bei Annahme zur Teilmenge H und bei Ablehnung zur Teilmenge A hinzugefügt. Darüber hinaus ist bei Annahme des Auftrags j eine Anpassung des Buchungslimits x_{qk} bzw. der Buchungslimits xn_{qk} um den benötigten Kapazitätsbedarf notwendig. Wie bereits eingangs erwähnt, wird bei Verwendung von geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} eine Anpassung nach dem Standard

Nesting empfohlen. Der benötigte Kapazitätsbedarf wird erneut durch die Summe aus der Bearbeitungszeit $Prod_j$ und 5% der maximalen Bearbeitungszeit $mProd_q$ der zugehörigen Auftragsgruppe q approximiert. Anschließend wird überprüft, ob die geplanten Produktionsbeginne b_i von angenommenen Aufträgen i , welche in der Teilmenge H enthalten sind, in drei oder weniger Tagen vom aktuellen Zeitpunkt ausgehend anstehen. Für Aufträge $i \in H$, auf die dies zutrifft, werden die Parameter B_i^1 und B_i^2 auf den zuvor geplanten Produktionsbeginn b_i festgesetzt, damit sich dieser beim erneuten Durchlaufen des Produktionsplanungsmodells nicht mehr verändern kann. Somit werden bereits bestellte Materialien wie geplant verwendet. Sollten bisher keine Aufträge angenommen worden sein oder alle bisher geplanten Produktionsbeginne in noch fernerer Zukunft liegen, entfällt dieser Schritt.

Als Nächstes wird überprüft, ob ein weiterer Auftrag vorhanden ist. Ist dies der Fall, wird der neue Auftrag als Auftrag j deklariert und zur Menge J hinzugefügt. Anschließend beginnt der Auftragsannahmeprozess erneut mit der Zuordnung des Auftrags j zu der passenden Auftragsgruppe q und dem zugehörigen Kundensegment k . Wenn kein weiterer Auftrag vorhanden ist, wird der Auftragsannahmeprozess beendet. Eine übersichtliche Darstellung des Auftragsannahmeprozesses zeigt Abbildung 7.1.

7.3 Anwendung der mengenorientierten Ansätze auf die Fallstudien

Der Auftragsannahmeprozess inklusive des Kapazitätszuweisungsmodells (s. Kapitel 5.2.1) und des Produktionsplanungsmodells (s. Kapitel 5.2.2) sind in Python 3.7.7 implementiert. Zum Lösen der Optimierungsmodelle wird mithilfe des Packages `gurobipy` der Solver Gurobi in der Version 9.0.1 verwendet. Die Berechnungen werden auf einem Computer mit zwei Intel Xeon E5-2650 v4 Prozessoren mit 2,20 GHz, insgesamt 24 Kernen und 128 GB Arbeitsspeicher durchgeführt. Wie bereits in Kapitel 6 erwähnt, existieren drei verschiedene Fallstudien mit jeweils 500 Datensätzen. Die Fallstudien unterscheiden sich bezüglich der Kundenzusammensetzung und werden für einen besseren Überblick in Tabelle 7.1 erneut aufgeführt. Für eine detailliertere Auflistung wird auf Tabelle 6.1 verwiesen.

Tabelle 7.1: Zusammensetzung der Fallstudien – Anteile der Aufträge je Kundensegment k

	A	B	C
Fallstudie 1	50%	30%	20%
Fallstudie 2	20%	50%	30%
Fallstudie 3	35%	32,5%	32,5%

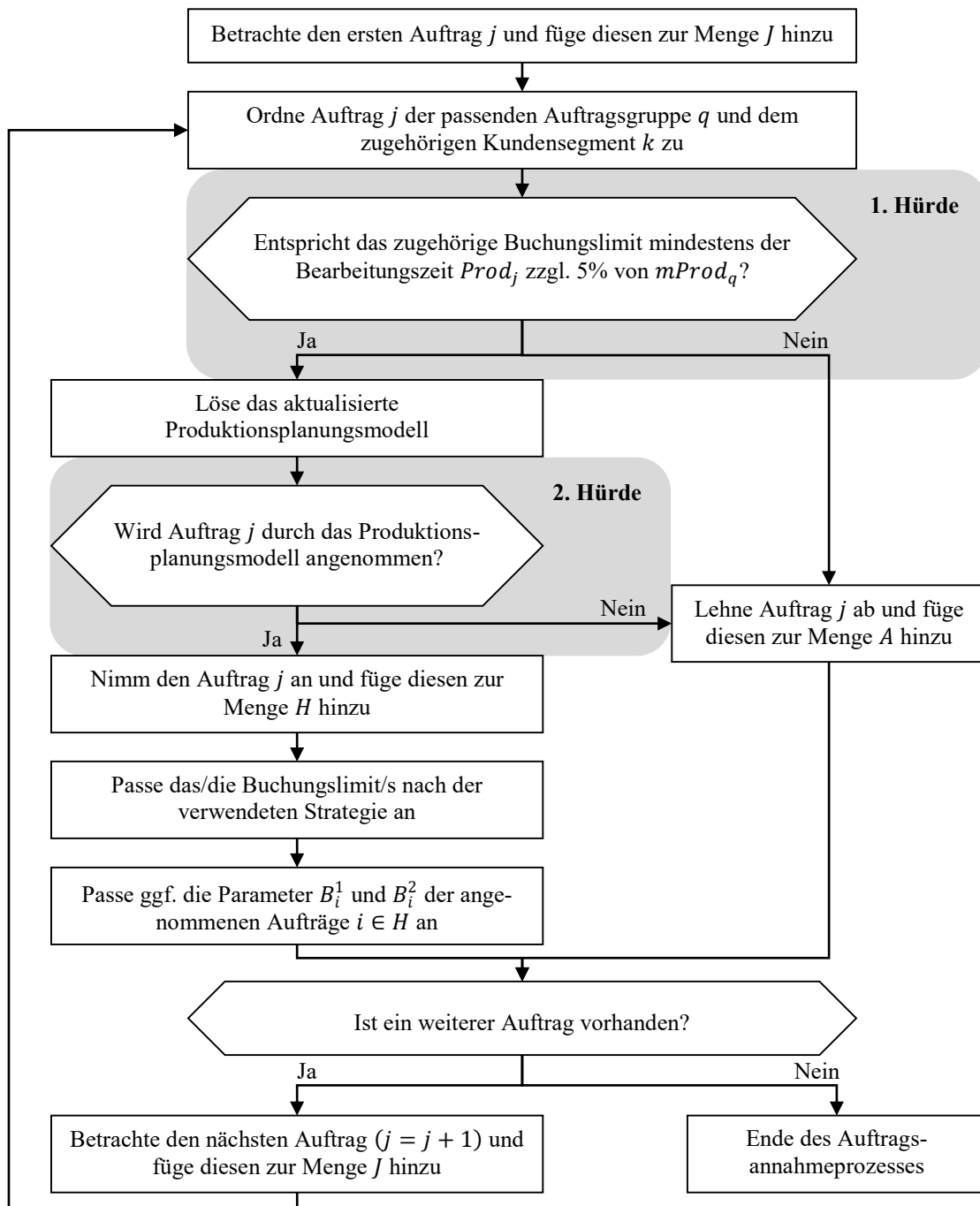


Abbildung 7.1: Detaillierter Auftragsannahmeprozess bei Verwendung von Buchungslimits

Ergebnisse des Kapazitätszuweisungsmodells

Die aus dem Kapazitätszuweisungsmodell resultierenden einfachen Buchungslimits x_{qk} , welche bei der Strategie PBL verwendet werden, sowie der Zielfunktionswert des Modells sind in Tabelle 7.2 für alle Fallstudien aufgeführt. Darüber hinaus sind für jede Fallstudie die produktorientierten Buchungslimits x_{qk}^{Pr} angegeben. Um diese produktorientierten Buchungslimits x_{qk}^{Pr} zu erhalten, werden die einfachen kapazitätsorientierten Buchungslimits x_{qk} durch die maximale Bearbeitungszeit $mProd_q$ der zugehörigen Auftragsgruppe q dividiert. Beim Vergleich der produktorientierten Buchungslimits x_{qk}^{Pr} und der

Nachfrageprognose DF_{qk} , welche ebenfalls in Tabelle 7.2 für jede Fallstudie aufgelistet ist, wird ersichtlich, bei welchen Produkten qk gemäß der einfachen Buchungslimits x_{qk}^{Pr} die Nachfrage nicht vollständig bedient werden kann. Unterschreitungen der Nachfrageprognose DF_{qk} sind in der Tabelle 7.2 kursiv und fett gedruckt, um diese besser hervorzuheben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei der Ermittlung der produktorientierten Buchungslimits x_{qk}^{Pr} immer davon ausgegangen wird, dass die Bearbeitungszeit $Prod_j$ der maximalen Bearbeitungszeit $mProd_q$ der zugehörigen Auftragsgruppe q entspricht. Sofern die individuellen Bearbeitungszeiten $Prod_j$ kürzer ausfallen, ist es auch möglich, dass im Vergleich zu dem produktorientierten Buchungslimit x_{qk}^{Pr} noch mehr Aufträge des betrachteten Produkts qk angenommen werden können und es somit nicht zwangsläufig zu einer Unterschreitung der Nachfrageprognose DF_{qk} kommen muss. Die produktorientierten Buchungslimits x_{qk}^{Pr} dienen folglich nur einer groben Orientierung, da sie einfacher mit der Nachfrageprognose DF_{qk} verglichen werden können.

Tabelle 7.2: Auflistung der einfachen, kapazitätsorientierten Buchungslimits x_{qk} , der einfachen, produktorientierten Buchungslimits x_{qk}^{Pr} im Vergleich zur Nachfrageprognose DF_{qk} und des Zielfunktionswertes

Kunden- segment k	Auftrags- gruppe q	Fallstudie 1			Fallstudie 2			Fallstudie 3		
		x_{qk}	x_{qk}^{Pr}	DF_{qk}	x_{qk}	x_{qk}^{Pr}	DF_{qk}	x_{qk}	x_{qk}^{Pr}	DF_{qk}
A	kurz	5	10	10	2	4	4	3,5	7	7
	mittel	7	7	7	3	3	3	5	5	5
	lang	1,5	1	3	0,3	0,2	1	0,9	0,6	2
B	kurz	3	6	6	5	10	10	3	6	6
	mittel	0	0	4	0	0	7	0,5	0,5	5
	lang	0	0	2	0	0	3	0	0	2
C	kurz	2	4	4	3	6	6	3	6	6
	mittel	1,5	1,5	3	4	4	4	4,1	4,1	5
	lang	0	0	1	2,7	1,8	2	0	0	2
Zielfunktionswert		14.385 GE			15.090 GE			14.771 GE		

Über alle Fallstudien und Kundensegmente hinweg kann bei den langen Aufträgen die Nachfrageprognose $DF_{lang,k}$ nicht (vollständig) bedient werden. Dies ist dadurch zu erklären, dass mit den langen Aufträgen innerhalb eines Kundensegments geringere Deckungsbeiträge pro Zeiteinheit erwirtschaftet werden, weshalb mittlere und besonders kurze Aufträge innerhalb eines Kundensegments bevorzugt werden. Bei den Segmenten B und C ist darüber hinaus fast immer eine Unterschreitung der Nachfrageprognose bezüglich der mittleren Aufträge zu verzeichnen. Insbesondere bei dem Kundensegment B

fällt eine deutliche Differenz zwischen der Nachfrageprognose $DF_{mittel,B}$ und dem einfachen, produktorientierten Buchungslimit $x_{mittel,B}^{Pr}$ auf. Dies ist auf die verwendete Zielfunktion zurückzuführen, mit welcher primär die Summe der Deckungsbeiträge maximiert wird und es nur bei Abweichungen von den angestrebten Servicelevels α_k zu einer Minderung des Zielfunktionswertes kommt. Bei allen Fallstudien werden gemäß den einfachen, produktorientierten Buchungslimits $x_{q,B}^{Pr}$ exakt 50% Aufträge von B-Kunden angenommen. Folglich wird das angestrebte Servicelevel α_B erreicht, aber nicht überschritten. Auch das Servicelevel α_A der A-Kunden wird in jeder Fallstudie mit 90% genau erreicht. Um den Zielfunktionswert zu maximieren, wird die unter Berücksichtigung der Nachfrageprognose DF_{qk} noch frei verteilbare Kapazität ausschließlich für Aufträge von C-Kunden reserviert. Diese besitzen eine höhere Nachfragewertigkeit und sorgen somit für eine Steigerung des (kurzfristigen) Deckungsbeitrags. Demzufolge kommt es nur bei dem Kundensegment C in allen Fallstudien zu einer Überschreitung des angestrebten Servicelevels α_C . In der ersten Fallstudie wird gemäß der einfachen, produktorientierten Buchungslimits x_{qC}^{Pr} ein Servicelevel von 68,75% für die C-Kunden erreicht. In der zweiten Fallstudie beträgt dieses 98,33% und in der dritten Fallstudie 77,69%.²⁰ Die unterschiedlichen Servicelevels sind auf die verschiedene Kundenzusammensetzung der Fallstudien (s. Tabelle 7.1) zurückzuführen. Da kein Servicelevel α_k unterschritten wird, nehmen alle Abweichungsvariablen dev_k den Wert 0 an.

Auch die unterschiedlichen Zielfunktionswerte (s. Tabelle 7.2) sind mit der verschiedenen Kundenzusammensetzung der Fallstudien zu begründen. Wenn es die Kapazität zulassen würde und die vollständige Nachfrage befriedigt werden könnte, wären bei der Fallstudie 1 im Durchschnitt 23.930 GE, bei der Fallstudie 2 im Durchschnitt 24.605 GE und bei der Fallstudie 3 im Durchschnitt 24.770 GE zu erzielen. Diese Werte werden durch die Multiplikation des durchschnittlichen Deckungsbeitrags aCM_{qk} mit der Nachfrageprognose DF_{qk} und der anschließenden Aufsummierung über alle Produkte qk berechnet. Da die Nachfrage die Kapazität jedoch übersteigt, ist es nicht möglich, alle Aufträge anzunehmen. Über alle Fallstudien hinweg entspricht der Zielfunktionswert in etwa 60% der zuvor genannten Summen (Fallstudie 1: 60,11%, Fallstudie 2: 61,33%, Fallstudie 3: 59,63%). Insofern sind auch bei dem Zielfunktionswert über alle Fallstudien hinweg ähnliche Ergebnisse zu beobachten.

Die mit den Strategien NDV, RNBL und NWCS ermittelten geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} sind neben den einfachen Buchungslimits x_{qk} , welche bei der PBL Strategie Anwendung finden, in Tabelle 7.3 aufgeführt. Es ist deutlich zu sehen, dass bei den Strategien NDV und RNBL jeweils das am höchsten gerankte Produkt Zugriff auf die gesamte Kapazität erhält. Folglich ist bei der NDV Strategie das Buchungslimit $xn_{kurz,C}$ und bei der RNBL Strategie das Buchungslimit $xn_{kurz,A}$ mit 20 KE am größten.

²⁰ Zur Ermittlung der Servicelevels wird die Summe der einfachen, produktorientierten Buchungslimits x_{qk}^{Pr} über die Auftragsgruppe q durch die Summe der Nachfrageprognose DF_{qk} über die Auftragsgruppe q dividiert.

Tabelle 7.3: Ergebnisse der einfachen und geschachtelten Buchungslimits

Kunden- segment k	Auftrags- gruppe q	Fallstudie 1				Fallstudie 2				Fallstudie 3			
		PBL	NDV	RNBL	NWCS	PBL	NDV	RNBL	NWCS	PBL	NDV	RNBL	NWCS
A	kurz	5	13,5	20	13,5	2	5,3	20	5,3	3,5	9,4	20	9,4
	mittel	7	8,5	15	8,5	3	3,3	18	3,3	5	5,9	16,5	5,9
	lang	1,5	1,5	8	1,5	0,3	0,3	15	0,3	0,9	0,9	11,5	0,9
B	kurz	3	16,5	6,5	3	5	10,5	14,7	5	3	12,9	10,6	3,5
	mittel	0	13,5	3,5	0	0	5,3	9,7	0	0,5	9,9	7,6	0,5
	lang	0	13,5	3,5	0	0	5,3	9,7	0	0	9,4	7,1	0
C	kurz	2	20	3,5	3,5	3	20	9,7	9,7	3	20	7,1	7,1
	mittel	1,5	18	1,5	1,5	4	17	6,7	6,7	4,1	17	4,1	4,1
	lang	0	16,5	0	0	2,7	13	2,7	2,7	0	12,9	0	0

Ergebnisse der Fallstudie 1 nach Durchführung des Auftragsannahmeprozesses

Die im Folgenden präsentierten Ergebnisse entsprechen den über die 500 Datensätzen ermittelten Durchschnittswerten nach Beendigung des Auftragsannahmeprozesses. Bei den Strategien NDV, RNBL und NWCS werden die geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} entsprechend dem Standard Nesting angepasst. Zunächst werden die Ergebnisse der Ausgangsfallstudie (Fallstudie 1) genauer betrachtet und analysiert. Die Ergebnisse der Fallstudien 2 und 3 werden anschließend zusammengefasst dargestellt.

In Abbildung 7.2, welche sich auf der nachfolgenden Seite befindet, sind der über die 500 Datensätze durchschnittlich erreichte Profit, die durchschnittlich erreichten Servicelevels und die durchschnittlich ungenutzte Kapazität der Fallstudie 1 dargestellt. Der Profit entspricht dem Zielfunktionswert des letzten Durchlaufs des Produktionsplanungsmodells ohne Abzug der fiktiven Strafkosten für Abweichungen von den angestrebten Servicelevels α_k und ungenutzte Produktionskapazität. Folglich setzt sich der Profit aus der Summe der Deckungsbeiträge der angenommenen Aufträge abzüglich der Rüstkosten und der Strafkosten für einen verfrühten Produktionsbeginn bzw. eine verspätete Fertigstellung zusammen. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden über alle Datensätze gemittelt und ins Verhältnis zu dem mit der FCFS Strategie erzielten Profit gesetzt. Das Profitergebnis, welches mit der FCFS Strategie erreicht wird, bildet demzufolge 100% ab. Die erreichten Servicelevels spiegeln den durchschnittlichen Anteil der angenommenen Aufträge innerhalb eines Kundensegments k wider. Um die tatsächlich ungenutzte Kapazität zu ermitteln, werden von der Kapazität CAP die Bearbeitungszeiten $Prod_j$ der angenommenen Aufträge $j \in H$ und die anfallenden Rüstzeiten ST_{ij} subtrahiert. Anschließend wird der

Mittelwert über alle Datensätze gebildet. Die ungenutzte Kapazität wird prozentual zur Gesamtkapazität CAP angegeben.

Mit der Vergleichsstrategie FCFS wird das beste Profitergebnis erreicht, was unter anderem auf die nahezu vollständige Kapazitätsauslastung zurückzuführen ist. Bei Verwendung der FCFS Strategie bleiben lediglich 0,82% der zur Verfügung stehenden Kapazität CAP ungenutzt. Dies ist auf der einen Seite positiv zu sehen, da ungenutzte Kapazität mit verlorenem Deckungsbeitragspotenzial gleichzusetzen ist (Hintsches, 2012, S. 60), auf der anderen Seite sollte jedoch auch bedacht werden, dass eine solch enge Produktionsplanung sehr anfällig bei Störungen, wie beispielsweise Maschinenausfällen, ist.

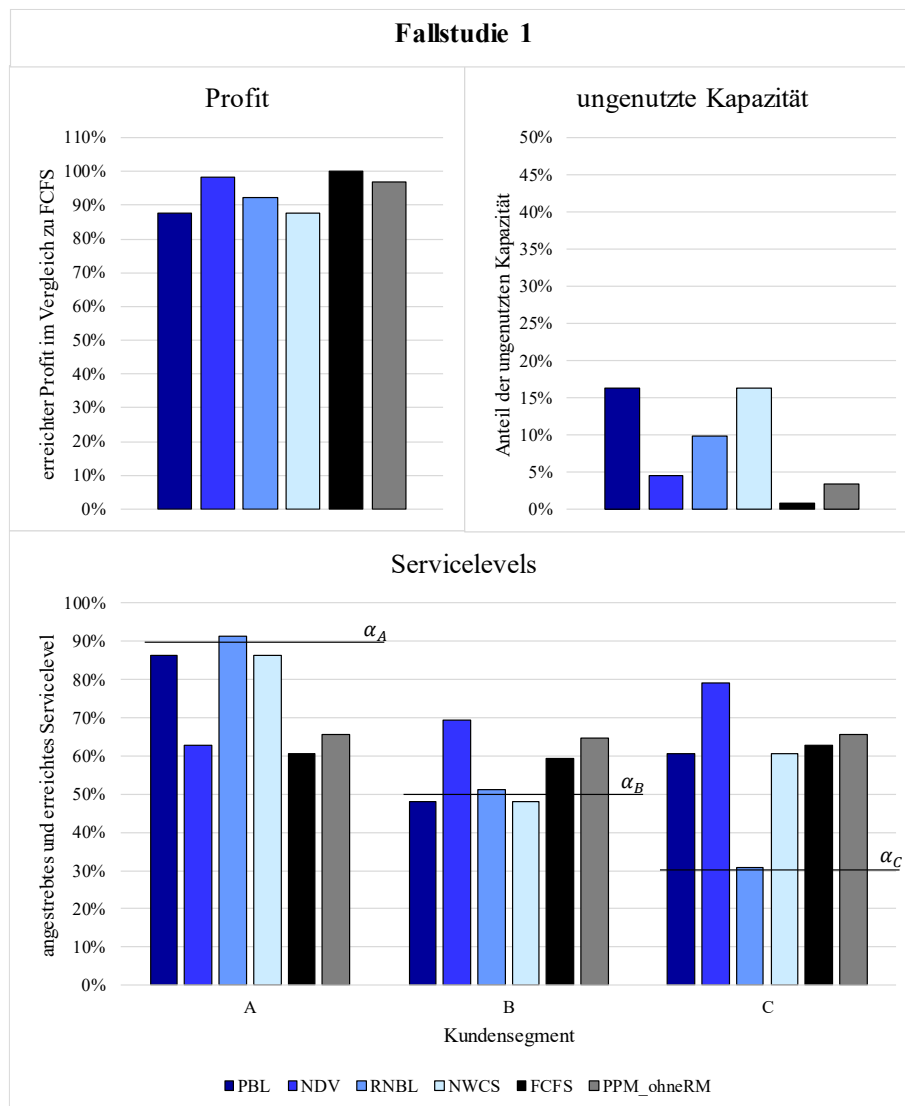


Abbildung 7.2: Durchschnittliche Ergebnisse der Fallstudie 1

Mithilfe der Schachtelungsstrategie NDV sind nur minimale Profiteinbußen von 1,86% zu verzeichnen, obwohl im Durchschnitt 4,55% der Kapazität ungenutzt bleiben. Auch mit der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM wird mit 96,72% ein ähnliches Profitergebnis erzielt. Mit 3,49% bleibt minimal weniger Kapazität als bei Verwendung der NDV Strategie ungenutzt. Im Durchschnitt können 92,07% des FCFS-Profitergebnisses mit der RNBL Strategie erreicht werden, wobei 9,94% der Kapazität ungenutzt

bleiben. Die Strategien PBL und NWCS führen zu demselben Ergebnis von 87,52% und folglich zum geringsten Profitergebnis. Jedoch werden mit diesen Strategien auch nur 83,69% der zur Verfügung stehenden Kapazität CAP genutzt. Wird der mit den verschiedenen Strategien erzielte Profit lediglich je genutzter Kapazität ermittelt, ist festzustellen, dass mit den Strategien PBL und NWCS relativ gesehen das beste Profitergebnis erreicht wird. Bei den Strategien PBL und NWCS ist der hohe Anteil der ungenutzten Kapazität durch die geringe Flexibilität bei Nutzung der Buchungslimits x_{qk} bzw. xn_{qk} zu erklären. Wenn beispielsweise die Buchungslimits so ausfallen, dass die Kapazität ohne eine Schachtelung gar nicht vollständig genutzt werden kann, weil diese nicht mehr für einen ganzen Auftrag reichen würde, führt dies zwangsläufig zu ungenutzter Kapazität. Das Buchungslimit $x_{mittel,C}$ ist ein Beispiel dafür. Dieses besitzt einen Wert von 1,5 (s. Tabelle 7.3). Folglich könnten – unter der Annahme, dass die Bearbeitungszeit der maximalen Bearbeitungszeit $mProd_{mittel}$ entspricht – anderthalb mittlere Aufträge aus dem Kundensegment C angenommen werden. Da jedoch ein Auftrag nicht nur zum Teil, sondern nur vollständig angenommen bzw. abgelehnt werden kann, bleibt zumindest die für einen halben Auftrag reservierte Kapazität ohne die Verwendung einer Schachtelung ungenutzt.

Zusätzlich kann eine Ablehnung durch das Produktionsplanungsmodell und folglich eine Ablehnung aus planungstechnischen Gründen dazu führen, dass bei (eingeschränkt) unflexibler Nutzung der Buchungslimits Kapazität ungenutzt bleibt. Insbesondere, wenn laut den Buchungslimits x_{qk} die vollständige Nachfrageprognose DF_{qk} eines Produkts qk bedient werden könnte, dies aber zum Beispiel bei einem Auftrag, welcher als Produkt qk klassifiziert wird, aus planungstechnischen Gründen nicht möglich ist, kann die für dieses Produkt qk vorgesehene Kapazität nicht anderweitig – oder bei der NWCS Strategie nicht für Aufträge außerhalb des Kundensegments k – genutzt werden. Bei den Strategien NDV und RNBL ist durch die segmentübergreifende Schachtelung eine größere Flexibilität für die Nutzung der geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} vorhanden. Da bei der NWCS Strategie lediglich innerhalb des Kundensegments k geschachtelt wird, ist dies nicht ausreichend, um einen mit 16,31% recht hohen Anteil an ungenutzter Kapazität zu vermeiden.

Bei Betrachtung des zweiten Ziels (s. Abbildung 7.2 untere Graphik), der Erreichung der angestrebten Servicelevels α_k , fällt auf, dass mit den Vergleichsstrategien FCFS und PPM_ohneRM über alle Kundensegmente $k \in K$ hinweg ähnliche Servicelevels erreicht werden. Durch die Verwendung der FCFS Strategie werden circa 60% aller Aufträge aus den Kundensegmenten A, B und C angenommen. Mit der Strategie PPM_ohneRM werden mit einem Servicelevel von etwa 65% über alle Kundensegmente leicht bessere Ergebnisse erzielt. Jedoch ist bei beiden Vergleichsstrategien keine Bevorzugung, der wichtigen Kunden aus dem Segment A zu verzeichnen. Somit wird das angestrebte Servicelevel α_A der wichtigsten Kunden mit den Vergleichsstrategien um ungefähr 25% bis 30% unterschritten. Da bei der FCFS Strategie jeder Auftrag, unabhängig vom Kundensegment, gleichbehandelt wird, entspricht ein ausgeglichenes Servicelevel über alle Kundensegmente der Erwartung. Dass mit der Strategie

PPM_ohneRM ebenfalls über alle Kundensegmente hinweg ähnliche Servicelevels erreicht werden, ist jedoch zunächst überraschend. Durch die Restriktionsgruppe (5.16) des Produktionsplanungsmodells werden Abweichungen von den angestrebten Servicelevels α_k durch die Variablen dev_k erfasst. Diese werden mit dem Strafkostensatz $Pdev_k$ in der Zielfunktion multipliziert und schmälern damit den Zielfunktionswert. Allerdings ist in dem Produktionsplanungsmodell und demnach auch in der Restriktionsgruppe (5.16), welche zur Verdeutlichung noch einmal aufgeführt wird, keine langfristige Perspektive enthalten. Die erreichten Servicelevels werden in dieser Nebenbedingungsgruppe lediglich abhängig von den bis zu diesem Zeitpunkt eingetroffenen Aufträgen berechnet. An dieser Stelle sei wiederholt, dass das Produktionsplanungsmodell mehrfach durchlaufen und die Menge J auftragsweise gefüllt wird. Folglich sind in der Menge J nur die Aufträge enthalten, welche bis zum Zeitpunkt der Durchführung des Modells bereits eingetroffen sind. Aufträge, welche zukünftig noch eintreffen, werden in der Restriktionsgruppe (5.16) nicht berücksichtigt.

$$\sum_{j \in J \setminus A} L_{kj} \cdot z_j \geq (\alpha_k - dev_k) \cdot \sum_{j \in J} L_{kj} \quad \forall k \in K \quad (5.16)$$

Um den Einfluss dieser Restriktionsgruppe auf die Erreichung der angestrebten Servicelevels α_k zu untersuchen, wurde die Strategie PPM_ohneRM erneut, aber ohne die Nebenbedingungsgruppe (5.16) durchgeführt. Ohne diese Restriktionsgruppe werden die angestrebten Servicelevels α_k in dem Produktionsplanungsmodell nicht beachtet. Die bei dieser erneuten Durchführung der Strategie PPM_ohneRM (ohne die Restriktionsgruppe (5.16)) erreichten Servicelevels weichen über die 500 Datensätze im Durchschnitt betragsmäßig um 0,02% für Kundensegment A, 0,05% für Kundensegment B und 0,13% für Kundensegment C von Ergebnissen ab, welche mit der ursprünglichen Strategie PPM_ohneRM (inklusive der Restriktionsgruppe (5.16)) erreicht werden. Demzufolge ist bei der auftragsweisen Durchführung der Strategie PPM_ohneRM, bei welcher die langfristige Perspektive nicht vorhanden ist, keine Auswirkung der Restriktionsgruppe (5.16) auf die erreichten Servicelevels erkennbar.

In dem Kapazitätszuweisungsmodell wird mit der sich auf den vollständigen Planungshorizont beziehenden Nachfrageprognose DF_{qk} auch eine langfristige Perspektive berücksichtigt. Demzufolge ist in den durch das Kapazitätszuweisungsmodell ermittelten Buchungslimits x_{qk} die langfristige Perspektive enthalten. Mit Ausnahme der NDV Schachtelungsstrategie ist bei allen Buchungslimitstrategien eine Bevorzugung der Aufträge von A-Kunden zu verzeichnen. Da Aufträge von A-Kunden bei der Schachtelungshierarchie der NDV Strategie an unterster Stelle stehen, ist dieses Ergebnis jedoch auch zu erklären. Folglich wird von der Schachtelung Gebrauch gemacht und das Annehmen von Aufträgen von B- und/oder C-Kunden wird unter anderem über die eigentlich gemäß den einfachen Buchungslimits $x_{q,A}$ für A-Kunden reservierte Kapazität ermöglicht. Auffällig ist darüber hinaus, dass mit den Strategien PBL und NWCS, wie bei den Resultaten hinsichtlich des Profits und der ungenutzten Kapazität, erneut identische Ergebnisse erzielt werden. Dies verifiziert die zuvor getroffene Schlussfolgerung, dass durch die Schachtelung innerhalb der Kundensegmente (NWCS Strategie) keine bessere Kapazitätsauslastung

erreicht werden kann, sondern vielmehr die gleichen Ergebnisse wie bei der Verwendung der einfachen Buchungslimits (PBL Strategie) erreicht werden. Die Servicelevels α_A und α_B werden mit den Strategien PBL und NWCS mit 86,26% und 47,93% nur leicht verfehlt. Das Servicelevel α_C wird mit allen Strategien erreicht. Lediglich mithilfe der RNBL Strategie können alle angestrebten Servicelevels α_k erfüllt werden. Diese Strategie ist demnach die einzige, mit welcher das hohe angestrebte Servicelevel α_A für die A-Kunden von 90% eingehalten werden kann.

Um die Effektivität der RM-Hürde zu beurteilen, kann neben den mit der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM erzielten Ergebnissen auch die Anzahl der Ablehnungen durch die Buchungslimits und das Produktionsplanungsmodell analysiert werden. In Abbildung 7.3 sind die Ablehnungen aufgeschlüsselt dargestellt. Auf der linken Seite ist die durchschnittliche Anzahl der durch die Buchungslimits (erste Hürde) abgelehnten Aufträge und in der Mitte die durchschnittliche Anzahl der durch das Produktionsplanungsmodell (zweite Hürde) abgelehnten Aufträge aufgeführt. Auf der rechten Seite ist die durchschnittliche Anzahl der Ablehnungen insgesamt und folglich die Summe der Ablehnungen aus der ersten und zweiten Hürde dargestellt. Darüber hinaus ist auf der rechten Seite auch die Anzahl der Ablehnungen, welche aus den Vergleichsstrategien FCFS und PPM_ohneRM resultieren, aufgeführt. Auffällig ist, dass bei den mengenorientierten Ansätzen die meisten Ablehnungen auf die Buchungslimits zurückzuführen sind. Insgesamt lässt dies unter Berücksichtigung der erzielten Profitergebnisse und insbesondere auch der erreichten Servicelevels auf eine große Effektivität der RM-Hürde schließen.

Bei der NDV Strategie werden im Vergleich zu den anderen Buchungslimitstrategien mit durchschnittlich 3,31 Aufträgen noch relativ viele Aufträge durch das Produktionsplanungsmodell abgelehnt. Dies liegt daran, dass bei dieser Strategie die geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} für viele Produkte relativ hohe Kontingente aufweisen und somit viele Produkte zunächst gemäß der Buchungslimits angenommen werden können. Die für viele Produkte relativ hohen Kontingente kommen dadurch zustande, dass gemäß den einfachen Buchungslimits x_{qk} die meiste Kapazität von A-Kunden reserviert ist. Diese ursprünglich für A-Kunden reservierte Kapazität ist bei der NDV Strategie jedoch auch für die B- und C-Kunden zugänglich, wodurch es über alle Kundensegmente hinweg zu relativ hohen Kontingenten kommt (s. Tabelle 7.3).

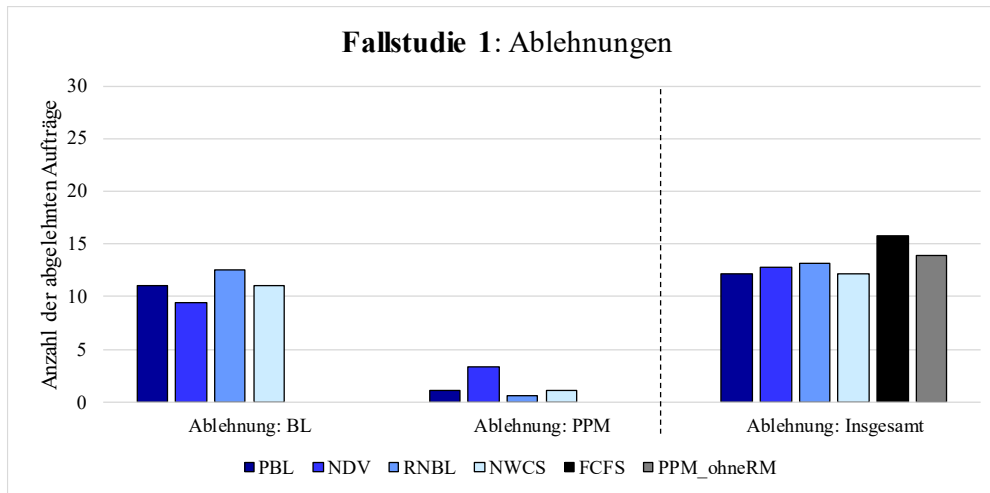


Abbildung 7.3: Anzahl der abgelehnten Aufträge durch Buchungslimits (BL), das Produktionsplanungsmodell (PPM) und insgesamt der Fallstudie 1

Des Weiteren ist es interessant, dass mit den Vergleichsstrategien insgesamt mehr Aufträge abgelehnt werden, obwohl durch diese Strategien die höchste Kapazitätsauslastung erzielt wird. Die Erklärung dafür ist, dass mit den Vergleichsstrategien tendenziell mehr mittlere und lange Aufträge angenommen werden. Dies veranschaulicht die Abbildung 7.4, in welcher die durchschnittliche Anzahl der angenommenen Aufträge nach Auftragsgruppe q und Kundensegment k aufgeschlüsselt dargestellt ist. Mithilfe der Buchungslimitstrategien werden überwiegend kurze Aufträge angenommen, da dies im Sinne der Profitmaximierung ist. Ferner wird anhand der Abbildung 7.4 deutlich, dass durch die Strategie RNBL in allen Auftragsgruppen die meisten Aufträge von Kunden aus dem Segment A angenommen werden. Dies führt dazu, dass das hohe Servicelevel α_A mit dieser Strategie erreicht wird.

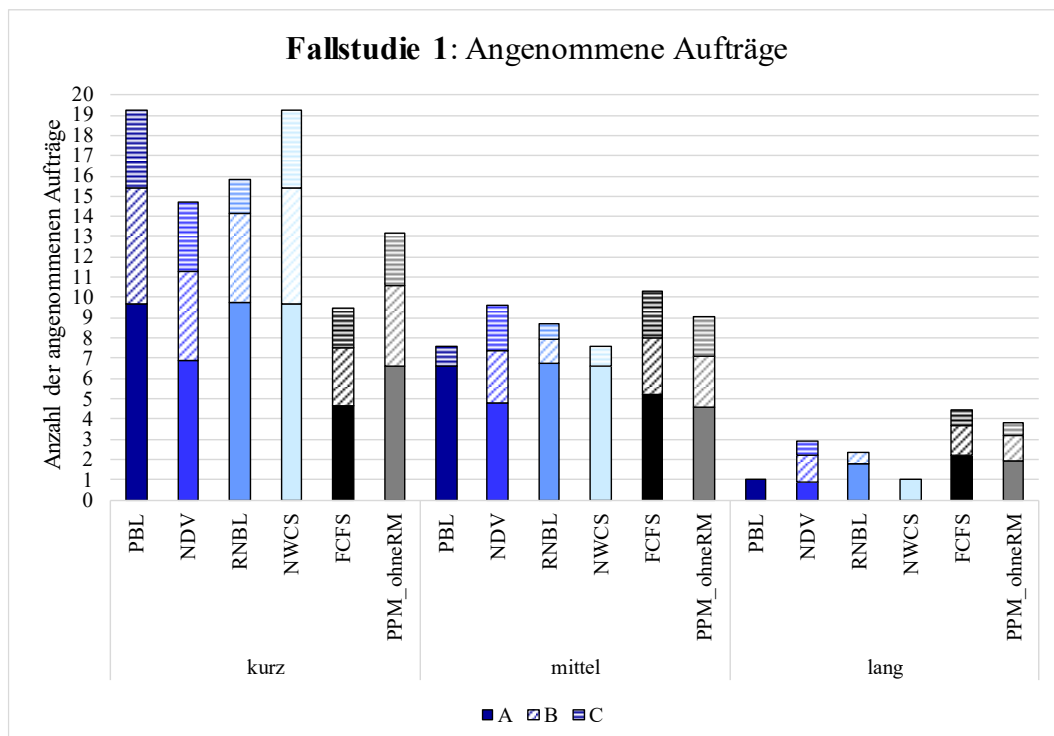


Abbildung 7.4: Aufgeschlüsselte Darstellung der angenommenen Aufträge der Fallstudie 1

Die zuvor vorgestellten Ergebnisse sind robust gegenüber einer zufälligen Auftragsreihenfolge und -dichte. Dies zeigt die von Lorscheid et al. (2012) empfohlene Analyse der Veränderung des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten über die ansteigende Anzahl der Datensätze. Beispielhaft werden in Abbildung 7.5 die Veränderungen der Profitergebnisse über die Anzahl der berücksichtigten Datensätze (X-Achse) aufgezeigt. Auf der primären Y-Achse ist der Mittelwert und auf der sekundären Y-Achse ist der Variationskoeffizient abgetragen. Die durchgezogenen Linien zeigen den Mittelwert, die gepunkteten Linien den Variationskoeffizienten (engl. Coefficient of Variation, CV). Es ist deutlich zu beobachten, dass sich die Mittelwerte sehr schnell einpendeln und auch bei den Variationskoeffizienten ist eine Stabilisierung der Werte zu erkennen. Bei den erreichten Servicelevels ist ebenfalls eine Stabilisierung der Mittelwerte und Variationskoeffizienten zu verzeichnen. Die dazugehörigen Abbildungen sind dem Anhang C.1 zu entnehmen.

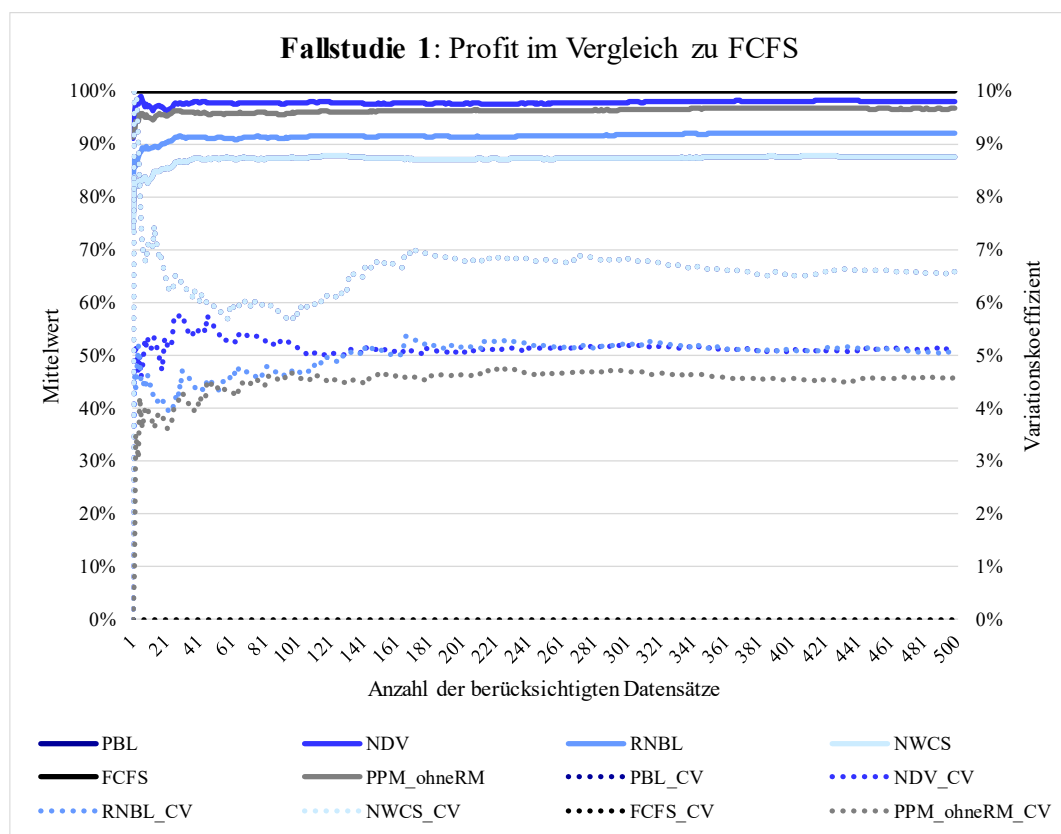


Abbildung 7.5: Robustheitsanalyse der Profitergebnisse der Fallstudie 1

Neben der Auftragsannahmeentscheidung wird mithilfe der vorgestellten Ansätze auch ein Produktionsplan ermittelt. Da die planungsrelevanten Daten, wie die Freigabezeitpunkte R_j und \bar{R}_j und die Fristen D_j und \bar{D}_j , jedoch von dem zufällig bestimmten Auftragseingangstag abhängig sind, können die Produktionspläne je nach Auftragsreihenfolge und -dichte sehr unterschiedlich ausfallen. Die Bildung eines durchschnittlichen Produktionsplans ist nicht sinnvoll. Stattdessen wird nachfolgend ein beispielhafter Datensatz genauer analysiert. Bei dem beispielhaften Datensatz handelt es sich um den Datensatz 228,

von welchem die auftragsspezifischen Daten vollständig in Anhang B.1 aufgeführt sind. Dieser Datensatz wird ausgewählt, da die Summe der verfrühten und verspäteten Zeiteinheiten – hierbei sind $\sum_{j \in J} e_j$ und $\sum_{j \in J} t_j$ gemeint –, die Summe der Rüstzeiten und der erzielte Profit über alle Strategien hinweg am ehesten den jeweiligen Mittelwerten über die 500 Datensätze entsprechen. Die genauen Werte können Tabelle 7.4 entnommen werden. Der resultierende Produktionsplan für Datensatz 228 ist in Abbildung 7.6 auf der nächsten Seite dargestellt.

Tabelle 7.4: Durchschnittliche und planungstechnische Ergebnisse der Fallstudie 1 und des Datensatzes 228

	Summe der verfrühten Zeiteinheiten [Tage]		Summe der verspäteten Zeiteinheiten [Tage]		Summe der Rüstzeiten [Tage]		Profit [GE]	
	\emptyset	Datensatz 228	\emptyset	Datensatz 228	\emptyset	Datensatz 228	\emptyset	Datensatz 228
PBL	0,99	0,00	3,37	2,77	1,03	1,08	13.100,78	13.668,02
NDV	0,36	0,00	22,03	21,98	1,13	1,21	14.705,95	15.583,95
RNBL	0,69	0,00	8,15	10,13	1,07	1,13	13.790,17	14.516,16
NWCS	0,99	0,00	3,37	2,77	1,03	1,08	13.100,78	13.668,02
FCFS	1,64	0,00	16,37	16,83	1,11	1,10	14.990,59	14.719,39
PPM_ohneRM	0,32	0,00	26,28	25,66	1,12	1,17	14.494,94	15.103,77

Die Summe der verfrühten Zeiteinheiten ist relativ gering, bzw. bei Datensatz 228 sogar gleich null. Dies liegt unter anderem an der Regelung, dass der Beginn eines Auftrags, sofern dieser in drei Tagen oder weniger eingeplant ist, nicht mehr verschoben werden kann. Dadurch wird garantiert, dass bereits bestellte Materialien wie geplant eingesetzt werden und nicht gelagert werden müssen. Durch die recht enge Produktionsplanung (s. Abbildung 7.6) ist es für einen neu eintreffenden Auftrag folglich meist gar nicht möglich oder zumindest nicht vorteilhaft, diesen verfrüht zu beginnen.

Die Summe der verspäteten Zeiteinheiten fällt jedoch zum Teil sehr hoch aus. Dies ist meist auf vereinzelte Aufträge mit einer sehr hohen Verspätung zurückzuführen. Bereits bei der Betrachtung des Produktionsplans fällt auf, dass mehrere Aufträge vollständig verspätet sind. Ein vollständig verspäteter Auftrag kann dabei auch um mehrere Tage überfällig sein. So kann Auftrag 12 bei der NDV Strategie als ein Beispiel genannt werden. Die Bearbeitung des Auftrags startet zum Zeitpunkt 15,43 ($= b_{12}$) und endet zum Zeitpunkt 16,73 ($= f_{12}$). Laut den Produktionsdaten wäre der gewünschte Fertigstellungszeitpunkt D_{12} am Tag 11 und die Deadline \bar{D}_{12} am Tag 18. Folglich wird der Auftrag 12 erst kurz vor der Deadline \bar{D}_{12} fertiggestellt und ist um 6,73 Tage ($= t_{12}$) verspätet. Neben Auftrag 12 ist bei der NDV Strategie auch der Auftrag 22 mit 4,22 Tagen ($= t_{22}$) deutlich verspätet. Zusammengenommen wird nur durch diese zwei Aufträge bereits circa die Hälfte der Summe der verspäteten Zeiteinheiten unter Verwendung der NDV Strategie verursacht. Die restlichen 11,03 verspäteten Zeiteinheiten

(21,98 – 6,73 – 4,22 = 11,03) setzen sich aus mehreren kleineren Verspätungen (unter 2 Tagen) zusammen. Ähnlich verhält es sich auch bei den anderen Strategien. So sorgen beispielsweise bei der Strategie PPM_ohneRM maßgeblich die Aufträge 12, 13 und 22 für die hohe Summe der verspäteten Zeiteinheiten.

Mit den Strategien PBL und NWCS wird ein identischer Produktionsplan ermittelt. Durch den relativ hohen Anteil an ungenutzter Kapazität wird es ermöglicht, dass die Summe der verspäteten Zeiteinheiten im Vergleich zu den anderen Strategien deutlich geringer ausfällt. Dies schlägt sich jedoch auch in geringeren Profitergebnissen nieder.

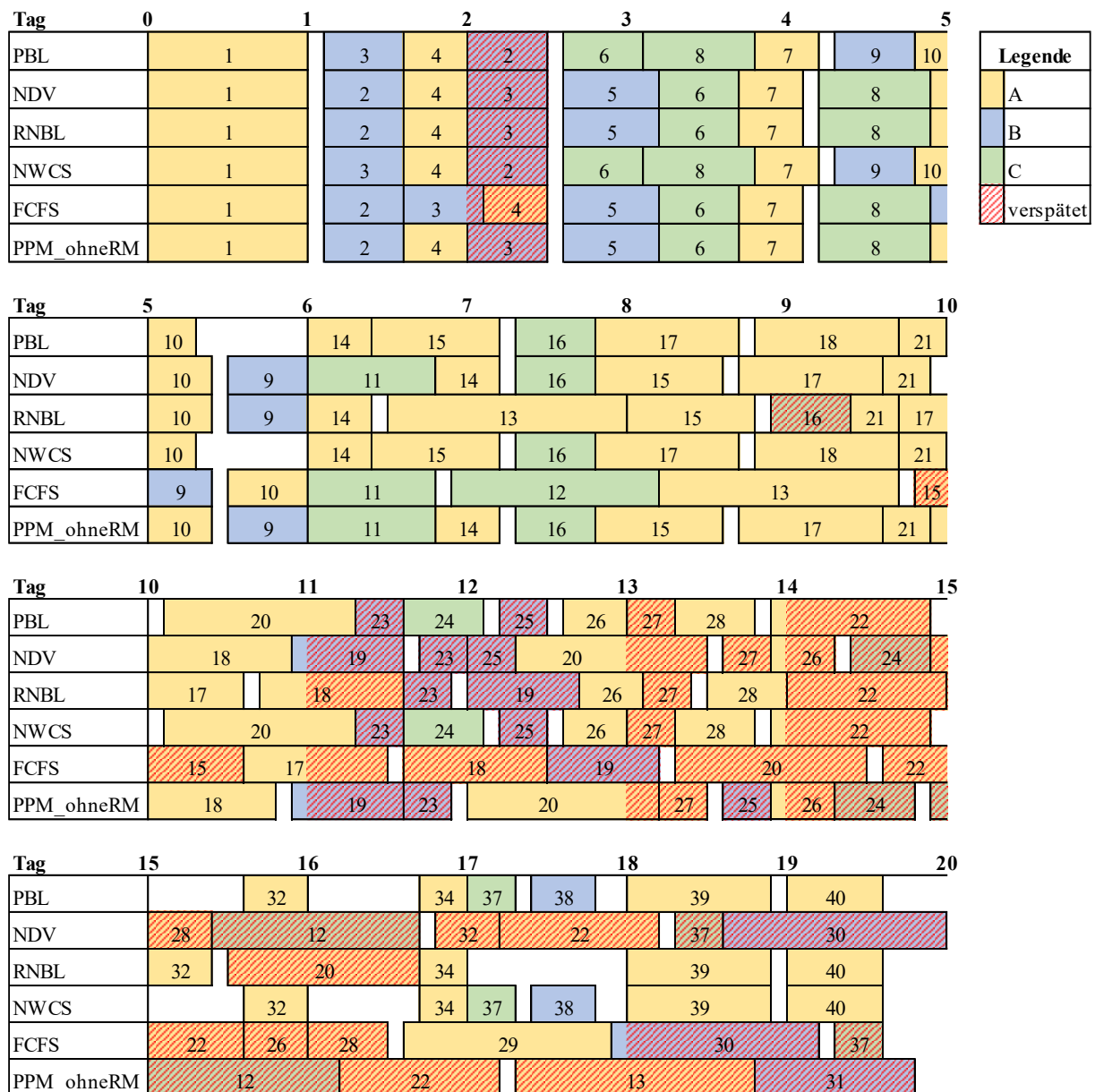


Abbildung 7.6: Produktionsplan des Datensatzes 228 der Fallstudie 1

Die Rüstzeiten sind über alle Strategien hinweg sehr ähnlich. Zwar sind die Zeiten sequenzabhängig, die Unterschiede zwischen den verschiedenen Reihenfolgen fallen jedoch relativ gering aus. So bewegen sich die Rüstzeiten in einem Intervall von 0,01 bis 0,07 Arbeitstagen (s. Tabelle 6.2, bzw. Tabelle B.3 bis Tabelle B.5 für Datensatz 228). Darüber hinaus fällt zwischen zwei Aufträgen derselben Auftragsgruppe immer dieselbe Rüstzeit an. Da es sich bei dem Großteil der angenommenen Aufträge um kurze Aufträge handelt (s. Abbildung 7.4), ist demnach die Rüstzeit zwischen diesen immer identisch. Insgesamt führt dies bei den verschiedenen Strategien zu ähnlichen Rüstzeiten. Aufgrund der Kürze der Rüstzeiten sind diese in der Abbildung 7.6 nicht mit dargestellt. Manche Lücken in der Darstellung des Produktionsplans kommen jedoch durch Rüstzeiten zustande.²¹

Wie bereits zuvor erläutert, hängen die Produktionspläne sehr stark von der Auftragsreihenfolge und -dichte ab. Jedoch können selbst bei identischer Auftragsreihenfolge und -dichte – folglich bei Verwendung desselben Datensatzes – unterschiedliche Produktionspläne zu demselben Zielfunktionswert und folglich demselben Zielerreichungsgrad führen. Ein Beispiel für eine solche Mehrfachlösung innerhalb der Optimierung bietet die Einplanung der Aufträge 2 und 3. Hierbei ist die Vergleichsstrategie FCFS von der nachfolgenden Diskussion ausgenommen, da die Reihenfolgenbildung bei dieser Strategie keiner Optimierung unterliegt. Bei den Strategien PBL und NWCS wird zunächst der Auftrag 3, dann Auftrag 4 und anschließend der Auftrag 2 gefertigt. Der Auftrag 2 ist dabei vollständig verspätet. Bei den Strategien NDV, RNBL und PPM_ohneRM wird der Auftrag 2 zuerst bearbeitet, gefolgt von Auftrag 4 und anschließend von Auftrag 3, woraufhin letzterer vollständig verspätet ist. Sowohl für Auftrag 2 als auch für Auftrag 3 ist der gewünschte Fertigstellungszeitpunkt am Tag 2 ($= D_2 = D_3$). Da beide Aufträge von B-Kunden stammen und der Strafkostenfaktor für die Verspätungen PT_k von dem Kundensegment k abhängig ist, führen beide Reihenfolgen (2-4-3 und 3-4-2) zu denselben Kosten. Folglich sei an dieser Stelle noch einmal betont, dass es sich bei dem Produktionsplan aus Abbildung 7.6 lediglich um einen beispielhaften Produktionsplan handelt.

Ergebnisse der Fallstudien 2 und 3 nach Durchführung des Auftragsannahmeprozesses

Nachdem die Ergebnisse der Ausgangsfallstudie in ausführlicher Form analysiert und diskutiert wurden, werden nachfolgend die Ergebnisse der Fallstudien 2 und 3 etwas verkürzt dargestellt. Dabei wird maßgeblich auf die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu den Ergebnissen der ersten Fallstudie eingegangen. In den Abbildungen 7.7 und 7.8, welche auf den nächsten beiden Seiten aufgeführt werden, sind

²¹ In der Abbildung des Produktionsplans sind die Produktionsdaten auf die erste Nachkommastelle gerundet. So wird der Fertigstellungszeitpunkt f_1 des Auftrags 1 von 1,03 auf 1,0 abgerundet. Durch eine Rüstzeit von 0,04 Arbeitstagen beginnt beispielsweise bei Verwendung der PBL Strategie der Auftrag 3 zum Zeitpunkt 1,07 ($= b_3$). Dieser Startzeitpunkt wird bei der Darstellung in Abbildung 7.6 auf 1,1 gerundet. Daher sind auf Basis der Rüstzeiten und der für die Abbildung verwendeten Rundungen in dem Produktionsplan teilweise kleine Lücken aufgeführt.

die durchschnittlichen Ergebnisse hinsichtlich des Profits, der ungenutzten Kapazität und der erreichten Servicelevels der zweiten und der dritten Fallstudie dargestellt.

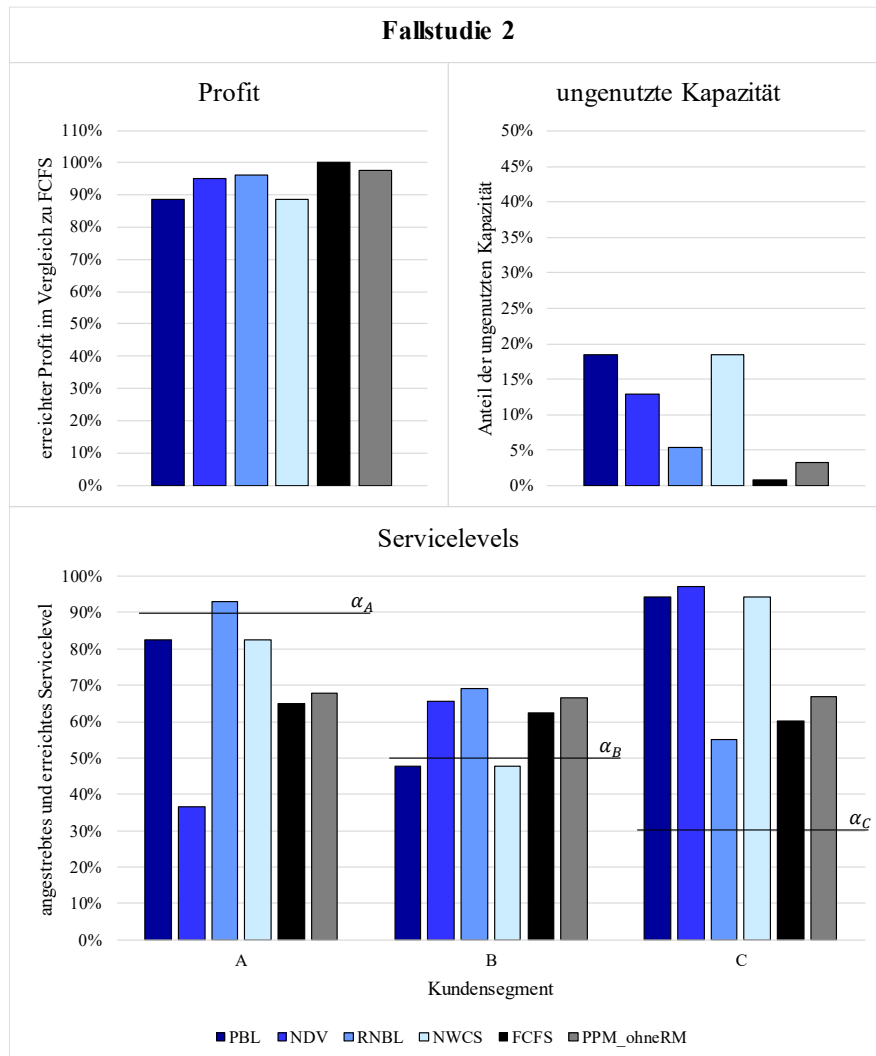


Abbildung 7.7: Durchschnittliche Ergebnisse der Fallstudie 2

Auch bei den Fallstudien 2 und 3 führt die Vergleichsstrategie FCFS jeweils zu dem besten Profitergebnis. Bei Fallstudie 2 wird mit einem durchschnittlichen Profitergebnis von 97,75% im Vergleich zu dem mit der FCFS Strategie erzielten Ergebnis das zweitbeste Ergebnis mit der Benchmark-Strategie PPM_ohneRM erreicht. Im Gegensatz zu der ersten Fallstudie wird bei der zweiten Fallstudie mit der Strategie RNBL mit 96,13% das beste Profitergebnis der mengenorientierten Ansätze erzielt. Mit der NDV Strategie wird aufgrund einer niedrigeren Kapazitätsauslastung ein leicht geringeres Profitergebnis mit 95,19% erzielt. Die niedrigere Kapazitätsauslastung der NDV Strategie ist darauf zurückzuführen, dass laut den einfachen Buchungslimits x_{qC} etwa 50% der Kapazität für Aufträge aus dem Kundensegment C reserviert sind und diese bei der NDV Strategie nicht für Aufträge aus anderen Kundensegmenten zugänglich ist (s. Tabelle 7.3). Wie bereits bei der Ergebnispräsentation der einfachen Buchungslimits x_{qk} erwähnt wurde, wäre damit für die C-Kunden in der zweiten Fallstudie eine nahezu vollständige Annahme der Aufträge von C-Kunden möglich. Falls Aufträge von C-Kunden

jedoch auf Basis von planungstechnischen Gründen abgelehnt werden, führt dies schnell zu ungenutzter Kapazität, welche mit der Schachtelung der NDV Strategie nicht ausgeglichen werden kann. Hingegen können bei der RNBL Strategie aufgrund der umgekehrten Schachtelung Aufträge von A- und B-Kunden auf die hohen Buchungslimits x_{qC} der C-Kunden zugreifen. Somit kann mit der RNBL Strategie in dieser Fallstudie eine höhere Kapazitätsauslastung und demnach auch ein höheres Profitergebnis als mit der NDV Strategie erreicht werden.

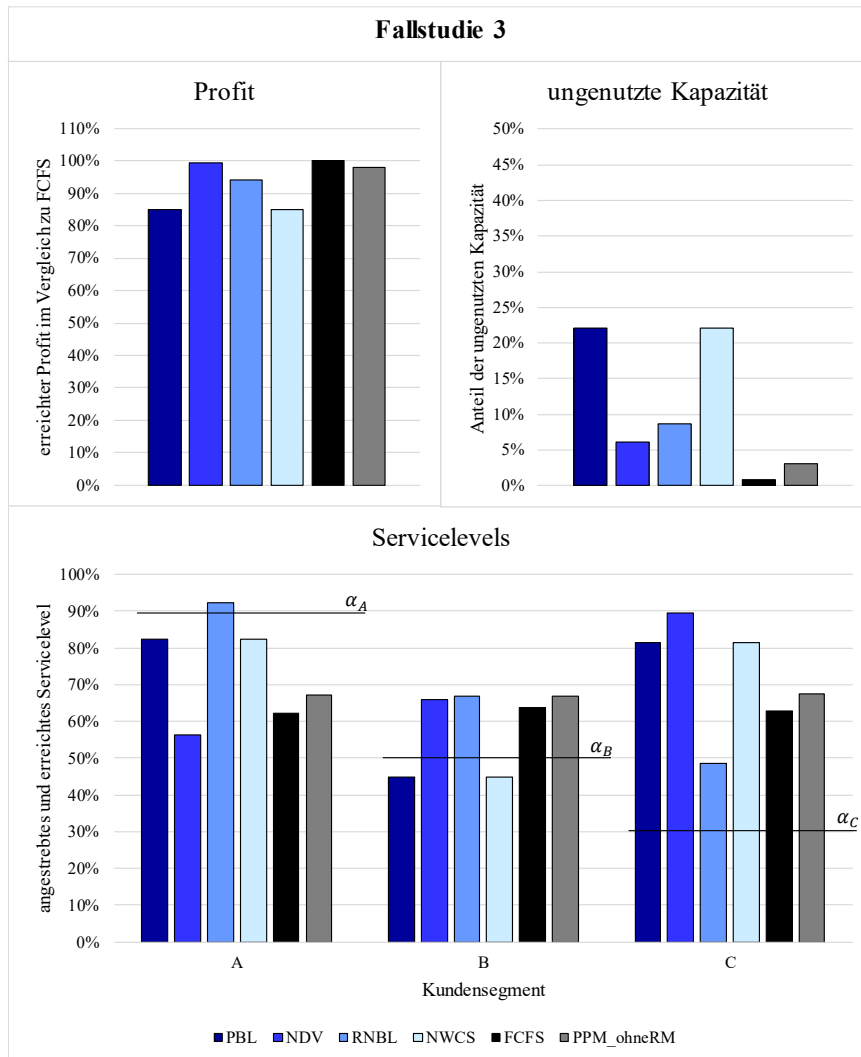


Abbildung 7.8: Durchschnittliche Ergebnisse der Fallstudie 3

Bei der dritten Fallstudie wird, wie auch bei der ersten Fallstudie, das beste Profitergebnis der mengenorientierten Ansätze mit der NDV Strategie erreicht. Dieses unterschreitet das Ergebnis der FCFS Strategie mit 99,56% sogar nur geringfügig. Über alle Fallstudien hinweg können mit den Strategien NDV und RNBL zu der FCFS Strategie vergleichbare Profitergebnisse erzielt werden, welche um maximal 7,93% abweichen. Die mit der Benchmark-Strategie PPM_ohneRM erzielten Profitergebnisse weichen sogar nur um maximal 3,28% von dem Profitergebnis der FCFS Strategie ab. Mit den Strategien PBL und NWCS werden auch bei den Fallstudien 2 und 3 identische Profitergebnisse erreicht. Erneut fallen

diese Ergebnisse im Vergleich zu den Ergebnissen der anderen Strategien schlechter aus. Als Begründung dafür kann wieder eine geringere Kapazitätsauslastung aufgeführt werden, welche durch die geringe bzw. nicht vorhandene Flexibilität bei der Nutzung der Buchungslimits zustande kommt.

Hinsichtlich des zweiten Ziels, der Erreichung der angestrebten Servicelevels α_k , sind bei allen Fallstudien ähnliche Ergebnisse zu erkennen. Mit den Vergleichsstrategien FCFS und PPM_ohneRM werden weiterhin für alle Kundensegmente nahezu identische Servicelevels erreicht. Dabei führt die Strategie PPM_ohneRM jedes Mal zu leicht besseren Ergebnissen als die FCFS Strategie. Es ist keine Bevorzugung eines bestimmten Kundensegments vorhanden. Mit der NDV Strategie wird bei allen Fallstudien das schlechteste Servicelevel für A-Kunden und das beste Servicelevel für C-Kunden erreicht. Dies ist auf die Schachtelungshierarchie, bei welcher die A-Kunden an unterster Stelle und die C-Kunden an oberster Stelle stehen, zurückzuführen. Mit den Strategien NWCS und PBL können erneut die Servicelevels α_A und α_B nicht erreicht werden. Zwischen diesen beiden Kundensegmenten ist jedoch jeweils eine deutliche Bevorzugung der A-Kunden zu erkennen. Bei allen Fallstudien wird mit jeder Strategie das angestrebte Servicelevel α_C der C-Kunden erreicht, bzw. teilweise sogar bei weitem überschritten. Dies ist dadurch zu begründen, dass mit Aufträgen der C-Kunden kurzfristig am meisten Profit erwirtschaftet werden kann und es folglich im Sinne der (kurzfristigen) Profitmaximierung ist, viele Aufträge von C-Kunden anzunehmen. Die einzige Strategie, mit welcher bei jeder Fallstudie die angestrebten Servicelevels α_k für alle Kundensegmente erreicht werden können, ist die RNBL Strategie. Dabei ist hervorzuheben, dass, trotz der Bevorzugung der A-Kunden, die mit der RNBL Strategie erreichten Profitergebnisse die Ergebnisse der Vergleichsstrategie FCFS lediglich um maximal 7,93% (Fallstudie 1: 7,93%, Fallstudie 2: 3,87%, Fallstudie 3: 5,72%) unterschreiten. In der zweiten Fallstudie wird mit dieser Strategie sogar im Vergleich zu den anderen mengenorientierten Ansätzen das beste Profitergebnis erreicht.

Um die Effektivität der RM-Hürde auch bei der zweiten und dritten Fallstudie aufzuzeigen, werden in den Abbildungen 7.9 und 7.10 die Ablehnungen aufgeschlüsselt dargestellt. Wie bei der ersten Fallstudie ist auch hier wieder deutlich zu erkennen, dass bei den mengenorientierten Ansätzen fast alle Ablehnungen auf die Buchungslimits zurückzuführen sind. Im Gegensatz zu der ersten Fallstudie sind bei den anderen beiden Fallstudien die Anzahlen der Ablehnungen über das Produktionsplanungsmodell über alle Strategien hinweg vergleichbar. In der ersten Fallstudie werden vergleichsweise bei der NDV Strategie mit durchschnittlich 3,31 Aufträgen relativ viele Ablehnungen über die zweite Hürde im Auftragsannahmeprozess verursacht. Dadurch, dass bei den Fallstudien 2 und 3 weniger Aufträge von A-Kunden stammen, fallen auch die einfachen Buchungslimits x_{qA} für Aufträge von A-Kunden geringer aus (s. Tabelle 7.3). Demzufolge ist es bei den Fallstudien 2 und 3 im Gegensatz zu der Ausgangsfallstudie nicht der Fall, dass bei der NDV Strategie für alle Produkte qk relativ hohe Kontingente zur Verfügung stehen, da bei dieser Strategie nur die für A-Kunden reservierte Kapazität für alle Kundensegmente k verfügbar ist. Durch diese differenzierteren Buchungslimits werden mit der NDV Strategie

in der zweiten und dritten Fallstudie im Vergleich zur Ausgangsfallstudie mehr Aufträge auf Basis der ersten Hürde und demnach weniger Aufträge auf Basis der zweiten Hürde abgelehnt. Aufgrund dessen ist bei der NDV Strategie vergleichsweise zur ersten Fallstudie in der zweiten und dritten Fallstudie eine größere Effektivität der ersten Hürde zu beobachten. Bei den anderen mengenorientierten Ansätzen ist die Effektivität der RM-Hürde und folglich der Buchungslimits über alle Fallstudien hinweg gleichermaßen zu beobachten.

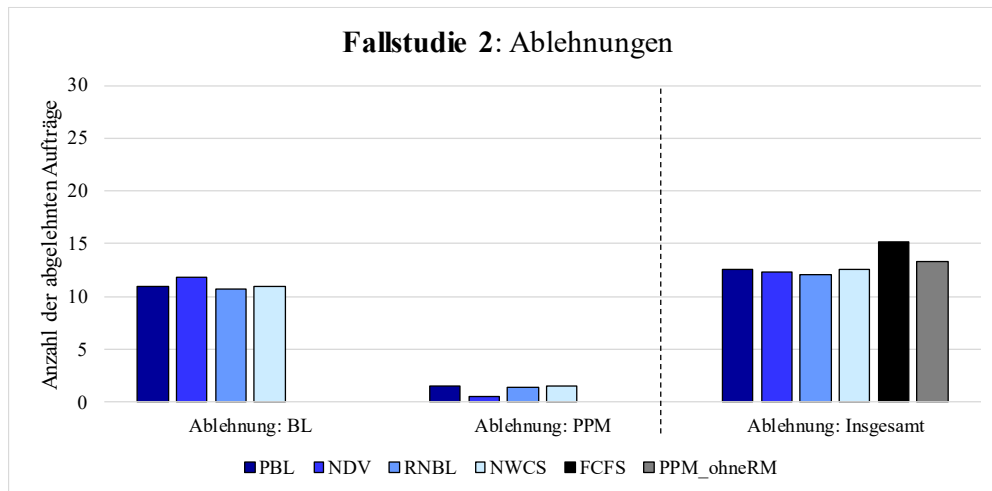


Abbildung 7.9: Anzahl der abgelehnten Aufträge durch Buchungslimits (BL), das Produktionsplanungsmodell (PPM) und insgesamt der Fallstudie 2

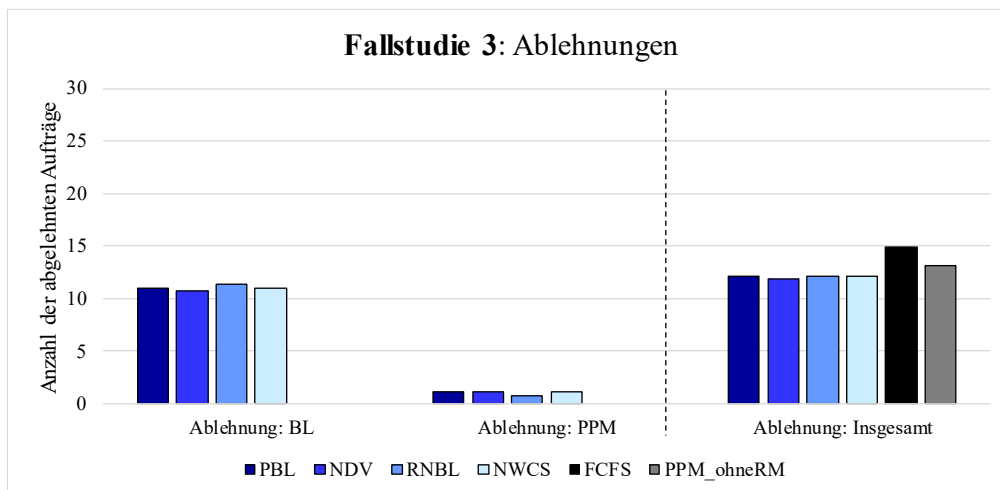


Abbildung 7.10: Anzahl der abgelehnten Aufträge durch Buchungslimits (BL), das Produktionsplanungsmodell (PPM) und insgesamt der Fallstudie 3

Wie auch in der ersten Fallstudie werden mit den Vergleichsstrategien FCFS und PPM_ohneRM insgesamt am meisten Aufträge abgelehnt. Dadurch, dass mit der FCFS Strategie etwas mehr Aufträge als mit der Strategie PPM_ohneRM abgelehnt werden, sind auch die leicht schlechteren erreichten Servicelevels der FCFS Strategie zu erklären. Trotz der höheren Gesamtanzahl an Ablehnungen bleibt bei Verwendung der Vergleichsstrategien weiterhin am wenigsten Kapazität ungenutzt. Wie auch bei der ersten

Fallstudie liegt dies daran, dass mit den Vergleichsstrategien tendenziell mehr mittlere und lange Aufträge angenommen werden. Durch die Buchungslimitstrategien werden vermehrt kurze Aufträge angenommen, was im Sinne der Profitmaximierung ist. Die Abbildungen 7.11 und 7.12, in welchen die Anzahl der angenommenen Aufträge aufgeschlüsselt nach Auftragsgruppe q und Kundensegment k für die Fallstudien 2 und 3 aufgeführt werden, bestätigen dies.

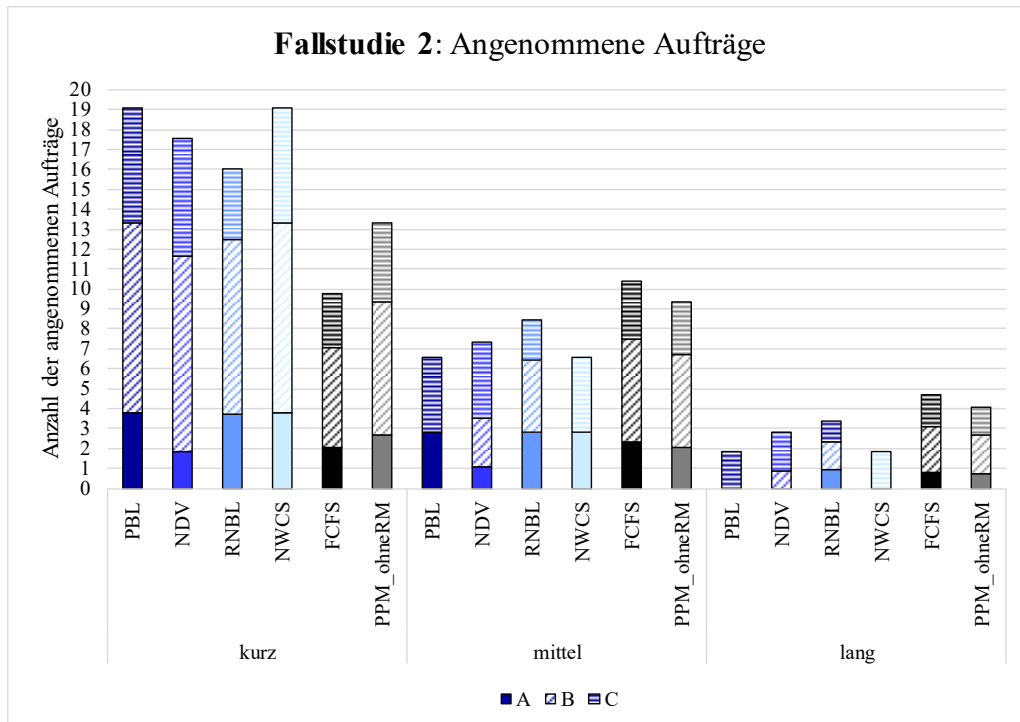


Abbildung 7.11: Aufgeschlüsselte Darstellung der angenommenen Aufträge der Fallstudie 2

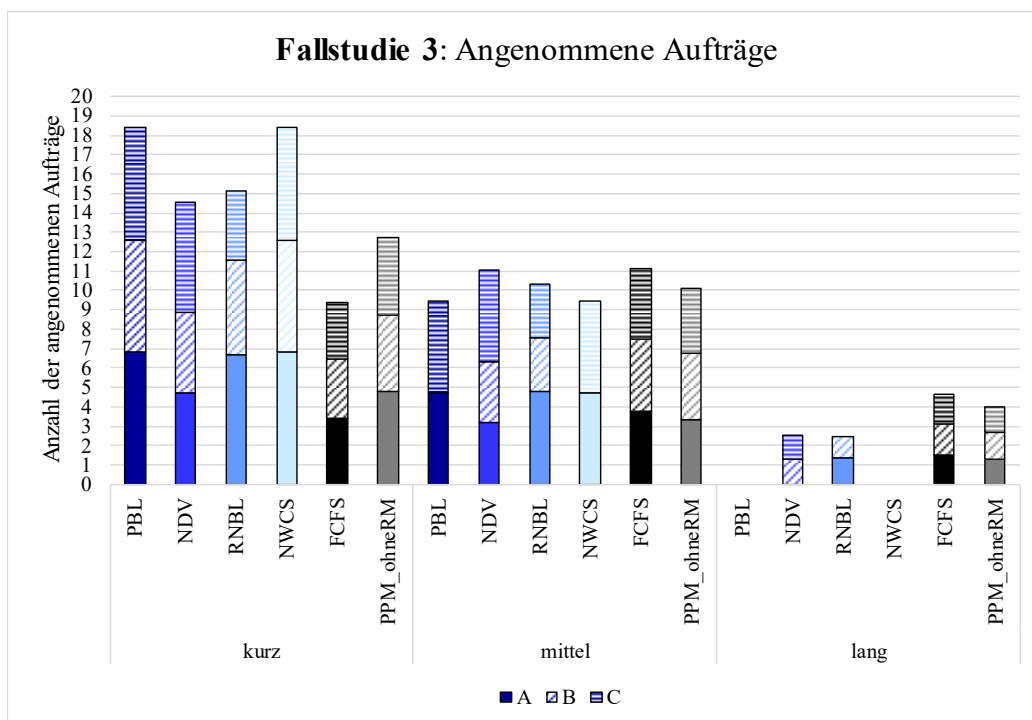


Abbildung 7.12: Aufgeschlüsselte Darstellung der angenommenen Aufträge der Fallstudie 3

Die zuvor vorgestellten durchschnittlichen Ergebnisse der Fallstudien 2 und 3 sind, wie die Ergebnisse der Fallstudie 1, robust gegenüber einer zufälligen Auftragsreihenfolge und -dichte. Dies zeigen die Abbildungen 7.13 und 7.14 anhand der Profitergebnisse im Vergleich zu den Ergebnissen der FCFS Strategie. Die Mittelwerte stabilisieren sich sehr schnell. Bei den Variationskoeffizienten sind zum Teil noch leichte Schwankungen zu erkennen, welche sich jedoch am Ende innerhalb eines Bereichs von weniger als einem Prozent bewegen. Die Schwankungen sind in der Regel durch „extreme“ Datensätze zu erklären. So treffen zum Beispiel in der zweiten Fallstudie bei Datensatz 374 innerhalb der letzten fünf Tage 16 von 40 Aufträgen ein. Dies führt zu einer geringeren Kapazitätsauslastung und folglich zu einem niedrigeren Profitergebnis, weshalb auch der leicht erhöhte Variationskoeffizient ab 374 berücksichtigten Datensätzen zu erklären ist. Allerdings haben selbst solche „extremen“ Datensätze keinen nennenswerten Einfluss auf die Mittelwerte. Demzufolge führt auch bei den Fallstudien 2 und 3 die Verwendung von 500 Datensätzen zu robusten Ergebnissen hinsichtlich einer zufälligen Auftragsreihenfolge und -dichte. Ähnliches ist bei den Veränderungen der erreichten Servicelevels zu beobachten. Die dazugehörigen Abbildungen für die Fallstudien 2 und 3 sind den Anhängen C.2 und C.3 zu entnehmen.

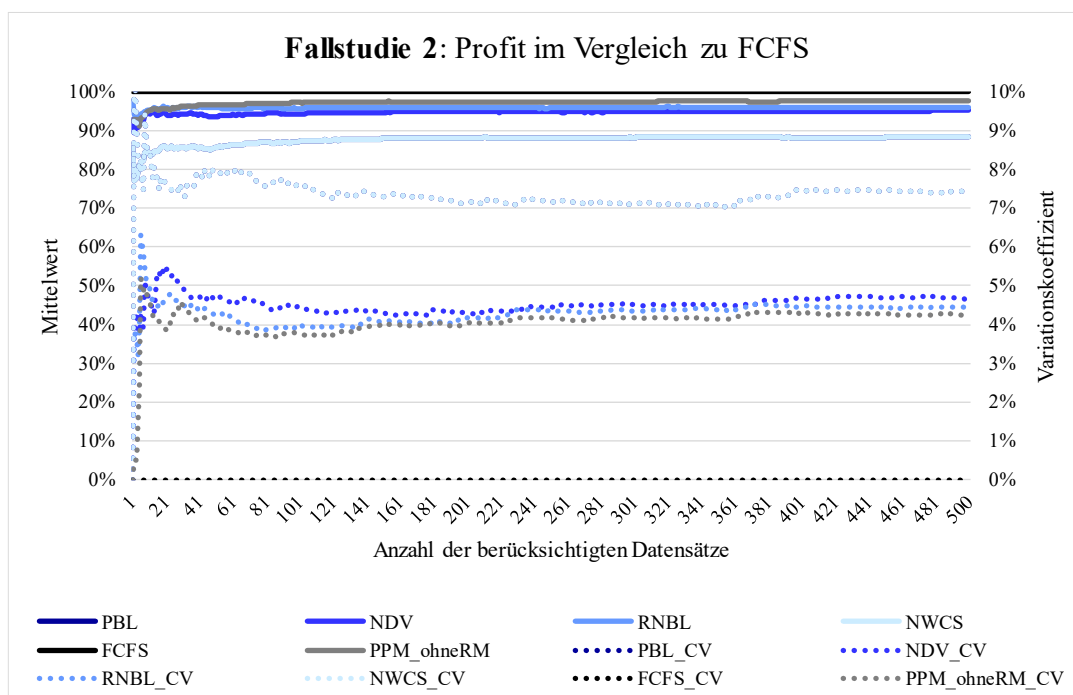


Abbildung 7.13: Robustheitsanalyse der Profitergebnisse der Fallstudie 2

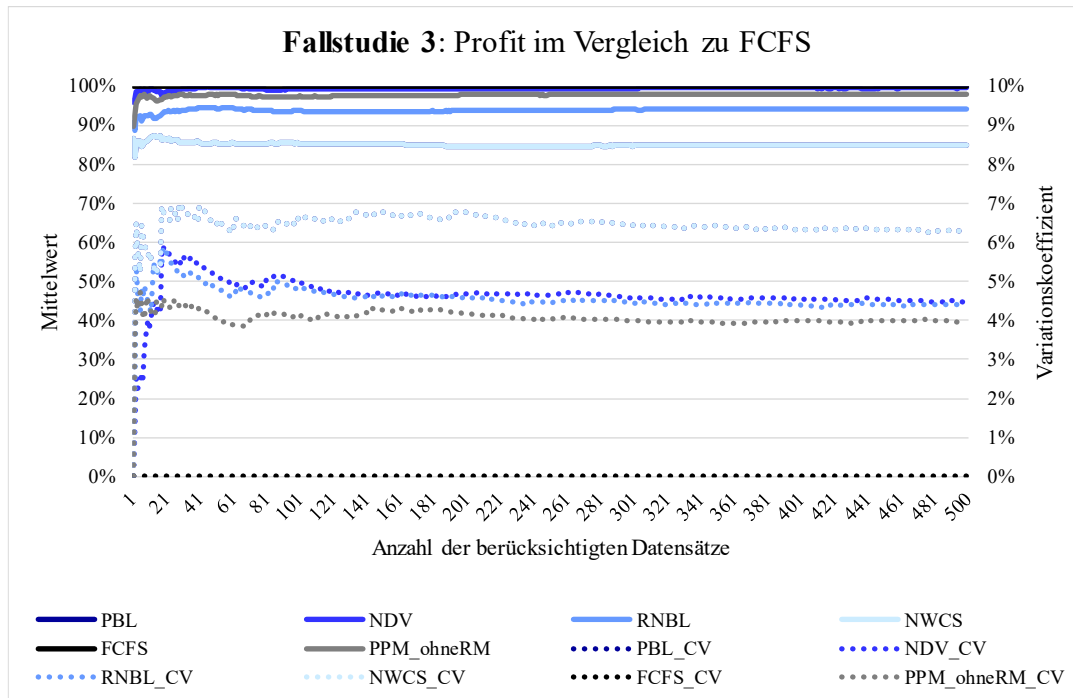


Abbildung 7.14: Robustheitsanalyse der Profitergebnisse der Fallstudie 3

Um einen Überblick über die planungstechnischen Daten zu geben, werden in Abbildung 7.15 die durchschnittlichen Summen der verfrühten und verspäteten Zeiteinheiten sowie der Rüstzeiten für alle Fallstudien in Arbeitstagen aufgezeigt. Aus den niedrigen Summen der verfrühten Zeiteinheiten ist zu schlussfolgern, dass es über alle Strategien und Fallstudien hinweg nur sehr selten zu einem verfrühten Produktionsbeginn kommt. Die Summe der Verspätungen fällt hingegen deutlich höher aus. Wie jedoch schon mit dem Datensatz 228 der ersten Fallstudie beispielhaft verdeutlicht wurde, kann sich eine hohe Summe an verspäteten Zeiteinheiten auch aus wenigen, sehr hohen Verspätungen einzelner Aufträge zusammensetzen. Generell lässt dies die Schlussfolgerung zu, dass die gewählten Daten des Strafkostensatzes PT_k , welche pro verspätete Zeiteinheit anfallen, zu niedrig angesetzt wurden, um derart hohe Verspätungen zu vermeiden. Der Strafkostensatz PT_k wird aus diesem Grund im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse (s. Kapitel 9.2.3) schrittweise vergrößert, um zu untersuchen, wie hoch dieser anzusetzen ist, sodass die Summe der verspäteten Zeiteinheiten geringer ausfällt.

Bei den Rüstzeiten ist über alle Fallstudien und Strategien hinweg kein nennenswerter Unterschied zu beobachten. Wie bereits bei der ersten Fallstudie erläutert, ist dies dadurch zu erklären, dass die Rüstzeiten generell sehr ähnlich und zwischen Aufträgen derselben Auftragsgruppe q sogar identisch sind. Weil mit allen Strategien hauptsächlich kurze Aufträge angenommen werden, sind unabhängig von der Produktionsreihenfolge nahezu identische Rüstzeiten zu erwarten. Folglich ist an dieser Stelle ein geringes Optimierungspotenzial gegeben, was im Endeffekt über alle Fallstudien und Strategien hinweg zu vergleichbaren Rüstzeiten führt.

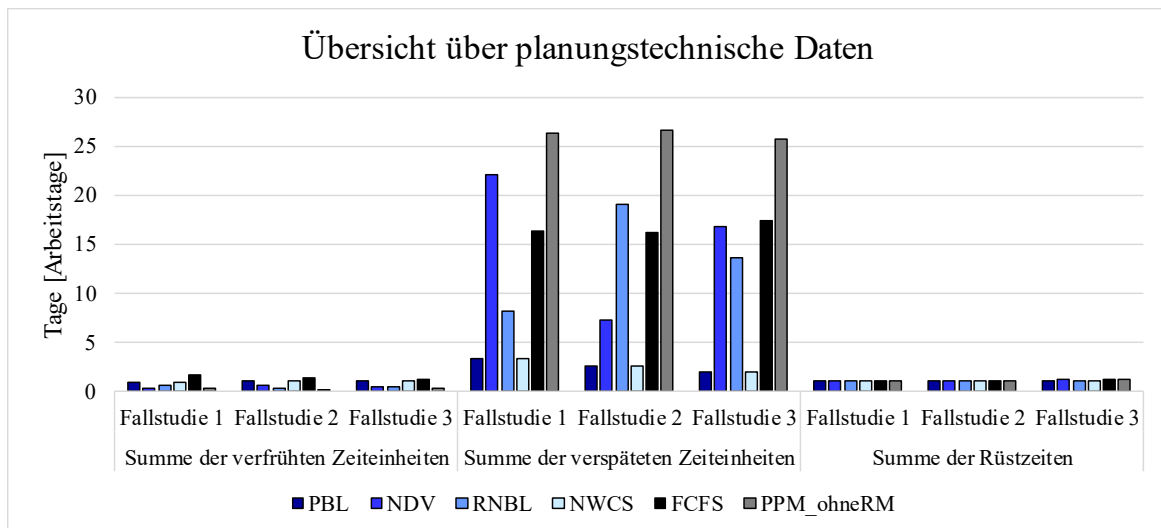


Abbildung 7.15: Übersicht über planungstechnische Daten der Fallstudien 1, 2 und 3

Ein weiterer interessanter Aspekt ist die durchschnittliche Rechenzeit pro Datensatz, welche für den vollständigen Auftragsannahmeprozess benötigt wird. Aufgrund der Einfachheit der FCFS Strategie ist die dafür benötigte Rechenzeit zu vernachlässigen. Die mit den mengenorientierten Ansätzen und der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM benötigte durchschnittliche Rechenzeit pro Datensatz ist in Abbildung 7.16 in Sekunden aufgeführt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Berechnungen mit der Benchmark-Strategie PPM_ohneRM mit Abstand am längsten brauchen. Bei der Fallstudie 1 ist darüber hinaus die vergleichsweise höhere Rechenzeit der NDV Strategie auffällig. Wie bereits zuvor erläutert, werden bei der ersten Fallstudie unter Verwendung der NDV Strategie aufgrund der über alle Produkte qk hinweg recht hohen geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} viele Auftragsannahmeentscheidungen über das Produktionsplanungsmodell getroffen. Dieses Optimierungsmodell ist wiederum mit höheren Rechenzeiten verbunden, wie es die benötigte Rechenzeit der Strategie PPM_ohneRM zeigt.

Bei den Rechenzeiten ist zu bedenken, dass bei Anwendung der verschiedenen Strategien in der Praxis keine Simulation durchlaufen werden würde, sondern der Prozess auftragsweise durchgeführt werden würde. Die in Abbildung 7.16 dargestellten Rechenzeiten beziehen sich auf die benötigte Rechenzeit für den vollständigen Auftragsannahmeprozess und folglich für alle 40 eintreffenden Aufträge. Für jeden einzelnen Auftrag ist die Rechenzeit demnach deutlich kürzer. Im Rahmen der durchgeführten Simulationen über 500 Datensätze fallen die unterschiedlich benötigten Rechenzeiten jedoch deutlicher ins Gewicht. Beispielsweise benötigt die Durchführung der Strategie PPM_ohneRM der vollständigen dritten Fallstudie in Summe 34,73 Stunden, wohingegen die Durchführung der vollständigen dritten Fallstudie bei Verwendung der Strategie PBL innerhalb von 33 Minuten abgeschlossen ist.

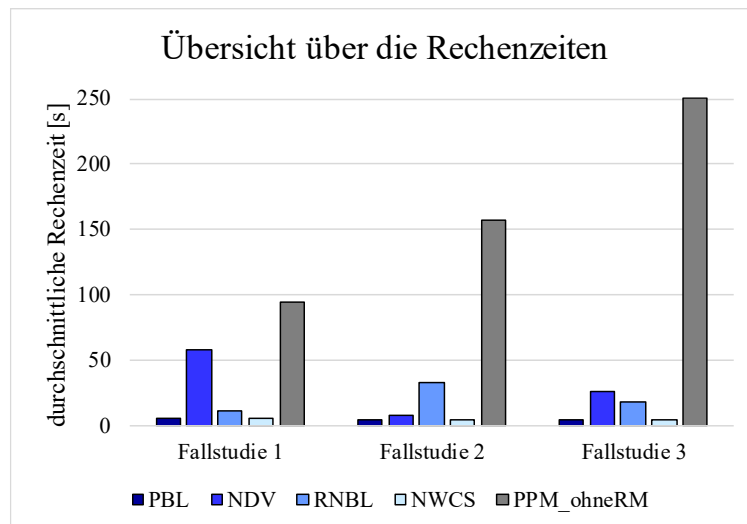


Abbildung 7.16: Durchschnittliche benötigte Rechenzeit für den Auftragsannahmeprozess pro Datensatz

Zusammenfassung

Alles in allem konnte über alle Fallstudien hinweg beobachtet werden, dass mit der Vergleichsstrategie FCFS aufgrund der nahezu vollständigen Kapazitätsauslastung das höchste Profitergebnis erzielt wird. Allerdings wird auch über alle Fallstudien hinweg mit der Strategie FCFS ein ähnliches Servicelevel für alle Kundensegmente erreicht. Folglich ist keine Bevorzugung der wichtigen A-Kunden vorhanden, sodass das angestrebte Servicelevel α_A bei weitem unterschritten wird. Gleiches gilt für die erreichten Servicelevels der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM. Anhand dieser Ergebnisse und dadurch, dass mit den mengenorientierten Ansätzen die meisten Ablehnungen auf die Buchungslimits zurückzuführen sind, kann eine hohe Effektivität der RM-Hürde geschlussfolgert werden.

Bei den mengenorientierten Ansätzen ist festzuhalten, dass die Strategien PBL und NWCS zu denselben Ergebnissen führen. Dadurch, dass bei der Strategie NWCS lediglich innerhalb des Kundensegments k und nicht segmentübergreifend geschachtelt wird, kann mit der Nutzung dieser geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} keine größere Flexibilität gegenüber der unmittelbaren Verwendung der einfachen Buchungslimits x_{qk} (PBL Strategie) erreicht werden. Die eingeschränkte Flexibilität der Strategien PBL und NWCS führt über alle Fallstudien hinweg jeweils zu der geringsten Kapazitätsauslastung, weshalb auch die Profitergebnisse mit diesen Strategien am niedrigsten ausfallen. Mit der Strategie NDV kann durchschnittlich über alle Fallstudien betrachtet mit 97,63% das beste Profitergebnis der mengenorientierten Ansätze erzielt werden (Fallstudie 1: 98,14%, Fallstudie 2: 95,19%, Fallstudie 3: 99,56%, \emptyset : 97,63%). Jedoch kann auch mit der RNBL Strategie mit durchschnittlich 94,16% ein sehr gutes Profitergebnis erlangt werden (Fallstudie 1: 92,07%, Fallstudie 2: 96,13%, Fallstudie 3: 94,28%, \emptyset : 94,16%). Die erreichten Servicelevels fallen bei den zuletzt genannten Strategien aufgrund ihrer gegensätzlichen Schachtelung sehr unterschiedlich aus. Dadurch, dass die A-Kunden bei der NDV Strategie in der Hierarchie an unterster Stelle stehen, fallen über alle Fallstudien hinweg die erreichten Servicelevels der A-Kunden am niedrigsten aus. Aufgrund dessen wird das angestrebte Servicelevel α_A

von 90% bei weitem unterschritten. Die RNBL Strategie ist die einzige, mit welcher über alle Fallstudien hinweg alle angestrebten Servicelevels α_k erreicht werden. Folglich führt diese Strategie zu einem sehr guten Kompromiss zwischen der Maximierung des Profits und der Erreichung der angestrebten Servicelevels α_k .

7.4 Standard Nesting vs. Theft Nesting

In den zuvor vorgestellten Ergebnissen wurde zur Anpassung der geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} das Standard Nesting verwendet. Neben dem Standard Nesting existiert die Möglichkeit, die geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} entsprechend dem sogenannten Theft Nesting anzupassen. Das Theft Nesting wurde im Rahmen des Kapitels 3.3.2 bereits erläutert. Klein und Steinhardt (2008, S. 134 f.) empfehlen die Verwendung des Theft Nestings, wenn die Nachfrage in aufsteigender Wertigkeit eintrifft. Bei einer willkürlichen bzw. unbekanntenen Reihenfolge der Aufträge und der damit verbundenen Wertigkeit wird das Standard Nesting empfohlen. Auch Gallego und Topaloglu (2019, S. 33) sowie Phillips (2021, S. 189) weisen darauf hin, dass in der Praxis das Standard Nesting häufig zu größeren Erfolgen führt, weil nicht immer davon ausgegangen werden kann, dass die höherwertige Nachfrage nach der niederwertigen Nachfrage eintrifft.

Bei der in dieser Arbeit betrachteten Problemstellung ist die Auftragsreihenfolge willkürlich. Darüber hinaus kann keine eindeutige Reihenfolge der Wertigkeiten festgestellt werden. Diese ist je nach betrachtetem Ziel unterschiedlich und daher nicht allgemeingültig festzustellen. So sind beispielsweise die Hierarchien bei den Schachtelungen der NDV und RNBL Strategien bezüglich der Kundensegmente gegensätzlich, da bei der Strategie NDV die Nachfragewertigkeit und bei der Strategie RNBL der Kundenwert im Vordergrund steht. Um die zuvor genannte These aus der Literatur, dass bei willkürlicher Reihenfolge mit dem Standard Nesting bessere Ergebnisse erzielt werden können, zu untersuchen, wird nachfolgend ein Vergleich der Ergebnisse bei Verwendung des Standard Nestings und des Theft Nestings aufgeführt. Die Ergebnisse werden dabei auf die Buchungslimitstrategien NDV, RNBL und NWCS beschränkt, da das Standard Nesting und das Theft Nesting sich lediglich auf die Anpassung der geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} auswirken.

Wie bei den bereits zuvor vorgestellten Ergebnissen bilden auch die nachfolgenden Ergebnisse die Mittelwerte über die 500 Datensätze einer Fallstudie ab. Die Ergebnisse, welche bei Verwendung des Theft Nestings erzielt werden, sind für die Strategien NDV, RNBL und NWCS in den nachfolgenden Abbildungen jeweils in derselben Farbe, jedoch in schraffiert aufgeführt.

In Abbildung 7.17 sind die mit den verschiedenen Strategien erreichten Profitergebnisse dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass über alle Fallstudien und alle Strategien hinweg, die Verwendung des Theft Nestings jeweils zu einem schlechteren Ergebnis führt. Der Grund für die geringeren Ergebnisse kann

durch den erhöhten Anteil an ungenutzter Kapazität (s. Abbildung 7.18) begründet werden. Die zuvor ermittelte ungenutzte Kapazität ist bei der Verwendung des Theft Nesting deutlich verstärkt.

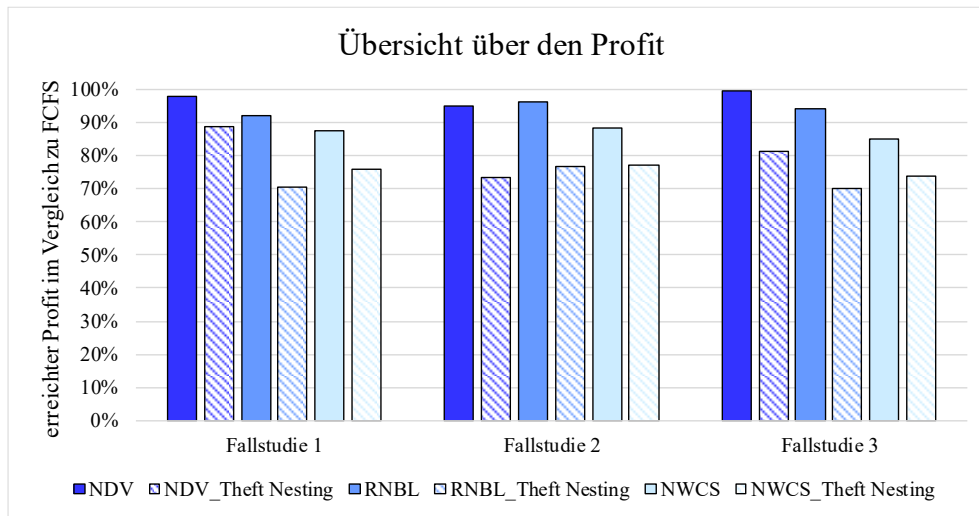


Abbildung 7.17: Übersicht über den Profit der Fallstudien 1, 2 und 3 bei Verwendung des Standard und Theft Nestings

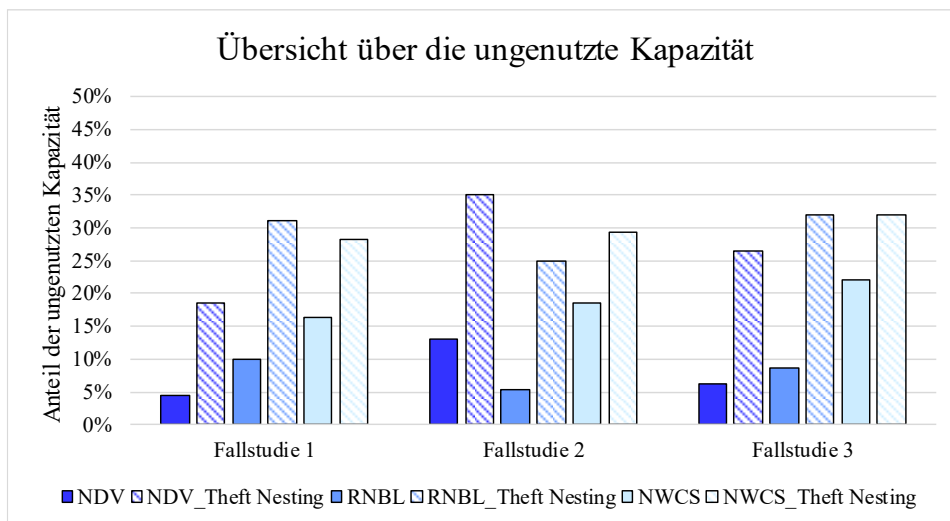


Abbildung 7.18: Übersicht über die ungenutzte Kapazität der Fallstudien 1, 2 und 3 bei Verwendung des Standard und Theft Nestings

Dass der hohe Anteil der ungenutzten Kapazität auf das Theft Nesting und somit auf die erste Hürde des Auftragsannahmeprozesses zurückzuführen ist, zeigen die aufgeschlüsselten Ergebnisse der Ablehnungen in Abbildung 7.19. Über alle Fallstudien hinweg ist deutlich zu beobachten, dass die Anzahl der aufgrund der Buchungslimits abgelehnten Aufträge bei Verwendung des Theft Nestings höher ausfällt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die für die verwendete Strategie höherwertigen Produkte zunächst die Kontingente der niederwertigen Produkte aufbrauchen, bevor die eigentlich den höherwertigen Produkten zustehenden Kontingente genutzt werden. In Kombination mit dem hohen Anteil an ungenutzter Kapazität lässt dies die Schlussfolgerung zu, dass die Buchungslimits nicht ausgeschöpft werden und ein Großteil der für die Strategie niederwertigen Nachfrage abgelehnt wird, sofern diese zeitlich gesehen später eintrifft.

Durch eine große Anzahl an Ablehnungen aufgrund der Buchungslimits kommt es bei Verwendung des Theft Nestings kaum noch zu Ablehnungen durch das Produktionsplanungsmodell. Da die Kapazität bei weitem nicht vollständig ausgelastet ist, ist es für fast alle Aufträge, die laut der ersten Hürde angenommen werden sollten, lohnenswert, diese endgültig anzunehmen und einzuplanen. So erfolgen bei Verwendung des Theft Nestings über alle Fallstudien und Strategien hinweg im Durchschnitt kaum Ablehnungen durch das Produktionsplanungsmodell.

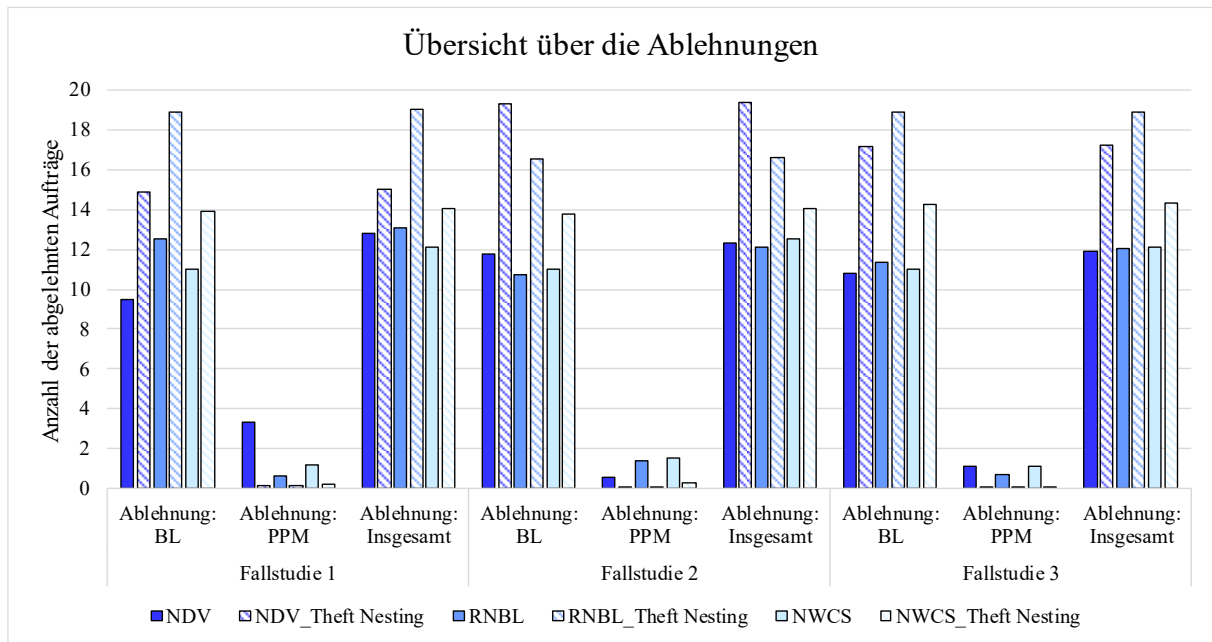


Abbildung 7.19: Übersicht über die Ablehnungen der Fallstudien 1, 2 und 3 bei Verwendung des Standard und Theft Nestings

Angesichts der hohen Anzahl an Ablehnungen ist zu erwarten, dass auch die Ergebnisse hinsichtlich der Servicelevels bei Verwendung des Theft Nestings meistens schlechter ausfallen. Die Erwartung wird durch die Ergebnisse aus Abbildung 7.20 bestätigt. Bei der NDV Strategie ist bei Verwendung des Theft Nestings eine Bevorzugung der C-Kunden über alle Fallstudien zu erkennen. Durch das Theft Nesting wird die Schachtelung verstärkt und somit werden noch mehr Aufträge der C-Kunden, welche in der Schachtelungshierarchie an oberster Stelle stehen, angenommen. Mit der RNBL Strategie ist dieser Effekt unter Verwendung des Theft Nestings bei den A-Kunden nicht über alle Fallstudien hinweg zu beobachten. Lediglich in der zweiten und dritten Fallstudie kann durch das Theft Nesting ein besseres Servicelevel für die Kunden aus dem Segment A erreicht werden. In der ersten Fallstudie wird das angestrebte Servicelevel α_A bei Verwendung des Theft Nestings mit einem durchschnittlich erreichten Servicelevel von 89,13% sogar minimal unterschritten.

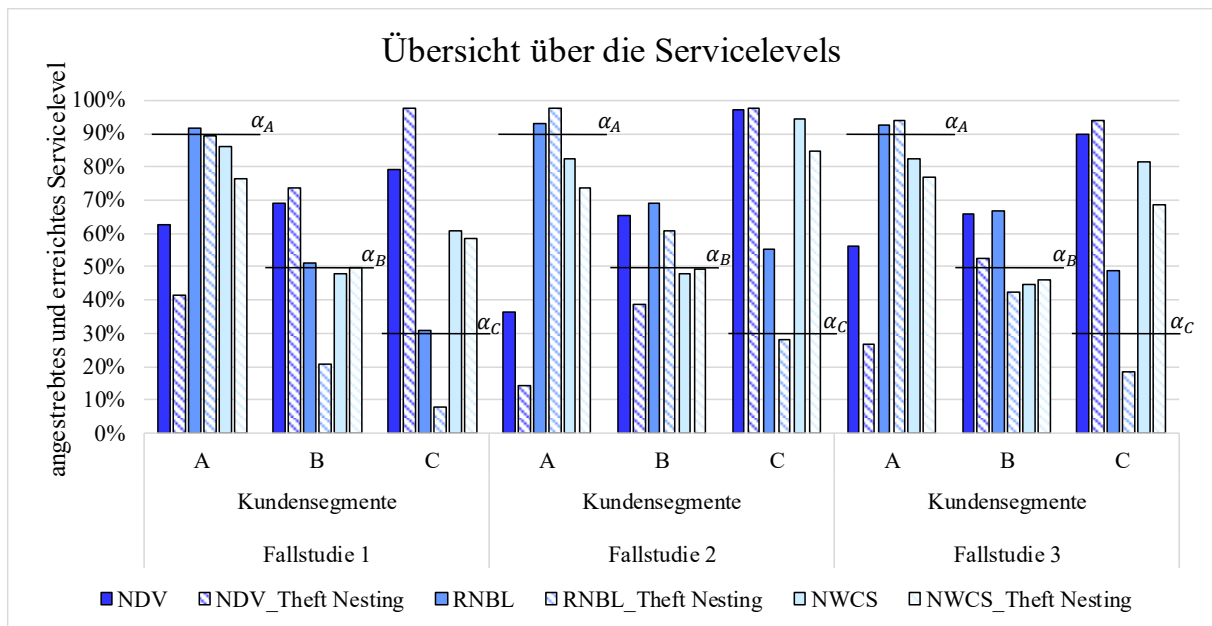


Abbildung 7.20: Übersicht über die Servicelevels der Fallstudien 1, 2 und 3 bei Verwendung des Standard und Theft Nestings

Alles in allem bestätigen die aufgeführten Ergebnisse, dass die Verwendung des Standard Nestings bei einer willkürlichen und unbekanntem Reihenfolge der Nachfrage und deren Wertigkeit zu besseren Profit- und Servicelevelergebnissen führt. Somit kann die in der Literatur ausgesprochene Empfehlung, das Standard Nesting zu verwenden, wenn die Nachfrage nicht (zwangsläufig) in aufsteigender Wertigkeit eintrifft, mit diesen Ergebnissen bestätigt werden.

Neben der mengenorientierten Steuerung ist auch eine erlösorientierte Steuerung für die Auftragsannahmeentscheidung möglich. Die erlösorientierten Ansätze werden im nachfolgenden Kapitel 8 erläutert. Anschließend erfolgt in Kapitel 9 ein Vergleich der Ergebnisse, welche mit den mengen- und den erlösorientierten Ansätzen erzielt werden.

8 Erlösorientierte Ansätze

In den erlösorientierten Ansätzen wird ein Bid-Preis als erste Hürde im Auftragsannahmeprozess verwendet. Wie dieser ermittelt wird, wird im Rahmen des Kapitels 8.1 erläutert. Anschließend wird in Kapitel 8.2 auf den konkreten Auftragsannahmeprozess eingegangen. Die Ergebnisse der Fallstudien, welche mithilfe der erlösorientierten Ansätze erzielt werden, werden in Kapitel 8.3 präsentiert und im Vergleich zu den mithilfe der Benchmark-Strategien (s. Kapitel 5.3) ermittelten Ergebnissen analysiert.

8.1 Ermittlung des Bid-Preises

Wie bereits in Kapitel 3.3.2 beschrieben, dient der Bid-Preis als Approximation der Opportunitätskosten und somit als Preisuntergrenze für die Auftragsannahmeentscheidung. Der Bid-Preis wird für jeden Auftrag individuell berechnet. Folglich wird das Kapazitätszuweisungsmodell (s. Kapitel 5.2.2), welches zur Ermittlung des Bid-Preises benötigt wird, in den erlösorientierten Ansätzen mehrfach – genauer gesagt einmal pro Auftrag – durchlaufen. Vor jedem Durchlauf ist eine Anpassung der Nachfrageprognose DF_{qk} und der zur Verfügung stehenden Kapazität CAP notwendig, um einen individuellen, an die Situation angepassten Bid-Preis zu berechnen. Zuerst wird der Betrachtungszeitraum auf den möglichen Bearbeitungszeitraum des eintreffenden Auftrags j begrenzt. Dieser beginnt mit dem verfrühten Freigabedatum \bar{R}_j des Auftrags j und endet mit der Deadline \bar{D}_j desselbigen Auftrags. In diesem Zeitraum steht die Kapazität $CAP1$ zur Verfügung. Es gilt die Gleichung (8.1).

$$CAP1 = \bar{D}_j - \bar{R}_j \quad (8.1)$$

Da sich die Nachfrageprognose DF_{qk} auf die zur Verfügung stehende Kapazität CAP des insgesamt betrachteten Planungshorizont bezieht, ist eine Umrechnung dieser im Verhältnis zu der Kapazität $CAP1$ notwendig. Die aktualisierte Nachfrageprognose $DF1_{qk}$ ergibt sich aus der Gleichung (8.2).

$$DF1_{qk} = \frac{CAP1}{CAP} \cdot DF_{qk} \quad (8.2)$$

Aufgrund von vorherigen Auftragsannahmen kann es sein, dass im Bearbeitungszeitraum nicht mehr die vollständige Kapazität $CAP1$, sondern nur ein Teil dieser – im Folgenden $CAP2$ genannt –, zur Verfügung steht. $CAP2$ spiegelt folglich die Kapazität $CAP1$ abzüglich der in diesem Zeitraum bereits eingeplanten Bearbeitungszeiten anderer Aufträge wider. Beispielhaft ist eine Kapazitätsanpassung für

einen Auftrag j in der Abbildung 8.1 dargestellt. Die Aufträge i , ii und iii entsprechen bereits in der Vergangenheit angenommenen und eingeplanten Aufträgen, wobei die Bearbeitungen dieser Aufträge zum Teil oder vollständig in dem möglichen Bearbeitungszeitraum des Auftrags j eingeplant sind.

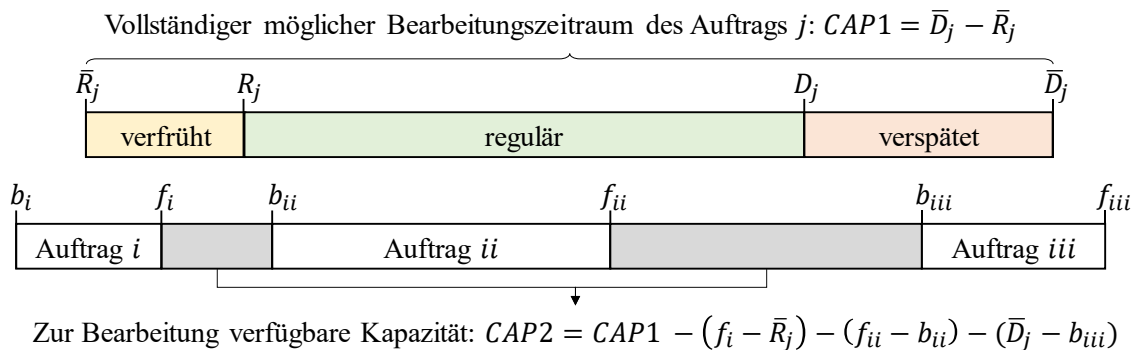


Abbildung 8.1: Beispielhafte Kapazitätsanpassung bezüglich des Auftrags j nach Lohnert und Fischer (2021)

Es ist möglich, dass diese Kapazitätsanpassung zu streng bzw. zu starr ist, da sich die Produktionsdaten der zuvor eingeplanten Aufträge innerhalb und/oder außerhalb des möglichen Bearbeitungszeitraums $CAP1$ von Auftrag j noch verschieben können. Verschiebungen können dazu führen, dass ein bereits angenommener Auftrag den Bearbeitungszeitraum $CAP1$ nicht mehr beeinflusst oder neu in diesen Zeitraum verschoben wird und somit diesen zusätzlich beschränkt. Es ist sehr komplex, alle mögliche Verschiebungen der Aufträge zu berücksichtigen, da diese Kettenreaktionen mit anderen zuvor eingeplanten Aufträgen verursachen können und nicht zwangsläufig zu einem besseren Ergebnis führen würden. Demnach wird diese strenge und starre Kapazitätsanpassung gewählt. Jedoch werden die anfallenden Rüstzeiten vernachlässigt, um die Anpassung nicht noch strenger und komplexer zu gestalten.

Mit der aktualisierten Nachfrageprognose $DF1_{qk}$ (anstelle von DF_{qk}) und der angepassten Kapazität $CAP2$ (anstelle von CAP) wird das Kapazitätszuweisungsmodell gelöst. Der Schattenpreis der Kapazitätsrestriktion (5.2) dient als Basis für die Ermittlung des Bid-Preises. Wie auch unter anderem in Hintsches et al. (2010) wird dieser Schattenpreis mit dem benötigten Kapazitätsbedarf und folglich mit der Bearbeitungszeit $Prod_j$ multipliziert, um diesen an die Daten des Auftrags j anzupassen.

Das Ergebnis der Berechnung wäre aktuell für alle Kundensegmente identisch, da diese alle gleichermaßen die Kapazität beanspruchen. Folglich gäbe es keine Bevorzugung von bestimmten Kunden und auch die Kundenwertigkeit wäre nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund werden in dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Bid-Preis-Ansätzen sogenannte kundenspezifische Multiplikatoren $multi_k$ eingeführt. Diesen Parametern werden Werte zwischen 0 und 1 zugewiesen. Dabei ist der Multiplikator von dem Kundensegment mit dem höchsten Kundenwert – in der vorliegenden Arbeit ist dies das Segment A – am niedrigsten und der Multiplikator von dem Kundensegment mit dem geringsten Kundenwert – in der vorliegenden Arbeit ist dies das Segment C – am höchsten zu wählen. Durch einen niedrigen kundenspezifischen Multiplikator $multi_k$ wird die Bid-Preis-Hürde gesenkt und folglich eine

positive Auftragsannahmeentscheidung in der ersten Hürde erleichtert. Der Bid-Preis für einen Auftrag j wird durch die Gleichung (8.3) ermittelt.

$$\text{Bid-Preis}_j = \text{Schattenpreis}_{\text{KapRestriktion}} \cdot \text{Prod}_j \cdot \sum_{k \in K} L_{kj} \cdot \text{multi}_k \quad (8.3)$$

Damit der zu dem Kundensegment des Auftrags j zugehörige Multiplikator multi_k verwendet wird, sind die kundenspezifischen Multiplikatoren multi_k mit den Zugehörigkeitsparametern L_{kj} zu multiplizieren. Da der Zugehörigkeitsparameter L_{kj} nur dann den Wert 1 (und ansonsten den Wert 0) besitzt, wenn der Auftrag j aus dem Kundensegment k stammt, kann somit gewährleistet werden, dass der für den Auftrag j richtige Multiplikator multi_k in die Berechnung des Bid-Preises einfließt.

In dieser Arbeit werden pro Fallstudie vier verschiedene Multiplikatorenansätze getestet und untersucht. Eine analytische Bestimmung der Werte von multi_k ist nicht möglich, jedoch ist davon auszugehen, dass die Datenwahl einen unmittelbaren Einfluss auf die Ergebnisse besitzt. Dies ist der Grund, weshalb vier verschiedene Multiplikatorenansätze, welche in Tabelle 8.1 aufgeführt sind, analysiert werden. Die Multiplikatorenansätze erfüllen die zuvor genannte Bedingung, dass die Werte zwischen 0 und 1 liegen und der Wert des Multiplikators mit ansteigendem Kundenwert geringer wird. Im Übrigen werden möglichst unterschiedliche Konstellationen gewählt. Der erste Multiplikatorenansatz zeichnet sich durch relativ große und ähnliche Werte aus. Für Aufträge von C-Kunden wird die Bid-Preis-Hürde mit diesem Multiplikatorenansatz nicht weiter gesenkt, da der kundenspezifische Multiplikator multi_C für C-Kunden den Wert 1 besitzt. Zu den Kundensegmenten B und A hin verringert sich der kundenspezifische Multiplikator multi_k jeweils um 0,2. Im zweiten Multiplikatorenansatz besitzen die Multiplikatoren multi_k relativ verschiedene Werte. Von dem Kundensegment C zu den Segmenten B und A halbieren sich die Multiplikatoren multi_k jeweils. Somit ist die Bid-Preis-Hürde für Aufträge von A-Kunden sehr reduziert, wohingegen es für Aufträge von C-Kunden nur zu einer kleineren Verringerung der Bid-Preis-Hürde kommt. In dem dritten Multiplikatorenansatz werden den Multiplikatoren multi_k relativ kleine und sehr ähnliche Werte zugewiesen. Folglich ist die Bid-Preis-Hürde für Aufträge aus allen Kundensegmenten deutlich reduziert. Bei dem vierten Multiplikatorenansatz besteht eine direkte Verbindung zwischen den kundenspezifischen Multiplikatoren multi_k und den angestrebten Servicelevels α_k . Die Werte dieses Multiplikatorenansatzes ergeben sich aus der Rechnung $1 - \alpha_k$ (mit α_k als Dezimalzahl). Hierdurch resultieren erneut relativ unterschiedliche Werte der kundenspezifischen Multiplikatoren multi_k . Durch diese verschiedenen Konstellationen ist es möglich, die Auswirkungen der Multiplikatorenwahl zu untersuchen.

Tabelle 8.1: Multiplikatorenansätze für die erlösorientierten Ansätze

		$multi_A$	$multi_B$	$multi_C$
Multiplikatorenansatz I	(M I)	0,6	0,8	1
Multiplikatorenansatz II	(M II)	0,2	0,4	0,8
Multiplikatorenansatz III	(M III)	0,2	0,3	0,4
Multiplikatorenansatz IV	(M IV)	0,1	0,5	0,7

8.2 Auftragsannahmeprozess

Vor dem Beginn des Auftragsannahmeprozesses ist die Wahl eines Multiplikatorenansatzes zu treffen. Anschließend wird, wie auch bei den mengenorientierten Ansätzen, der Auftragsannahmeprozess auftragsweise durchlaufen. Jedoch wird das Kapazitätszuweisungsmodell bei den erlösorientierten Ansätzen nicht einmalig zur Vorbereitung gelöst, sondern ebenfalls auftragsweise. Zuerst wird der eintreffende Auftrag j zu der zu Beginn des Auftragsannahmeprozesses noch leeren Menge J hinzugefügt. Im Anschluss daran erfolgt die Anpassung der Nachfrageprognose von DF_{qk} zu $DF1_{qk}$ und der Kapazität von CAP zu $CAP2$ in Bezug auf den eintreffenden Auftrag j , wie es im vorherigen Kapitel 8.1 beschrieben wurde. Daraufhin wird das angepasste Kapazitätszuweisungsmodell gelöst und der aktuelle Bid-Preis für den Auftrag j wird ermittelt (s. Formel (8.3)).

In der ersten Hürde des Auftragsannahmeprozesses wird überprüft, ob der Deckungsbeitrag CM_j des betrachteten Auftrags j mindestens dem Bid-Preis entspricht. Wenn dies nicht der Fall ist, wird der Auftrag j unmittelbar abgelehnt und zur Teilmenge A hinzugefügt. Bei vorläufiger Annahme des Auftrags j wird das aktualisierte Produktionsplanungsmodell gelöst und mithilfe der zweiten Hürde geprüft, ob der Auftrag j angenommen ($z_j = 1$) oder abgelehnt ($z_j = 0$) werden sollte. Damit die Auftragsannahmeentscheidung bei zukünftigen Durchläufen nicht revidiert werden kann, wird der Auftrag j bei Annahme zur Teilmenge H und bei Ablehnung zur Teilmenge A hinzugefügt. Anschließend erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie bei den mengenorientierten Ansätzen ggf. die Anpassung der Parameter B_i^1 und B_i^2 von den Aufträgen $i \in H$, damit sich sehr baldige Produktionsbeginne nicht mehr verschieben. Daraufhin wird überprüft, ob ein weiterer Auftrag vorhanden ist. Sofern dies der Fall ist, wird dieser zur Menge J hinzugefügt und als Auftrag j deklariert. Im Anschluss daran beginnt der Auftragsannahmeprozess mit der Anpassung der Nachfrageprognose und Kapazität von vorne. Ist kein weiterer Auftrag vorhanden, ist das Ende des Auftragsannahmeprozesses erreicht. Eine Übersicht über den Ablauf bietet Abbildung 8.2.

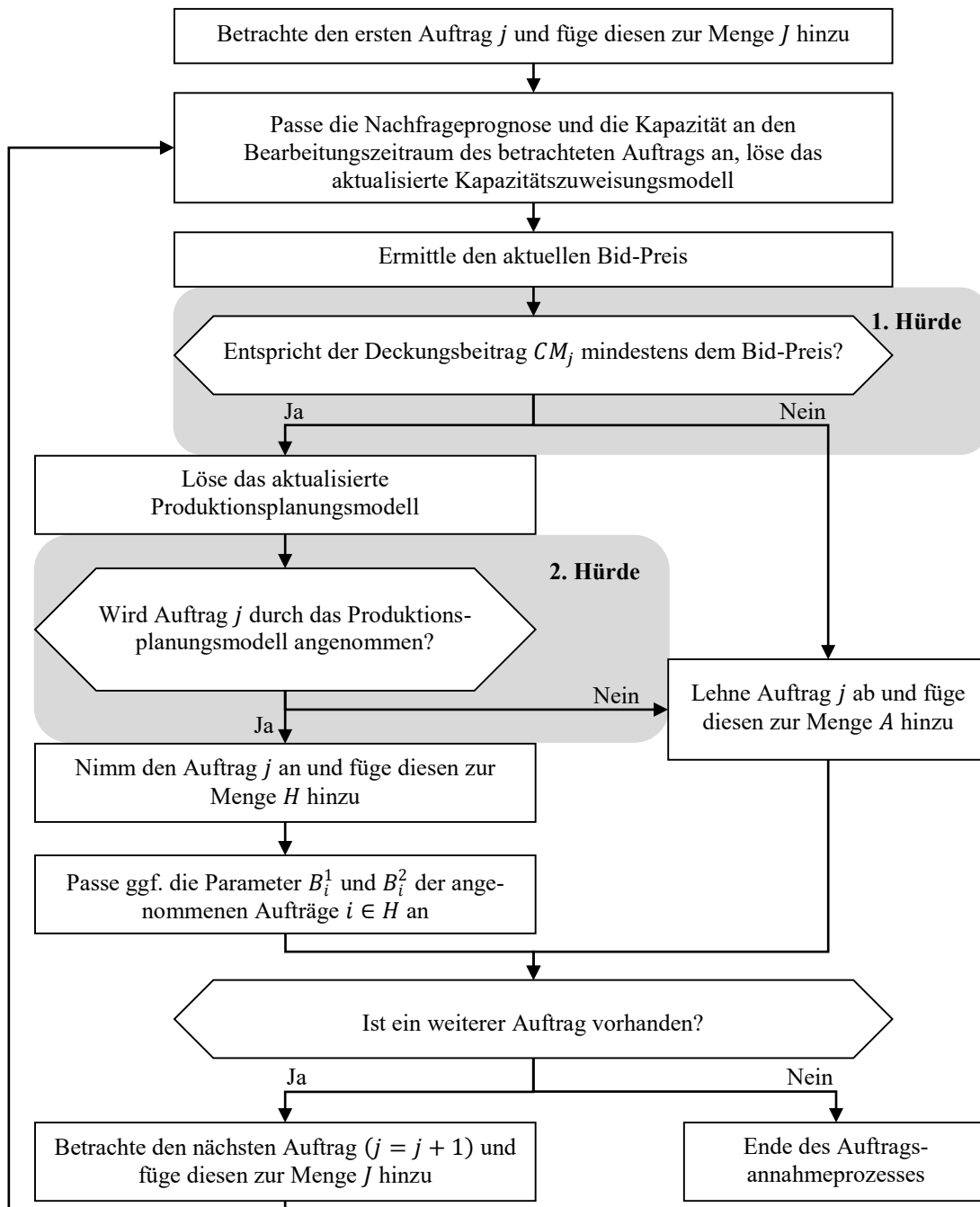


Abbildung 8.2: Detaillierter Auftragsannahmeprozess bei Verwendung von Bid-Preisen nach Lohnert und Fischer (2021)

8.3 Anwendung der erlösorientierten Ansätze auf die Fallstudien

Wie auch bei den mengenorientierten Ansätzen ist der vollständige Auftragsannahmeprozess der erlösorientierten Ansätze in Python 3.7.7 implementiert. Ebenfalls wird der Solver Gurobi in der Version 9.0.1 zum Lösen der Optimierungsmodelle verwendet. Die Berechnungen werden auf demselben Computer, wie in Kapitel 7.3 beschrieben, durchgeführt. Für die Übersichtlichkeit wird in Tabelle 8.2 erneut die Zusammensetzung der Fallstudien aufgeführt, bevor nachfolgend auf die über die 500 Datensätze gemittelten Ergebnisse eingegangen wird. Es handelt sich dabei um die identischen 500

Datensätze pro Fallstudie, auf welche auch die mengenorientierten Ansätze aus dem vorherigen Kapitel angewendet wurden.

Tabelle 8.2: Zusammensetzung der Fallstudien – Anteile der Aufträge je Kundensegment k

	A	B	C
Fallstudie 1	50%	30%	20%
Fallstudie 2	20%	50%	30%
Fallstudie 3	35%	32,5%	32,5%

Ergebnisse der Fallstudie 1 nach Durchführung des Auftragsannahmeprozesses

In Abbildung 8.3 sind die durchschnittlichen Ergebnisse bezüglich des Profits, der ungenutzten Kapazität und der erreichten Servicelevels der Ausgangsfallstudie (Fallstudie 1) dargestellt. Die Profitergebnisse sind sehr ähnlich, abgesehen von denen, die mit dem Multiplikatorenansatz M I erzielt werden. Mit der Vergleichsstrategie FCFS wird im Durchschnitt das beste Profitergebnis erreicht. Allerdings weicht das mit dem Multiplikatorenansatz M III erzielte Ergebnis mit 99,68% um weniger als 0,4% von dem mit der FCFS Strategie erreichten Profitergebnis ab. Unter Verwendung der Multiplikatorenansätze M II und M IV werden mit 96,58% und 95,09% minimal geringere Ergebnisse als mit der zweiten Vergleichsstrategie PPM_ohneRM mit 96,72% erreicht. Insgesamt führen die Multiplikatorenansätze M II, M III und M IV zu vergleichbaren Profitergebnissen, welche um weniger als 5% von dem mit der FCFS Strategie erreichten Profitergebnis abweichen.

Das Profitergebnis, welches mit dem Multiplikatorenansatz M I ermittelt wird, fällt im Vergleich zu den zuvor genannten Ergebnissen mit 68,83% deutlich geringer aus. Dies liegt an dem hohen Anteil der ungenutzten Kapazität von 34,95%. Die kundenspezifischen Multiplikatoren $multi_k$ des ersten Multiplikatorenansatzes sind im Vergleich zu den anderen Multiplikatorenansätzen für alle Kundensegmente $k \in K$ sehr hoch (s. Tabelle 8.1), wodurch es zu hohen Bid-Preisen kommt. Aufgrund dessen ist die erste Hürde im Auftragsannahmeprozess relativ hoch, was wiederum viele Ablehnungen und dementsprechend einen hohen Anteil an ungenutzter Kapazität zur Folge hat. Bei der späteren Betrachtung der aufgeschlüsselten Ergebnisse der Ablehnungen wird noch einmal deutlich werden, dass ein Großteil der Ablehnungen auf die erste Hürde im Auftragsannahmeprozess zurückzuführen ist.

Mit den anderen Multiplikatorenansätzen fällt der Anteil der ungenutzten Kapazität deutlich geringer aus. Mit dem Multiplikatorenansatz M III werden sogar 95,45% der zur Verfügung gestellten Kapazität genutzt. Weiterhin wird jedoch mit den Vergleichsstrategien die höchste Auslastung der Kapazität erreicht. Mit der FCFS Strategie bleibt weniger als 1% der Kapazität ungenutzt.

Die verschiedenen Multiplikatorenansätze führen auch zu unterschiedlichen Ergebnissen bezüglich der zweiten Zielsetzung, der Erreichung der angestrebten Servicelevels α_k . Wie zu erwarten, fallen die unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M I erreichten Ergebnisse erneut am schlechtesten aus. Bei einer

so geringen Kapazitätsauslastung werden nur wenige Aufträge angenommen und demnach werden mit 39,82% für A-Kunden, 28,68% für B-Kunden und 22,4% für C-Kunden sehr niedrige Servicelevels erreicht, welche die angestrebten Servicelevels α_k bei weitem unterschreiten. Für die A-Kunden kann das beste Servicelevel mit dem Multiplikatorenansatz M IV erzielt werden. Dies ist mit 88,39% nur minimal geringer als das angestrebte Servicelevel α_A von 90%. Mit einem Servicelevel von 82,82% führt der Multiplikatorenansatz M II zu dem zweitbesten Ergebnis für die A-Kunden, gefolgt von dem Multiplikatorenansatz M III, mit welchem ein Servicelevel von 74,36% für die A-Kunden erzielt wird. Insgesamt übersteigen somit die mit den Multiplikatorenansätzen M II, M III und M IV erreichten Servicelevels für die A-Kunden die mit den Vergleichsstrategien FCFS und PPM_ohneRM erzielten Servicelevels, die sich zwischen 60% und 70% bewegen. Darüber hinaus findet bei allen erlösorientierten Ansätzen die Berücksichtigung der Kundenwerte statt. Demzufolge ist jeweils das erreichte Servicelevel der A-Kunden am höchsten und das erreichte Servicelevel der C-Kunden am niedrigsten. Am stärksten ist die Bevorzugung der A-Kunden gegenüber den B- und C-Kunden bei dem vierten Multiplikatorenansatz zu beobachten, bei welchem die kundenspezifischen Multiplikatoren $multi_k$ und die angestrebten Servicelevels α_k direkt miteinander verknüpft sind.

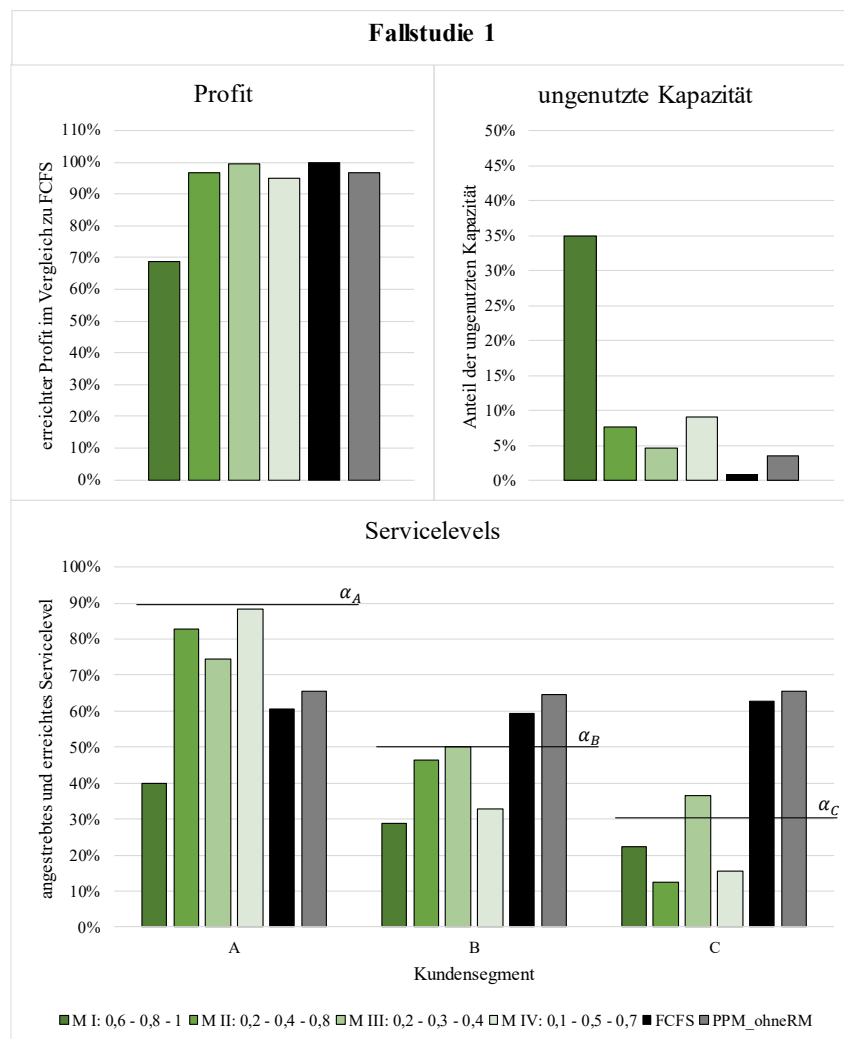


Abbildung 8.3: Durchschnittliche Ergebnisse der Fallstudie 1

Für die B- und C-Kunden werden mit den Vergleichsstrategien FCFS und PPM_ohneRM bessere Servicelevels als mit den erlösorientierten Ansätzen erreicht. Wie bereits in Kapitel 7.3 erwähnt, sind die mit den Vergleichsstrategien erzielten Servicelevels über alle Kundensegmente hinweg relativ ausgeglichen. Mit dem Multiplikatorenansatz M III wird das angestrebte Servicelevel α_B der B-Kunden mit 49,97% fast erreicht und bildet insgesamt bei den erlösorientierten Ansätzen das beste Servicelevel für die B-Kunden ab. Das angestrebte Servicelevel α_C der C-Kunden wird mit dem dritten Multiplikatorenansatz mit einem erreichten Servicelevel von 36,55% sogar überschritten. Bei Verwendung des dritten Multiplikatorenansatzes ist der Unterschied zwischen den erreichten Servicelevels der A-, B- und C-Kunden im Vergleich zu den mit den anderen Multiplikatorenansätzen erzielten Servicelevels am geringsten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die kundenspezifischen Multiplikatoren $multi_k$ des dritten Multiplikatorenansatzes mit 0,2 ($= multi_A$), 0,3 ($= multi_B$) und 0,4 ($= multi_C$) sehr ähnliche Werte besitzen und demzufolge die erste Hürde im Auftragsannahmeprozess für die verschiedenen Kundensegmente nur geringe Unterschiede aufweist. Hinzu kommt, dass alle Multiplikatoren $multi_k$ des Multiplikatorenansatzes M III einen recht niedrigen Wert besitzen und folglich die erste Hürde im Auftragsannahmeprozess bei Verwendung dieses Multiplikatorenansatzes für alle Kundensegmente sehr verringert ist. Insgesamt hat dies zur Folge, dass mit dem Multiplikatorenansatz M III im Vergleich zu den anderen erlösorientierten Ansätzen am wenigsten Aufträge aufgrund der ersten Hürde abgelehnt werden und stattdessen mehr Ablehnungen durch das Produktionsplanungsmodell in der zweiten Hürde ausgesprochen werden (s. Abbildung 8.4). Deshalb sind die mit dem dritten Multiplikatorenansatz erzielten Ergebnisse auch den mit der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM erzielten Ergebnisse am ähnlichsten. Am deutlichsten ist dies bei der Kapazitätsauslastung zu sehen, wo der Unterschied mit 95,45% bei Verwendung des dritten Multiplikatorenansatzes und 96,51% bei Verwendung der Strategie PPM_ohneRM nur marginal ist.

Wie bereits zuvor angesprochen, ist der aufgeschlüsselten Darstellung der Ablehnungen (s. Abbildung 8.4) deutlich zu entnehmen, dass bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M I sehr viele Ablehnungen auf die erste Hürde im Auftragsannahmeprozess zurückzuführen sind. Auch die Gesamtanzahl der Ablehnungen ist mit diesem Multiplikatorenansatz am höchsten. Dies verstärkt die Aussage, dass durch die hohen Werte der kundenspezifischen Multiplikatoren $multi_k$ (M I: $multi_A = 0,6$, $multi_B = 0,8$, $multi_C = 1$) die erste Hürde zu hoch ist und es folglich zu sehr vielen Ablehnungen kommt. Dies resultiert in schlechten Ergebnissen hinsichtlich des Profits und der Servicelevels, die zuvor bereits diskutiert wurden.

Weiter fällt anhand der Abbildung 8.4 auf, dass die erlösorientierten Ansätze insgesamt im Vergleich zu den Strategien FCFS und PPM_ohneRM zu einer höheren Anzahl an abgelehnten Aufträgen führen. Aus diesem Grund ist bei den erlösorientierten Ansätzen der Anteil der ungenutzten Kapazität auch größer als bei den Benchmark-Strategien.

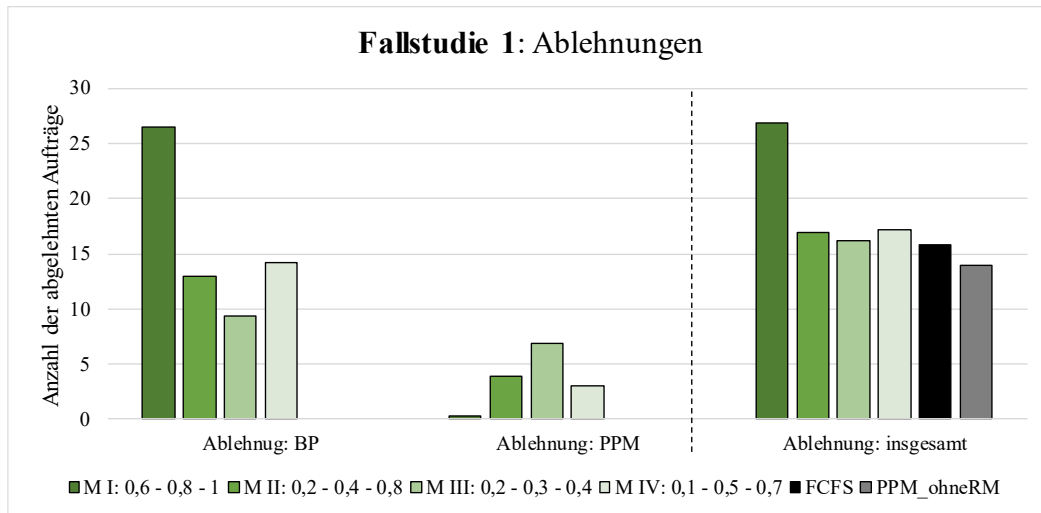


Abbildung 8.4: Anzahl der abgelehnten Aufträge durch Bid-Preise (BP), das Produktionsplanungsmodell (PPM) und insgesamt der Fallstudie 1

Interessant sind auch die aufgeschlüsselten Ergebnisse der angenommenen Aufträge, welche in Abbildung 8.5 dargestellt sind. Es ist keine Bevorzugung der kurzen Aufträge gegenüber den mittleren und langen Aufträgen vorhanden. Insbesondere bei den langen Aufträgen ist die Anzahl der angenommenen Aufträge über alle Strategien nahezu identisch. Bei Verfolgung der Profitmaximierung sollten jedoch primär kurze Aufträge angenommen werden, da mit diesen pro Zeiteinheit ein höherer Profit erwirtschaftet werden kann. Dass kurze Aufträge nicht bevorzugt angenommen werden, liegt daran, dass bei Verwendung einer erlösorientierten Strategie keinerlei Priorisierung innerhalb der anzunehmenden Aufträge vorhanden ist. Für die Annahmeentscheidung ist ein Auftrag, dessen Deckungsbeitrag exakt dem Bid-Preis und somit der Preisuntergrenze entspricht, gleichwertig zu einem Auftrag, dessen Deckungsbeitrag den Bid-Preis bei weitem übersteigt. Aus der hohen Anzahl an angenommenen, langen Aufträgen kann geschlossen werden, dass auch mit dem Deckungsbeitrag dieser eher unrentableren Aufträge der Bid-Preis mindestens gedeckt wird. Dass insgesamt weniger lange Aufträge angenommen werden, liegt daran, dass lange Aufträge seltener erteilt werden. Bei lediglich sechs von 40 Aufträgen handelt es sich um lange Aufträge. Aufgrund der längeren Bearbeitungszeit nehmen diese Aufträge allerdings deutlich mehr Kapazität in Anspruch, was dazu führt, dass weniger Kapazität für andere Aufträge vorhanden ist. Als Folge daraus kommt es zu einer höheren Anzahl an Ablehnungen (s. Abbildung 8.4).

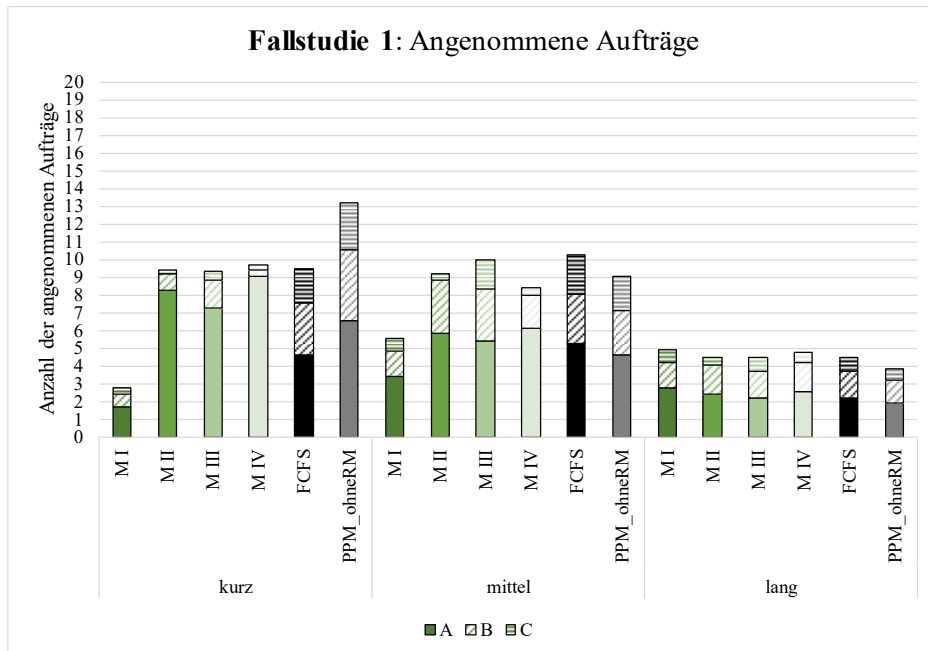


Abbildung 8.5: Aufgeschlüsselte Darstellung der angenommenen Aufträge der Fallstudie 1

Dass die zuvor vorgestellten Ergebnisse unabhängig von der Auftragsreihenfolge und -dichte sind, zeigt die Abbildung 8.6. In dieser werden beispielhaft die Veränderungen der Mittelwerte (primäre Y-Achse) und der Variationskoeffizienten (sekundäre Y-Achse) hinsichtlich des Profitergebnisses über die Anzahl der berücksichtigten Datensätze (X-Achse) aufgezeigt. Sowohl die Mittelwerte als auch die Variationskoeffizienten stabilisieren sich sehr schnell und bleiben fortan unabhängig von der Anzahl der berücksichtigten Datensätze auf einem konstanten Niveau. Gleiches ist bei den erreichten Servicelevels zu verzeichnen. Die dazugehörigen Abbildungen sind dem Anhang D.1 zu entnehmen.

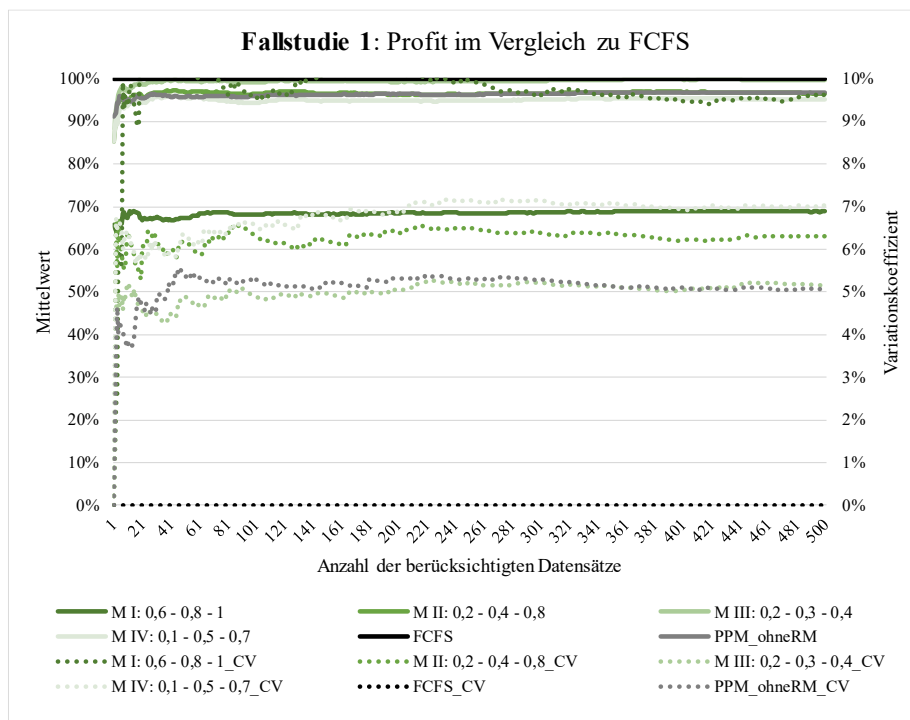


Abbildung 8.6: Robustheitsanalyse der Profitergebnisse der Fallstudie 1

Wie auch bei der Präsentation der mengenorientierten Ergebnisse wird im Folgenden ein beispielhafter Produktionsplan für einen Datensatz aufgezeigt. Erneut wird dazu der Datensatz 228 herangezogen, da die mit diesem Datensatz erzielten Ergebnisse am ehesten den durchschnittlichen Ergebnissen entsprechen. Die vollständigen auftragspezifischen Daten dieses Datensatzes sind in Anhang B.1 aufgeführt. Ein Vergleich der durchschnittlichen und mit dem Datensatz 228 erreichten Ergebnisse ist in Tabelle 8.3 aufgeführt. Generell fallen die resultierenden Produktionspläne sehr unterschiedlich aus, da diese maßgeblich von den auftragspezifischen Freigabedaten R_j und \bar{R}_j sowie den auftragspezifischen Fristen D_j und \bar{D}_j und diese wiederum von dem zufällig generierten Auftragseingangstag abhängen. Somit hat die Auftragsreihenfolge und -dichte einen wesentlichen Einfluss auf den Produktionsplan. Aus diesem Grund sei noch einmal betont, dass es sich bei dem in Abbildung 8.7 dargestellten Plan, welcher sich auf der nächsten Seite befindet, lediglich um einen beispielhaften Produktionsplan handelt.

Tabelle 8.3: Durchschnittliche und planungstechnische Ergebnisse der Fallstudie 1 und des Datensatzes 228

	Summe der verfrühten Zeiteinheiten [Tage]		Summe der verspäteten Zeiteinheiten [Tage]		Summe der Rüstzeiten [Tage]		Profit [GE]	
	Ø	Datensatz 228	Ø	Datensatz 228	Ø	Datensatz 228	Ø	Datensatz 228
M I	0,25	0,00	0,00	0,00	0,71	0,82	10.306,93	11.899,59
M II	0,50	0,00	4,66	9,26	1,06	1,05	14.461,18	14.344,38
M III	0,33	0,00	10,55	10,84	1,09	1,14	14.931,42	15.387,17
M IV	0,54	0,00	3,30	3,49	1,05	1,08	14.234,79	14.755,01
FCFS	1,64	0,00	16,37	16,83	1,11	1,10	14.990,59	14.719,39
PPM_ohneRM	0,32	0,00	26,28	25,66	1,12	1,17	14.494,94	15.103,77

Allgemein fällt auf, dass verfrühte Produktionsbeginne nur sehr selten vorkommen, sodass die Summe der verfrühten Zeiteinheiten bei allen erlösorientierten Strategien und der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM sogar weniger als einen Tag umfasst. Bei dem Datensatz 228 kommt es sogar zu gar keinem verfrühten Produktionsbeginn. Verspätungen hingegen kommen sowohl bei den durchschnittlichen Ergebnissen als auch bei den Ergebnissen des Datensatzes 228 häufiger vor. Bezüglich des zweiten Multiplikatorenansatzes ist dabei hervorzuheben, dass die Summe der Verspätungen bei dem für den Datensatz 228 resultierenden Produktionsplan deutlich höher als der Mittelwert ist. Häufig ist eine hohe Summe an verspäteten Zeiteinheiten auf vereinzelte Aufträge, welche um mehrere Tage verspätet fertiggestellt werden, zurückzuführen. So ist beispielsweise der Auftrag 13 bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M II um 5,14 Tage ($= t_{13}$) verspätet. Dies umfasst bereits mehr als die Hälfte der verspäteten Zeiteinheiten. Darüber hinaus sind bei fast allen Strategien zusätzlich auch mehrere kleinere Verspätungen vorhanden, welche ebenfalls der Abbildung 8.7 entnommen werden können. Eine Ausnahme bildet hier das Ergebnis, welches mit dem Multiplikatorenansatz M I erzielt wird. Aufgrund

der deutlich geringeren Kapazitätsauslastung ist es möglich, alle angenommenen Aufträge rechtzeitig fertigzustellen. Folglich ist die Summe der Verspätung sowohl beim Datensatz 228 als auch im Durchschnitt gleich null. Allerdings fällt mit dem ersten Multiplikatorenansatz auch das Profitergebnis deutlich geringer als mit den anderen Strategien aus und die angestrebten Servicelevels α_k werden bei weitem verfehlt.

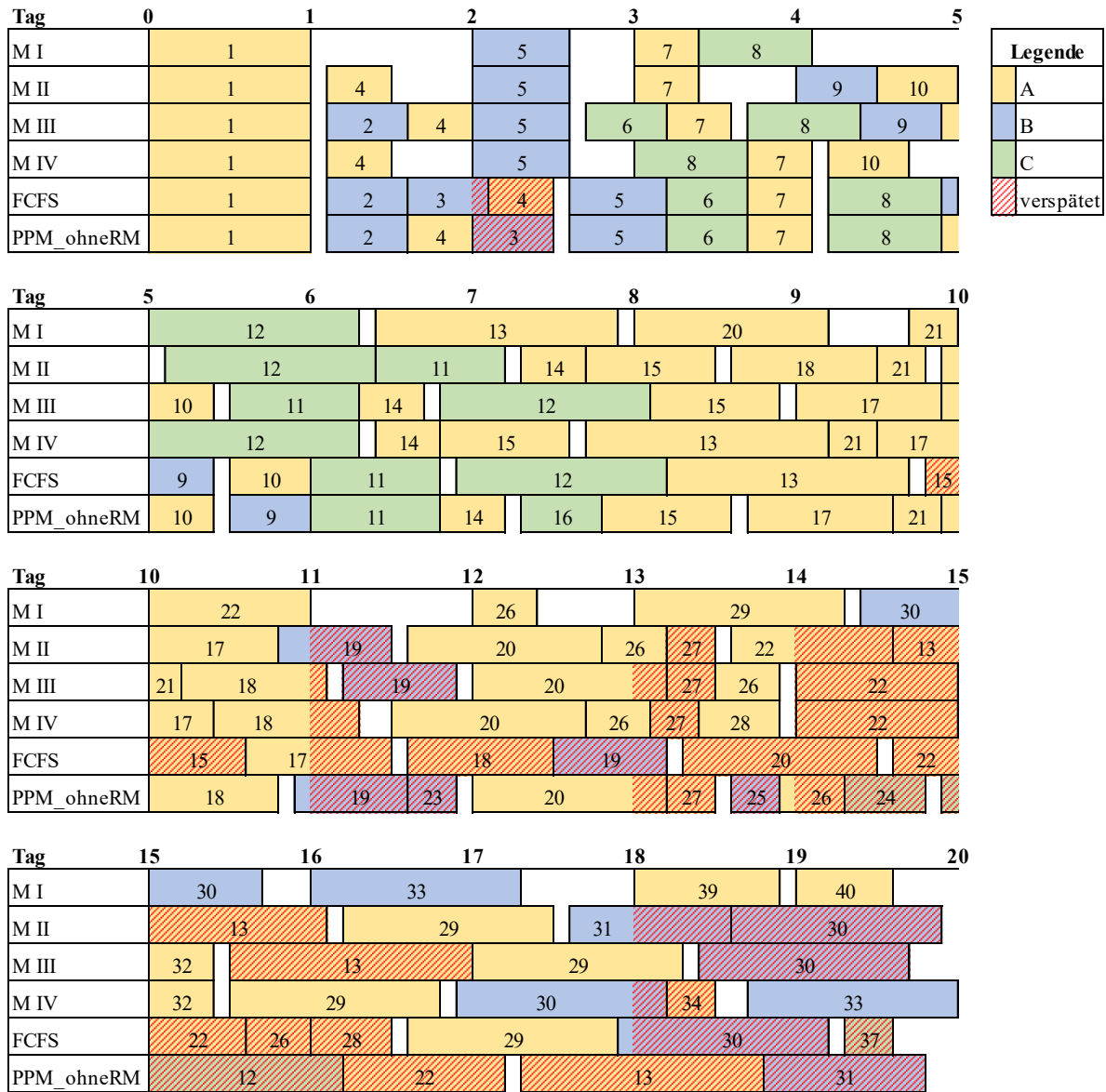


Abbildung 8.7: Produktionsplan des Datensatzes 228 der Fallstudie 1

Die Summe der Rüstzeiten ist bei allen Strategien ebenfalls ähnlich. Mit dem ersten Multiplikatorenansatz wird der geringste Rüstaufwand erreicht. Grund dafür ist erneut die geringe Anzahl an angenommenen Aufträgen. Bei allen anderen Strategien unterscheidet sich die Summe der Rüstzeiten um maximal 0,12 Arbeitstage (≈ 1 Stunde). Diese ähnlichen Summen sind dadurch zu erklären, dass die Unterschiede zwischen den sequenzabhängigen Rüstzeiten relativ gering sind (s. Tabelle 6.2, bzw. Tabelle B.3 bis Tabelle B.5 für Datensatz 228) und somit eine nicht optimierte Produktionsreihenfolge auch nur geringfügig höhere Rüstzeiten zur Folge hat.

Ergebnisse der Fallstudie 2 und 3 nach Durchführung des Auftragsannahmeprozesses

Wie auch bei der Ergebnisvorstellung und -diskussion der mengenorientierten Ansätze, werden nachfolgend die Ergebnisse, welche mit den erlösorientierten Ansätzen bei den Fallstudien 2 und 3 erreicht werden, zusammengefasst. Dabei wird maßgeblich auf die Besonderheiten, Gemeinsamkeiten und Unterschiede eingegangen. In den Abbildungen 8.8 und 8.9, welche auf dieser und der übernächsten Seite aufgeführt sind, werden die durchschnittlichen Ergebnisse hinsichtlich des Profits, der ungenutzten Kapazität und der erreichten Servicelevels der Fallstudien 2 und 3 aufgeführt. Erneut fallen die Profitergebnisse sehr ähnlich aus. Insbesondere bei der zweiten Fallstudie ist dies zu beobachten. Weiterhin wird auch bei dieser Fallstudie mit der Benchmark-Strategie FCFS das beste Profitergebnis erzielt. Mit den anderen Multiplikatorenansätzen wird ein lediglich um maximal 5,72% abweichendes Ergebnis erreicht. Zum zweitbesten Ergebnis führt erneut der dritte Multiplikatorenansatz mit einem durchschnittlichen Ergebnis von 99,30%. Bei der dritten Fallstudie wird mit dem Multiplikatorenansatz M III mit 100,27% sogar erstmals ein minimal besseres Profitergebnis als mit der FCFS Strategie erreicht. Die Profitergebnisse der Multiplikatorenansätze M II und M IV weichen in der dritten Fallstudie um maximal 6,98% von dem Ergebnis der FCFS Strategie ab.

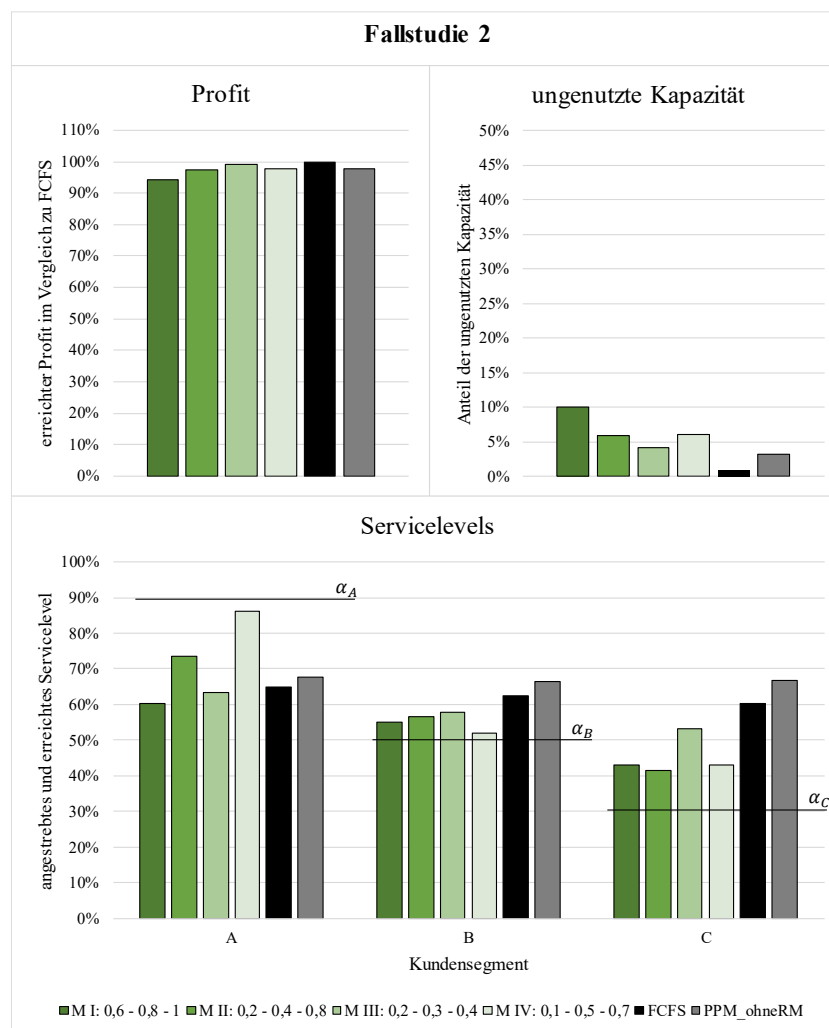


Abbildung 8.8: Durchschnittliche Ergebnisse der Fallstudie 2

Auffällig bei den Ergebnissen ist, dass auch das Profitergebnis, welches mit dem Multiplikatorenansatz M I erzielt wird, bei den Fallstudien 2 und 3 im Vergleich zur ersten Fallstudie deutlich besser ausfällt. Insbesondere bei der zweiten Fallstudie wird bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M I mit einem Ergebnis von 94,28% ein zu den anderen Ergebnissen vergleichbarer Profit erzielt. Auch ein Blick auf den Anteil der ungenutzten Kapazität verdeutlicht, dass in der zweiten und dritten Fallstudie mit dem ersten Multiplikatorenansatz zwar immer noch die geringste Kapazitätsauslastung, jedoch eine deutlich bessere als bei der ersten Fallstudie, erreicht wird. Der Grund für diese deutlich besseren Ergebnisse liegt in der Kundenzusammensetzung der Fallstudien. In der zweiten Fallstudie stammen lediglich 20% aller Aufträge von A-Kunden, 50% der Aufträge werden von B-Kunden und die restlichen 30% von C-Kunden gestellt. Da Aufträge von B- und C-Kunden höhere Deckungsbeiträge als Aufträge von A-Kunden aufweisen, gibt es somit insgesamt bei der zweiten Fallstudie im Vergleich zur ersten Fallstudie mehr Aufträge, welche einen höheren Deckungsbeitrag besitzen. Demzufolge gibt es vergleichsweise zur ersten Fallstudie auch mehr Aufträge, welche eine bessere Voraussetzung haben, eine höhere Preisuntergrenze zu decken bzw. zu übersteigen. Zwar wird die erste Hürde durch einen für A-Kunden niedrigeren Multiplikator $multi_A$ noch weiter verringert, allerdings scheint diese Verringerung, wie die Ergebnisse der ersten Fallstudie verdeutlichen, oftmals nicht für eine vorläufige Annahme auszureichen. Insgesamt führt der Multiplikatorenansatz M I zu besseren, wenn auch immer noch im Vergleich zu den anderen Multiplikatorenansätzen zu schlechteren, Ergebnissen, wenn ein Großteil der Aufträge höhere Deckungsbeiträge aufweist. Aus diesem Grund kann das mit dem Multiplikatorenansatz M I erzielte Profitergebnis der dritten Fallstudie zwischen dem in der ersten und zweiten Fallstudie erreichten Ergebnis eingeordnet werden. Bei der dritten Fallstudie ist die Kundenzusammensetzung über alle Segmente hinweg relativ ausgeglichen. Folglich ist der Anteil der Aufträge von A-Kunden geringer als bei der ersten Fallstudie und höher als bei der zweiten Fallstudie.

Auch in den Ergebnissen der ungenutzten Kapazität spiegelt sich die zuvor aufgeführte Schlussfolgerung wider. Sowohl in der zweiten als auch in der dritten Fallstudie bleibt mit dem ersten Multiplikatorenansatz im Vergleich zu dem Ergebnis aus der ersten Fallstudie weniger Kapazität ungenutzt, wobei der Anteil der ungenutzten Kapazität in der zweiten Fallstudie am geringsten ist. Insgesamt führen bei allen Fallstudien die anderen Multiplikatorenansätze zu jeweils höheren Kapazitätsauslastungen. Die höchste Kapazitätsauslastung wird weiterhin stets mit den Vergleichsstrategien erzielt. Innerhalb der erlösorientierten Ansätze führt über alle Fallstudien hinweg der dritte Multiplikatorenansatz zu der höchsten Kapazitätsauslastung.

Bei den Servicelevels kann weiterhin beobachtet werden, dass mit dem vierten Multiplikatorenansatz jeweils das höchste Servicelevel für die A-Kunden erzielt werden kann. Zusätzlich werden mit diesem Multiplikatorenansatz bei der zweiten Fallstudie sowohl das angestrebte Servicelevel α_B für B-Kunden als auch α_C für C-Kunden überschritten. Dies ist jedoch bei der zweiten Fallstudie mit allen Multiplikatorenansätzen der Fall. Bei der dritten Fallstudie kann mit dem Multiplikatorenansatz M IV sogar das

angestrebte Servicelevel α_A der A-Kunden mit einem Ergebnis von 91,04% überschritten werden. Allerdings wird nur mit diesem Multiplikatorenansatz das angestrebte Servicelevel α_B der B-Kunden nicht erreicht. Mit den anderen Multiplikatorenansätzen ist es möglich, das angestrebte Servicelevel α_B der B-Kunden zu erreichen bzw. zu überschreiten, wobei mit diesen die Erreichung von α_A nicht gelingt. Auch bei der dritten Fallstudie wird mit allen Strategien, insbesondere auch mit dem vierten Multiplikatorenansatz, das angestrebte Servicelevel α_C der C-Kunden erreicht bzw. überschritten.

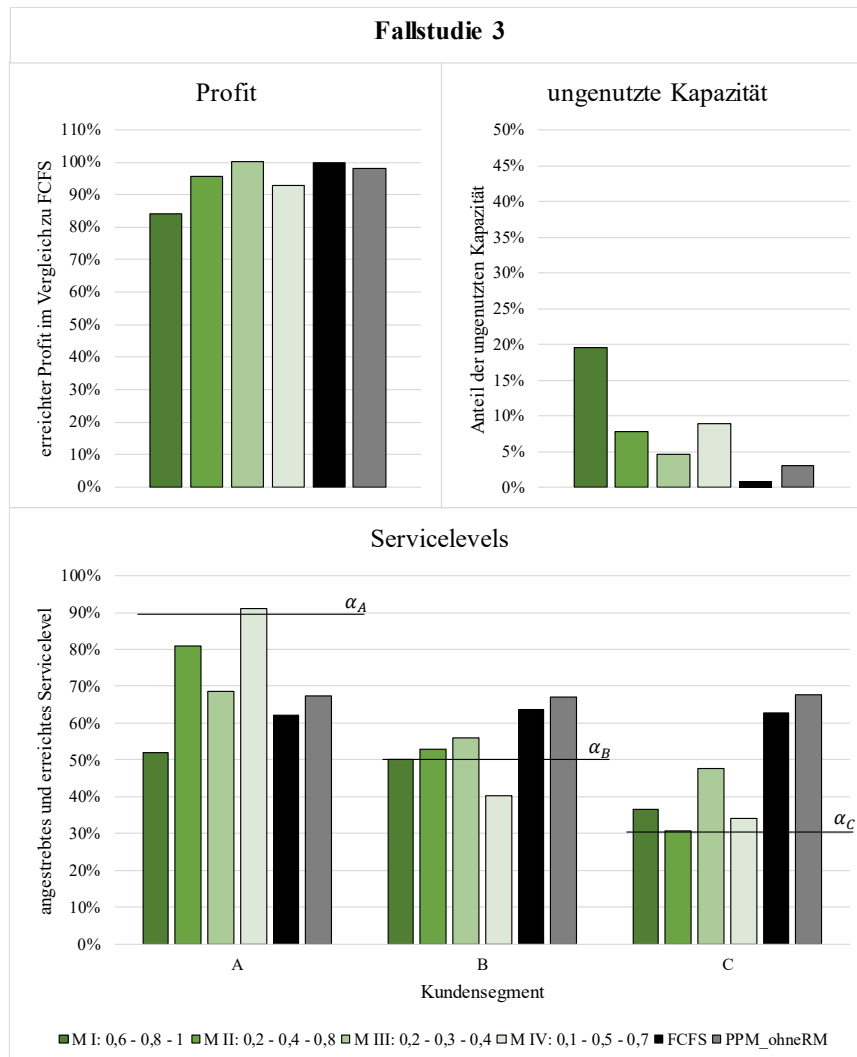


Abbildung 8.9: Durchschnittliche Ergebnisse der Fallstudie 3

Im Vergleich zu der ersten Fallstudie kann bei den Ergebnissen der zweiten und dritten Fallstudie noch deutlicher beobachtet werden, dass die mit dem Multiplikatorenansatz M III erreichten Servicelevels der A-, B- und C-Kunden sich zum Teil nur geringfügig unterscheiden. Bei den Ergebnissen der zweiten Fallstudie ist dies besonders auffällig. Erneut ist dieser Umstand auf die ähnlichen und sehr niedrigen Werte der kundenspezifischen Multiplikatoren $multi_k$ zurückzuführen. Die erste Hürde ist somit bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III so gering, dass diese Hürde generell zu weniger Ablehnungen führt. Dies kann auch der aufgeschlüsselten Darstellung der Ablehnungen in den Abbildungen 8.10 und 8.11 entnommen werden. Aufgrund des eher geringen Effekts der ersten Hürde ähnelt diese

Strategie am ehesten der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM, mit welcher ebenfalls sehr ausgeglichene Servicelevels erreicht werden.

Zusätzlich kann den Abbildungen 8.10 und 8.11 entnommen werden, dass die erlösorientierten Ansätze, wie auch bei der ersten Fallstudie, zu einer vergleichsweise höheren Anzahl an Ablehnungen führen. Ein Großteil der Ablehnungen ist dabei auf die erste Hürde im Auftragsannahmeprozess zurückzuführen. Weiterhin werden, wie bereits erwartet, bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M I auf Basis der ersten Hürde und insgesamt die meisten Aufträge abgelehnt.

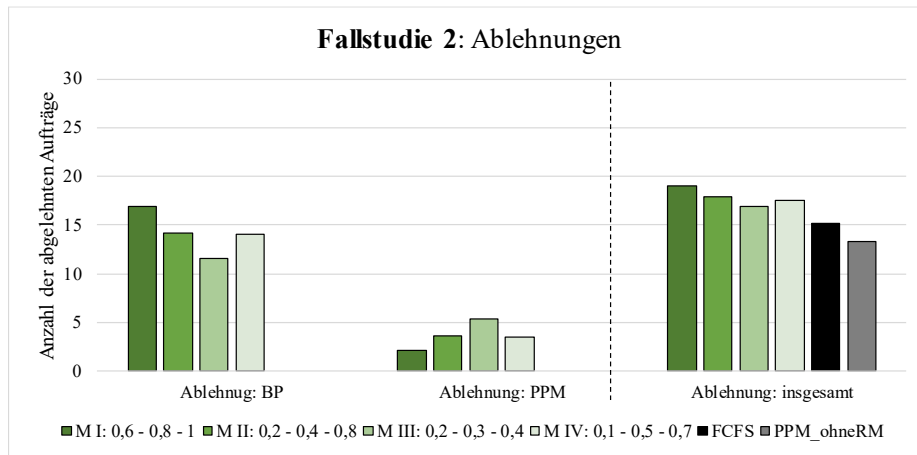


Abbildung 8.10: Anzahl der abgelehnten Aufträge durch Aufträge durch Bid-Preise (BP), das Produktionsplanungsmodell (PPM) und insgesamt der Fallstudie 2

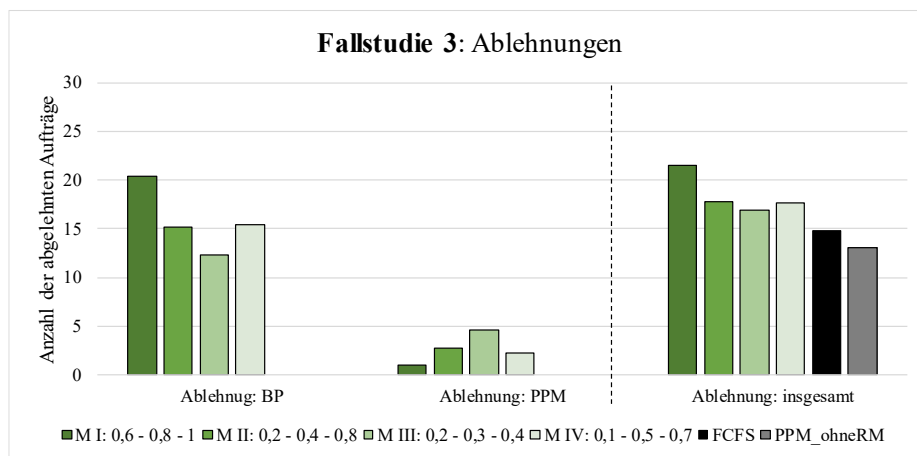


Abbildung 8.11: Anzahl der abgelehnten Aufträge durch Bid-Preise (BP), das Produktionsplanungsmodell (PPM) und insgesamt der Fallstudie 3

Bei Betrachtung der aufgeschlüsselten Ergebnisse hinsichtlich der Auftragsannahmen (s. Abbildung 8.12 und 8.13) fällt erneut auf, dass mit den erlösorientierten Ansätzen keine Bevorzugung der kurzen Aufträge zu beobachten ist, obwohl mit diesen pro Zeiteinheit ein höherer Deckungsbeitrag erwirtschaftet werden kann. Folglich ist erneut der Nachteil der erlösorientierten Steuerung zu beobachten, dass keinerlei Priorisierung innerhalb der anzunehmenden Aufträge existiert. Sobald der Deckungsbeitrag CM_j eines Auftrags j den Bid-Preis mindestens deckt, wird dieser angenommen, wohingegen

bei den mengenorientierten Ansätzen die Kapazität für die anzunehmenden Aufträge produktgenau aufgeteilt wird. Indem mehr Kapazität für die kurzen Aufträge reserviert wird, wird eine Priorisierung der lukrativeren Aufträge ermöglicht. Durch eine Schachtelung der einfachen Buchungslimits kann die gewünschte Priorisierung noch verstärkt werden. Dieser Vorteil entfällt bei erlösorientierten Ansätzen.

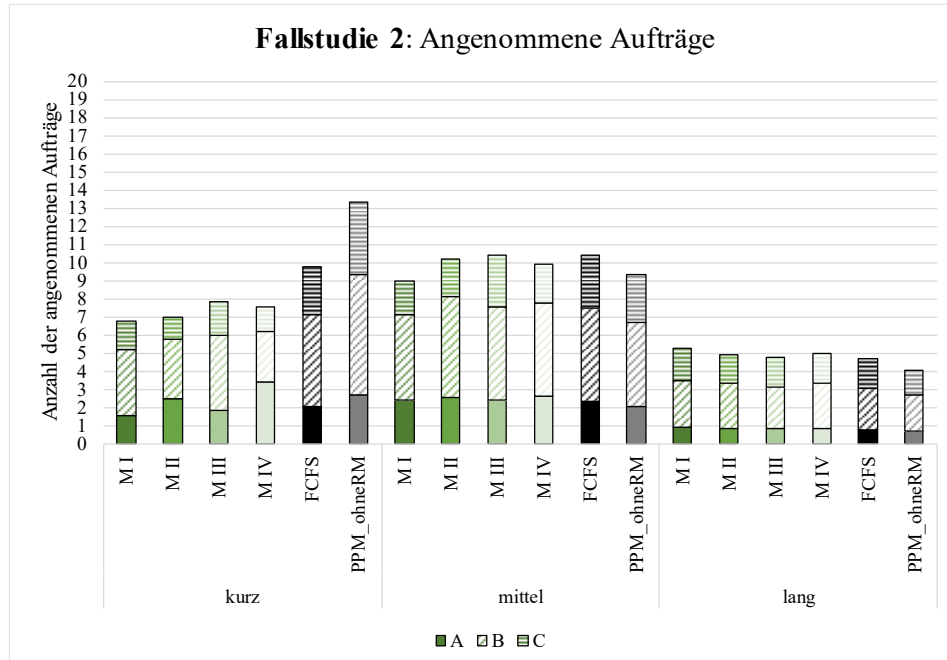


Abbildung 8.12: Aufgeschlüsselte Darstellung der angenommenen Aufträge der Fallstudie 2

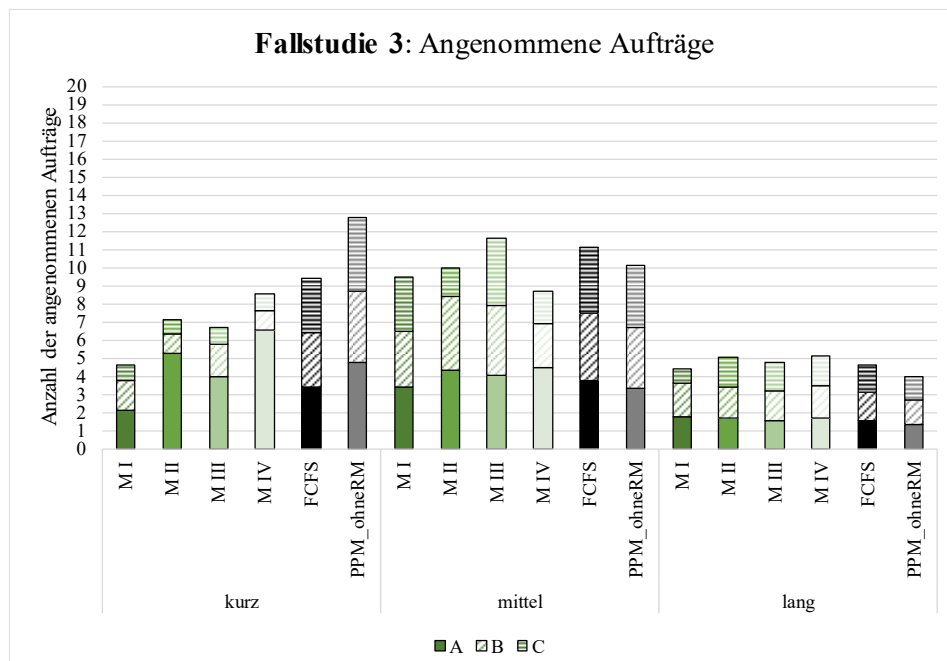


Abbildung 8.13: Aufgeschlüsselte Darstellung der angenommenen Aufträge der Fallstudie 3

Um zu belegen, dass die zuvor präsentierten Ergebnisse auch bei den Fallstudien 2 und 3 unabhängig von einer Auftragsreihenfolge und -dichte sind, sind in den Abbildungen 8.14 und 8.15 beispielhaft die Ergebnisse der Robustheitsanalyse der Profitergebnisse dargestellt. Es ist bei beiden Fallstudien zu

erkennen, dass sich die Mittelwerte und die Variationskoeffizienten stabilisieren. Somit ist es möglich, innerhalb der Fallstudien – unter Berücksichtigung der vorherrschenden Standardabweichung – verlässliche Aussagen über die Performance der Strategien zu treffen. Auch bei den erreichten Servicelevels ist dies der Fall. Die dazugehörigen Abbildungen sind den Anhängen D.2 und D.3 zu entnehmen.

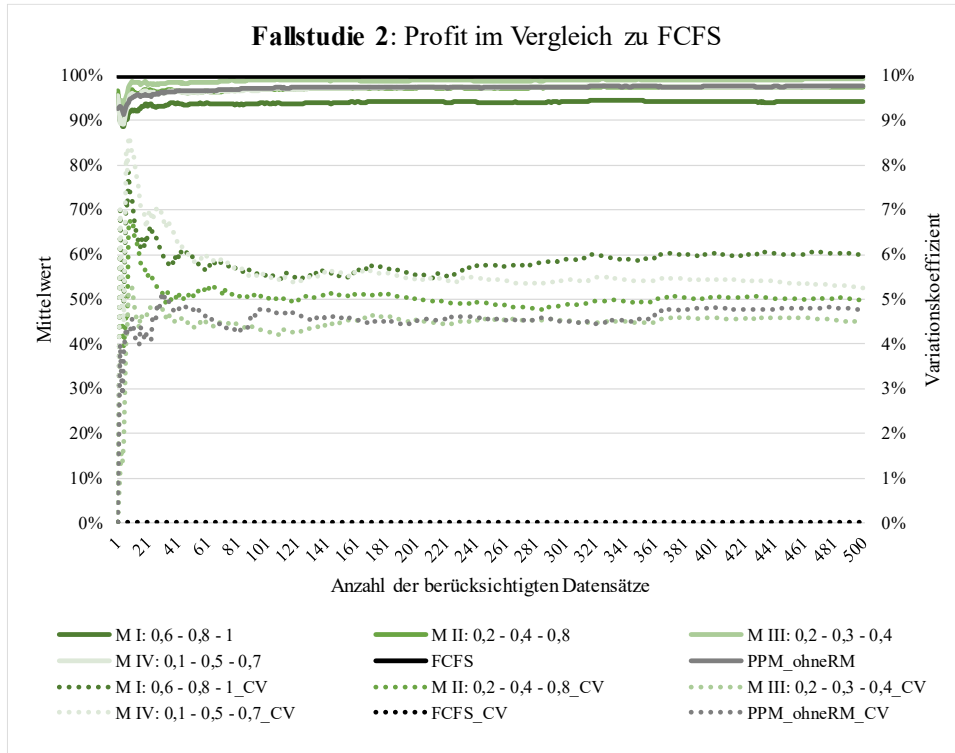


Abbildung 8.14: Robustheitsanalyse der Profitergebnisse der Fallstudie 2

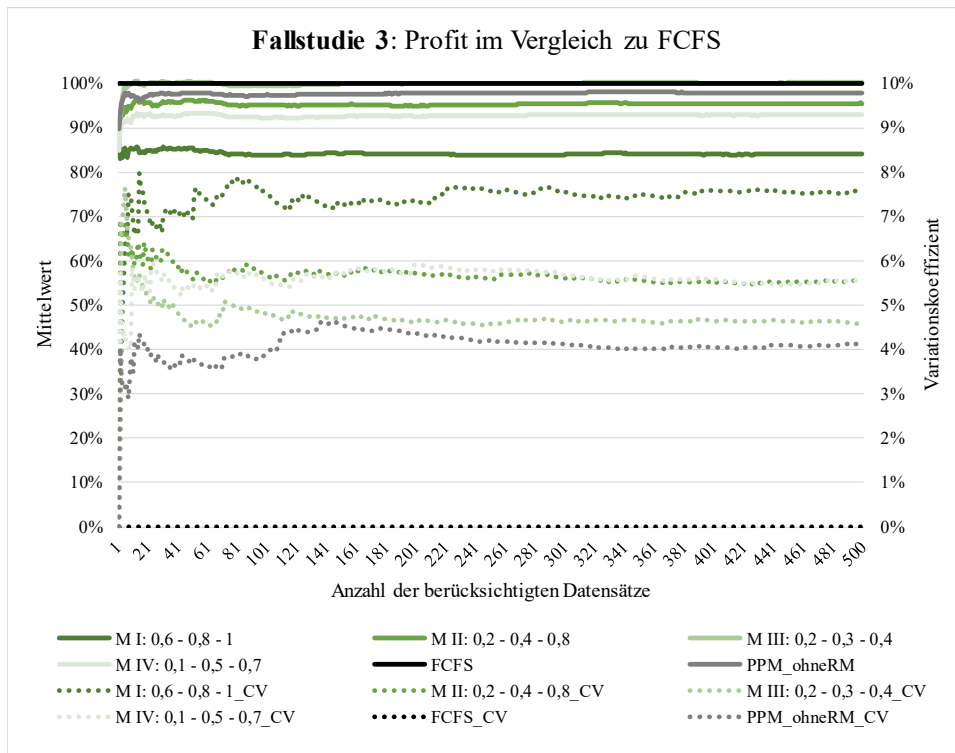


Abbildung 8.15: Robustheitsanalyse der Profitergebnisse der Fallstudie 3

Anders jedoch sieht dies, wie bereits zuvor erläutert, bei konkreten Produktionsplänen aus. Diese hängen vollständig von der Auftragsreihenfolge und -dichte ab. Für die erste Fallstudie wurde bereits ein beispielhafter Produktionsplan präsentiert (s. Abbildung 8.7). Anstatt des genauen Blicks auf einen Produktionsplan für die zweite und dritte Fallstudie werden in der nachfolgenden Abbildung 8.16 die Mittelwerte der planungstechnischen Daten aller Fallstudien aufgezeigt. Es ist zu erkennen, dass es nur sehr selten zu verfrühten Produktionsbeginn kommt. Am ehesten ist dies bei der Vergleichsstrategie FCFS zu beobachten. Dies liegt daran, dass bei FCFS keinerlei Kosten (und Deckungsbeiträge) bei der Annahmeentscheidung berücksichtigt werden und ein angenommener Auftrag immer so früh wie möglich eingeplant wird. Folglich ist der Produktionsbeginn b_j eines Auftrags j abhängig von dem Fertigstellungszeitpunkt f_i des vorherigen Auftrags i und dem verfrühten Freigabezeitpunkt \bar{R}_j des einzuplanenden Auftrags j . Aufgrund der mit der FCFS Strategie nahezu vollständigen Kapazitätsauslastung kommen verfrühte Produktionsbeginne jedoch relativ selten vor. Stattdessen sind die Aufträge häufiger verspätet. Über alle Fallstudien hinweg ist die Summe der verspäteten Zeiteinheiten mit der Strategie PPM_ohneRM am höchsten, gefolgt von der FCFS Strategie. Mit den erlösorientierten Strategien fällt die Summe der Verspätungen vergleichsweise geringer aus. Dies ist durch die geringere Anzahl an Annahmen und die dadurch geringere Kapazitätsauslastung zu begründen. Insbesondere bei Verwendung des ersten Multiplikatorenansatzes ist daher die Summe der Verspätungen nahezu gleich null. Hinsichtlich der aufsummierten Rüstzeiten ist über alle Fallstudien und Strategien hinweg kaum ein Unterschied sichtbar. Dies liegt, wie schon angesprochen, an den generell sehr ähnlichen Rüstzeiten, weshalb das Optimierungspotenzial an dieser Stelle nur recht klein ist. Tendenziell führen die Vergleichsstrategien FCFS und PPM_ohneRM, wenn auch nur marginal, zu höheren Rüstzeiten. Als Begründung dafür kann die bei den Vergleichsstrategien höhere Anzahl an Auftragsannahmen aufgeführt werden.

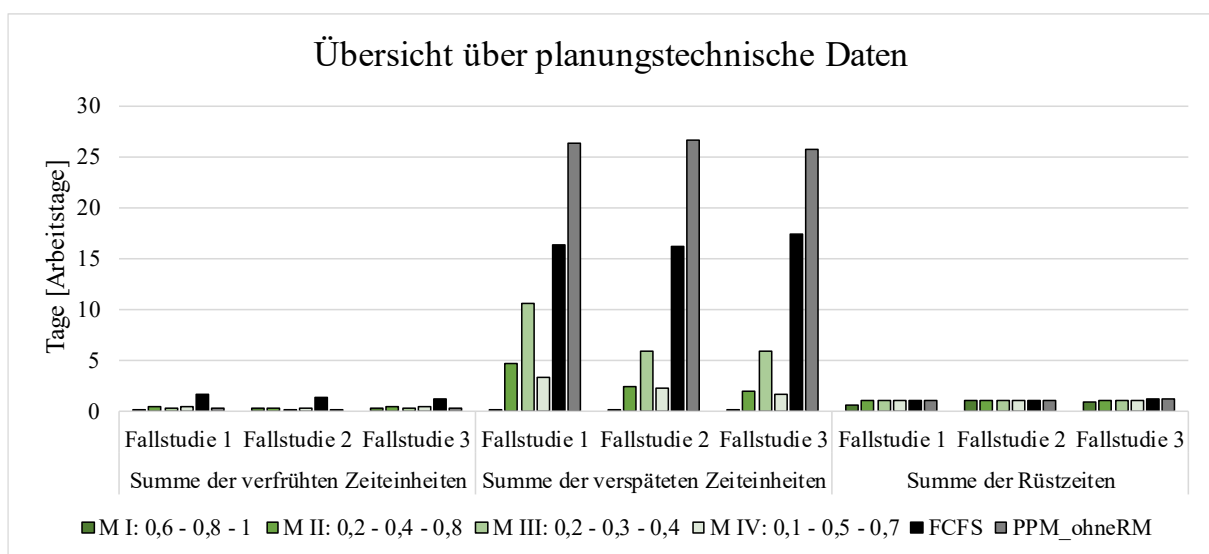


Abbildung 8.16: Übersicht über planungstechnische Daten der Fallstudien 1, 2 und 3

In Abbildung 8.17 werden die durchschnittlich pro Datensatz benötigten Rechenzeiten dargestellt. Folglich beziehen sich die dargestellten Ergebnisse immer auf die durchschnittliche Dauer (in Sekunden) eines vollständigen Auftragsannahmeprozesses über die 40 eintreffenden Aufträge. Aufgrund der Einfachheit der FCFS Strategie ist die Rechenzeit bei dieser zu vernachlässigen. Hinsichtlich der anderen Strategien ist zu erkennen, dass die Rechenzeit bei den erlösorientierten Ansätzen deutlich geringer als bei der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM ausfällt. Wie auch bei den Profitergebnissen unterscheiden sich die benötigten Rechenzeiten bei Verwendung der verschiedenen Multiplikatorenansätze zum Teil kaum voneinander. Demzufolge hilft die in den erlösorientierten Ansätzen zusätzlich existierende RM-Hürde zum einen zu meist besseren Servicelevelergebnissen und zum anderen zu einer deutlichen Beschleunigung der Berechnungen.

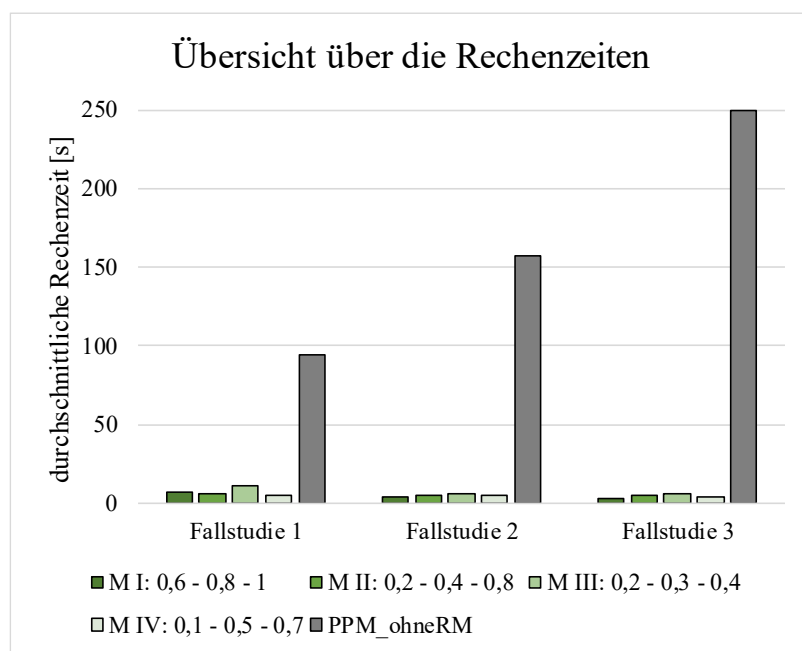


Abbildung 8.17: Durchschnittliche benötigte Rechenzeit für den Auftragsannahmeprozess pro Datensatz

Zusammenfassung

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass mit dem ersten Multiplikatorenansatz über alle Fallstudien hinweg die schlechtesten Ergebnisse erzielt werden. Zwar fallen die Ergebnisse, wenn nicht ein Großteil der Aufträge von A-Kunden gestellt wird, in den Fallstudien 2 und 3 tendenziell besser aus, jedoch werden diese fast immer von den mit den anderen Strategien erzielten Ergebnissen dominiert. Folglich ist es nicht ratsam, die Werte der kundenspezifischen Multiplikatoren $multi_k$ zu hoch anzusetzen.

Ferner kann im Allgemeinen geschlussfolgert werden, dass die Profitergebnisse bei Verwendung der Multiplikatorenansätze M II, M III und M IV meist recht ähnlich ausfallen. Jedoch sind bei den erreichten Servicelevels Unterschiede ersichtlich. Besonders der Multiplikatorenansatz M IV sticht dabei hervor, denn dieser führt bei allen Fallstudien zu dem höchsten Servicelevel für die wichtigen A-Kunden. Bei den ersten beiden Fallstudien wird das angestrebte Servicelevel α_A um 1,61% bei Fallstudie 1 und um

3,77% bei Fallstudie 2 und damit, nur leicht, verfehlt. Bei der dritten Fallstudie kann das angestrebte Servicelevel α_A mit dem vierten Multiplikatorenansatz sogar überschritten werden.

Die Servicelevelergebnisse bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III fallen über die verschiedenen Kundensegmente hinweg relativ ähnlich aus. Folglich ist in der Regel nur eine marginale Bevorzugung der Aufträge, welche von A-Kunden stammen, zu erkennen. Allerdings werden konstant über alle Fallstudien hinweg mit diesem Multiplikatorenansatz die besten Profitergebnisse der erlösorientierten Ansätze erzielt. Insgesamt führt der Multiplikatorenansatz M III in der zweiten Fallstudie nach den Ergebnissen der Vergleichsstrategien zum drittbesten Profitergebnis, in der ersten Fallstudie zum zweitbesten Profitergebnis und in der dritten Fallstudie sogar zum besten Profitergebnis. Sofern bei den konkurrierenden Zielen die Profitmaximierung gegenüber der Erreichung der angestrebten Servicelevels im Vordergrund steht, sollte bei den erlösorientierten daher Ansätzen der Multiplikatorenansatz M III verwendet werden. Sollte hingegen besonders die Erreichung des angestrebten Servicelevels α_A der wichtigen A-Kunden im Fokus stehen, wird bei den erlösorientierten Ansätzen die Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV empfohlen.

9 Vergleich der mengen- und erlösorientierten Ansätze

Nachdem in den vorherigen Kapiteln die mengen- und erlösorientierten Ansätze separat voneinander erläutert und analysiert wurden, steht in diesem Kapitel der direkte Vergleich der unterschiedlichen Strategien im Fokus. Dazu werden in Kapitel 9.1 die wichtigsten Ergebnisse der drei Fallstudien erneut aufgegriffen und herausgearbeitet, welche Ansätze den anderen gegenüber überlegen sind. Anschließend werden die stärksten Ansätze ausgewählt. Die Performance der ausgewählten Strategien wird in Kapitel 9.2 im Rahmen verschiedener Sensitivitätsanalysen weiter untersucht. Mithilfe von Sensitivitätsanalysen soll ermittelt werden, inwiefern mögliche Schlussfolgerungen von gewählten Parameterwerten abhängen, bzw. inwiefern die Schlussfolgerungen robust gegenüber veränderten Daten sind.

9.1 Ergebnisvergleich

Die durchschnittlichen Profitergebnisse der mengen- und erlösorientierten Ansätze sowie der Vergleichsstrategien sind in Abbildung 9.1 für alle Fallstudien dargestellt. Innerhalb einer Fallstudie sind die Ansätze nach den Ergebnissen sortiert aufgeführt. Ganz links ist jeweils die Strategie mit dem höchsten Profitergebnis und ganz rechts ist jeweils die Strategie mit dem geringsten Profitergebnis abgebildet. An der sortierten Darstellung ist schnell erkennbar, dass keine Strategie über alle Fallstudien hinweg zu dem besten Profitergebnis führt. Allerdings wird ersichtlich, dass manche Strategien andere über alle Fallstudien hinweg dominieren. Mit den Strategien PBL, NWCS und bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M I werden in allen Fallstudien die niedrigsten Profitergebnisse erzielt. An dieser Stelle sei noch einmal wiederholt, dass die durchschnittlichen Ergebnisse, welche mit den Strategien PBL und NWCS erreicht werden, identisch sind und dass insbesondere bei der ersten Fallstudie das Profitergebnis unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M I aufgrund der hohen Anzahl an Aufträgen aus dem Kundensegment A deutlich geringer ausfällt.

Werden diese drei Strategien exkludiert, so liegen die Ergebnisse der anderen Strategien relativ nah beieinander. Zum Teil sind nur marginale Unterschiede vorhanden. Insbesondere bei der zweiten Fallstudie sind sehr ähnliche Profitergebnisse zu beobachten. Die Profitergebnisse der NDV Strategie und bei Verwendung der Multiplikatorenansätze M II und M III weichen über alle Fallstudien um maximal 5% von dem Profitergebnis der Vergleichsstrategie FCFS ab. Dies ist auch für die zweite Vergleichsstrategie PPM_ohneRM der Fall. Allerdings ist bezüglich dieser Benchmark-Strategie festzuhalten, dass über alle

Fallstudien hinweg immer mindestens eine RM Strategie (die erlösorientierte Strategie unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III) zu einem besseren Profitergebnis führt. Bei der ersten und dritten Fallstudie wird sogar mit zwei RM Strategien (die erlösorientierte Strategie unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III und die NDV Strategie) ein besseres Ergebnis als mit der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM erzielt.

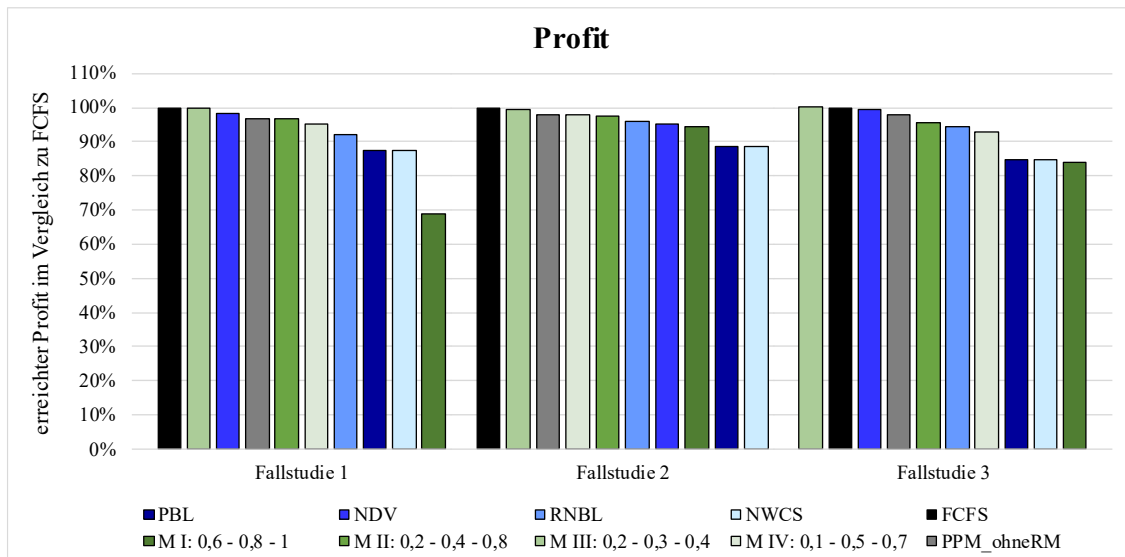


Abbildung 9.1: Sortierte durchschnittliche Profitergebnisse im Vergleich

Mit der Schachtelungsstrategie RNBL werden ebenfalls sehr gute Profitergebnisse erreicht, allerdings weichen diese in den Fallstudien 1 und 3 mit 7,93% und 5,72% um mehr als 5% von dem Profitergebnis der FCFS Strategie ab. In der zweiten Fallstudie hingegen kann mit der RNBL Strategie sogar ein minimal besseres Ergebnis als mit der NDV Strategie erzielt werden. Mit 96,13% weicht das Profitergebnis der RNBL Strategie nur um 3,87% von dem Ergebnis der FCFS Strategie ab. Ähnlich verhält es sich mit dem erlösorientierten Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV. Bei den ersten beiden Fallstudien weicht das Profitergebnis um weniger als 5% von dem Ergebnis der FCFS Strategie ab. In der dritten Fallstudie fällt das Profitergebnis mit 93,02% zwar immer noch sehr gut, aber niedriger als in den vorherigen beiden Fallstudien aus.

Von den entwickelten RM Ansätzen führt über alle Fallstudien hinweg die Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III zu dem besten Profitergebnis. Nur mit dieser Strategie ist es möglich, in der dritten Fallstudie mit einem durchschnittlichen Ergebnis von 100,27% ein minimal besseres Ergebnis als mit der FCFS Strategie zu erzielen. Auch bei den ersten beiden Fallstudien ist das Profitergebnis unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III hervorzuheben, denn dieses weicht jeweils um weniger als 1% von dem Ergebnis der FCFS Strategie ab.

Neben den Profitergebnissen sind auch die mit den verschiedenen Ansätzen erreichten Servicelevels, insbesondere für die wichtigen A-Kunden, von großem Interesse. In Abbildung 9.2 werden diese für alle Fallstudien dargestellt. Innerhalb einer Fallstudie sind die verschiedenen Strategien nach den

erreichten Servicelevels der A-Kunden sortiert. So wird die Strategie, mit welcher das höchste Servicelevel für die A-Kunden erzielt wird, jeweils ganz links und die Strategie, mit welcher das geringste Servicelevel für die A-Kunden erreicht wird, jeweils ganz rechts aufgeführt. Die ermittelte Sortierung wird bei den erreichten Servicelevels der B- und C-Kunden ebenfalls angewendet, wobei die Sortierung bei diesen Kundensegmenten nicht zwangsläufig einer absteigenden Reihenfolge der erreichten Servicelevels entspricht.

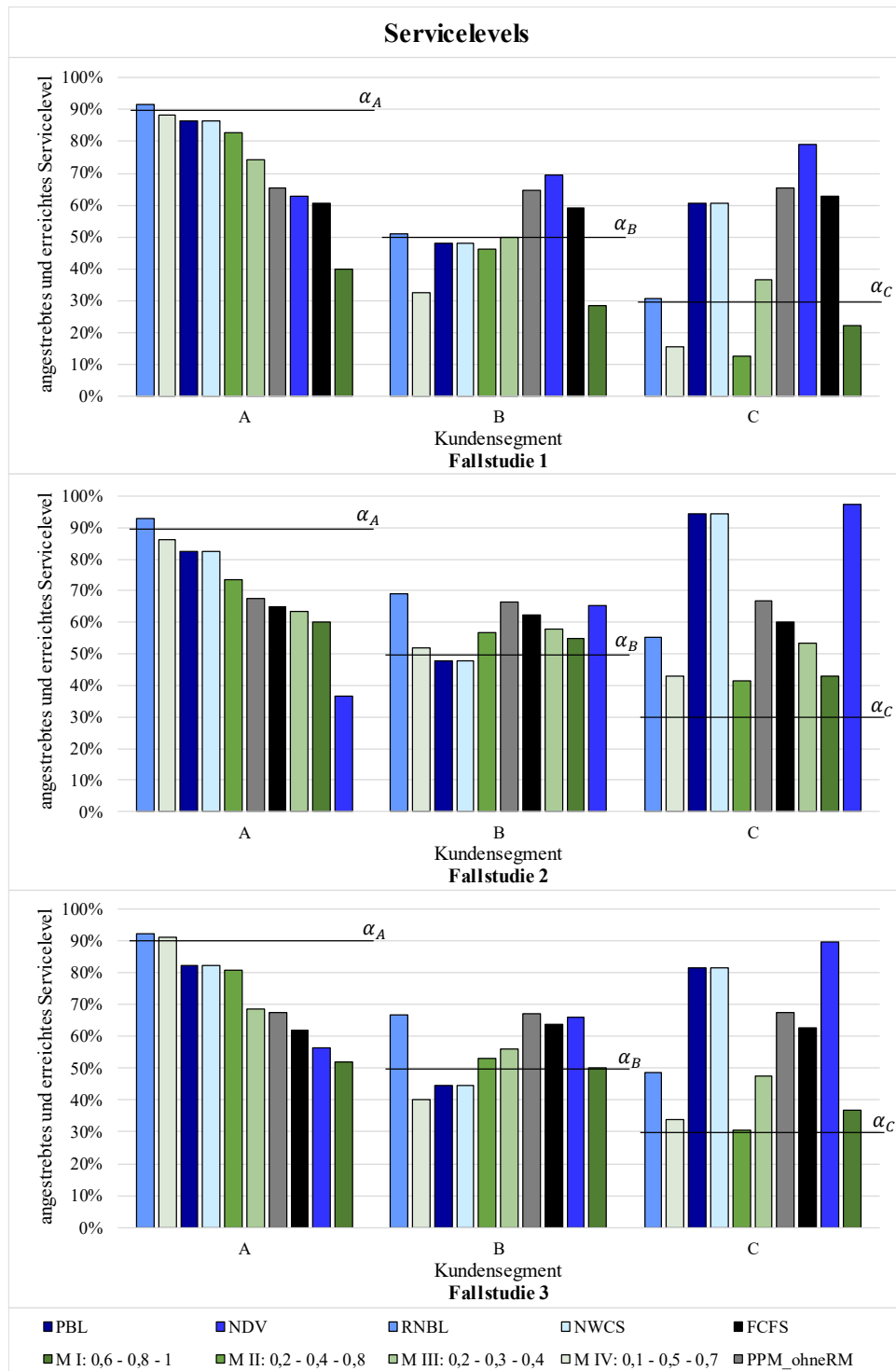


Abbildung 9.2: Sortierte durchschnittlich erreichte Servicelevels im Vergleich

Im Gegensatz zu den Profitergebnissen kann bei den erreichten Servicelevels der A-Kunden über alle Fallstudien hinweg eine feste Reihenfolge bezüglich der Strategien, welche zu den fünf höchsten Servicelevels der A-Kunden führen, beobachtet werden. Das beste Servicelevel wird mit der RNBL Strategie erreicht. Mit dieser Strategie wird über alle Fallstudien hinweg die Einhaltung des hohen angestrebten Servicelevels α_A von 90% ermöglicht, bzw. sogar überschritten. In der dritten Fallstudie wird neben der RNBL Strategie auch bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV das angestrebte Servicelevel α_A überschritten. Bei den ersten beiden Fallstudien sind mit dem vierten Multiplikatorenansatz minimale Abweichungen von dem angestrebten Servicelevel α_A zu verzeichnen. Das drittbeste Servicelevelergebnis bezüglich der A-Kunden wird von den Strategien PBL und NWCS erzielt. Anschließend führt der Multiplikatorenansatz M II zum nächstbesten Servicelevel der A-Kunden, wobei in der Fallstudie 2 das mit dieser Strategie erreichte Servicelevel mit 74,43% das angestrebte Servicelevel α_A von 90% deutlich unterschreitet. Bei den übrigen Strategien sind teilweise über die Fallstudien hinweg unterschiedliche Reihenfolgen zu beobachten. Gemeinsam haben diese Strategien jedoch, dass sie das angestrebte Servicelevel α_A in der Fallstudie 1 um mindestens 15,64%, in der Fallstudie 2 um mindestens 22,30% und in der Fallstudie 3 um mindestens 21,34% unterschreiten.

Jedoch sollten auch die mit den verschiedenen Ansätzen erreichten Servicelevels der B- und C-Kunden berücksichtigt werden. Anhand der Abbildung 9.2 wird schnell ersichtlich, dass die Sortierung nach dem erreichten Servicelevel der A-Kunden bei den Kundensegmenten B und C nicht zwangsläufig zu einer absteigenden Reihenfolge der erreichten Servicelevels führt. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass die angestrebten Servicelevels α_B und α_C nicht immer erreicht werden, obwohl diese mit 50% und 30% deutlich geringer als α_A mit 90% angesetzt sind. Grund dafür sind unter anderem die im Vergleich zu dem Segment A geringeren Strafkosten $Pdev_B$ bzw. $Pdev_C$ für Abweichungen von den angestrebten Servicelevels α_B bzw. α_C . Lediglich bei den Fallstudien 2 und 3 kann das angestrebte Servicelevel α_C der C-Kunden mit allen Strategien erreicht bzw. überschritten werden. Bei diesen Fallstudien ist im Gegensatz zur ersten Fallstudie der Anteil der von C-Kunden erteilten Aufträge höher. Je höher der Anteil an Aufträgen, welcher aus einem Kundensegment stammt, ist, desto geringer ist der Einfluss eines einzelnen Auftrags aus diesem Kundensegment. Beispielsweise werden in der dritten Fallstudie dreizehn Aufträge von C-Kunden gestellt. Pro abgelehntem Auftrag sinkt das erreichte Servicelevel um circa 7,69% ($\cong 1/13$). Bei der ersten Fallstudie hingegen stammen nur acht Aufträge von C-Kunden. Mit jedem abgelehnten Auftrag verringert sich bei dieser Fallstudie das Servicelevel um 12,5% ($\cong 1/8$). Demnach fällt bei der ersten Fallstudie eine Ablehnung eines Auftrags aus dem Kundensegment C stärker ins Gewicht. Unter Verwendung der Multiplikatorenansätze M I, M II und M IV wird bei der ersten Fallstudie das angestrebte Servicelevel α_C nicht erreicht. Die Gemeinsamkeit dieser Multiplikatorenansätze ist der vergleichsweise relative hohe Wert des kundenspezifischen Multiplikators $multi_C$, wodurch die Bid-Preis-Hürde für Aufträge von C-Kunden nur geringfügig gesenkt wird. Alle anderen

Strategien und somit auch alle mengenorientierten Strategien ermöglichen die Einhaltung des angestrebten Servicelevels α_C .

Bei den B-Kunden ist ebenfalls der Anteil der von diesen Kunden gestellten Aufträgen in den Fallstudien 2 und 3 gegenüber der ersten Fallstudie höher. Dies führt dazu, dass es in der zweiten und dritten Fallstudie insgesamt mit mehr Strategien möglich ist, das angestrebte Servicelevel α_B zu erfüllen bzw. zu übersteigen. Auffällig ist, dass über alle Fallstudien hinweg mit den Strategien PBL und NWCS das Servicelevel α_B der B-Kunden nicht erreicht wird. Dies liegt an den niedrigen einfachen Buchungslimits x_{qB} für Aufträge aus dem Kundensegment B. In der ersten Fallstudie kann zusätzlich mit keinem der erlösorientierten Ansätze das Servicelevel α_B erreicht werden, wobei bei Verwendung des dritten Multiplikatorenansatzes das erreichte Servicelevel mit 49,97% das angestrebte Servicelevel α_B von 50% nur sehr knapp verfehlt. Bei den anderen beiden Fallstudien fallen die Servicelevelergebnisse der B-Kunden, welche mit den erlösorientierten Ansätzen erreicht werden, im Vergleich zur ersten Fallstudie besser aus. Bei der dritten Fallstudie wird neben den Strategien PBL und NWCS auch bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV das angestrebte Servicelevel α_B nicht erreicht.

Eine weitere Auffälligkeit, die bezüglich der Servicelevels festgehalten werden sollte, ist, dass mit der NDV Strategie das erreichte Servicelevel der C-Kunden in allen Fallstudien jeweils höher als das der B-Kunden und das wiederum höher als das der A-Kunden ist. Diese Auffälligkeit ist mit der Schachtelungshierarchie zu erklären, bei welcher C-Kunden an oberster und A-Kunden an unterster Stelle stehen. Darüber hinaus führen die Vergleichsstrategien FCFS und PPM_ohneRM über alle Fallstudien und Kundensegmente hinweg zu ähnlichen Servicelevels. Folglich ist keine Bevorzugung bzw. Priorisierung eines Kundensegments vorhanden. Insgesamt ist hinsichtlich der Servicelevelergebnisse die RNBL Strategie deutlich hervorzuheben. Nur mit dieser Strategie können in den Fallstudien 1, 2 und 3 alle angestrebten Servicelevels α_k erreicht werden.

Als weiterer Vergleichsaspekt zwischen den mengen- und erlösorientierten Ansätzen wird im Folgenden die Anzahl der Ablehnungen betrachtet. In Abbildung 9.3 sind die Gesamtanzahl der Ablehnungen sowie für die RM Ansätze die Ablehnungen in aufgeschlüsselter Darstellung sortiert aufgeführt. Die Sortierung ist von der Gesamtanzahl der Ablehnungen abhängig. An linker Stelle wird jeweils die Strategie aufgeführt, welche zu der geringsten Anzahl an Ablehnungen führt, und an rechter Stelle die Strategie, welche die höchste Anzahl an Ablehnungen zur Folge hat. Über alle Fallstudien hinweg ist das Muster zu erkennen, dass die mengenorientierten Ansätze jeweils zu einer geringeren Anzahl an Ablehnungen und die erlösorientierten Ansätze jeweils zu einer höheren Anzahl an Ablehnungen führen. Die Vergleichsstrategien PPM_ohneRM und FCFS sind in der Mitte angesiedelt. Innerhalb der mengenorientierten Ansätze ist über die Fallstudien hinweg keine feste Reihenfolge vorhanden. Allerdings fällt bei den mengenorientierten Ansätzen die Gesamtanzahl an Ablehnungen sehr ähnlich aus und weicht für jede Strategie über die Fallstudien hinweg um weniger als einen Auftrag ab. Bei den erlösorientierten

Ansätzen ist eher eine feste Reihenfolge zu beobachten. Der dritte Multiplikatorenansatz führt über alle Fallstudien hinweg immer zu der geringsten Anzahl an Ablehnungen und der erste Multiplikatorenansatz immer zu der höchsten Anzahl an Ablehnungen. Dabei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass selbst die geringste Anzahl an Ablehnungen der erlösorientierten Strategien immer noch höher als bei den Vergleichsstrategien und allen mengenorientierten Ansätzen ist. Ferner fällt bei Verwendung des ersten Multiplikatorenansatzes die Gesamtanzahl der Ablehnungen sehr unterschiedlich aus.

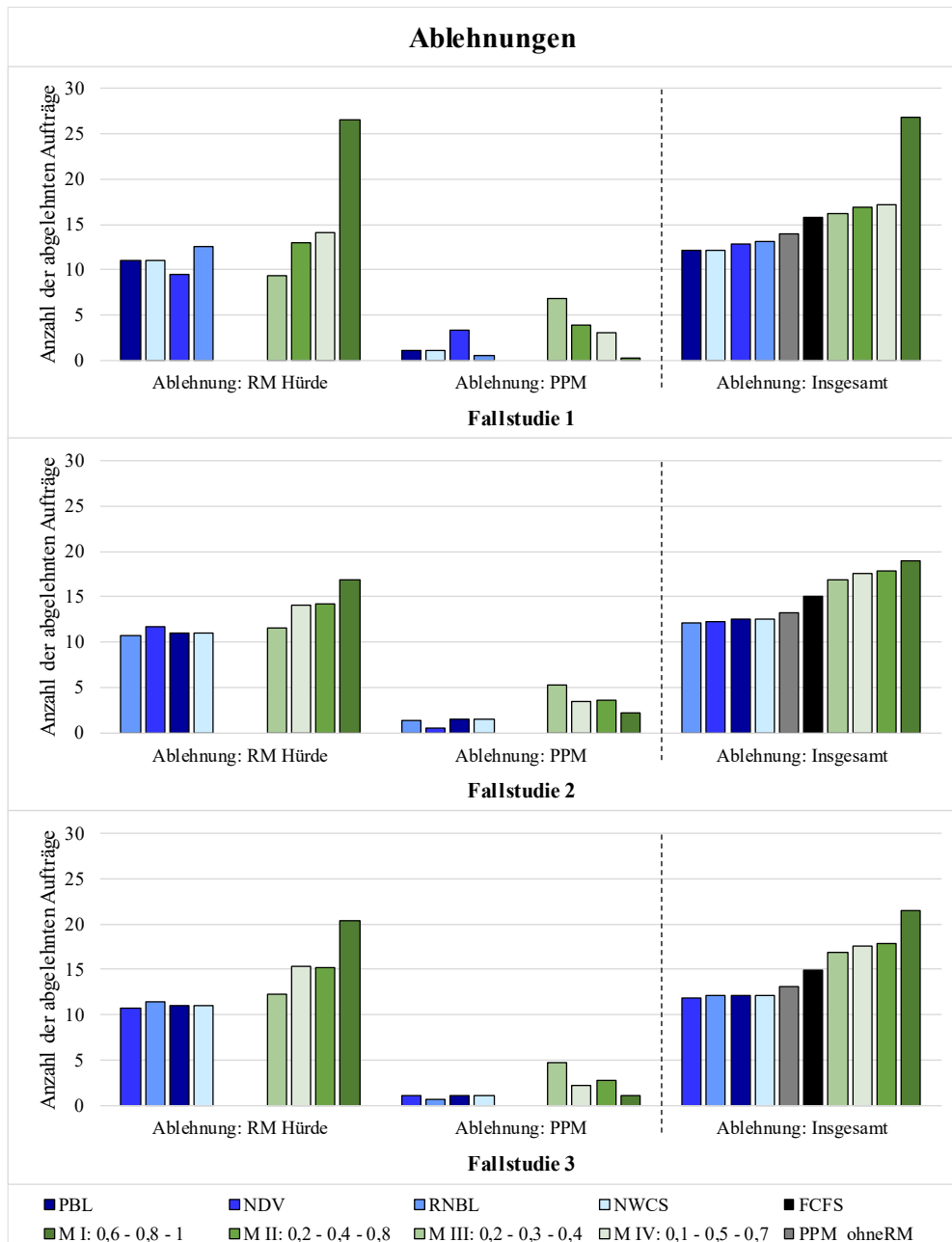


Abbildung 9.3: Sortierte durchschnittliche Anzahl an Ablehnungen im Vergleich

Bei allen RM Ansätzen ist zu beobachten, dass die Anzahl der Ablehnungen aufgrund der RM Hürde und folglich aufgrund der Buchungslimits bzw. der Bid-Preise jeweils höher ausfällt als aufgrund der zweiten Hürde und demnach aufgrund des Produktionsplanungsmodells. Um Rückschlüsse über die RM

Hürde im Allgemeinen zu ziehen, sollten jedoch auch die Profitergebnisse und die erreichten Servicelevels berücksichtigt werden. Eine hohe Anzahl an Ablehnungen aufgrund der RM Hürde deutet nicht zwangsläufig auf eine große Effektivität der Hürde hin. Die Ergebnisse, welche mit dem ersten Multiplikatorenansatz erreicht werden, zeigen dies. Die auffällig hohe Anzahl an Ablehnungen, welche auf den Bid-Preisen basieren, führt dazu, dass bei den Fallstudien 1 und 3 sogar mehr als 50% aller Aufträge abgelehnt werden. Dies wiederum hat schlechte Profitergebnisse und geringe erreichte Servicelevels zur Folge. Allerdings hat beispielsweise die RNBL Strategie in den Fallstudien 1 und 3 von den mengenorientierten Ansätzen die höchste Anzahl der Ablehnungen in der ersten Hürde und nur mit dieser Strategie können alle angestrebten Servicelevels α_k erreicht werden.

Als letzter Vergleichspunkt wird mithilfe der Abbildung 9.4 ein Überblick über die durchschnittlich benötigte Rechenzeit pro Datensatz gegeben. Da alle Berechnungen auf demselben Computer durchgeführt wurden, ist ein unmittelbarer Vergleich möglich. Auch diese Darstellung ist für jede Fallstudie sortiert, sodass ganz links jeweils die Strategie mit der kürzesten Rechenzeit und ganz rechts jeweils die Strategie mit der längsten Rechenzeit aufgeführt ist. FCFS wird aufgrund der Einfachheit dieser Strategie nicht aufgeführt, da die Rechenzeiten vernachlässigbar sind. Auffällig ist, dass die Vergleichsstrategie PPM_ohneRM stets mit Abstand die längste Rechenzeit beansprucht. Die Rechenzeiten der RM Strategien fallen größtenteils sehr gering aus. Lediglich die Strategien NDV und RNBL fallen zum Teil durch etwas längere Rechenzeiten auf. Umso ausgeglichener die geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} ausfallen, desto weniger Ablehnungen werden aufgrund der ersten Hürde im Auftragsannahmeprozess vorgenommen. Dies bringt jedoch für die mengenorientierten Strategien RNBL und NDV zum Teil eine höhere Rechenzeit mit sich, wie die Ergebnisse in der Abbildung 9.4 zeigen.

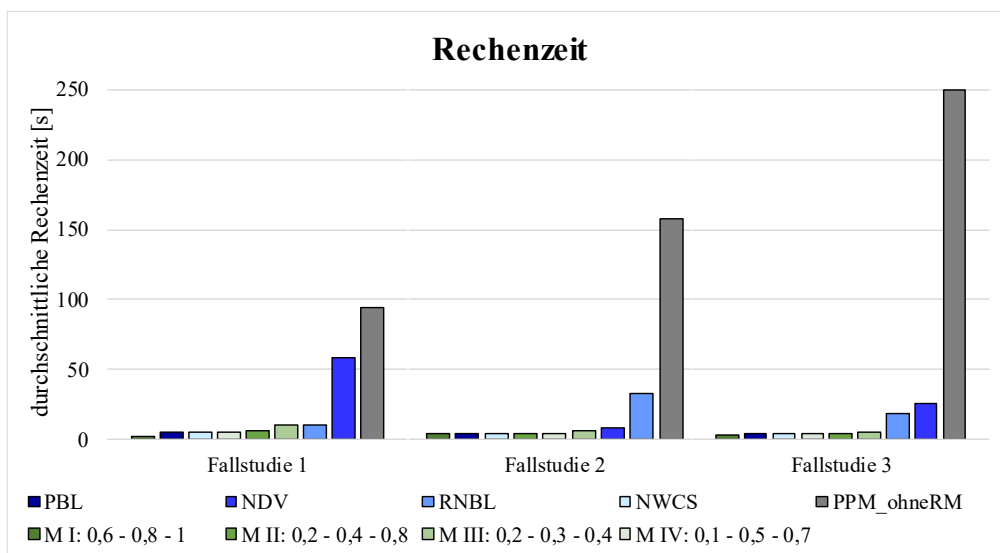


Abbildung 9.4: Sortierte durchschnittlich benötigte Rechenzeit für den Auftragsannahmeprozess pro Datensatz

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es keine Strategie gibt, welche die anderen Ansätze in allen wichtigen Aspekten dominiert. Hinsichtlich der Profitergebnisse führt die Verwendung des

Multiplikatorenansatzes M III zu dem besten Ergebnis. Allerdings sind bei dieser Strategie Abstriche bei der Erreichung der angestrebten Servicelevels α_k festzustellen. Wenn jedoch die Erreichung dieser im Vordergrund steht, sollte die Schachtelungsstrategie RNBL angewendet werden. Folglich sind insbesondere diese beiden Ansätze herauszustellen und werden in den nachfolgenden Sensitivitätsanalysen tiefgreifender analysiert. Um je mengen- und erlösorientiertem Ansatz zwei Strategien zu untersuchen, wird auch der zweitbeste Buchungslimit- und Bid-Preis-Ansatz in die nachfolgende Analyse mit aufgenommen. Bei den mengenorientierten Ansätzen kommt die NDV Schachtelungsstrategie hinzu. Zwar sind die Servicelevelergebnisse dieser Strategie insbesondere für die wichtigen A-Kunden eher schlecht, jedoch zählen die mit dieser Strategie erreichten Profitergebnisse immer zu den besten Ergebnissen und weichen in keiner Fallstudie um mehr als 5% von dem Ergebnis der FCFS Strategie ab.

Als zweite erlösorientierte Strategie wird die Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV weiter betrachtet. Mit dieser Strategie können am ehesten die angestrebten Servicelevels α_k eingehalten werden. Auch hier steht besonders die Einhaltung des Servicelevels α_A im Vordergrund. Darüber hinaus sind die Profitergebnisse immer noch in einem sehr guten Bereich. In den ersten beiden Fallstudien weicht das Ergebnis um weniger als 5% von dem Profitergebnis der FCFS Strategie ab. Insbesondere in der zweiten Fallstudie kann mit durchschnittlich 97,70% ein sehr gutes Profitergebnis erzielt werden. In der dritten Fallstudie fällt das Profitergebnis mit 93,02% geringer, aber immer noch sehr gut aus.

Zuzüglich zu den vier ausgewählten RM Strategien wird die Vergleichsstrategie FCFS in den nachfolgenden Analysen mit betrachtet. Durch FCFS werden stets sehr gute Profitergebnisse erzielt, allerdings ist bei der Auftragsannahmeentscheidung keinerlei Priorisierung der verschiedenen Kundensegmente vorhanden. Die zweite Vergleichsstrategie PPM_ohneRM wird nachfolgend nicht weiter betrachtet. Zwar werden durch diese Strategie minimal bessere Servicelevels als mit der FCFS Strategie erzielt, jedoch fallen die benötigten Rechenzeiten unverhältnismäßig hoch aus.

9.2 Sensitivitätsanalysen

Die mengenorientierten Strategien RNBL und NDV, die erlösorientierten Strategien unter Verwendung der Multiplikatorenansätze M III und M IV sowie FCFS werden in den nachfolgenden Sensitivitätsanalysen genauer betrachtet. Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen werden einzelne Parameterwerte variiert und untersucht, welchen Einfluss diese Variationen auf die mit den unterschiedlichen Strategien ermittelten Lösungen besitzen. Demnach wird die Performance der verschiedenen Strategien bei veränderten Parameterwerten analysiert und herausgearbeitet, inwiefern die Performance robust gegenüber variierten Werten ist.

Nicht jeder Parameter ist für eine Sensitivitätsanalyse gleichermaßen geeignet. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Variation eines Parameters nicht einen Einfluss auf noch weitere Parameterwerte ausübt und die veränderten Parameterwerte steuerbar und nicht willkürlich sind. Wenn zu viele Parameter

gleichzeitig variiert werden, können Veränderungen der Lösungen nicht oder nur sehr eingeschränkt nachvollzogen und begründet werden. Aus diesem Grund ist beispielsweise eine Variation der durchschnittlichen Deckungsbeiträge aCM_{qk} nicht sinnvoll, da diese einen direkten Einfluss auf die Werte der individuellen Deckungsbeiträge CM_j besitzen. Folglich müssten mehrere Parameter gleichzeitig angepasst werden. Zusätzlich basieren die Werte der individuellen Deckungsbeiträge CM_j auf zufällig generierten Daten. Demnach würde die Variation dieser Werte keinem speziellen Muster folgen, sondern wäre willkürlich. Dadurch sind begründete Rückschlüsse nicht möglich. Gleiches gilt für die maximalen Bearbeitungszeiten $mProd_q$ und die individuellen Bearbeitungszeiten $Prod_j$. Werden die maximalen Bearbeitungszeiten $mProd_q$ verändert, zieht dies auch eine notwendige Veränderung der individuellen Bearbeitungszeiten $Prod_j$ nach sich. Diese wiederum werden zufällig generiert, um individuelle Zeiten darzustellen.

Auch die Variation der erwarteten Nachfrage DF_{qk} würde zu viele Parameter gleichzeitig beeinflussen. Wird die erwartete Nachfrage DF_{qk} erhöht, kommen neue Aufträge mit auftragsspezifischen Daten dazu. Bei einer Senkung der erwarteten Nachfrage DF_{qk} gibt es ebenfalls viele Variationsmöglichkeiten. Allein, wenn die Nachfrage um nur einen Auftrag verringert wird, bestehen bei dem Parameter DF_{qk} und der gewählten Fallstudien neun verschiedene Möglichkeiten, in welchem Kundensegment k und welcher Auftragsgruppe q die Nachfrage DF_{qk} reduziert wird. In der nächsten, detaillierteren Ebene existieren dann ggf. weiterhin verschiedene Möglichkeiten, welcher konkrete Auftrag j nicht eintrifft. Demzufolge wird von der Variation der Nachfrage DF_{qk} und der zuvor genannten Parameter aCM_{qk} , CM_j , $mProd_q$ und $Prod_j$ abgesehen.

Die Parameter D_j , \bar{D}_j , R_j und \bar{R}_j , welche den Bearbeitungszeitraum eines Auftrags j begrenzen, werden ebenfalls nicht für Sensitivitätsanalysen ausgewählt. Die Variation dieser Parameter für nur einen Auftrag j ist wenig aufschlussreich bezüglich der Performance der entwickelten Strategien. Darüber hinaus werden diese Daten durch die zufälligen Auftragseingänge der unterschiedlichen Datensätze innerhalb einer Fallstudie bereits in gewisser Hinsicht variiert. Ferner steht die Auftragsannahmeentscheidung im Fokus der entwickelten Ansätze und nicht die Produktionsplanung, auf welche diese Parameter hauptsächlich einen Einfluss hätten. Gleiches gilt für die Rüstzeiten ST_{ji} und die Rüstkosten SC_{ji} . Auch diese beeinflussen hauptsächlich die Produktionsplanung und nicht die Auftragsannahmeentscheidung. Zusätzlich sind diese Parameter eng miteinander verknüpft und es gäbe sehr viele Möglichkeiten, diese zu variieren.

Weitere Parameter sind die Strafkostensätze PE_q , PT_k , PU und $Pdev_k$. Da es in den drei Fallstudien bei allen Strategien nur sehr selten zu verfrühten Produktionsbeginnen kommt, hätte eine Variation des Strafkostensatzes PE_q nur einen sehr geringen bis vermutlich gar keinen Einfluss auf die ermittelten

Lösungen. Aus diesem Grund wird von der Variation dieser Parameter abgesehen. Verspätungen hingegen können in den Fallstudien häufiger und zum Teil auch in recht hohem Ausmaß beobachtet werden. Aus diesem Grund wird der Parameter PT_k für eine Sensitivitätsanalyse ausgewählt.

Mit PU wird die ungenutzte Kapazität bestraft. Da es sich hierbei lediglich um die Bestrafung der abgeschätzten ungenutzten Kapazität handelt und der Wert nach einer festen Formel berechnet wird (s. Formel (6.1)), wird dieser Parameter nicht variiert. Zwar ist der Anteil der ungenutzten Kapazität bei den entwickelten Strategien deutlich höher als bei der Vergleichsstrategie FCFS, allerdings ist dies vorrangig auf die RM Hürde im Auftragsannahmeprozess zurückzuführen. Diese Schlussfolgerung basiert zum einen darauf, dass mehr Aufträge durch die erste als durch die zweite Hürde abgelehnt werden (s. bspw. Abbildung 9.3), und zum anderen, dass bei der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM die Kapazitätsauslastung nach dem Ergebnis der FCFS Strategie am höchsten ist und folglich ungenutzte Kapazität nicht zwangsläufig auf das Produktionsplanungsmodell, in welchem der Parameter PU verwendet wird, zurückzuführen ist (s. bspw. Abbildung 7.2).

Die Variation des Strafkostensatzes $Pdev_k$, welcher in der Zielfunktion beider Optimierungsmodelle mit den Abweichungen dev_k von den angestrebten Servicelevels α_k multipliziert wird, wäre denkbar für eine Sensitivitätsanalyse. Es könnte untersucht werden, wie hoch der Strafkostensatz $Pdev_k$ anzusetzen ist, um einen noch größeren Effekt auf die Erreichung der angestrebten Servicelevels α_k zu besitzen. Allerdings werden laut der Lösung des Kapazitätszuweisungsmodells die angestrebten Servicelevels α_k bereits erreicht (s. Kapitel 7.3). Zusätzlich konnte in Kapitel 7.3 bei genauerer Untersuchung der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM gezeigt werden, dass die Servicelevel-Restriktionsgruppe des Produktionsplanungsmodells (5.16) auf die Lösungen keinen Effekt ausübt. Mit einer Variation von $Pdev_k$ könnte analysiert werden, ab wann diese Restriktionsgruppe innerhalb des Produktionsplanungsmodell einen sichtbaren Einfluss auf die Lösung besitzt. Interessanter ist jedoch die Variation der Servicelevels α_k . Mit einer Variation dieser kann untersucht werden, wie gut die verschiedenen Strategien bei anderen angestrebten Servicelevels α_k arbeiten und ob sich weiterhin bezüglich der Erreichung der Servicelevels α_k insbesondere die mengenorientierte Strategie RNBL und die erlösorientierte Strategie bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV als geeignet herauskristallisieren.

Ein weiterer Parameter, welcher für eine Sensitivitätsanalyse sehr interessant ist, ist die zur Verfügung stehende Kapazität CAP . Mit einer schrittweisen Senkung dieses Wertes kann die Performance der ausgewählten Strategien untersucht werden, wenn die Nachfrage die Kapazität noch deutlicher übersteigt. Eine Erhöhung der Kapazität ist nur in bedingtem Rahmen sinnvoll. In jedem Fall sollte darauf geachtet werden, dass die Anwendungsvoraussetzungen des RM erfüllt sind und demnach die Nachfrage die Kapazität übersteigt. Eine Verknappung der Kapazität ist bei der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse daher deutlich interessanter.

Für die nachfolgenden Sensitivitätsanalysen werden folglich die Parameter α_k (Kapitel 9.2.1), CAP (Kapitel 9.2.2) und PT_k (Kapitel 9.2.3) ausgewählt. Die Analysen werden anhand der Ausgangsfallstudie (Fallstudie 1) durchgeführt, bei welcher 50% der Aufträge von A-Kunden, 30% der Aufträge von B-Kunden und 20% der Aufträge von C-Kunden stammen. Die Ergebnisse der vorherigen Kapitel fallen bei den verschiedenen Fallstudien zwar zum Teil unterschiedlich aus, jedoch sind insgesamt übereinstimmende Muster bezüglich der Performance der ausgewählten Strategien erkennbar. Darüber hinaus werden lediglich die ersten 200 Datensätze der ausgewählten Fallstudie verwendet. Die Robustheitsanalysen haben gezeigt, dass bereits mit 200 Datensätzen robuste Ergebnisse vorliegen, welche sich mit zusätzlichen Datensätzen nicht erwähnenswert verändern. Demnach kann durch die verringerte Anzahl von Datensätzen die benötigte Rechenzeit zur Durchführung der vollständigen Sensitivitätsanalysen verringert werden. Somit werden mehr Parametervariationen in einer kürzeren Rechenzeit ermöglicht.

9.2.1 Variation der angestrebten Servicelevels α_k

Die Sensitivitätsanalyse der angestrebten Servicelevels α_k wird in zwei Abschnitte aufgeteilt. Im ersten Abschnitt wird lediglich das Servicelevel α_A variiert. Die Servicelevels α_B und α_C bleiben mit 50% und 30% wie in der Ausgangssituation bestehen. Im zweiten Abschnitt bleibt das Servicelevel α_A mit 90% im Vergleich zur Ausgangssituation unverändert und die Servicelevels α_B sowie α_C werden variiert. Weitere Informationen zu den Sensitivitätsanalysen werden in den jeweiligen Abschnitten gegeben.

Variation von α_A

Das für die wichtigen A-Kunden angestrebte Servicelevel α_A wird im Rahmen des ersten Abschnitts der Sensitivitätsanalyse schrittweise erhöht und gesenkt. So soll zum einen überprüft werden, inwiefern die Einhaltung eines erhöhten Servicelevels möglich ist und zum anderen, inwiefern sich Veränderungen des angestrebten Servicelevels α_A generell – also auch hinsichtlich der Kundensegmente B und C – auf die erreichten Servicelevels auswirken. Die Veränderungen von α_A erfolgt jeweils in 5%-Schritten. In den ersten zwei Variationen wird α_A um jeweils 5% erhöht, sodass in der Variation 2 eine vollständige Annahme der Aufträge aus dem Segment A angestrebt wird. In den Variationen 3 und 4 wird α_A um jeweils 5% gesenkt. Eine Übersicht über die Variationen bietet Tabelle 9.1.

Tabelle 9.1: Übersicht über die Variation von α_A

	α_A	α_B	α_C
Variation 4	80%	50%	30%
Variation 3	85%		
Ausgangssituation	90%		
Variation 1	95%		
Variation 2	100%		

Bevor auf die durchschnittlichen Ergebnisse nach Durchführung des vollständigen Auftragsannahmeprozesses eingegangen wird, werden zunächst die Ergebnisse des Kapazitätszuweisungsmodells näher beleuchtet. Das Kapazitätszuweisungsmodell bildet die Basis sowohl für die erlösorientierten als auch für die mengenorientierten Strategien. In Tabelle 9.2 werden die resultierenden einfachen Buchungslimits x_{qk} , die Werte der Abweichungsvariablen dev_k sowie der Zielfunktionswert des Optimierungsmodells aufgeführt. Die aus der Ausgangssituation bekannten Ergebnisse sind durch einen grauen Hintergrund hervorgehoben.

Mit Variation von α_A sind einige Veränderungen zu beobachten. Als erstes soll an dieser Stelle festgehalten werden, dass das angestrebte Servicelevel α_A laut dem Kapazitätszuweisungsmodell und demnach gemäß den einfachen Buchungslimits x_{qk} immer eingehalten werden kann. Gleiches gilt für das angestrebte Servicelevel α_B . Sobald eine vollständige Annahme der Aufträge von A-Kunden angestrebt wird (Variation 2: $\alpha_A = 100\%$), wird das angestrebte Servicelevel α_C der Neukunden (Segment C) unterschritten. Bei dieser Variation nimmt die Abweichungsvariable dev_C den Wert 0,175 ($\hat{=} 17,5\%$) an. Demnach wird laut dem Kapazitätszuweisungsmodell für die C-Kunden ein Servicelevel von nur 12,5% ($30\% - 17,5\% = 12,5\%$) erreicht. Da die Strafkosten $Pdev_k$ für das Kundensegment C im Vergleich zu den anderen beiden Kundensegmenten am geringsten sind, entspricht es den Erwartungen, dass es zu Abweichungen bezüglich dieses Kundensegments kommt.

Tabelle 9.2: Ergebnisse des Kapazitätszuweisungsmodells bei Variation von α_A

Kundensegment k	Auftragsgruppe q	Variation 4	Variation 3	Ausgangssituation	Variation 1	Variation 2
		$\alpha_A = 80\%$ x_{qk}	$\alpha_A = 85\%$ x_{qk}	$\alpha_A = 90\%$ x_{qk}	$\alpha_A = 95\%$ x_{qk}	$\alpha_A = 100\%$ x_{qk}
A	kurz	5	5	5	5	5
	mittel	6	7	7	7	7
	lang	0	0	1,5	3	4,5
B	kurz	3	3	3	3	3
	mittel	0	0	0	0	0
	lang	0	0	0	0	0
C	kurz	2	2	2	2	0,5
	mittel	3	3	1,5	0	0
	lang	1	0	0	0	0
dev_A		0%	0%	0%	0%	0%
dev_B		0%	0%	0%	0%	0%
dev_C		0%	0%	0%	0%	17,5%
Zielfunktionswert		14.640 GE	14.550 GE	14.385 GE	14.220 GE	13.996,25 GE

Wird die Veränderung der einfachen Buchungslimits x_{qk} betrachtet, fällt auf, dass sich lediglich die einfachen Buchungslimits der Kundensegmente A und C verändern. Die einfachen Buchungslimits x_{qB} des Kundensegments B bleiben unverändert. Weiterhin wird mit den einfachen Buchungslimits x_{qB} das angestrebte Servicelevel α_B eingehalten, aber nicht überschritten. Bezüglich der einfachen Buchungslimits x_{qA} des Kundensegments A ist mit einer Erhöhung des Servicelevels α_A zu beobachten, dass sich das Buchungslimit $x_{lang,A}$ vergrößert. Die einfachen Buchungslimits $x_{kurz,A}$ und $x_{mittel,A}$ werden bereits in der Ausgangssituation durch die Nachfrageprognose $DF_{kurz,A}$ und $DF_{mittel,A}$ begrenzt und können folglich nicht weiter erhöht werden (s. Restriktionsgruppe (5.3)). Um die limitierte Kapazität nicht zu überschreiten, wird zunächst das einfache Buchungslimit $x_{mittel,C}$ und anschließend auch $x_{kurz,C}$ verringert.

Mit verringertem Wert des Servicelevels α_A (Variationen 3 und 4) werden die einfachen Buchungslimits des Kundensegments A kleiner und die des Kundensegments C größer. Stets wird das Servicelevel α_A eingehalten, jedoch nie überschritten. Kapazität, welche nach der Gewährleistung der angestrebten Servicelevels α_k frei zugeteilt werden kann, wird für Aufträge aus dem Segment C reserviert, da durch Annahme dieser Aufträge der Zielfunktionswert gesteigert werden kann. Demzufolge ist der erreichte Zielfunktionswert bei Variation 4 ($\alpha_A = 80\%$) am höchsten und bei Variation 2 ($\alpha_A = 100\%$) am niedrigsten. Zusätzlich sei an dieser Stelle erwähnt, dass der Zielfunktionswert auch die fiktiven Strafkosten für die Abweichung von den angestrebten Servicelevels α_k enthält. Aus diesem Grund fällt der Zielfunktionswert zwischen den Variationen 1 und 2 stärker ab, da es bei Variation 2 zu Abweichungen von dem angestrebten Servicelevel α_C kommt. Von Variation 3 zu Variation 4 ist ein geringerer Unterschied zwischen den Zielfunktionswerten vorhanden, da zur Variation 4 hin das Buchungslimit $x_{mittel,A}$ reduziert und $x_{lang,C}$ erhöht wird. Demzufolge wird nicht nur das Buchungslimit eines anderen Kundensegments k , sondern auch einer anderen Auftragsgruppe q verändert. Zwischen der Variation 3, der Ausgangssituation und Variation 1 ist die Veränderung des Zielfunktionswertes linear, da jeweils genau 1,5 Tage mehr für lange Aufträge von A-Kunden und jeweils genau 1,5 Tage weniger für mittlere Aufträge von C-Kunden reserviert werden.

Nachfolgend werden die durchschnittlichen Ergebnisse der ausgewählten mengen- und erlösorientierten Strategien, welche sich über die 200 Datensätze ergeben, aufgeführt und analysiert. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Vergleichsstrategie FCFS ebenfalls mit untersucht. Da die angestrebten Servicelevels α_k in der FCFS Strategie keine Berücksichtigung finden, verändern sich die Ergebnisse nicht. Damit die Ergebnisse der ausgewählten mengen- und erlösorientierten Strategien unmittelbar mit den Ergebnissen der FCFS Strategie verglichen werden können, werden die identischen Ergebnisse der FCFS Strategie dennoch für jede Variation aufgeführt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, welcher bei den nachfolgenden Ergebnissen berücksichtigt werden sollte, ist, dass sich der kundenspezifische Multiplikator $multi_A$ des Multiplikatorenansatzes M IV mit Variation

von α_A verändert. Der vierte Multiplikatorenansatz ergibt sich aus der Rechnung $1 - \alpha_k$ (mit α_k als Dezimalzahl). Folglich variiert der kundenspezifische Multiplikator $multi_A$ zwischen 0,2 und 0. Alle anderen Daten bleiben unverändert.

In Abbildung 9.5 sind die Profitergebnisse bei Variation von α_A als Streudiagramm dargestellt. Zwischen den einzelnen Ergebnispunkten sind Verbindungslinien aufgeführt, um die Veränderung der Ergebnisse besser aufzuzeigen. Wichtig bei dieser und den folgenden Abbildungen ist, dass es sich lediglich um Verbindungslinien und nicht um eine angenommene lineare Entwicklung handelt.

Es fällt auf, dass die generelle Performance der Strategien ähnlich bleibt. So kann weiterhin mit dem erlösorientierten Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III immer das zweitbeste Ergebnis erzielt werden, welches um weniger als 1% von dem Profitergebnis der FCFS Strategie abweicht. Insbesondere bei dieser Strategie fallen die sehr robusten Profitergebnisse gegenüber der Veränderung des Servicelevels α_A auf. Als Begründung dafür können die sehr niedrigen und ähnlichen Werte der kundenspezifischen Multiplikatoren $multi_k$ von M III aufgeführt werden. Dadurch werden die Aufträge in der ersten Hürde nahezu gleichbehandelt und es werden im Vergleich zu den anderen Strategien mehr Ablehnungen auf Basis des Produktionsplanungsmodells getroffen. Dass in diesem Modell die Servicelevel-Restriktionen (5.16) und folglich die angestrebten Servicelevels α_k keinen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis besitzen, konnte bereits in Kapitel 7.3 bei näherer Betrachtung der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM gezeigt werden. Somit können die ähnlichen und auch bei Variation des angestrebten Servicelevels α_A gleichbleibenden, kundenspezifischen Multiplikatoren $multi_k$ sowie der ausbleibende Effekt der Servicelevel-Restriktionsgruppe (5.16) als Erklärung für die nahezu unveränderten Profitergebnisse der erlösorientierten Strategie unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III herangezogen werden.

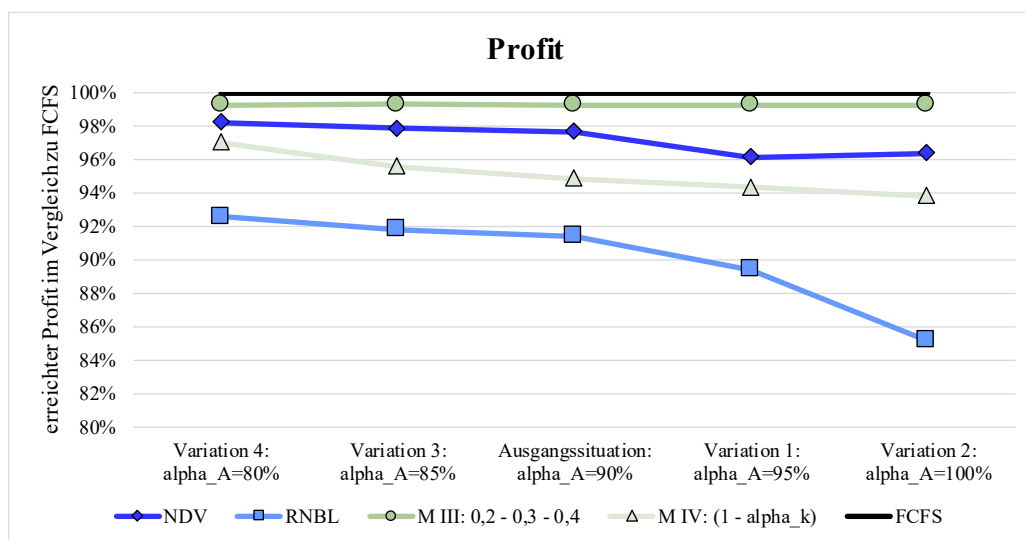


Abbildung 9.5: Durchschnittliche Profitergebnisse bei Variation von α_A

Auch die Profitergebnisse, welche mit dem vierten Multiplikatorenansatz und der NDV Strategie erreicht werden, fallen sehr gut aus. Bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV ist mit jeder Erhöhung des Servicelevels α_A jeweils ein leicht verringertes Profitergebnis zu erkennen. Dadurch, dass bei dieser Strategie eine Erhöhung von α_A zu einem verringerten Multiplikator $multi_A$ führt, wird die Bid-Preis-Hürde für Aufträge aus dem Kundensegment A weiter verringert. Da diese Aufträge jedoch mit einem geringeren kurzfristigen Profit einhergehen, führt eine Erhöhung des Servicelevels α_A zu tendenziell geringeren Profitergebnissen. Die Profitergebnisse der NDV Strategie sind bei Variation von α_A recht stabil. Bei der Variation 1 bzw. 2 ($\alpha_A = 95\%$ bzw. $\alpha_A = 100\%$) ist eine Verringerung des Profits zu beobachten, weil mehr Aufträge aus dem Kundensegment A angenommen werden. Dies wird auch die Analyse der erreichten Servicelevels belegen.

Mit der RNBL Strategie wird das geringste Profitergebnis erreicht. Dies ist dadurch zu erklären, dass bevorzugt Aufträge von A-Kunden angenommen werden, welche in der kurzfristigen Perspektive zu einem geringeren Profit führen. Insbesondere bei Erhöhung des angestrebten Servicelevels α_A fällt bei der RNBL Strategie das Profitergebnis stärker ab. Dadurch, dass gemäß den einfachen Buchungslimits x_{qk} alle Aufträge von A-Kunden angenommen werden sollten, dies aber aus planungstechnischen Gründen nicht immer möglich ist, kommt es bei der RNBL Strategie vermehrt dazu, dass Kapazität ungenutzt bleibt. Dies belegen die in Abbildung 9.6 dargestellten Ergebnisse. Diese Abbildung ist nach dem gleichen Schema wie Abbildung 9.5 aufgebaut. Folglich stellen auch in dieser Abbildung die Linien lediglich Verbindungslinien zur Orientierung und keine angenommene lineare Entwicklung dar.

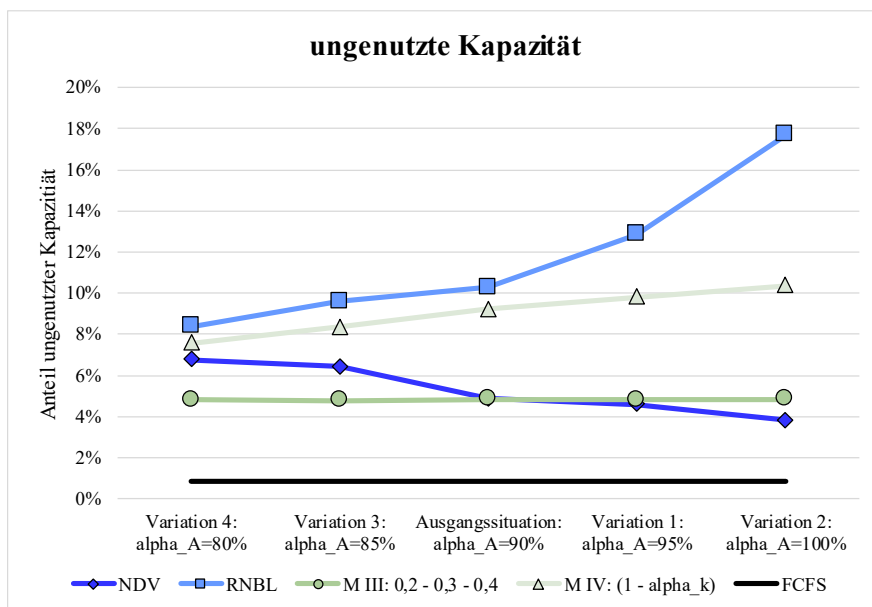


Abbildung 9.6: Durchschnittlich ungenutzte Kapazität bei Variation von α_A

Bei der NDV Strategie kann durch die im Vergleich zur RNBL Strategie gegensätzliche Schachtelung ein geringerer Anteil an ungenutzter Kapazität erreicht werden. In Abbildung 9.6 ist diese gegensätzliche Veränderung des Anteils der ungenutzten Kapazität zu sehen. Umso höher das Servicelevel α_A ist, desto geringer ist der Anteil der ungenutzten Kapazität bei Verwendung der NDV Strategie. Dadurch,

dass mit Erhöhung des Servicelevels α_A gemäß den einfachen Buchungslimits x_{qk} mehr Kapazität für Aufträge der A-Kunden reserviert wird und diese wiederum bei der NDV Strategie auch für die Kundensegmente B und C verfügbar ist, werden die geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} bei der NDV Strategie für alle Kundensegmente immer ausgeglichener. Somit ist die erste Hürde im Auftragsannahmeprozess für alle Kundensegmente nahezu identisch. Dass das Produktionsplanungsmodell zu einer hohen Kapazitätsauslastung führt, zeigen sowohl die Ergebnisse der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM aus den vorherigen Kapiteln (s. bspw. Abbildung 7.2) als auch die Ergebnisse der erlösorientierten Strategie bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III.

Die erreichten Servicelevels sind in Abbildung 9.7 für jedes Kundensegment einzeln und ebenfalls nach dem gleichen Schema der vorherigen Abbildungen dargestellt. In der obersten Graphik sind die erreichten Servicelevels für das Kundensegment A, in der mittleren für das Kundensegment B und in der untersten für das Kundensegment C abgebildet. Auch die Veränderung des angestrebten Servicelevels α_A ist der obersten Graphik zu entnehmen.

Auch bei Variation des Servicelevels α_A kann weiterhin mit der RNBL Strategie das höchste Servicelevel für die wichtigen A-Kunden erzielt werden. Bei Verringerung des angestrebten Servicelevels α_A wird dieses sowohl von der RNBL Strategie als auch von dem erlösorientierten Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV erreicht. Bei einem erhöhten, angestrebten Servicelevel α_A , d.h. bei den Variationen 1 und 2, wird dieses Servicelevel im Durchschnitt nicht mehr erreicht. Dies ist auf ungenutzte Kapazität zurückzuführen, welche insbesondere bei der RNBL Strategie und dem erlösorientierten Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV zu beobachten ist (s. Abbildung 9.6). Festzuhalten ist an dieser Stelle jedoch, dass lediglich mit der RNBL Strategie ein Servicelevel für A-Kunden von über 90% erreicht wird. Ermöglicht wird dieses hohe Servicelevel der A-Kunden zu Lasten der C-Kunden, was durch die Betrachtung der einfachen Buchungslimits x_{qk} zu erklären ist (s. Tabelle 9.2). Die geringen Kontingente für Aufträge der C-Kunden führen dazu, dass bei Erhöhung des Servicelevels α_A bei der RNBL Strategie insbesondere das Servicelevel dieser Kunden deutlich abfällt und infolgedessen auch ein niedrigeres Profitergebnis erzielt wird.

Bei Verwendung der erlösorientierten Ansätze verändern sich die erreichten Servicelevels bei Variation von α_A meist nur geringfügig. Am ehesten sind bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV leichte Veränderungen zu erkennen. Diese sind dadurch zu erklären, dass die Variation von α_A bei dieser Strategie Einfluss auf den Wert des kundenspezifischen Multiplikators $multi_A$ hat. Generell ist der Einfluss jedoch relativ gering, da im Allgemeinen der Wert von $multi_A$ bei allen Variationen sehr niedrig ist und demnach die erste Hürde für Aufträge aus dem Kundensegment A sehr verringert ist.

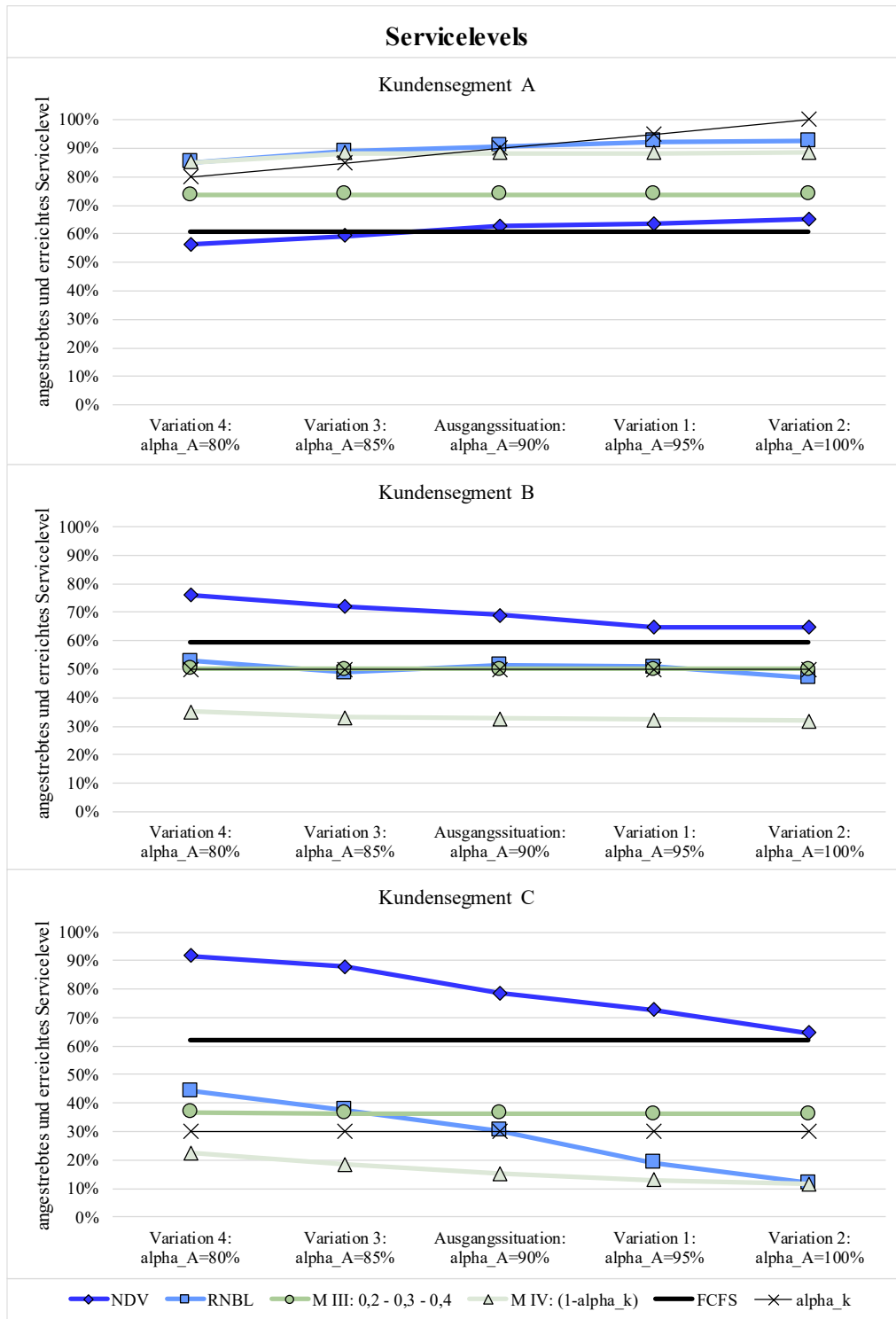


Abbildung 9.7: Durchschnittlich erreichte Servicelevels bei Variation von α_A

Etwas deutlichere Auswirkungen bei Variation von α_A sind bei den mit der NDV Strategie erreichten Servicelevels zu erkennen. Mit sinkendem α_A wird bei der NDV Strategie das Servicelevel der C-Kunden noch weiter erhöht, wohingegen mit steigendem α_A sich die für die drei Kundensegmente erreichten Servicelevels eher angleichen. Bei Variation 2 ($\alpha_A = 100\%$) sind die mit der NDV Strategie erreichten Servicelevels mit 65,18% für A-Kunden, 64,79% für B-Kunden und 64,56% für C-Kunden

nahezu identisch. Diese Ergebnisse sind mit der Veränderung der einfachen Buchungslimits x_{qk} (s. Tabelle 9.2) und der verwendeten Schachtelungshierarchie zu begründen. Umso höher das Servicelevel α_A ist, desto mehr Kapazität wird laut den einfachen Buchungslimits x_{qk} für Aufträge von A-Kunden reserviert. Bei der NDV Strategie ist diese durch die Schachtelung jedoch auch für Aufträge von B- und C-Kunden verfügbar. Folglich verringert sich der Effekt der RM Hürde mit einem erhöhten Servicelevel α_A . Deutlich zu sehen ist dies auch anhand der aufgeschlüsselten Darstellung der Ablehnungen, welche in Abbildung 9.8 nach bekanntem Schema aufgeführt ist. Umso höher das Servicelevel α_A ist, desto mehr Ablehnungen sind bei der NDV Strategie auf die zweite Hürde im Auftragsannahmeprozess zurückzuführen. Bei den anderen Strategien sind kaum Veränderungen im Vergleich zur Ausgangssituation zu erkennen.

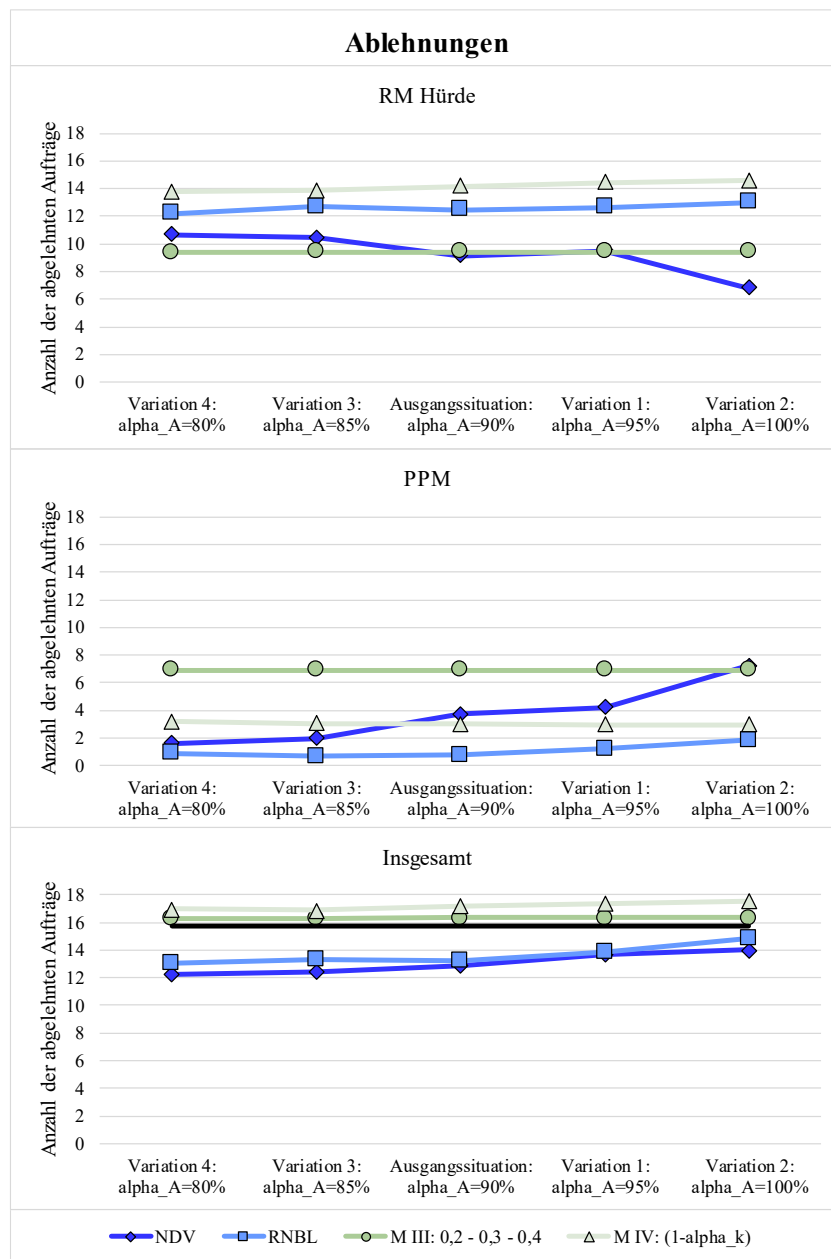


Abbildung 9.8: Aufgeschlüsselte Darstellung der Ablehnungen bei Variation von α_A

Insgesamt zeigt die Variation des Servicelevels α_A , dass hauptsächlich Veränderungen bezüglich der Kundensegmente A und C zu beobachten sind. Mit Senkung des Servicelevels α_A (Variationen 3 und 4) werden tendenziell mehr Aufträge von C-Kunden angenommen, wodurch höhere Profitergebnisse ermöglicht werden. Mit Erhöhung des Servicelevels α_A (Variationen 1 und 2) ist ein gegenteiliger Effekt zu beobachten. Die Profitergebnisse fallen geringer aus und es werden tendenziell mehr Aufträge von A-Kunden angenommen. Allerdings wird bei den Variationen 1 und 2 das erhöhte Servicelevel α_A von keiner Strategie erreicht. Grundsätzlich führen die Strategien bei Variation von α_A zu denselben Mustern. Zusätzlich fällt auf, dass die Ergebnisse der erlösorientierten Strategien robuster gegenüber Veränderungen des Servicelevels α_A als die der mengenorientierten Strategien sind, da sich die Ergebnisse der ausgewählten Bid-Preis-Ansätze in einem geringeren Umfang verändern.

Variation von α_B und α_C

Im zweiten Abschnitt der Sensitivitätsanalyse von α_k stehen die Servicelevels α_B und α_C im Fokus der Untersuchungen. In der nachfolgenden Analyse werden beide Servicelevels jeweils drei Mal in 10%-Schritten erhöht. Dabei werden alle resultierenden Kombinationsmöglichkeiten berücksichtigt. Eine Übersicht über die verschiedenen Variationen ist in Tabelle 9.3 aufgeführt. Erneut werden die Werte der Ausgangssituation durch einen grauen Hintergrund hervorgehoben. Durch die betrachteten Variationen ergibt sich unter anderem auch die Situation, in welcher sowohl für B-Kunden als auch für C-Kunden ein Servicelevel von 50% und folglich ein identisches Servicelevel angestrebt wird (s. Variation 2).

Tabelle 9.3: Übersicht über die Variation von α_B und α_C

	α_A	α_B	α_C
Ausgangssituation	90%	50%	30%
Variation 1		50%	40%
Variation 2		50%	50%
Variation 3		60%	30%
Variation 4		60%	40%
Variation 5		60%	50%
Variation 6		70%	30%
Variation 7		70%	40%
Variation 8		70%	50%

Da die Ergebnisse des Kapazitätszuweisungsmodells die Grundlage für die erlös- und mengenorientierten Strategien bilden, werden in Tabelle 9.4 die Ergebnisse dieses Modells übersichtlich dargestellt. Auffällig ist, dass sich die einfachen, kapazitätsorientierten Buchungslimits x_{qk} lediglich mit der Variation von α_B verändern. Dies ist dadurch zu erklären, dass das angestrebte Servicelevel α_B immer erreicht, jedoch nicht überschritten wird, anders als es bei dem angestrebten Servicelevel α_C der Fall ist. Durch die Erreichung des angestrebten Servicelevels α_B werden Strafkosten vermieden. Die noch frei verteilbare Kapazität wird für Aufträge von C-Kunden reserviert, da durch diese der kurzfristige Profit maximiert werden kann. Sobald das Servicelevel α_B auf 70% angehoben wird (Variationen 6, 7 und 8), kommt es zu Abweichungen vom Servicelevel α_C . Die angestrebten Servicelevels α_A und α_B werden weiterhin erreicht, aber nicht überschritten. Folglich kann ab Variation 6 beobachtet werden, dass keine zulässige Lösung existiert, bei welcher es nicht zu Abweichungen von den angestrebten Servicelevels α_k kommt. Wie bereits zuvor erwähnt, sind die Strafkosten $Pdev_C$ für Abweichungen vom Servicelevel α_C am geringsten, weshalb am ehesten von diesem Servicelevel und nicht von α_A oder α_B abgewichen wird.

Aufgrund der Abweichungen vom Servicelevel α_C kommt es bei den Variationen 6, 7 und 8 zu unterschiedlichen Zielfunktionswerten, obwohl die einfachen Buchungslimits x_{qk} identische Werte besitzen. Bei den anderen Variationen führen identische einfache Buchungslimits x_{qk} auch zu demselben Zielfunktionswert. Dies gilt folglich für die Ausgangssituation, Variation 1 und Variation 2 sowie für die Variation 3, Variation 4 und Variation 5. Generell ist der Zielfunktionswert bei der Ausgangssituation und bei den Variationen 1 und 2 am höchsten. Der Grund dafür ist, dass in diesen Variationen am meisten frei verfügbare Kapazität für Aufträge der C-Kunden reserviert wird.

Bevor die durchschnittlichen Ergebnisse bei Verwendung der ausgewählten Strategien präsentiert und diskutiert werden, soll an dieser Stelle noch einmal daran erinnert werden, dass die Ergebnisse der FCFS Strategie weiterhin unverändert sind, da die angestrebten Servicelevels α_k in dieser Strategie nicht berücksichtigt werden. Darüber hinaus sei hervorgehoben, dass sich mit der Variation der Servicelevels α_B und α_C die Multiplikatoren $multi_B$ und $multi_C$ des Multiplikatorenansatzes M IV verändert. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse nimmt der Multiplikator $multi_B$ Werte zwischen 0,5 und 0,3 an. Der Multiplikator $multi_C$ wird zwischen 0,7 und 0,5 variiert. Alle weiteren Daten bleiben unverändert.

Tabelle 9.4: Ergebnisse des Kapazitätszuweisungsmodells bei Variation von α_B und α_C

Kunden- segment k	Auftrags- gruppe q	Ausgangs- situation x_{qk}	Variation 1 $\alpha_B = 50\%$ $\alpha_C = 40\%$ x_{qk}	Variation 2 $\alpha_B = 50\%$ $\alpha_C = 50\%$ x_{qk}	Variation 3 $\alpha_B = 60\%$ $\alpha_C = 30\%$ x_{qk}	Variation 4 $\alpha_B = 60\%$ $\alpha_C = 40\%$ x_{qk}	Variation 5 $\alpha_B = 60\%$ $\alpha_C = 50\%$ x_{qk}	Variation 6 $\alpha_B = 70\%$ $\alpha_C = 30\%$ x_{qk}	Variation 7 $\alpha_B = 70\%$ $\alpha_C = 40\%$ x_{qk}	Variation 8 $\alpha_B = 70\%$ $\alpha_C = 50\%$ x_{qk}
A	kurz	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	mittel	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	lang	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
B	kurz	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	mittel	0	0	1,2	1,2	1,2	1,2	2,4	2,4	2,4
	lang	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	kurz	2	2	2	2	2	2	1,1	1,1	1,1
	mittel	1,5	1,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0	0	0
	lang	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dev_A		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
dev_B		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
dev_C		0%	0%	0%	0%	0%	0%	2,5%	12,5%	22,5%
Zielfunktionswert		14.385 GE	14.385 GE	14.385 GE	14.325 GE	14.325 GE	14.325 GE	14.249,75 GE	14.224,75 GE	14.199,75 GE

Wie bei der Variation des Servicelevels α_A können auch bei dem zweiten Abschnitt dieser Sensitivitätsanalyse klare Muster in den Ergebnissen erkannt werden. Die Performance der ausgewählten Strategien bleibt vergleichbar. In Abbildung 9.9 sind die Profitergebnisse bei Variation von α_B und α_C als Streudiagramm dargestellt. Erneut sind zwischen den einzelnen Ergebnispunkten Verbindungslinien zur Orientierung aufgeführt. Mit den mengenorientierten Strategien RNBL und NDV sowie mit der erlösorientierten Strategie unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III sind auch bei Variation von α_B und/oder α_C kaum veränderte Profitergebnisse zu beobachten. Dahingegen werden bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV unterschiedliche Profitergebnisse erreicht, welche sich durch die veränderten Multiplikatoren $multi_k$ erklären lassen. Anhand der Verbindungslinien ist bei dieser Strategie ein gezacktes Muster zu erkennen. Um dieses Muster zu erklären, ist es wichtig, die Variationen genauer zu betrachten. Von der Ausgangssituation wird bei den ersten zwei Variationen das Servicelevel α_C jeweils um 10% angehoben. Anschließend wird bei Variation 3 das Servicelevel α_C wieder auf den ursprünglichen Wert von 30% reduziert und α_B wird um 10% angehoben. In den zwei nachfolgenden Variationen 4 und 5 wird α_C wieder jeweils um 10% erhöht. Bei der Variation 6 ist α_C erneut auf den ursprünglichen Wert von 30% zurückgesetzt und α_B wird um 10% gesteigert. In den letzten beiden Variationen wird α_C wiederholt in 10%-Schritten angehoben. Generell ist dem Muster der veränderten Profitergebnisse bei Verwendung des vierten Multiplikatorenansatzes zu entnehmen, dass die Variation von α_C jeweils einen stärkeren Effekt auf den erzielten Profit als die Variation von α_B besitzt. Werden die Ergebnispunkte bei Erhöhung des Servicelevels α_C betrachtet (Ausgangssituation bis Variation 2; Variation 3 bis Variation 5; Variation 6 bis Variation 8), so ist zwischen diesen Ergebnissen eine deutlichere Steigerung zu beobachten, als wenn die Ergebnispunkte bei Erhöhung des Servicelevels α_B miteinander verglichen werden. Für Letzteres ist der Vergleich zwischen den Profitergebnissen der Ausgangssituation, Variation 3 und Variation 6 sowie der Variation 1, Variation 4 und Variation 7 bzw. der Variation 2, Variation 5 und Variation 8 notwendig.

Dass bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV die Variation von α_C einen größeren Einfluss auf die Profitergebnisse besitzt, liegt daran, dass der Multiplikator $multi_C$ in der Ausgangssituation mit 0,7 noch einen recht hohen Wert besitzt. Dieser wiederum wird mit der Erhöhung des Servicelevels α_C verringert. Sobald der Multiplikator $multi_k$ einen relativ niedrigen Wert besitzt, wird die erste Hürde im Auftragsannahmeprozess so weit gesenkt, dass eine weitere Verringerung dieser Hürde nicht zwangsläufig zu einem (deutlich) anderen Ergebnis führt. Diese These kann beispielsweise mit der Betrachtung des Multiplikators $multi_B$ für das Kundensegment B gestützt werden. Der Multiplikator $multi_B$ besitzt in der Ausgangssituation einen Wert von 0,5. Mit Erhöhung des Servicelevels α_B wird $multi_B$ bei Verwendung von M IV ebenfalls verringert, allerdings sind die Effekte dieser Verringerung eher geringfügig. Auch im ersten Abschnitt dieser Sensitivitätsanalyse konnten bei Variation von α_A eher geringere Veränderungen bezüglich des Profits beobachtet werden, da auch da der Multiplikator $multi_A$ bereits in der Ausgangssituation mit einem Wert von 0,1 sehr niedrig ist.

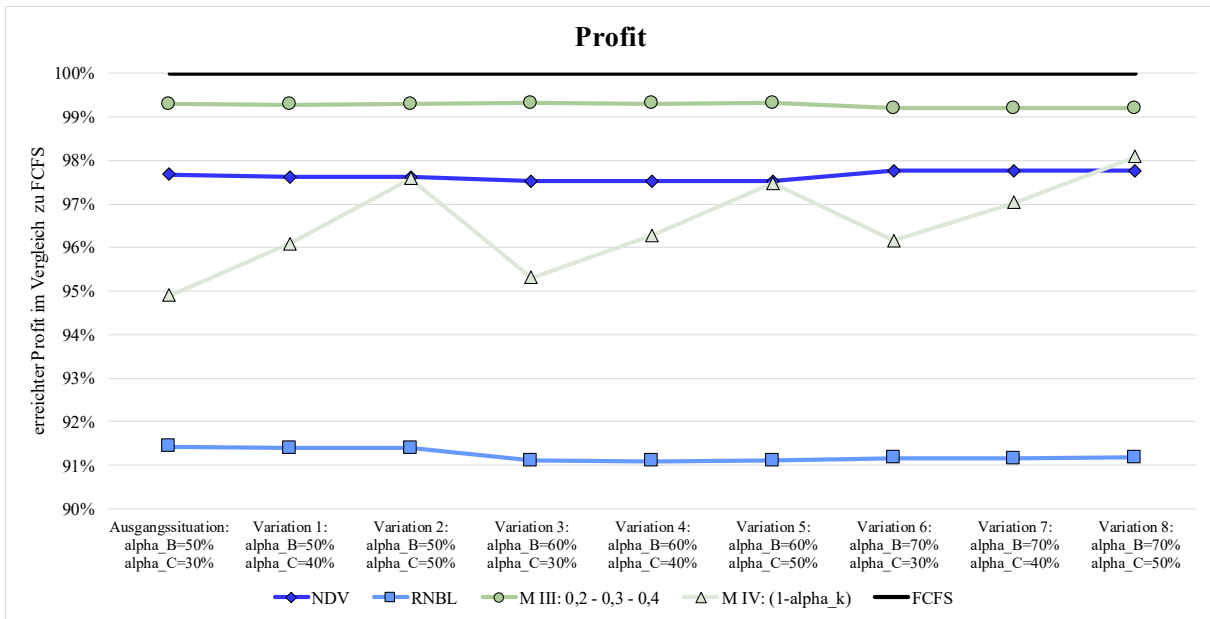


Abbildung 9.9: Durchschnittliche Profitergebnisse bei Variation von α_B und α_C

Ein weiterer wichtiger Aspekt, weshalb die Variation von α_C und folglich die des Multiplikators $multi_C$ einen größeren Einfluss auf die Profitergebnisse besitzt, ist die höhere Nachfragewertigkeit des Kundensegments C. Durch die Senkung der Bid-Preis-Hürde für Kunden aus dem Segment C können vermehrt Aufträge dieses Segments angenommen werden, wodurch ein höherer (kurzfristiger) Profit erzielt wird. Die erhöhte Anzahl an Annahmen bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV spiegelt sich auch in dem verringerten Anteil der ungenutzten Kapazität wider (s. Abbildung 9.10). Folglich kann durch geringere Werte der kundenspezifischen Multiplikatoren $multi_k$ eine höhere Kapazitätsauslastung erreicht werden. Bei den anderen Strategien verändert sich der Anteil der ungenutzten Kapazität wie bei den Profitergebnissen nur geringfügig.

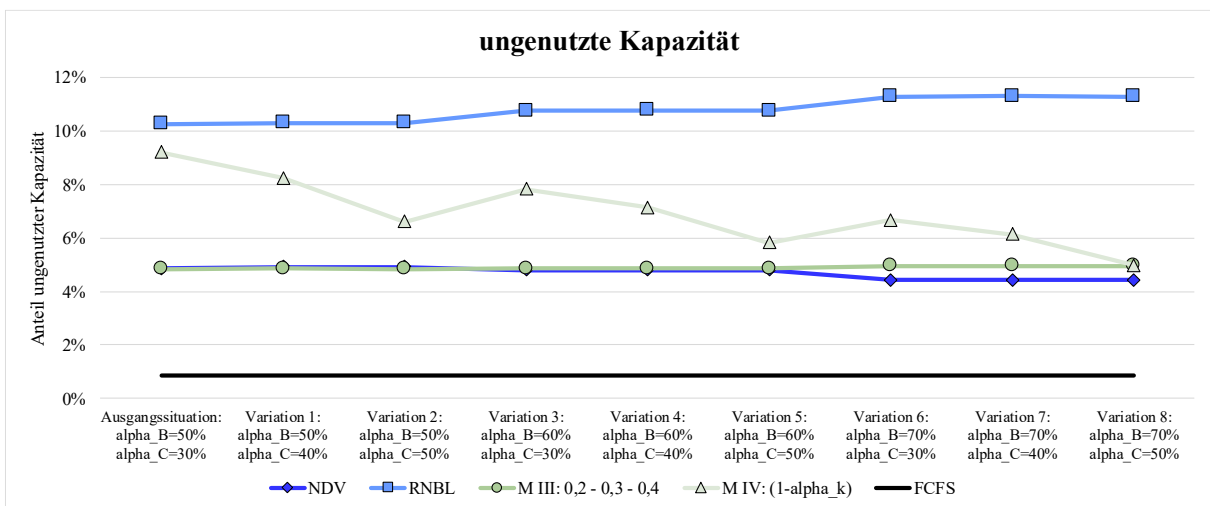


Abbildung 9.10: Durchschnittlich ungenutzte Kapazität bei Variation von α_B und α_C

Die im Durchschnitt erreichten Servicelevels bei Variation von α_B und α_C sind in Abbildung 9.11 dargestellt. Die Variation des angestrebten Servicelevels α_B ist in der mittleren Graphik und die des

angestrebten Servicelevels α_C ist in der untersten Graphik abgebildet. Auch hier spiegeln sich die Erkenntnisse der vorherigen Analysen wider. Die Ergebnisse der Strategien NDV, RNBL und insbesondere die des erlösorientierten Ansatzes bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III bleiben größtenteils von den durchgeführten Variationen unbeeinflusst. Die RNBL Strategie ist weiterhin die einzige Strategie, mit welcher das hohe angestrebte Servicelevel α_A gewährleistet werden kann. Eine Erhöhung des Servicelevels α_B führt bei der RNBL Strategie zu einem besseren erreichten Servicelevel für die B-Kunden, jedoch kann das angestrebte Servicelevel α_B bereits ab der ersten Erhöhung, d.h. ab Variation 3, nicht mehr eingehalten werden. Aufgrund der bei der RNBL Strategie verwendeten Schachtelungshierarchie geht ein verbessertes erreichtes Servicelevel der B-Kunden zu Lasten der C-Kunden, weshalb bei diesem eine leichte Verschlechterung zu beobachten ist.

Das erhöhte Servicelevel α_B kann lediglich mit der NDV Strategie erfüllt werden. Allerdings ist bei dieser Strategie insbesondere bei der Erhöhung beider Servicelevels α_B und α_C ein zunehmend über alle Kundensegmente ausgeglichenes Servicelevel erkennbar, wenn auch die erreichten Servicelevels bei Variation 8 mit 64,58% für A-Kunden, 69,67% für B-Kunden und 71,19% für C-Kunden unterschiedlicher ausfallen, als es bei der Erhöhung des angestrebten Servicelevels α_A der Fall ist (s. Abbildung 9.7). Weiterhin werden aufgrund der Schachtelungshierarchie Aufträge der C-Kunden gegenüber Aufträgen der B- und A-Kunden bevorzugt. Da jedoch ab Variation 6 gemäß den einfachen Buchungslimits x_{qk} mit 1,1 Tagen kaum Kapazität ausschließlich für C-Kunden reserviert wird (s. Tabelle 9.4), kommt es ab dieser Variation zu einer etwas deutlicheren Verringerung des erreichten Servicelevels der C-Kunden.

Deutlichere Veränderungen der erreichten Servicelevels sind bei dem erlösorientierten Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV zu erkennen. Bei Betrachtung der Abbildung 9.11 fällt auf, dass die Veränderung der erreichten Servicelevels der B- und C-Kunden ein ähnliches Muster ergeben, wie die Veränderung der angestrebten Servicelevels α_B und α_C . Diese Veränderungen der erreichten Servicelevels für die B- und C-Kunden haben jedoch eine Verschlechterung des erreichten Servicelevels der A-Kunden zur Folge. Generell kann mit dieser Strategie keines der angestrebten Servicelevels α_k erreicht werden, wobei das Servicelevel α_A in der Ausgangssituation mit 88,39% nur knapp verfehlt wird.

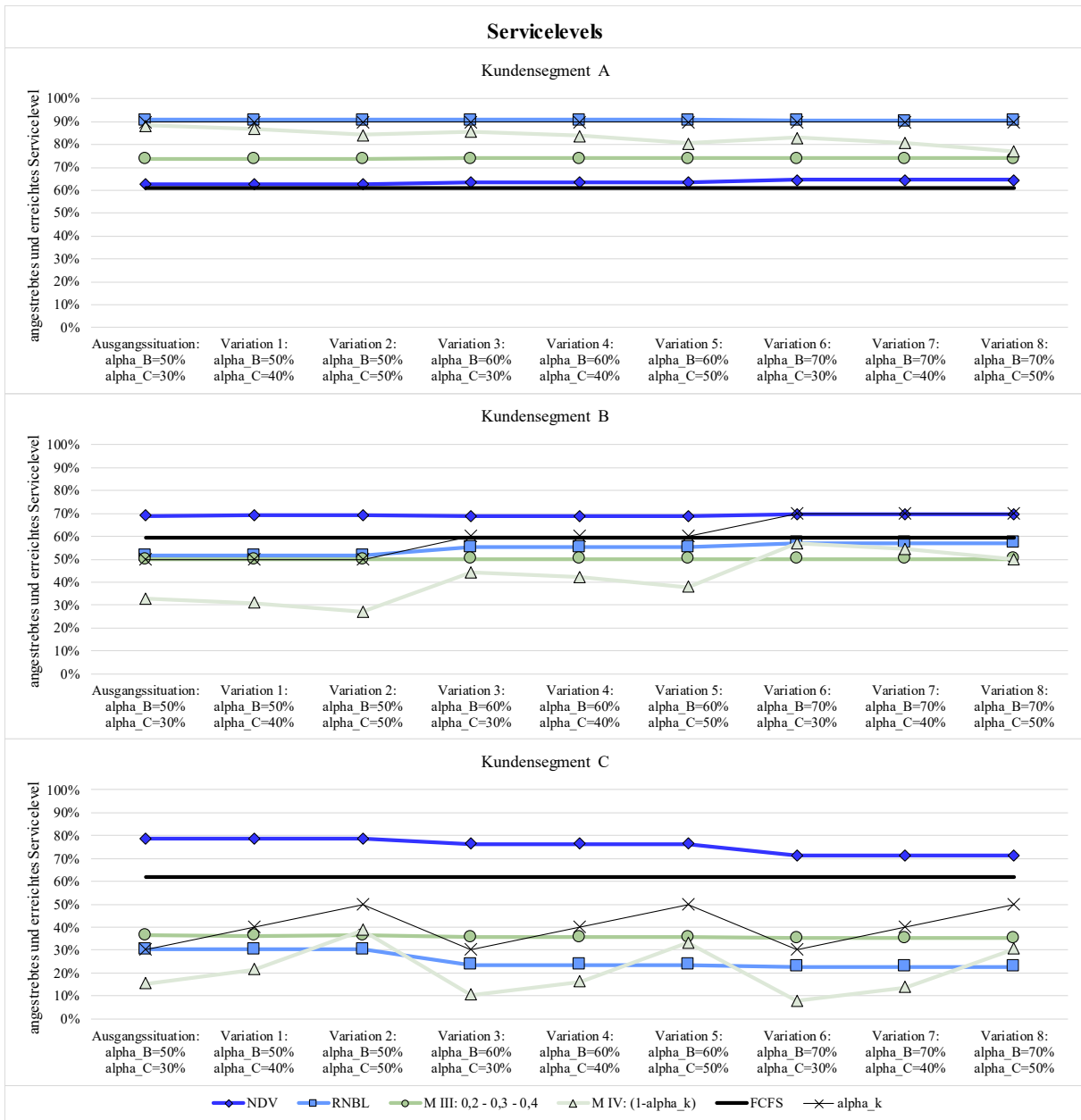


Abbildung 9.11: Durchschnittlich erreichte Servicelevels bei Variation von α_B und α_C

In Abbildung 9.12 wird nach bekanntem Schema die aufgeschlüsselte Darstellung der Ablehnungen aufgeführt. Umso höher das Servicelevel α_k ist, desto geringer wird bei Verwendung des vierten Multiplikatorenansatzes der Multiplikator $multi_k$. Auf Basis eines geringeren kundenspezifischen Multiplikators $multi_k$ werden weniger Ablehnungen aufgrund der RM Hürde ausgesprochen. Der Abbildung 9.12 ist jedoch auch zu entnehmen, dass weniger Ablehnungen auf Basis der ersten Hürde zu mehr Ablehnungen aufgrund des Produktionsplanungsmodells führen.

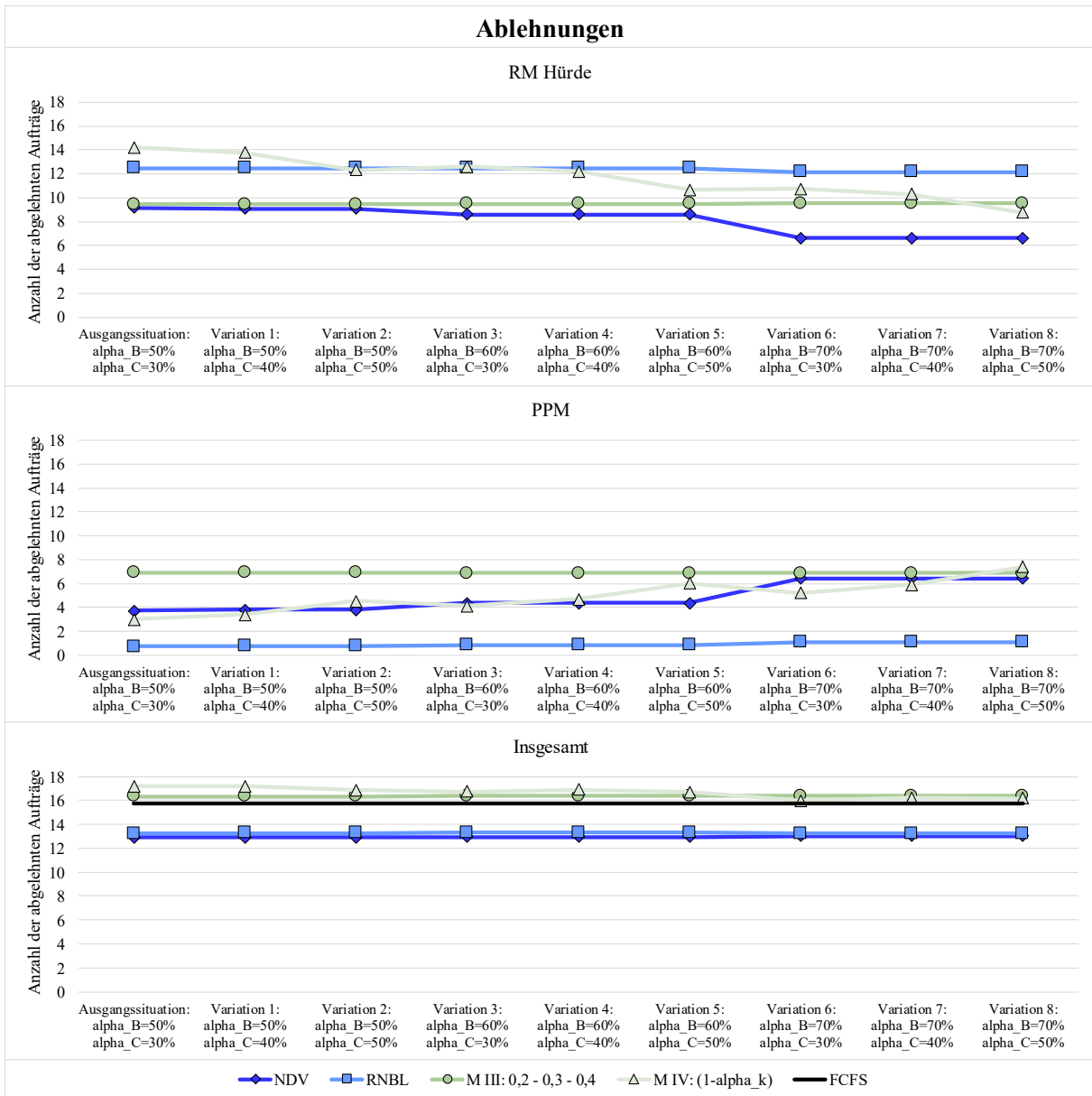


Abbildung 9.12: Aufgeschlüsselte Darstellung der Ablehnungen bei Variation von α_B und α_C

Auch bei der NDV Strategie ist zu beobachten, dass eine verringerte Anzahl an Ablehnungen aufgrund der ersten Hürde zu einer höheren Anzahl an Ablehnungen aufgrund der zweiten Hürde führt. Wie bereits erwähnt, ist ab Variation 6 gemäß den einfachen Buchungslimits x_{qk} nur noch sehr wenig Kapazität für Aufträge von C-Kunden reserviert (s. Tabelle 9.4). Für die NDV Strategie hat dies ausgeglichene geschachtelte Buchungslimits xn_{qk} zur Folge, weshalb es zu weniger Ablehnungen aufgrund der RM Hürde und zu mehr Ablehnungen aufgrund des Produktionsplanungsmodells kommt. Die durchschnittliche Gesamtanzahl der Ablehnungen bleibt für alle Strategien jedoch nahezu konstant. Weiterhin führen auch bei Variation von α_B und α_C die erlösorientierten Strategien zu mehr Ablehnungen als die Vergleichsstrategie FCFS. Am wenigsten Ablehnungen werden bei Verwendung der mengenorientierten Strategien ausgesprochen.

Insgesamt kann anhand des zweiten Abschnitts der Sensitivitätsanalyse von α_k geschlussfolgert werden, dass sich die Ergebnisse der Strategien RNBL und NDV sowie des erlösorientierten Ansatzes bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III bei der Variation der Servicelevels α_B und α_C überwiegend nur in geringerem Umfang verändern. Deutlichere Veränderungen sind hingegen bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV zu verzeichnen, welche jedoch durch den unmittelbaren Einfluss auf die kundenspezifischen Multiplikatoren $multi_k$ zu begründen sind. Mit Erhöhung der Servicelevels α_B und/oder α_C – und folglich durch die Verringerung der Multiplikatoren $multi_B$ und/oder $multi_C$ – kann auf der einen Seite ein besseres Profitergebnis (s. Abbildung 9.9) und eine höhere Kapazitätsauslastung (s. Abbildung 9.10) erzielt werden. Auf der anderen Seite führt die durchgeführte Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der angestrebten Servicelevels α_B und α_C zu einem schlechteren Servicelevel der wichtigen A-Kunden (s. Abbildung 9.11), welches bei Variation 8 nur geringfügig besser als unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III ist und somit deutlich von dem angestrebten Servicelevel α_A abweicht. Wenn allerdings insbesondere die Erreichung des Servicelevels α_A im Vordergrund steht, eignet sich die erlösorientierte Strategie unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV in der Ausgangssituation, in welcher ein größerer Abstand zwischen den angestrebten Servicelevels α_A und α_B/α_C vorhanden ist, besser als bei den durchgeführten Variationen.

9.2.2 Variation der zur Verfügung stehenden Kapazität CAP

Im Rahmen der zweiten Sensitivitätsanalyse wird die zur Verfügung stehende Kapazität CAP gesenkt. In der ursprünglichen Fallstudie stehen 20 Arbeitstage für die Bearbeitung der Aufträge zur Verfügung. Die Summe über die individuellen Bearbeitungszeiten $Prod_j$ der 40 gestellten Aufträge beträgt 28 Tage in der Fallstudie 1. Folglich übersteigt die Nachfrage die Kapazität um 40%. Um die Performance der ausgewählten Ansätze zu untersuchen, wenn die Nachfrage die Kapazität noch weiter übersteigt, wird die Kapazität CAP tageweise von der Ausgangssituation bis auf 14 Tage reduziert. So ergibt sich bei der sechsten Variation ein Verhältnis von 200% zwischen der Nachfrage und der Kapazität. Eine Übersicht über die Variationen und die sich ergebenden Verhältnisse zwischen der Nachfrage und der Kapazität bietet Tabelle 9.5. Eine Erhöhung der Kapazität wird nicht untersucht, da durch diese es generell zu weniger Ablehnungen kommen würde. Folglich hätte die Auftragsannahmeentscheidung weniger Bedeutung und der Vorteil, der durch den Einsatz des RM erzielt werden könnte, würde geringer werden. Interessanter ist es zu untersuchen, wie gut die entwickelten RM Ansätze arbeiten, wenn die Kapazität verringert und somit die Auftragsannahmeentscheidung weiter erschwert wird.

Tabelle 9.5: Übersicht über die Variation von *CAP*

	<i>CAP</i>	Verhältnis Nachfrage/Kapazität
Ausgangssituation	20	140,00%
Variation 1	19	147,37%
Variation 2	18	155,56%
Variation 3	17	164,71%
Variation 4	16	175,00%
Variation 5	15	186,67%
Variation 6	14	200,00%

Allerdings können bei dieser Sensitivitätsanalyse nicht weiterhin dieselben 200 Datensätze verwendet werden. Wie bereits in Kapitel 5.1 erwähnt, entspricht die Länge des Buchungszeitraums der Länge des Planungshorizonts und folglich des Produktionszeitraums (s. Abbildung 5.1). Der einzige Unterschied zwischen dem Buchungs- und Produktionszeitraum ist, dass der Buchungszeitraum um drei Tage nach vorne versetzt ist. Dies entspricht der Standardversandzeit der Materiallieferung und ermöglicht somit, dass zum einen der Beginn des Produktionszeitraums direkt genutzt werden kann und zum anderen, dass auch später eintreffende Aufträge zumindest unter Zuhilfenahme einer Expresslieferung noch bearbeitet werden können. Wenn lediglich die Kapazität *CAP* verringert wird, kann es sein, dass später eintreffende Aufträge nicht mehr innerhalb des Produktionszeitraums bearbeitet werden können, da dieser schon abgeschlossen ist. Trifft beispielsweise ein Auftrag am Tag 16 ein, so könnte dieser ab Variation 3 nicht mehr bearbeitet werden, da die Materialien nicht rechtzeitig geliefert werden können bzw. der Produktionszeitraum schon abgeschlossen ist. Folglich würde bei dieser Sensitivitätsanalyse neben der Kapazität auch die Nachfrage beeinflusst werden, wobei die Variation der Nachfrage keinem festen Schema folgen würde, sondern zufällig wäre. Dies würde sowohl das Ziehen von Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen erschweren als auch eine gewisse Willkür in die Sensitivitätsanalyse einbringen. Demzufolge ist es notwendig, für jede Variation neue Datensätze zu erzeugen. Dafür werden weiterhin dieselben 40 Aufträge mit denselben auftragsspezifischen Daten verwendet. Lediglich die Auftragseingangstage werden auf Basis einer diskreten Gleichverteilung neu erzeugt. Die Freigabezeitpunkte \bar{R}_j und R_j sowie die Fristen D_j und \bar{D}_j werden nach den gleichen Regeln, wie in Kapitel 6 beschrieben, basierend auf den neuen Auftragseingangstagen erzeugt. Zusätzlich wird darauf geachtet, dass der Buchungszeitraum dieselbe Länge wie der Produktionszeitraum umfasst. Weiterhin wird mit 200 zufällig generierten Auftragsreihenfolgen und -dichten gearbeitet. Die Robustheitsanalysen zeigen, dass bei dieser Anzahl an Datensätzen die Auftragsreihenfolgen und -dichten keinen nennenswerten Einfluss auf die generelle Performance der Strategien ausüben. Aus diesem Grund ist, auch wenn nicht dieselben Datensätze zugrunde liegen, weiterhin das Ziehen von generellen Schlussfolgerungen möglich.

Die Ergebnisse des Kapazitätszuweisungsmodells (s. Tabelle 9.6) werden wieder zuerst analysiert. Wie zu erwarten, nimmt der Zielfunktionswert im Verlauf der Variationen ab. Darüber hinaus ist zu beobachten, dass die Summe der einfachen, kapazitätsorientierten Buchungslimits x_{qk} immer der zur Verfügung stehenden Kapazität CAP entspricht. Folglich reduziert sich die Summe der Buchungslimits x_{qk} mit jeder Variation um eins. Sobald nur noch eine Kapazität von 17 Tagen zur Verfügung steht (Variation 3), ist es nicht mehr möglich, alle angestrebten Servicelevels α_k einzuhalten. Zuerst wird von dem angestrebten Servicelevel α_C der C-Kunden abgewichen, da Abweichungen von diesem Servicelevel mit den geringsten Kosten bestraft werden. Dabei sei daran erinnert, dass die Strafkosten $Pdev_C$ mit 250 GE deutlich geringer angesetzt sind als die Strafkosten $Pdev_B$ mit 5.000 GE und $Pdev_A$ mit 10.000 GE. Der Grund dafür ist, dass Kunden, welche bereits in der Vergangenheit Aufträge gestellt haben (A- und B-Kunden), eine höhere Bedeutung für das Unternehmen besitzen als Neukunden (C-Kunden) und Aufträge von Neukunden aufgrund der höheren Nachfragewertigkeit sowie der verwendeten Zielsetzung, der Profitmaximierung, bevorzugt angenommen werden.

Ab Variation 4 wird keine Kapazität für Aufträge von C-Kunden reserviert. Zusätzlich wird von dem Servicelevel α_A für die wichtigen A-Kunden abgewichen. Dies entspricht zunächst nicht der Erwartung, da die Strafkosten $Pdev_A$ mit 10.000 GE doppelt so hoch wie die Strafkosten $Pdev_B$ angesetzt sind. Stattdessen wäre es zu erwarten, dass zuerst von dem Servicelevel α_B abgewichen wird, bevor das Servicelevel α_A nicht mehr erreicht wird. Die Erklärung für dieses Ergebnis liegt in der ungleichmäßigen Verteilung der Aufträge aus den verschiedenen Kundensegmenten. Umso mehr Aufträge von einem Kundensegment k erteilt werden, desto geringer ist das Gewicht eines einzelnen Auftrags bei der Erreichung des angestrebten Servicelevels α_k . Bei der Fallstudie 1, welche den Sensitivitätsanalysen zugrunde liegt, werden 50% der Aufträge von A-Kunden, 30% von B-Kunden und 20% von C-Kunden erteilt. Würde von der Variation 3 zur Variation 4 hin das Buchungslimit $x_{kurz,B}$ statt dem Buchungslimit $x_{lang,A}$ um 0,5 Tage reduziert werden, d.h. $x_{kurz,B} = 2,5$ und $x_{lang,A} = 1,5$, dann würde gemäß den einfachen Buchungslimits x_{qB} für die B-Kunden ein Servicelevel von 41,67% erreicht werden.²² Demzufolge gäbe es eine Abweichung von 8,33% von dem angestrebten Servicelevel α_B (= 50%). Die Multiplikation dieser Abweichung mit den Strafkosten $Pdev_B$ (= 5.000 GE) führt zu Kosten in der Höhe von 416,67 GE. Bei der in Variation 4 ermittelten Lösung hingegen wird nur um 1,67% von dem Servicelevel α_A abgewichen. Die Multiplikation dieser Abweichung und der Strafkosten $Pdev_A$ (= 10.000 GE) führt lediglich zu Kosten in der Höhe von 166,67 GE. Aus diesem Grund wird ab Variation 4 von dem Servicelevel α_A statt von dem Servicelevel α_B abgewichen.

²² Das Servicelevel ergibt sich aus der folgenden Berechnung:
$$\frac{\sum_{q \in Q} x_{qB}}{\sum_{q \in Q} DF_{qB}} = \frac{\frac{2,5 \cdot 0}{0,5} + \frac{0}{1} + \frac{0}{1,5}}{6+4+2} = \frac{5}{12} = 0,4167$$

Tabelle 9.6: Ergebnisse des Kapazitätszuweisungsmodells bei Variation von CAP

Kunden-segment k	Auftrags-gruppe q	Ausgangs-situation $CAP = 20$ x_{qk}	Variation 1 $CAP = 19$ x_{qk}	Variation 2 $CAP = 18$ x_{qk}	Variation 3 $CAP = 17$ x_{qk}	Variation 4 $CAP = 16$ x_{qk}	Variation 5 $CAP = 15$ x_{qk}	Variation 6 $CAP = 14$ x_{qk}
A	kurz	5	5	5	5	5	5	5
	mittel	7	7	7	7	7	7	6
	lang	1,5	1,5	1,5	1,5	1	0	0
B	kurz	3	3	3	3	3	3	3
	mittel	0	0	0	0	0	0	0
	lang	0	0	0	0	0	0	0
C	kurz	2	2	1,5	0,5	0	0	0
	mittel	1,5	0,5	0	0	0	0	0
	lang	0	0	0	0	0	0	0
dev_A		0%	0%	0%	0%	1,67%	5%	10%
dev_B		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
dev_C		0%	0%	0%	17,5%	30%	30%	30%
Zielfunktionswert		14.385 GE	13.595 GE	12.800 GE	11.956,25 GE	11.018,33 GE	10.005 GE	8.815 GE

Im Gegensatz zu der vorherigen Sensitivitätsanalyse von α_k werden bei Variation der Kapazität CAP auch die Ergebnisse der Vergleichsstrategie FCFS beeinflusst. Insbesondere die neuen Datensätze und somit die neuen Auftragsreihenfolgen beeinflussen die Ergebnisse der Vergleichsstrategie. Robustheitsanalysen zeigen jedoch weiterhin, dass sich die durchschnittlichen Ergebnisse mit dem Hinzufügen eines weiteren Datensatzes und somit mit einer weiteren, neuen Auftragsreihenfolge nicht nennenswert verändern. Es werden demnach weiterhin 200 Datensätze verwendet und robuste, durchschnittliche Ergebnisse erzielt.

In Abbildung 9.13 werden die durchschnittlichen Profitergebnisse sowohl in relativer als auch in absoluter Form dargestellt. In der oberen Graphik wird das Profitergebnis, welches mit der FCFS Strategie für jede Variation erzielt wird, zum Vergleich genommen. Aus diesem Grund stellt das Profitergebnis der FCFS Strategie weiterhin immer 100% dar, obwohl sich die absoluten Profitergebnisse mit Variation der Kapazität CAP verändern. Die Veränderungen der absoluten Profitergebnisse sind in der unteren Graphik dargestellt.

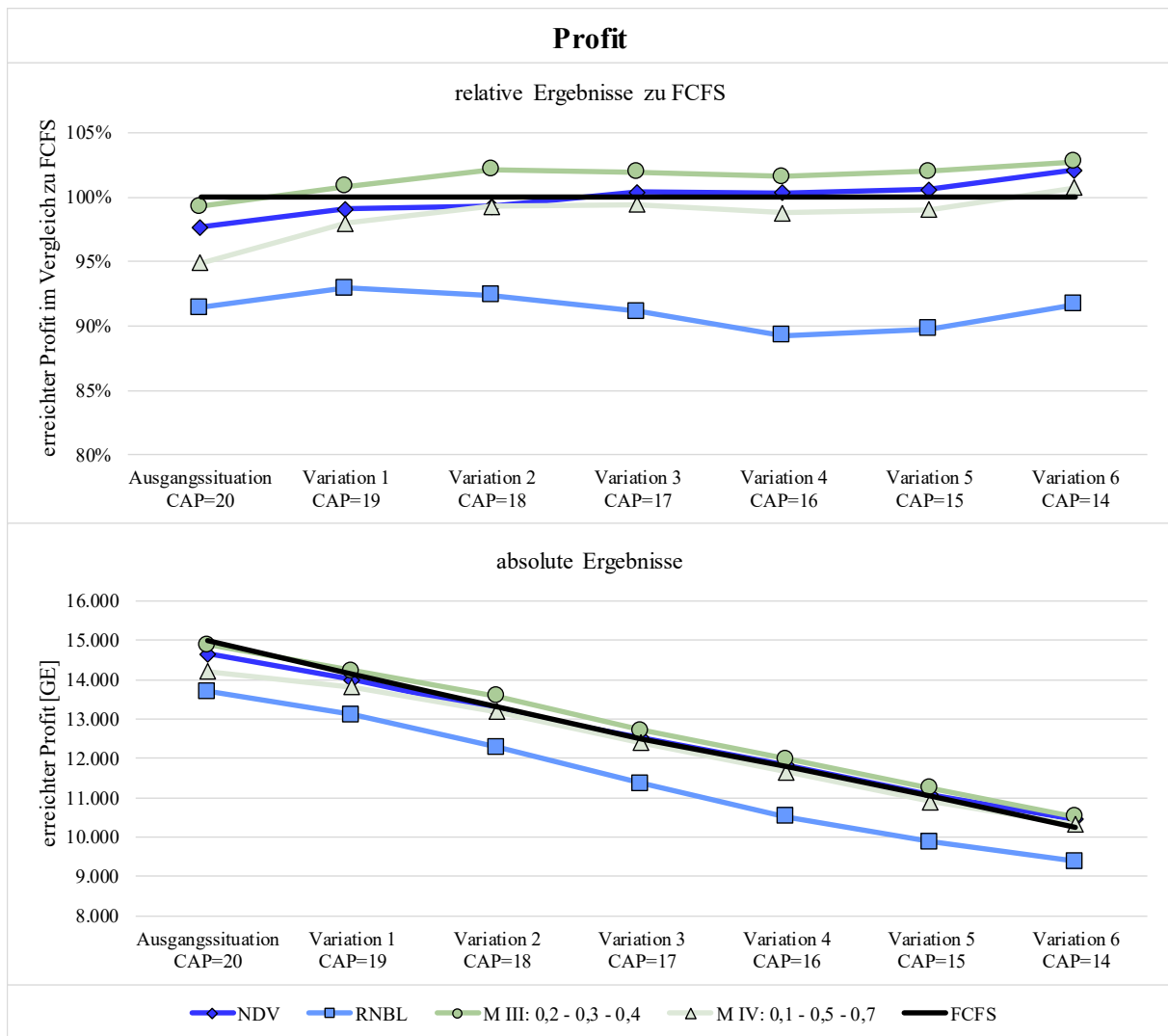


Abbildung 9.13: Durchschnittliche Profitergebnisse bei Variation von CAP

Generell ist anhand der unteren Graphik gut erkennbar, dass die Profitergebnisse mit jeder Verringerung der zur Verfügung stehenden Kapazität CAP unabhängig von der verwendeten Strategie niedriger ausfallen. Darüber hinaus wird jedoch auch – insbesondere anhand der oberen Graphik – ersichtlich, dass umso knapper die Kapazität im Vergleich zur Nachfrage wird, desto eher mit den ausgewählten RM Strategien sogar ein zum Teil besseres Profitergebnis als mit der Vergleichsstrategie FCFS erzielt wird. Lediglich die RNBL Strategie führt weiterhin zu dem geringsten Profitergebnis, welches jedoch immer noch mit mindestens 89,29% des Profitergebnisses der FCFS Strategie sehr gut ist. Das geringere Profitergebnis der RNBL Strategie liegt daran, dass ab der vierten Variation aufgrund der einfachen Buchungslimits x_{qk} (s. Tabelle 9.6) und der verwendeten Schachtelungshierarchie keine Annahme von Aufträgen von C-Kunden möglich ist. Vor der Variation 4 wird für Aufträge von C-Kunden auch nur sehr wenig Kapazität reserviert. Da insbesondere die Aufträge von C-Kunden je Zeiteinheit am lukrativsten sind, fällt das Profitergebnis bei RNBL Strategie im Vergleich zu den ausgewählten Ansätzen am niedrigsten aus.

Mit dem erlösorientierten Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III wird bereits ab der ersten Variation ein höheres Profitergebnis als mit der FCFS Strategie erzielt. Mit der NDV Strategie wird ab Variation 3 und mit dem erlösorientierten Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV wird ab der sechsten Variation ein höheres Profitergebnis als mit der FCFS Strategie ermöglicht. Als Begründung für diese Entwicklung kann unter anderem der Anteil der ungenutzten Kapazität²³ herangezogen werden (s. Abbildung 9.14). Bei der FCFS Strategie verändert sich der Anteil der ungenutzten Kapazität kaum, wohingegen sich der Anteil der ungenutzten Kapazität bei der NDV Strategie und den beiden erlösorientierten Strategien verringert. Dadurch, dass sich die Flexibilität der RNBL Strategie mit Verringerung der Kapazität verschlechtert, führt dies zu einem tendenziell erhöhten Anteil ungenutzter Kapazität. Lediglich von der Variation 5 zu der Variation 6 hin reduziert sich auch bei der RNBL Strategie der Anteil der ungenutzten Kapazität leicht. Der Grund dafür ist, dass durch andere Auftragsreihenfolgen und -dichten, welche bei dieser Sensitivitätsanalyse für jede Variation der Kapazität neu erzeugt wurden, im Durchschnitt geringfügig mehr lange Aufträge angenommen werden können. Dadurch wird unter Berücksichtigung des Aspekts, dass die zur Verfügung stehende Kapazität erneut um einen Tag reduziert wird, eine leicht bessere prozentuale Kapazitätsauslastung ermöglicht.

²³ Um den Anteil der ungenutzten Kapazität zu ermitteln, wird die genutzte Kapazität durch die zur Verfügung stehende Kapazität CAP dividiert. Da bei dieser Sensitivitätsanalyse die zur Verfügung stehende Kapazität CAP variiert wird, verändert sich pro Variation der Divisor.

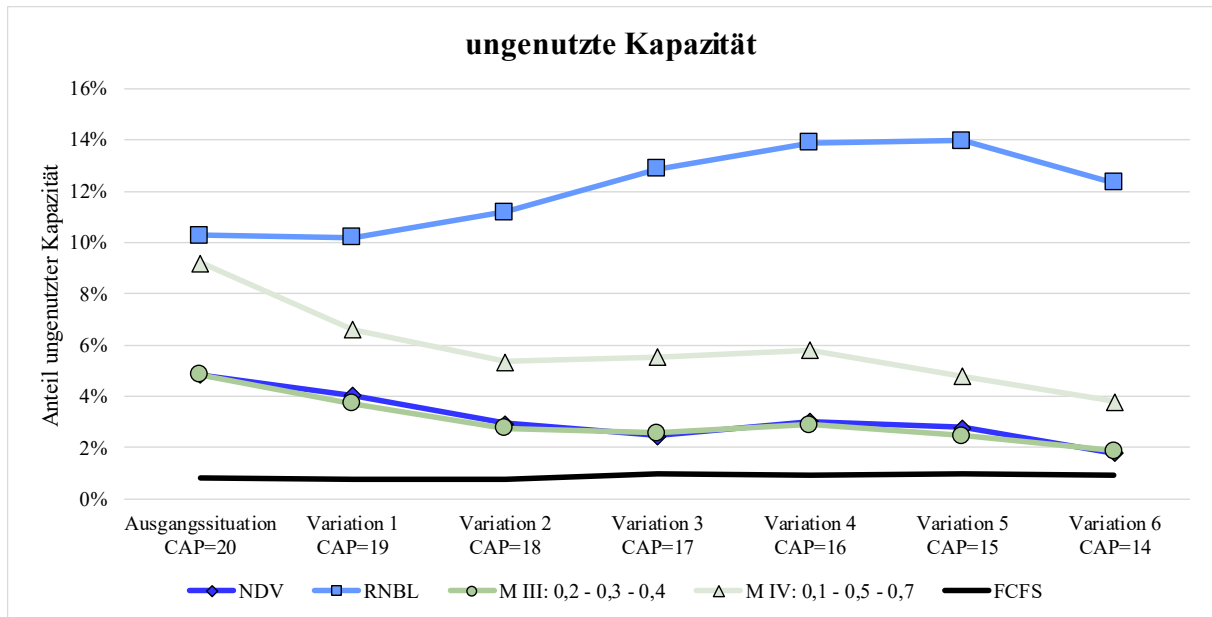


Abbildung 9.14: Durchschnittlich ungenutzte Kapazität bei Variation von CAP

Die durchschnittlich erreichten Servicelevels sind in der Abbildung 9.15 dargestellt. Generell sind weiterhin ähnliche Muster bezüglich der Performance der einzelnen Strategien erkennbar. Mit der RNBL Strategie wird stets das höchste Servicelevel für die A-Kunden erreicht. Zwar nimmt das erreichte Servicelevel mit der Verringerung der Kapazität ab, jedoch ist bei der RNBL Strategie das erreichte Servicelevel der A-Kunden robuster gegenüber der verringerten Kapazität, als es bei den anderen Strategien der Fall ist. Ermöglicht wird dieses recht robuste Servicelevel der A-Kunden der RNBL Strategie durch eine deutlichere Verringerung der erreichten Servicelevels der B- und C-Kunden.

Auffällig sind darüber hinaus die recht robusten Servicelevelergebnisse für die B- und C-Kunden der erlösorientierten Strategien. Dies zeigt, dass die erlösorientierten Ansätze zum Teil weniger von den Ergebnissen der einfachen Buchungslimits x_{qk} abhängen, als es bei den mengenorientierten Strategien der Fall ist. Auch bei der ersten Sensitivitätsanalyse – der Variation von α_k – konnten recht robuste Ergebnisse der erlösorientierten Strategie bei Verwendung des dritten Multiplikatorenansatzes beobachtet werden. Der Multiplikatorenansatz M IV ist bei diesem Vergleich zu der vorherigen Sensitivitätsanalyse ausgeschlossen, da bei dieser durch die Variation von α_k auch die kundenspezifischen Multiplikatoren $multi_k$ verändert wurden. Durch diese gleichzeitige Veränderung von α_k und $multi_k$ wurden die Ergebnisse stärker beeinflusst und sind somit nicht robust gegenüber den durchgeführten Variationen. Im Rahmen der zweiten Sensitivitätsanalyse – der Variation der Kapazität CAP – können jedoch auch bei Verwendung des vierten Multiplikatorenansatzes recht stabile Servicelevelergebnisse der B- und C-Kunden beobachtet werden. Der generelle Abwärtstrend, welcher bei allen Strategien zu beobachten ist, ist durch die immer weiter verringerte Kapazität CAP zu begründen.

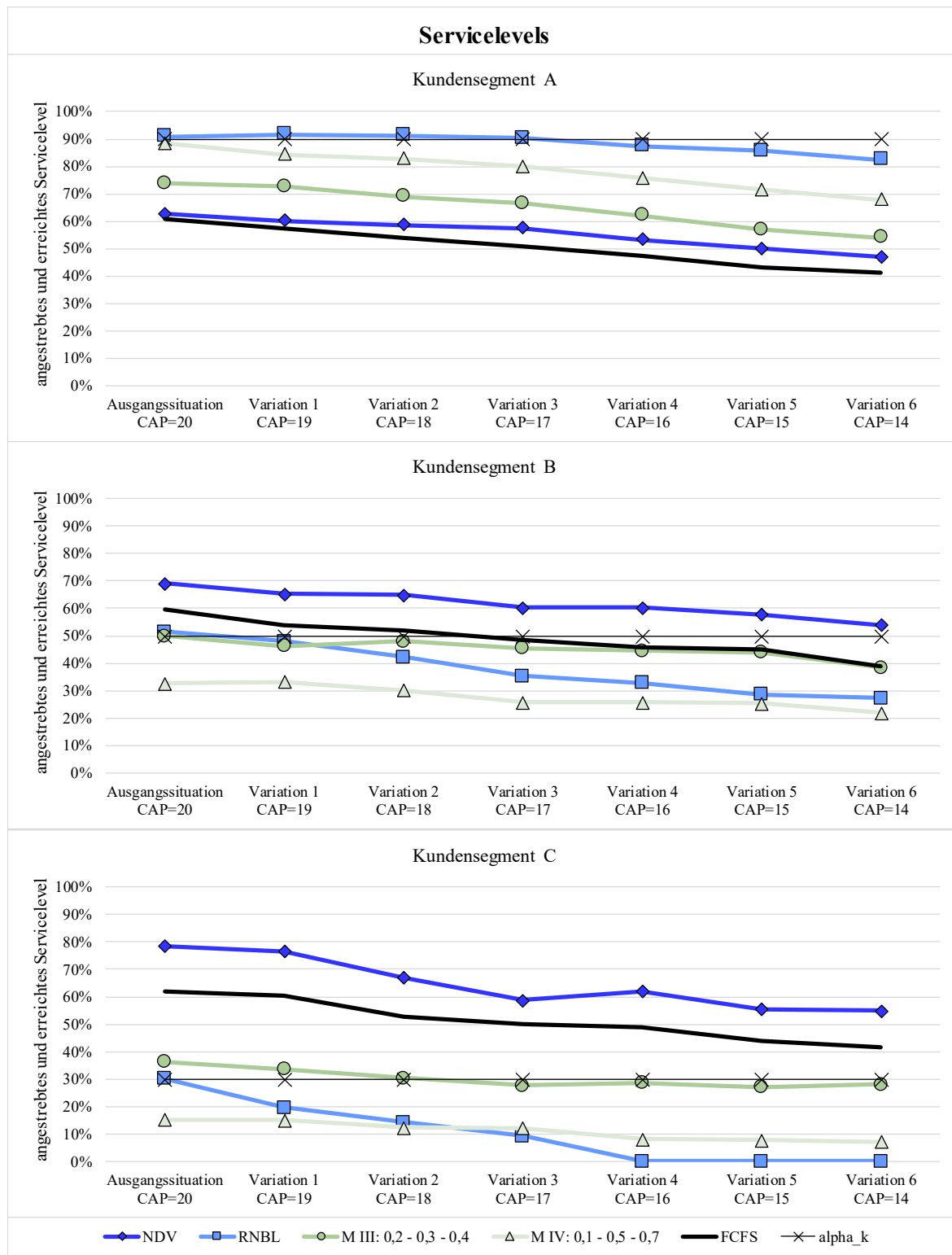


Abbildung 9.15: Durchschnittlich erreichte Servicelevels bei Variation von CAP

Dass die Anzahl der Ablehnungen mit Verringerung der Kapazität CAP zunimmt, ist logisch und zu erwarten. Diese Erwartung wird durch die Ergebnisse, welche in der Abbildung 9.16 dargestellt sind, bestätigt. Weiterhin kommt es mit den mengenorientierten Ansätzen zu weniger Ablehnungen als mit den erlösorientierten Strategien. Durch die erhöhte Kapazitätsauslastung (s. Abbildung 9.14) werden mit dem erlösorientierten Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III ab Variation 2,

bzw. unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV ab Variation 3 weniger Ablehnungen als mit der Vergleichsstrategie FCFS ausgesprochen. Darüber hinaus kann beobachtet werden, dass bei den erlösorientierten Strategien die Anzahl der Ablehnungen aufgrund der ersten Hürde bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV nahezu identisch bleibt und bei Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III sinkt. Bei beiden erlösorientierten Strategien ist jedoch ein Anstieg an Ablehnungen aufgrund des Produktionsplanungsmodells zu verzeichnen. Insofern kann geschlussfolgert werden, dass bei den erlösorientierten Ansätzen die Auftragsannahmeentscheidung mehr über die zweite als über die erste Hürde gesteuert wird und dass diese Beobachtung bei einer knapper werdenden Kapazität sogar noch deutlicher hervorsteicht.

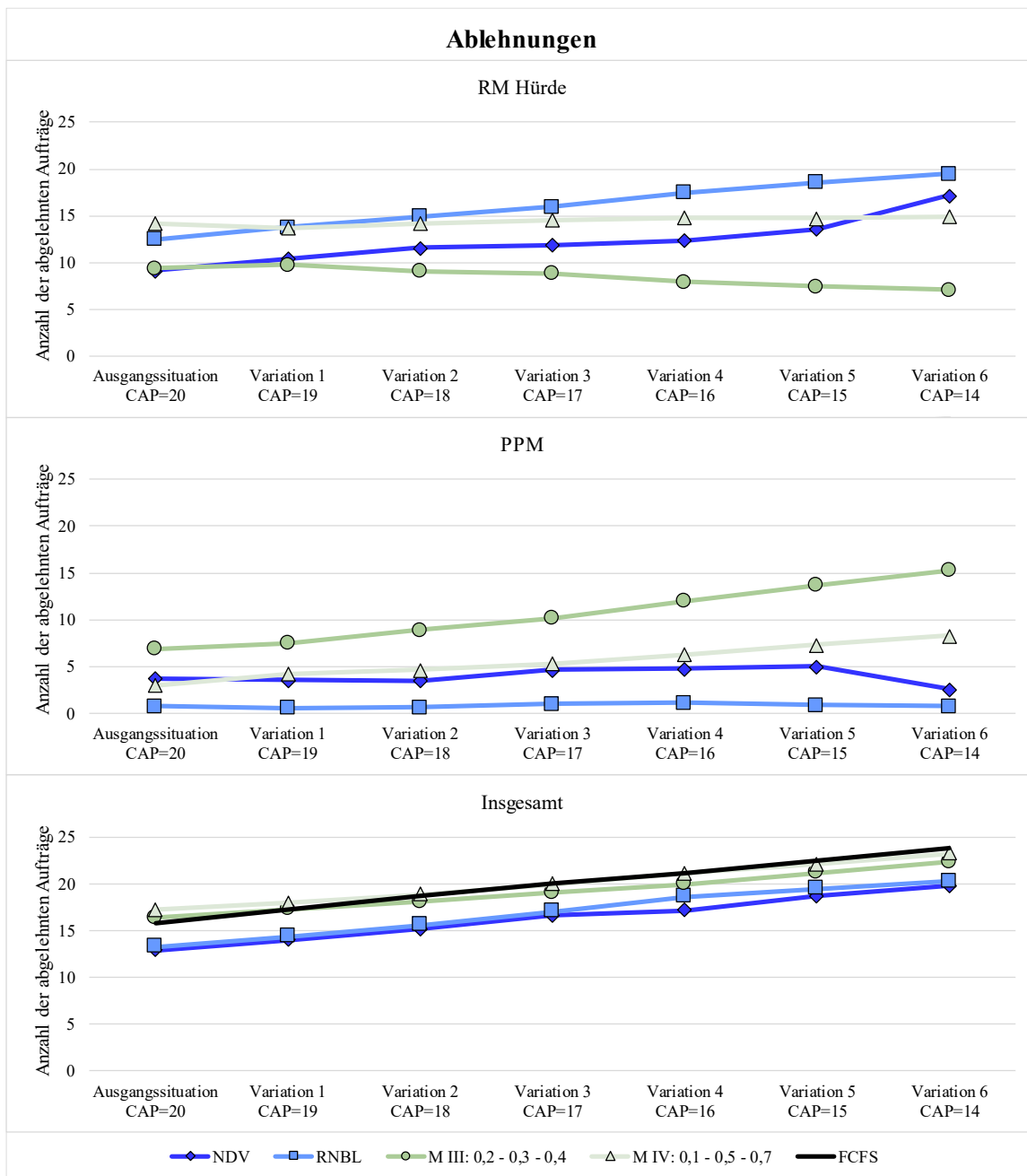


Abbildung 9.16: Aufgeschlüsselte Darstellung der Ablehnungen bei Variation von CAP

Bei den mengenorientierten Strategien steigt die Anzahl der Ablehnungen aufgrund der RM Hürde mit Verknappung der Kapazität an. Die Anzahl der auf das Produktionsplanungsmodell zurückzuführenden Ablehnungen verändert sich bei der RNBL Strategie kaum. Auch bei der NDV Strategie ist die Anzahl der Ablehnung durch das Produktionsplanungsmodell recht konstant. Nur bei der Variation 6 werden deutlich weniger Ablehnungen aufgrund der zweiten Hürde ausgesprochen. Dies liegt daran, dass mehr Ablehnungen bereits durch die erste Hürde erfolgen.

Ein weiterer Aspekt, welcher bei der Auswertung dieser Sensitivitätsanalyse auffällt, ist die Veränderung der benötigten Rechenzeit der NDV Strategie. Die pro Datensatz durchschnittlich benötigten Rechenzeiten sind in Abbildung 9.17 aufgeführt. Die Besonderheit dabei ist, dass die hohe Rechenzeit der NDV Strategie bei Variation 3 ($CAP = 17$) maßgeblich auf die erhöhte Rechenzeit eines einzelnen Datensatzes zurückzuführen ist. Für die Durchführung des vollständigen Auftragsannahmeprozesses wurden für den 57. Datensatz 277.124,24 Sekunden ($\cong 3,21$ Tagen) benötigt. Ohne diesen Ausreißer wäre die durchschnittliche Rechenzeit der NDV Strategie bei Variation 3 mit 329,21 Sekunden zwar weiterhin am höchsten, jedoch vergleichbarer zu den Rechenzeiten der anderen RM Strategien (s. NDV_ohneAusreißer in Abbildung 9.17). Der Grund für die erhöhte Rechenzeit ist, dass bei dem 57. Datensatz die Aufträge 13 bis 21, d.h. neun Aufträge, am selben Tag eintreffen. Zwar wird der Auftragsannahmeprozess weiterhin auftragsweise durchgeführt, jedoch fallen die Fristen D_j und \bar{D}_j bei Aufträgen, welche am gleichen Tag eintreffen, sehr ähnlich aus. Die NDV Strategie ist die einzige Strategie, bei welcher alle zuvor eingetroffene Aufträge, d.h. die Aufträge 1 bis 12, angenommen werden. Demzufolge ist die Kapazität bei dieser Strategie bereits ausgelasteter, als es bei Verwendung der anderen Strategien der Fall ist. Für die Auftragsannahmeentscheidung eines einzelnen weiteren Auftrags wurden bei der NDV Strategie 257.250,31 Sekunden ($\cong 2,98$ Tagen) benötigt. Da bei den anderen Strategien nicht alle von den ersten zwölf Aufträgen angenommen werden, kommt es bei den anderen Strategien nicht zu so auffällig erhöhten Rechenzeiten. Insgesamt ist die erhöhte Rechenzeit auf die zweite Hürde im Auftragsannahmeprozess zurückzuführen. Dass das Produktionsplanungsmodell höhere Rechenzeiten mit sich bringen kann, wurde bereits bei der Analyse der Vergleichsstrategie PPM_ohneRM deutlich (s. Abbildung 7.16 und 8.17).

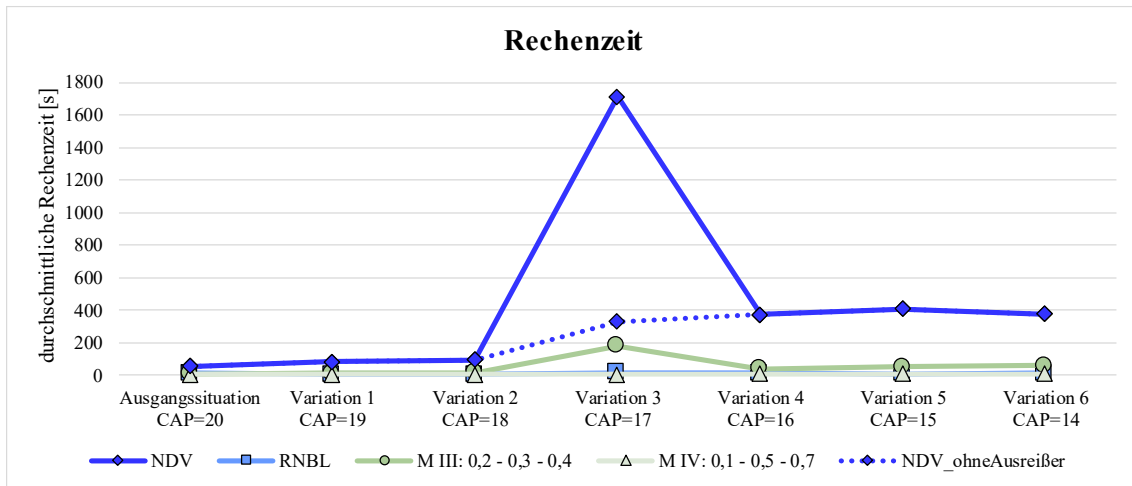


Abbildung 9.17: Durchschnittlich benötigte Rechenzeit für den Auftragsannahmeprozess pro Datensatz

Alles in allem kann mit dieser Sensitivitätsanalyse gezeigt werden, dass die ausgewählten RM Strategien weiterhin zu sehr guten Ergebnissen führen, auch wenn die Nachfrage die Kapazität noch weiter übersteigt. Sogar insbesondere wenn die Kapazität noch knapper ist, ist es möglich, dass höhere Profitergebnisse als mit der FCFS Strategie erzielt werden. Diesbezüglich sind weiterhin besonders der erlösorientierte Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III und die NDV Strategie hervorzuheben. Hinsichtlich der Servicelevelergebnisse ist die RNBL Strategie herauszustellen. Selbst mit einer um drei Tage verkürzten Kapazität (Variation 3) kann das hohe Servicelevel α_A weiterhin eingehalten werden, was ansonsten mit keiner anderen Strategie ermöglicht wird. Jedoch geht dieses hohe erreichte Servicelevel der A-Kunden zu Lasten der B- und vor allem der C-Kunden. Demzufolge fällt auch das Profitergebnis mit dieser Strategie geringer aus. Der erlösorientierte Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV führt kontinuierlich zum zweitbesten Servicelevel der A-Kunden, wengleich dies insbesondere mit Variation der Kapazität CAP deutlich geringer ausfällt. Die im Auswahlprozess betonten Stärken und Schwächen der ausgewählten RM Ansätze bleiben also auch bei dieser Sensitivitätsanalyse erhalten.

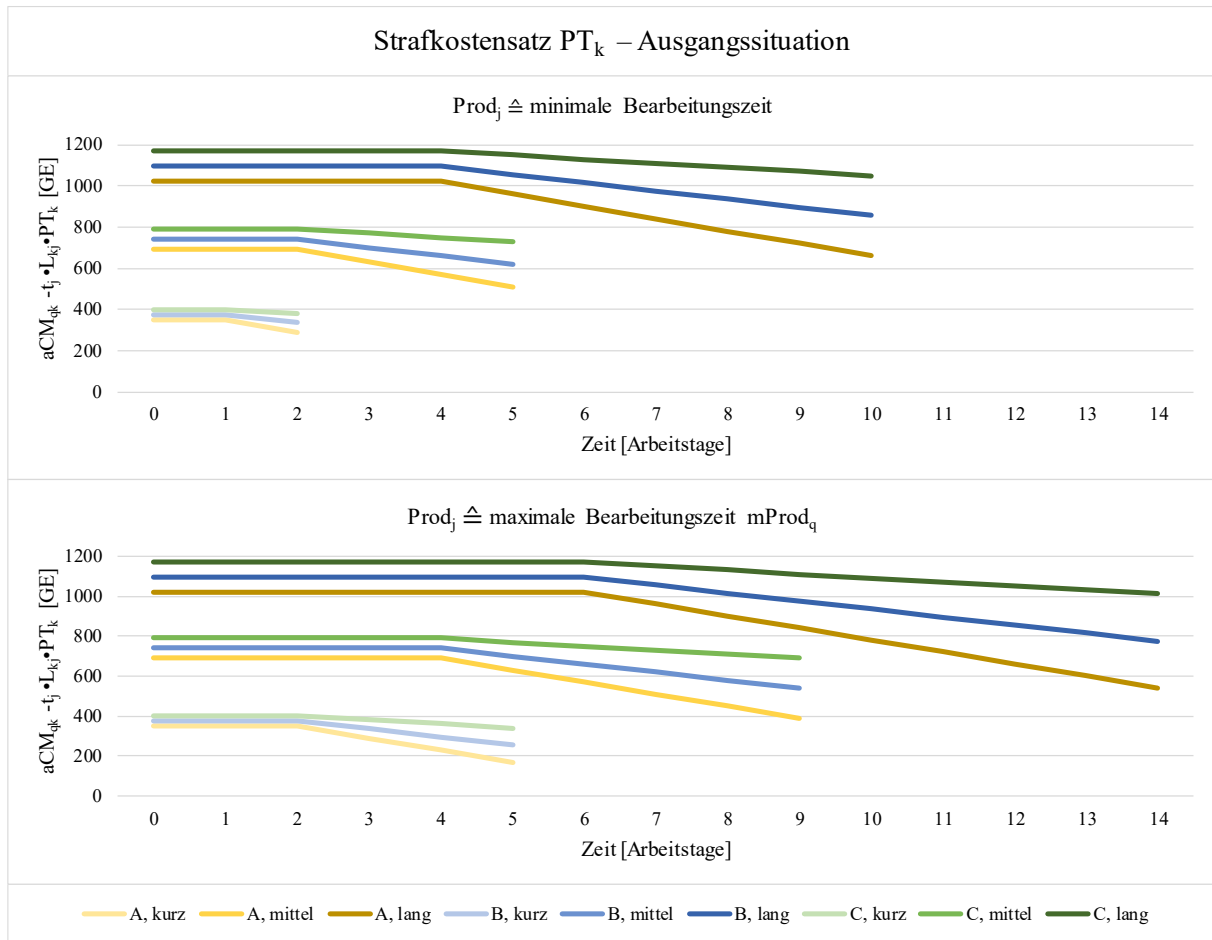
9.2.3 Variation des Strafkostensatzes für Verspätungen PT_k

In der dritten Sensitivitätsanalyse wird der Strafkostensatz für Verspätungen PT_k variiert. Die anfallenden Strafkosten stellen für den Kunden einen Preisnachlass als Entschädigung für die verspätete Fertigstellung dar. Bei den Auswertungen der Fallstudien fallen zum Teil sehr hohe Verspätungen auf (s. Abbildung 7.15 und 8.16). Bevor auf die Variation des Strafkostensatzes PT_k eingegangen wird, wird der bisher verwendete Strafkostensatz PT_k mit $PT_A = 60$, $PT_B = 40$ und $PT_C = 20$ genauer analysiert, um ein tiefgreifendes Verständnis dafür zu schaffen, wieso es bisher zu teilweise sehr hohen Verspätungen kommt.

Verspätungen entstehen, wenn der Auftrag j nach dem gewünschten Zeitpunkt D_j fertiggestellt wird. Die maximale Verspätung ergibt sich aus der Differenz des gewünschten Fertigstellungszeitpunktes D_j

und der Deadline \bar{D}_j . Eine Fertigstellung nach der Deadline \bar{D}_j wird durch die Restriktionsgruppe (5.13) des Produktionsplanungsmodells ausgeschlossen. In den Fallstudien sind die Fristen D_j und \bar{D}_j abhängig von dem regulären Freigabezeitpunkt R_j und der Bearbeitungszeit $Prod_j$ generiert. Wie bereits in Kapitel 6 erläutert, ergibt sich der gewünschte Fertigstellungszeitpunkt D_j des Auftrags j aus dem auf eine ganze Zahl gerundeten Ergebnis des regulären Freigabezeitpunktes R_j zuzüglich der vierfachen Bearbeitungszeit $Prod_j$. Der einzige Unterschied bei der Generierung der Deadline \bar{D}_j ist, dass die neunfache Bearbeitungszeit $Prod_j$ zum regulären Freigabezeitpunkt R_j hinzuaddiert wird. Da die Bearbeitungszeiten $Prod_j$ zufällig in einem Intervall zwischen der minimalen und der maximalen Bearbeitungszeit $mProd_q$ der zugehörigen Auftragsgruppe q erzeugt werden, werden im Folgenden zwei verschiedene Fälle betrachtet. Zum einen wird angenommen, dass $Prod_j$ der minimalen Bearbeitungszeit der Auftragsgruppe q (kurz = 0,25, mittel = 0,6, lang = 1,1) entspricht, und zum anderen, dass $Prod_j$ der maximalen Bearbeitungszeit $mProd_q$ der Auftragsgruppe q ($mProd_{kurz} = 0,5$, $mProd_{mittel} = 1$, $mProd_{lang} = 1,5$) entspricht. Um das nachfolgende Beispiel möglichst einfach zu halten, wird angenommen, dass der Auftrag j regulär zum Zeitpunkt 0 freigegeben wird ($R_j = 0$) und dass der individuelle Deckungsbeitrag CM_j dem durchschnittlichen Deckungsbeitrag aCM_{qk} der zugehörigen Auftragsgruppe q und des Kundensegments k entspricht. So kann für jedes Produkt qk der Verlauf des zu erwirtschafteten Deckungsbeitrags aCM_{qk} abzüglich der anfallenden Strafkosten für Verspätungen ermittelt werden. Dabei ist zu beachten, dass weitere Kosten, wie beispielsweise Rüstkosten, bei der nachfolgenden Analyse nicht berücksichtigt werden.

Mithilfe der Abbildung 9.18 kann für jedes Produkt qk abgelesen werden, wie hoch der Deckungsbeitrag aCM_{qk} abzüglich der anfallenden Verspätungskosten zum Zeitpunkt t ist. Bis zum gewünschten Fertigstellungszeitpunkt D_j fallen keine Verspätungskosten an. Da der spätmöglichste Fertigstellungszeitpunkt die Deadline \bar{D}_j ist, endet in der Abbildung 9.18 die Linie für ein Produkt qk jeweils zu diesem Zeitpunkt. Bei der oberen Graphik entspricht die Bearbeitungszeit $Prod_j$ der minimalen Bearbeitungszeit der Auftragsgruppe q . Demnach liegen die Fristen D_j und \bar{D}_j näher beieinander. Bei der unteren Graphik entspricht die Bearbeitungszeit $Prod_j$ der maximalen Bearbeitungszeit $mProd_q$ der Auftragsgruppe q . Beiden Graphiken ist deutlich zu entnehmen, dass auch bei der maximalen Verspätung bei allen Produkten qk immer noch ein positives Ergebnis aus dem Deckungsbeitrag aCM_{qk} abzüglich der anfallenden Strafkosten entsteht. Demzufolge ist es logisch und zu erwarten, dass es sich lohnt, einen Auftrag j anzunehmen, auch wenn dieser um mehrere Tage verspätet fertiggestellt wird.



Mithilfe einer Sensitivitätsanalyse soll untersucht werden, welchen Einfluss ein veränderter Strafkostensatz PT_k auf die Lösungen der ausgewählten Strategien besitzt. Der Strafkostensatz PT_k wird dabei für alle Kundensegmente $k \in K$ verändert. Es werden vier Variationen durchgeführt. PT_k wird im Vergleich zur Ausgangssituation verdoppelt, vervierfacht, versechsfacht und verachtfach (s. Tabelle 9.7). In Anhang E sind, nach gleichem Schema wie in Abbildung 9.18, die Analysen der variierten Strafkostensätze PT_k aufgeführt. Ab der ersten Variation kommt es bereits zu einem negativen Ergebnis aus dem Deckungsbeitrag abzüglich der Verspätungskosten. So werden -10 GE erwirtschaftet, wenn ein kurzer Auftrag j aus der Kundengruppe A erst zur Deadline \bar{D}_j fertiggestellt wird und die Bearbeitungszeit $Prod_j$ der maximalen Bearbeitungszeit $mProd_{kurz}$ entspricht. Bei dem verachtfachen Strafkostensatz PT_k (Variation 4) wird, wenn die Bearbeitungszeit $Prod_j$ der maximalen Bearbeitungszeit $mProd_q$ der zugehörigen Auftragsgruppe q entspricht und der Auftrag j erst zur Deadline \bar{D}_j fertiggestellt wird, für alle Produkte qk ein negatives Ergebnis aus dem Deckungsbeitrag aCM_{qk} abzüglich der Verspätungskosten erzielt. Folglich werden Verspätungen immer unattraktiver. Für die Sensitivitätsanalyse wird demnach erwartet, dass sich die Summe der verspäteten Zeiteinheiten reduziert.

Tabelle 9.7: Übersicht über die Variation von PT_k

	PT_A	PT_B	PT_C
Ausgangssituation	60	40	20
Variation 1	120	80	40
Variation 2	240	160	80
Variation 3	360	240	120
Variation 4	480	320	160

Da der Strafkostensatz PT_k in dem Kapazitätszuweisungsmodell nicht verwendet wird, hat diese Sensitivitätsanalyse keine Auswirkungen auf das Ergebnis dieses Optimierungsmodells. Folglich bleiben die einfachen Buchungslimits x_{qk} wie in der Ausgangssituation bestehen (s. Tabelle 7.2 für Fallstudie 1). Gleiches gilt auch für die geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} (s. Tabelle 7.3 für Fallstudie 1). Es werden, wie auch bei der ersten Sensitivitätsanalyse, die ersten 200 Datensätze der Fallstudie 1 verwendet. Nachfolgend werden die über die 200 Datensätze gemittelten Ergebnisse der ausgewählten Strategien präsentiert und analysiert.

Die durchschnittlichen Profitergebnisse sind in Abbildung 9.19 dargestellt. Wie bei der vorherigen Sensitivitätsanalyse werden sowohl die relativen Ergebnisse im direkten Vergleich zu dem Profitergebnis der FCFS Strategie (obere Graphik) als auch die absoluten Ergebnisse (untere Graphik) aufgeführt. Durch die obere Graphik sind Veränderungen gegenüber der Vergleichsstrategie FCFS deutlicher sichtbar und in der unteren Graphik ist besser zu erkennen, dass die Erhöhung des Strafkostensatzes PT_k sich negativ auf die Profitergebnisse auswirkt. Insbesondere die negativen Auswirkungen auf die FCFS Strategie sind dabei hervorzuheben. Dies lässt sich dadurch begründen, dass sich bei der FCFS Strategie weder an der Auftragsannahmeentscheidung noch an der geplanten Bearbeitungsreihenfolge etwas verändert, obwohl die Kosten für die Verspätungen deutlich ansteigen, wodurch der Profit geschmälert wird.

Dadurch, dass bei den entwickelten RM Ansätzen der Strafkostensatz PT_k in dem Auftragsannahmeprozess – genauer gesagt in der zweiten Hürde, dem Produktionsplanungsmodell – berücksichtigt wird, kann die Summe der verspäteten Tage reduziert werden. Dies wird anhand der Ergebnisse aus Abbildung 9.20 ersichtlich, welche auf der übernächsten Seite aufgeführt ist. Aufgrund dessen ist es möglich, dass die Profitergebnisse insbesondere im Vergleich zu dem Ergebnis der FCFS Strategie deutlich besser ausfallen (s. Abbildung 9.19). Auffällig bei den Profitergebnissen ist, dass ab Variation 2 nicht mehr der erlösorientierte Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III, sondern unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV zu dem höchsten Profitergebnis führt. Auch die RNBL Strategie führt ab Variation 2 zu einem besseren Profitergebnis als die NDV Strategie. Zu begründen sind diese Ergebnisse durch die Summe der verspäteten Fertigstellungen. In Abbildung 9.20 ist zu sehen,

dass insbesondere die hohe Summe der Verspätungen der NDV Strategie sich mit Erhöhung des Strafkostensatzes PT_k deutlich verringert. Jedoch fällt diese immer noch höher als bei den anderen Strategien aus. Mit dem erlösorientierten Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV ist die Summe der Verspätungen am geringsten, gefolgt von der RNBL Strategie. Dadurch, dass die Verspätungskosten im Profit mit einbezogen werden, führt eine geringere Summe an Verspätungen zu einem höheren Profitergebnis. Aus diesem Grund ist es möglich, dass die zuvor jeweils bezüglich des Profits schwächeren Strategien (erlösorientierter Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV, RNBL Strategie) mit Erhöhung des Strafkostensatzes PT_k gegenüber den jeweils anderen Strategien (erlösorientierter Ansatz unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III, NDV Strategie) überlegen sind.

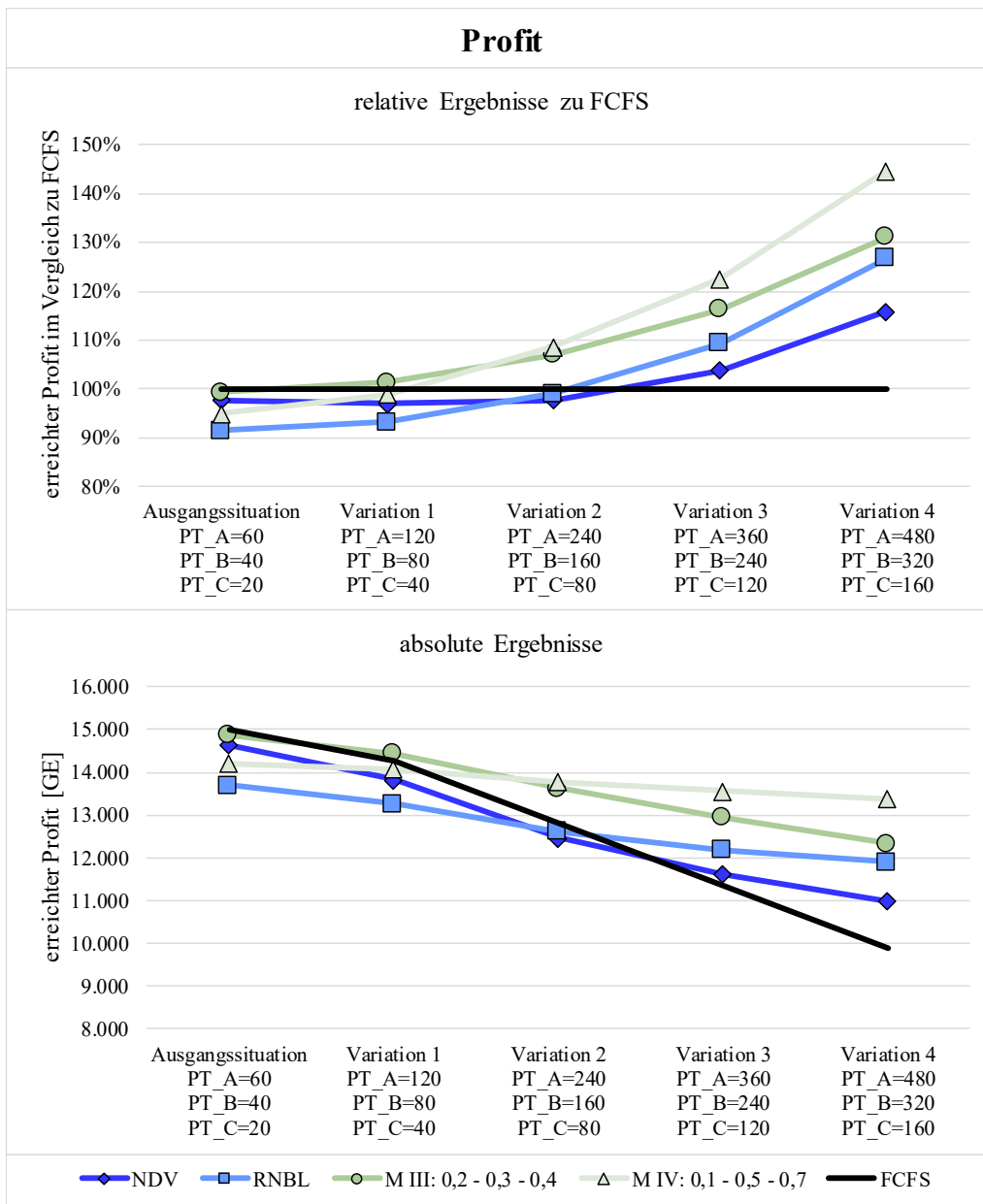


Abbildung 9.19: Durchschnittliche Profitergebnisse bei Variation von PT_k

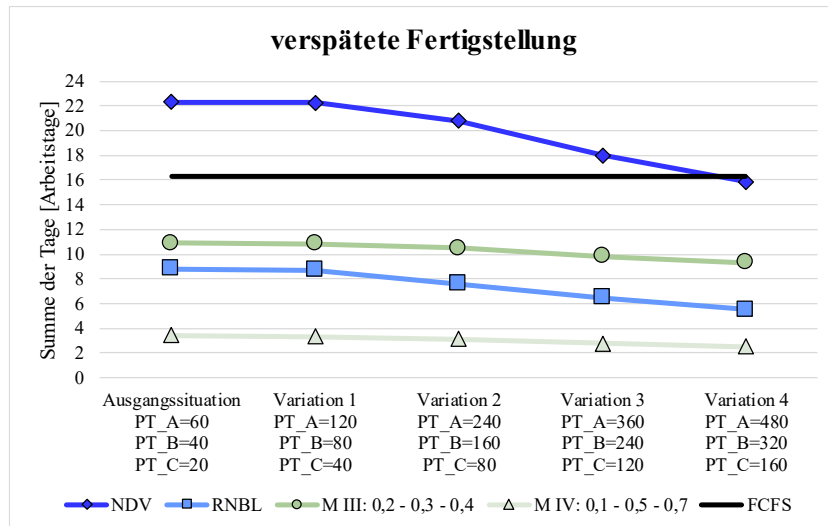


Abbildung 9.20: Summe der verspäteten Tage bei Variation des Strafkostensatzes PT_k

Darüber hinaus fällt anhand der Abbildung 9.20 auf, dass die Summe der Verspätungen bei den erlösorientierten Ansätzen im Vergleich zu den mengenorientierten Ansätzen relativ konstant bleibt. Auch bei dem Anteil der ungenutzten Kapazität ist bei den erlösorientierten Ansätzen kaum eine Veränderung zu sehen (s. Abbildung 9.21). Die bei den mengenorientierten Ansätzen verringerte Summe an verspäteten Zeiteinheiten kann durch einen zum Teil leicht höheren Anteil an ungenutzter Kapazität erklärt werden (s. Abbildung 9.21). Durch diesen erhöhten Anteil an ungenutzter Kapazität sowie die sinkende Summe der Verspätungen kann geschlossen werden, dass eine Erhöhung des Strafkostensatzes PT_k bei den mengenorientierten Ansätzen dazu führt, dass weniger Aufträge angenommen werden und diese tendenziell in einem geringeren Umfang verspätet sind.

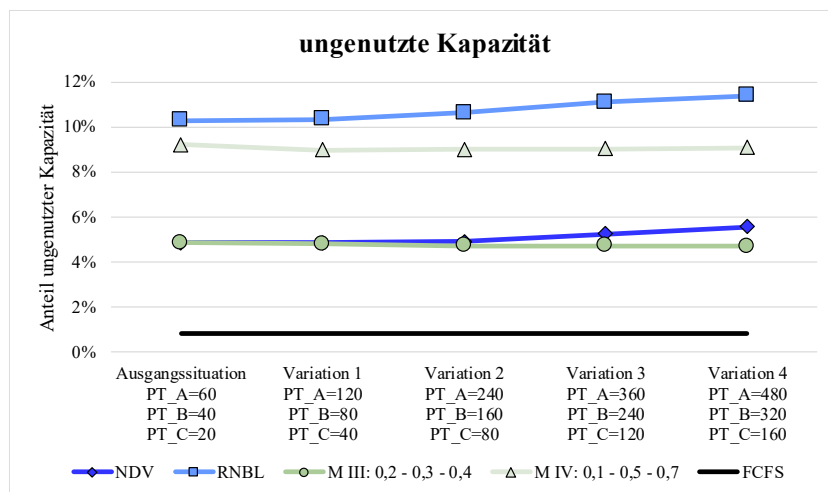


Abbildung 9.21: Durchschnittlich ungenutzte Kapazität bei Variation von PT_k

Ein genauerer Blick auf die aufgeschlüsselte Darstellung der Ablehnungen, welche in Abbildung 9.22 zu sehen ist, bestätigt die zuvor aufgestellte Schlussfolgerung und zeigt, dass bei den mengenorientierten Ansätzen eine steigende Anzahl an Ablehnungen aufgrund der zweiten Hürde im Auftragsannahme-

prozess zu beobachten ist und es folglich zu weniger Auftragsannahmen kommt. Die Anzahl der Ablehnungen, welche aufgrund der ersten Hürde getroffen werden, ist nahezu konstant. Dies ist logisch und zu erwarten, da sich die einfachen Buchungslimits x_{qk} und folglich auch die geschachtelten Buchungslimits $x_{n_{qk}}$ mit der Variation des Strafkostensatzes PT_k nicht verändern. Die minimalen Unterschiede, welche zu beobachten sind, kommen durch andere Auftragsannahmeentscheidungen zustande. Bei den erlösorientierten Ansätzen hingegen sind die Ergebnisse nahezu gleichbleiben.

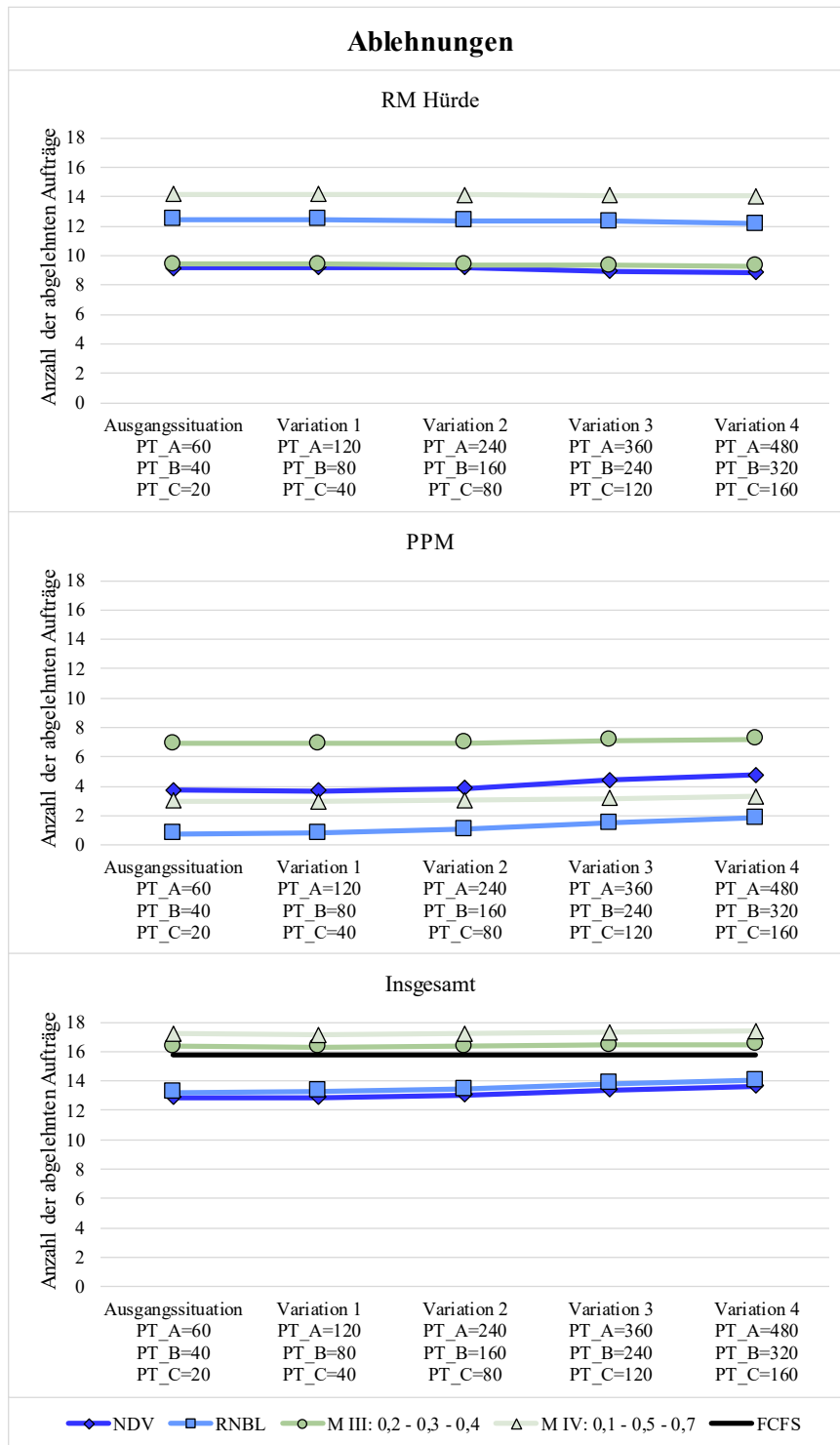


Abbildung 9.22: Aufgeschlüsselte Darstellung der Ablehnungen bei Variation von PT_k

Zu guter Letzt sind in Abbildung 9.23 die Servicelevelergebnisse bei Variation des Strafkostensatzes PT_k aufgeführt. Dadurch, dass bei den Ablehnungen nur geringfügige Unterschiede bei Erhöhung von PT_k zu erkennen sind, sind auch bei den erreichten Servicelevels nahezu konstante Ergebnisse sichtbar.

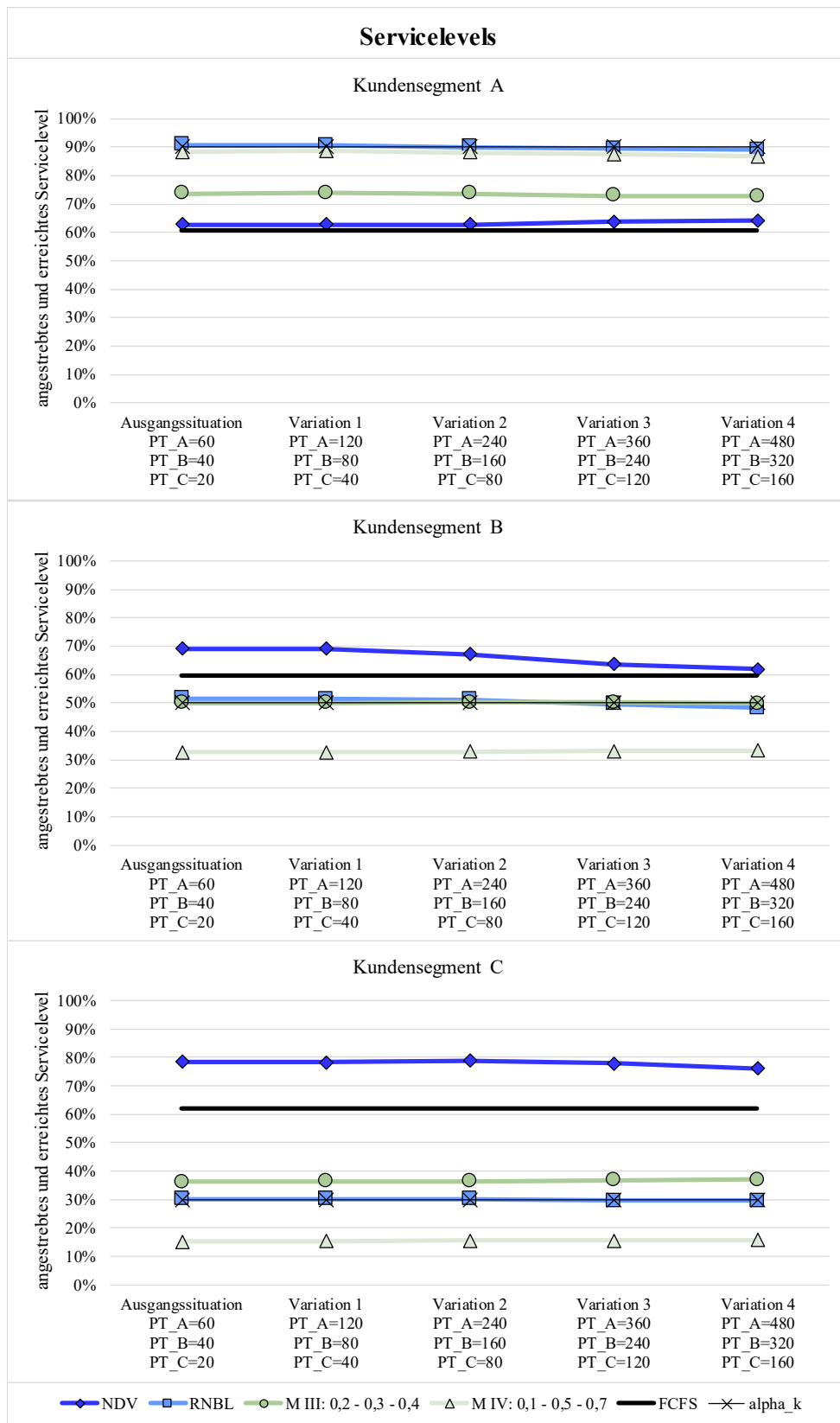


Abbildung 9.23: Durchschnittlich erreichte Servicelevels bei Variation von PT_k

Am ehesten fällt bei der NDV Strategie das sich reduzierende Servicelevel der B-Kunden auf. Aufgrund dessen, dass Aufträge von B-Kunden je Zeiteinheit einen geringeren Deckungsbeitrag als Aufträge von C-Kunden besitzen und dass das Servicelevel α_B der B-Kunden bei der NDV Strategie immer überschritten wird, kann am ehesten durch eine reduzierte Anzahl von Auftragsannahmen von B-Kunden eine stärkere Reduktion des Profitergebnisses verhindert werden. Würde die Anzahl der angenommenen Aufträgen von A-Kunden noch weiter reduziert werden, wären die Abweichungen von dem angestrebten Servicelevel α_A noch größer als sie es ohnehin schon sind. In abgeschwächter Form kann das gleiche Phänomen bei der RNBL Strategie beobachtet werden. Auch dort führt die Erhöhung des Strafkostensatzes PT_k zu einer Verschlechterung des erreichten Servicelevels der B-Kunden.

Alles in allem kann mithilfe der Sensitivitätsanalyse des Parameters PT_k gezeigt werden, dass im Vergleich zu den vorherigen beiden Sensitivitätsanalysen dieser Parameter zum Teil einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse besitzt, da sich die festen Muster der Performance der ausgewählten Strategien verändern. Beispielsweise führt ab einem vervierfachen Strafkostensatz PT_k nicht mehr die erlösorientierte Strategie unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M III sondern unter Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV zu dem besten Profitergebnis. So wie die Daten in der Ausgangssituation gewählt sind, ist es zu erwarten, dass es zum Teil zu sehr hohen Verspätungen kommt. Ist eine geringere Summe an Verspätungen gewünscht, so sollten höhere Werte für den Strafkostensatz PT_k gewählt werden. Alternativ sollten die Deadline \bar{D}_j und der gewünschte Fertigstellungszeitpunkt D_j näher beieinander liegen, um die maximale Verspätung stärker zu begrenzen.

Über alle Fallstudien und Sensitivitätsanalysen hinweg ist hinsichtlich der erreichten Servicelevels weiterhin die RNBL Strategie hervorzuheben. Das mit der RNBL Strategie erreichte Servicelevel der wichtigen A-Kunden kann mit keiner Strategie übertroffen werden. Darüber hinaus ist bei dieser Strategie auch eine deutliche Orientierung an den angestrebten Servicelevels α_k zu erkennen. Mithilfe der letzten Sensitivitätsanalyse konnte zusätzlich gezeigt werden, dass mit einem höheren Strafkostensatz PT_k mit der RNBL Strategie auch bessere Profitergebnisse als mit der Vergleichsstrategie FCFS und mit der NDV Strategie erzielt werden können. Insgesamt überzeugt die RNBL Strategie über die verschiedenen Fallstudien und Sensitivitätsanalysen hinweg mit besonders guten Servicelevelergebnissen sowie sehr guten Profitergebnissen und führt somit zu einem sehr guten Kompromiss zwischen den konkurrierenden Zielsetzungen.

10 Kritik, Limitationen und Ausblick

In diesem Kapitel werden die zuvor vorgestellten RM Ansätze kritisch betrachtet. Darüber hinaus werden Limitationen sowie ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsarbeiten aufgezeigt. Zuerst wird auf Kritikpunkte der entwickelten Ansätze eingegangen. Anschließend werden kritische Aspekte bezüglich der verwendeten Fallstudien diskutiert.

Ein großer Vorteil der entwickelten Ansätze ist, dass die Aufträge nicht vollständig kundenanonym behandelt werden, sondern dass die Kunden verschiedenen Kundensegmenten k zugeordnet werden und der Kundenwert dieser Segmente bei der Auftragsannahmeentscheidung berücksichtigt wird. Somit können insbesondere Aufträge der wichtigen A-Kunden bevorzugt werden. Allerdings wird die Auftragsannahmeentscheidung innerhalb eines Kundensegments k weiterhin kundenanonym getroffen. So wird zum Beispiel nicht berücksichtigt, wenn mehrere Aufträge von demselben Kunden erteilt werden. Insbesondere wenn mehrere Aufträge von einem Kunden zeitgleich gestellt werden, wäre es allerdings sinnvoll, dies bei der Auftragsannahmeentscheidung zu berücksichtigen, denn ein Kunde empfindet es sicherlich nicht als guten Service, wenn beispielsweise nur einer von zwei zeitgleich gestellten Aufträgen angenommen wird. Bei von einem Kunden zeitgleich gestellten Aufträgen könnten diese entweder zu einem größeren Auftrag zusammengefasst werden oder es sollte anderweitig sichergestellt werden, dass für diese Aufträge die gleiche Entscheidung getroffen wird. Eine Zusammenfassung zu einem größeren Auftrag bringt den Vorteil mit sich, dass die Aufträge auch in der Produktionsplanung unmittelbar hintereinander gefertigt werden, da sie von dem Optimierungsmodell als ein Auftrag behandelt werden. Somit würde es nur zu einer kurzen Zwischenlagerung kommen, bis alle zusammengefassten Aufträge fertiggestellt sind und gemeinsam zum Kunden geliefert oder vom Kunden abgeholt werden könnten.

Für die zusammengefassten Aufträge wäre es sinnvoll, eine weitere Auftragsgruppe q einzuführen, in welcher die von einem Kunden zeitgleich erteilten Aufträge jeweils zu einem größeren Auftrag gebündelt enthalten sind. Allerdings müsste dann unter anderem auch die Nachfrageprognose angepasst werden, sodass ebenfalls die Anzahl der zeitgleich eintreffenden Aufträge je Kundensegment k prognostiziert wird. Dies könnte die Nachfrageprognose jedoch verkomplizieren. Umso detaillierter eine Vorhersage getroffen werden muss, desto größer ist die Gefahr einer Fehleinschätzung.

Generell führt eine weitere Auftragsgruppe q dazu, dass auch für die gebündelten Aufträge für jedes Kundensegment k einfache Buchungslimits $x_{zusammengefasst,k}$ ermittelt werden. Bezüglich der Schachtelung ist anschließend noch zu untersuchen, wie die zusammengefassten Aufträge in der Schachtelungshierarchie anzuordnen sind. Es sollte analysiert werden, ob es vorteilhaft ist, wenn die einzelnen Aufträge Zugriff auf die für die gebündelten Aufträge reservierte Kapazität erhalten oder anders herum oder ob die für die gebündelten Aufträge reservierte Kapazität eventuell gar nicht in die Schachtelung mit aufgenommen werden sollte.

Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass in den vorgestellten Ansätzen keine Interaktion mit dem Kunden berücksichtigt wird. Es wird angenommen, dass die mittels der entwickelten Ansätze getroffene Auftragsannahme- und Planungsentscheidung vom Kunden akzeptiert wird. Jedoch könnte es auch dazu kommen, dass der Kunde einen vom produzierenden Unternehmen angenommenen Auftrag zurückzieht. Gemäß Hintsches (2012, S. 65) und Sucky (2009) ist die Stornierungsquote in der MTO Produktion jedoch sehr gering, weshalb dieser Fall bewusst in den entwickelten Ansätzen nicht berücksichtigt wird. Wenn von dem produzierenden Unternehmen eine (höhere) Stornierungsquote beobachtet wird, könnte mithilfe einer gezielten Überbuchungssteuerung (s. Kapitel 3.3.3) versucht werden, die Kapazitätsauslastung zu optimieren.

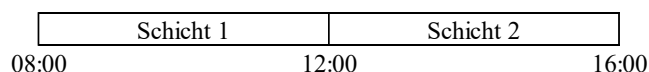
Auch Verhandlungen werden in den entwickelten Ansätzen nicht berücksichtigt. Es gibt lediglich einen individuellen Deckungsbeitrag CM_j , welcher bei den untersuchten Fallstudien um +/-10% um den durchschnittlichen Deckungsbeitrag aCM_{qk} variiert. Insbesondere die erlösorientierten Ansätze könnten jedoch eine Entscheidungsunterstützung für Verhandlungen darstellen, wie es beispielsweise Gallien et al. (2004) in ihrer Arbeit zeigen. Fällt die Annahmeentscheidung gemäß dem Bid-Preis negativ aus, könnte dem Kunden zum Beispiel ein neuer, erhöhter Preis kommuniziert werden, welcher zu einer positiven Annahmeentscheidung in der ersten Hürde führt. Allerdings sollte dabei bedacht werden, dass eine positive Annahmeentscheidung der ersten Hürde nicht zwangsläufig zu einer endgültigen Auftragsannahme führt. Weiterhin ist eine Ablehnung aufgrund des Produktionsplanungsmodells möglich. Wenn der Kunde mit einem erhöhten Preis nicht einverstanden ist, könnte alternativ überprüft werden, ob der Auftrag bei einer späteren Deadline und folglich einem längeren Bearbeitungszeitraum angenommen werden könnte. Bei Verwendung eines mengenorientierten Ansatzes besteht diese Möglichkeit nicht, da die Annahmeentscheidung der ersten Hürde nicht basierend auf einem Preis, sondern basierend auf der benötigten und der noch zur Verfügung stehenden, für das Produkt qk reservierten Kapazität, d.h. den Buchungslimits x_{qk} bzw. xn_{qk} , getroffen wird.

Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass jegliche Art von Störungen, welche die Produktionsplanung beeinflussen, nicht in den entwickelten Ansätzen berücksichtigt werden. Da es in der Praxis allerdings immer wieder zu unvorhersehbaren Störungen kommt, sollte untersucht werden, inwiefern die Performance der

entwickelten Ansätze anfällig gegenüber Störungen ist. Als beispielhafte Störungen können Maschinenausfälle, Krankheitsfälle in der Belegschaft oder Lieferprobleme aufgeführt werden (Lödding, 2016, S. 3). Die zum Teil ungenutzte Kapazität, welche bei den entwickelten Ansätzen zu beobachten ist, kann in Hinblick auf Störungen auch als Puffer ausgelegt werden. Demnach kann es vorteilhaft sein, nicht die vollständige Kapazität auszunutzen. Darüber hinaus könnte ebenso bei der Abschätzung der Bearbeitungszeiten $mProd_q$ und $Prod_j$ darauf geachtet werden, die Zeit eher zu über- als zu unterschätzen, um somit einen weiteren Puffer in die Planung mit aufzunehmen.

Eine weitere Möglichkeit, die Auswirkungen von Störungen minimal zu halten, ist die Kapazität in Ausnahmefällen anzupassen, um beispielsweise durch Störung verursachte Rückstände aufzuholen. Im Rahmen der Überprüfung der Anwendungsvoraussetzungen des RM in der MTO Produktion (s. Kapitel 4.1) wurde festgestellt, dass eine Anpassung der Kapazität jedoch nicht problemlos durchgeführt werden kann, sondern mit hohen Kosten verbunden ist und meist sprunghaft erfolgt. Allerdings ist bei einer Kapazitätsanpassung aufgrund von Rückständen keine dauerhafte Kapazitätserhöhung und, wenn rechtzeitig reagiert wird, nur eine Anpassung in kleinerem Maße notwendig. Somit können Überstunden oder beispielsweise bereits eingeplante Puffer zum Ausgleich genutzt werden. Eine Möglichkeit Puffer fest einzuplanen ist, in Schichten zu arbeiten und diese zu entkoppeln. So könnte ein Ausgleich des Rückstands zeitnah erfolgen und weitere Rückstände könnten vermieden werden. Eine Gegenüberstellung eines gekoppelten und entkoppelten Schichtsystems ist in Abbildung 10.1 aufgeführt (Lödding, 2019). Eine Umsetzung eines entkoppelten Schichtsystems führt bei den entwickelten Ansätzen zu keinen Veränderungen. In den Fallstudien wurde festgelegt, dass ein Arbeitstag acht Stunden umfasst (s. Kapitel 6), wie es sowohl in der beispielhaften Darstellung eines gekoppelten als auch eines entkoppelten Schichtsystems der Fall ist (s. Abbildung 10.1). Dadurch, dass auch die Bearbeitungszeiten $mProd_q$ und $Prod_j$ in Arbeitstagen angegeben werden, besteht weder für das Kapazitätszuweisungsmodell noch für das Produktionsplanungsmodell ein Unterschied zwischen einem gekoppelten und einem entkoppelten Schichtsystem. Sobald ein Rückstand festgestellt wird, sollte die Nutzung der Puffer manuell veranlasst und geplant werden. Eine Anpassung der geplanten Bearbeitungsreihenfolge ist nicht zwangsläufig notwendig. So könnte beispielsweise lediglich durch Nutzung der Puffer die Kapazität kurzfristig erweitert werden.

gekoppeltes Schichtsystem:



entkoppeltes Schichtsystem:

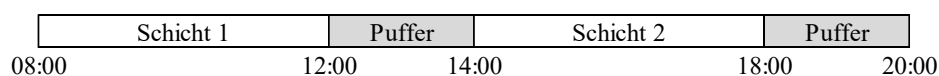


Abbildung 10.1: Gegenüberstellung eines gekoppelten und entkoppelten Schichtsystems nach Lödding, 2016, S. 652

Bereits in der Beschreibung der Problemstellung (s. Kapitel 5.1) wurde thematisiert, dass trotz der Betrachtung nur einer einzelnen Maschine weitere Produktionsschritte vor bzw. nach der Bearbeitung auf der Engpassmaschine mithilfe der Rückwärts- bzw. Vorwärtsterminierung eingeplant werden können. In diesem Fall ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Freigabedaten \bar{R}_j und R_j sowie die Fristen D_j und \bar{D}_j an die Bearbeitung auf der Engpassmaschine angepasst werden müssen. Wenn beispielsweise nach der Bearbeitung auf der Engpassmaschine noch weitere Produktionsschritte im Umfang eines Arbeitstages erfolgen, sollten für das Produktionsplanungsmodell die Fristen D_j und \bar{D}_j um einen Tag nach vorne gezogen werden, damit die vollständige Bearbeitung möglichst zum gewünschten Fertigstellungszeitpunkt bzw. spätestens zur Deadline beendet wird. Sobald jedoch mehrere Engpässe im Produktionsprozess vorhanden sind, ist eine Anpassung des Produktionsplanungsmodells erforderlich, da alle Engpässe in der Produktionsplanung berücksichtigt werden sollten. Auch eine parallele Bearbeitung ist bei dem verwendeten Produktionsplanungsmodell ausgeschlossen. Da jedoch in der Literatur verschiedene Modelle für unterschiedliche Produktionssituation existieren, könnte bei einer veränderten Situation in der Produktion gegebenenfalls ein anderes sogenanntes Order Acceptance and Scheduling Modell als Basis für das Produktionsplanungsmodell verwendet werden, welches dann um die Servicelevelrestriktionsgruppe und andere für die Auftragsannahme- und Planungsentscheidungen relevante Aspekte erweitert wird. Für Reviews zu Order Acceptance and Scheduling Modellen wird auf Palakiti et al. (2019) und Slotnick (2011) verwiesen. Zusätzlich sollte überprüft werden, ob bei einer veränderten Situation in der Produktion auch Anpassungen für das Kapazitätszuweisungsmodell notwendig sind.

Bei dem in Kapitel 5.2.2 präsentierten Produktionsplanungsmodell wird ein verfrühter Produktionsbeginn bzw. eine verspätete Fertigstellung exakt erfasst und anschließend mit dem Strafkostensatz PE_q bzw. PT_k in der Zielfunktion bewertet. Wenn Materiallieferungen und der Versand bzw. die Abholung von fertigen Produkten flexibel erfolgen, ist dies sinnvoll. Allerdings wäre denkbar, dass aus praktischer Sicht eine Aufrundung auf ganze Tage besser wäre, da in der Praxis nicht davon ausgegangen werden kann, dass Materiallieferungen und der Versand bzw. die Abholung von fertigen Produkten flexibel erfolgen, sondern eher zu vereinbarten Zeiten. Wenn die fertigen Produkte nur einmal täglich versendet werden, kommt das fertige Produkt auch bei einer zum Beispiel nur um eine halbe Stunde verspäteten Fertigstellung bei dem Kunden erst einen Tag später als gewünscht an. Somit ist eine Aufrundung notwendig, um die Strafkosten richtig zu berechnen und die vollständige, vom Kunden wahrgenommene Verspätung zu berücksichtigen. Gleiches gilt für einen verfrühten Produktionsbeginn. Eine Aufrundung eines verfrühten Produktionsbeginns bzw. einer verspäteten Fertigstellung kann jedoch sehr einfach in dem Produktionsplanungsmodell umgesetzt werden: Anstatt die Variablen e_j und t_j als kontinuierliche Variablen zu definieren, sollten diese Variablen als ganzzahlige Variablen festgelegt werden. Demzufolge sollten die Variablen e_j und t_j aus der Nichtnegativitätsrestriktionsgruppe (5.24) entfernt werden und stattdessen sollte die Restriktionsgruppe (10.1) ergänzt werden.

$$e_j, t_j \in \mathbb{N}_0 \quad \forall j \in J \quad (10.1)$$

In weiteren zukünftigen Forschungsarbeiten könnte darüber hinaus analysiert werden, inwiefern die Berücksichtigung der angestrebten Servicelevels α_k in dem Produktionsplanungsmodell verbessert werden könnte. Eine Idee dazu wäre es, eine langfristige Perspektive in das Produktionsplanungsmodell zu integrieren. Bei der momentanen Formulierung der Restriktionsgruppe (5.16) werden zur Ermittlung des erreichten Servicelevels die angenommenen Aufträge eines Kundensegments k ins Verhältnis zu den bis zu diesem Zeitpunkt eingetroffenen Aufträgen des Segments k gesetzt. Wenn anstelle der bisher eingetroffenen Aufträge die erwartete Nachfrage DF_{qk} verwendet wird, könnten somit auch zukünftige Aufträge unmittelbar berücksichtigt werden. Der Nachteil bei dieser Variante wäre jedoch, dass die Abweichungsvariablen dev_k erst nach Abschluss des vollständigen Auftragsannahmeprozesses – und folglich erst, nachdem alle 40 Aufträge eingetroffen sind – einen aussagekräftigen Wert besitzen. Darüber hinaus würden die zuerst eintreffenden Aufträge bevorzugt angenommen werden, um die Differenz zwischen den erreichten Servicelevels und den angestrebten Servicelevels α_k möglichst schnell zu minimieren. Demzufolge kann an dieser Stelle ein zukünftiger Forschungsbedarf aufgezeigt werden.

Ferner könnte in künftigen Forschungsarbeiten untersucht werden, inwiefern die Produktionsplanung zu einer rollierenden Planung abgewandelt werden könnte. So könnten ab einem gewissen Zeitpunkt ältere, bereits fertiggestellte Aufträge nicht mehr berücksichtigt werden und stattdessen könnte der Planungshorizont in die Zukunft erweitert werden. Folglich müssten die Auftragsannahmeentscheidung und Produktionsplanung nicht für einen begrenzten, starren Zeithorizont getroffen werden, sondern dieser könnte mit der Zeit angepasst werden. Eine Anpassung in Hinblick auf eine rollierende Planung hätte Auswirkungen auf beide Optimierungsmodelle, da in beiden Modellen die zur Verfügung stehende Kapazität berücksichtigt wird. Ebenso müssten die Servicelevelrestriktionen beider Optimierungsmodelle angepasst werden.

Als weiterer allgemeiner Ausblick könnte in zukünftigen Arbeiten erforscht werden, ob die ungenutzte Kapazität – sofern sie nicht als Puffer zur Aufholung von Rückständen benötigt wird – zur Produktion von Standardkomponenten verwendet werden kann und ob die entwickelten Ansätzen somit in die Richtung einer ATO Produktion erweitert werden können. Wenn die Möglichkeit besteht, häufig benötigte Standardkomponenten vorzuproduzieren, könnte die Bearbeitungszeit der Aufträge verkürzt werden und somit mehr Freiraum und Flexibilität für weitere, kurzfristig eintreffende Aufträge geschaffen werden.

Auch an den verwendeten Fallstudien gibt es verschiedene Aspekte, die kritisch zu betrachten sind. Durch die Verwendung von 500 Datensätzen, bzw. 200 Datensätzen in den Sensitivitätsanalysen, kann verhindert werden, dass die ermittelten Ergebnisse von einer einzelnen, zufälligen Auftragsreihenfolge und -dichte abhängen. Dies zeigen die durchgeführten Robustheitsanalysen, welche in den vorherigen

Kapiteln 7, 8 und 9 bereits thematisiert wurden. Darüber hinaus konnte durch die Anwendung der entwickelten Ansätze auf drei Fallstudien, die Performance bereits bezüglich unterschiedlicher Kundenzusammensetzungen untersucht werden. Allerdings existieren natürlich noch unendlich viele weitere Möglichkeiten, wie die Daten der Fallstudien festgelegt werden können. So könnten zum Beispiel noch andere Kundenzusammensetzungen oder weitere Aspekte, die bisher noch nicht variiert wurden, betrachtet werden. Beispielsweise wird für jede Fallstudie angenommen, dass es sich bei circa 50% der Aufträge um kurze Aufträge, bei circa 35% um mittlere Aufträge und bei circa 15% um lange Aufträge handelt. Auch diese Zusammensetzung könnte verändert werden und es könnte untersucht werden, ob bzw. inwiefern sich die Ergebnisse der entwickelten Ansätze aufgrund einer anderen Auftragszusammensetzung verändern. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Ergebnisse bei einer veränderten Auftragszusammensetzung ähnlich wie die bei der Variation der zur Verfügung stehenden Kapazität *CAP* ausfallen (s. Kapitel 9.2.2), da sich eine veränderte Auftragszusammensetzung maßgeblich auf das Verhältnis zwischen der Nachfrage und der zur Verfügung stehenden Kapazität *CAP* auswirkt. Folglich würden weiterhin – insbesondere wenn die Nachfrage die Kapazität sehr deutlich übersteigt – sehr gute Ergebnisse der stärksten, entwickelten Ansätze zu erwarten sein.

Darüber hinaus ist in der Praxis nicht davon auszugehen, dass die prognostizierte Nachfrage immer der tatsächlichen Nachfrage entspricht, sondern dass es zu Abweichungen kommen kann. Zu welchen Ergebnissen die entwickelten Ansätze bei abweichender Nachfrage führen, wird in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht. Auch hier gibt es unendlich viele Möglichkeiten, inwiefern die tatsächliche Nachfrage von der prognostizierten Nachfrage abweichen kann. So kann beispielsweise die Gesamtzahl der eintreffenden Aufträge über- bzw. unterschätzt oder die Verteilung der Nachfrage auf die verschiedenen Produkte q_k falsch prognostiziert werden. In weiteren Untersuchungen, welche sich beispielsweise auf die Prognose von Nachfragedaten fokussieren, könnte analysiert werden, inwiefern die Ergebnisse der entwickelten Ansätze von einer abweichenden Nachfrage beeinflusst werden und ob es sinnvoll ist, die Nachfrageprognose in regelmäßigen Zeitintervallen oder bei Feststellung einer Abweichung von der prognostizierten Nachfrage zu aktualisieren. Generell wäre bei einer abweichenden Nachfrage zu erwarten, dass die Strategien, welche bei der Annahmeentscheidung möglichst flexibel agieren können, weiterhin zu sehr guten Ergebnissen führen. Gemeint sind bei den mengenorientierten Ansätzen damit die Strategien NDV und RNBL. Durch die segmentübergreifende Schachtelung ist zu vermuten, dass Abweichungen ausgeglichen werden können und die Performance der Strategien nur geringfügig beeinflusst wird, sofern die tatsächliche Nachfrage nicht in allen Dimensionen, d.h. hinsichtlich der Höhe und der Verteilung, vollständig von der prognostizierten Nachfrage abweicht. Bezüglich der erlösorientierten Strategien ist ebenfalls eine weiterhin recht stabile Performance der entwickelten Strategien zu erwarten. Diese Vermutung basiert darauf, dass auch bei den durchgeführten Sensitivitätsanalysen sich die Ergebnisse meist nur in einem geringeren Umfang verändert haben (s. Kapitel 9.2). Darüber hinaus wird die vorläufige Auftragsannahmeentscheidung

basierend auf einem Preis getroffen wird und nicht produktgenau festgelegt wird, wie viele Aufträge wovon anzunehmen sind, wodurch die erlösorientierten Strategien ebenfalls recht flexibel agieren können. Mithilfe von weiteren Analysen könnten in zukünftigen Forschungsarbeiten die aufgestellten Vermutungen untersucht werden.

11 Fazit

Seitdem sich in den 1960er/70er Jahren die meisten Märkte von einem Verkäufermarkt zu einem Käufermarkt entwickelt haben, steht der Kunde zunehmend im Vordergrund. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, passen sich die produzierenden Unternehmen an die individuellen Kundenwünsche an. Dies hat eine enorme Steigerung der Variantenvielfalt zur Folge (Seeck, 2010, S. 20). Um Kosten zu reduzieren und besser auf die individuellen Anforderungen der Kunden reagieren zu können, fertigen immer mehr Unternehmen nach dem MTO Prinzip (Barut & Sridharan, 2005; Dan et al., 2018). Bei diesem Prinzip beginnt die Produktion erst mit einem vorliegenden Kundenauftrag (Nebl, 2011, S. 822). Durch die in der Regel limitierte Produktionskapazität ist es jedoch nicht möglich, alle Aufträge anzunehmen, weshalb eine Entscheidung über die Annahme und Ablehnung von Aufträgen notwendig wird. Dabei sind die von einem nach dem MTO Prinzip produzierenden Unternehmen verfolgten Ziele, den (kurzfristigen) Profit zu maximieren und insbesondere den für das produzierende Unternehmen wichtigsten Kunden einen guten Service zu bieten, nicht komplementär zueinander, sondern stehen in Konkurrenz, wie Sucky (2009) es bereits in seiner Arbeit betont. Dies kommt dadurch zustande, dass produzierende Unternehmen ihren wichtigsten Kunden oft Preisnachlässe gewähren, um diese stärker an das Unternehmen zu binden. Folglich ist die zu treffende Auftragsannahmeentscheidung unter Berücksichtigung beider, konkurrierender Ziele nicht trivial.

Durch das RM werden quantitative Methoden zur Unterstützung der Annahmeentscheidung geboten. Die MTO Produktion gilt dabei in der RM Literatur als noch recht junges Anwendungsgebiet (Talluri & Van Ryzin, 2004, S. 574). Nichtsdestotrotz können bereits mehrere Arbeiten aufgezeigt werden, welche sich dem RM in der MTO Produktion widmen (s. Kapitel 4.3). Jedoch wird in nur sehr wenigen Arbeiten eine konkrete, bzw. optimierte Produktionsplanung bei der Auftragsannahmeentscheidung berücksichtigt. Dies ist allerdings notwendig, wenn vom Kunden eine Deadline angegeben wird. Nur durch die Erstellung einer – im Idealfall optimierten – Produktionsplanung kann garantiert werden, dass ein Auftrag lediglich angenommen wird, wenn dieser spätestens bis zu der angegebenen Deadline fertiggestellt werden kann. Ferner werden der Service gegenüber dem Kunden und der Kundenwert in den meisten Arbeiten nicht beachtet, obwohl verschiedene Autoren auf die Wichtigkeit dieses Aspekts hinweisen (bspw. Balakrishnan et al., 1996; Wu et al., 2010). Diese Forschungslücke wird durch die in dieser Arbeit entwickelten mengen- und erlösorientierten Ansätze geschlossen.

Generell verfolgen alle entwickelten Ansätze einen zweistufigen Auftragsannahmeprozess, welcher zwei an die betrachtete Problemstellung angepasste und weiterentwickelte Optimierungsmodelle miteinander kombiniert (s. Kapitel 5). In der ersten Hürde des Prozesses wird bei den mengenorientierten Ansätzen basierend auf Buchungslimits und bei den erlösorientierten Ansätzen basierend auf Bid-Preisen eine vorläufige Entscheidung getroffen. In der zweiten Hürde wird durch das Produktionsplanungsmodell unter Berücksichtigung der vom Kunden angegebenen Fristen die endgültige Auftragsannahmeentscheidung getroffen und eine optimierte Produktionsplanung ermittelt.

Vier verschiedene, mengenorientierte Ansätze wurden in Kapitel 7 präsentiert und auf die Fallstudien angewendet. Bei unmittelbarer Verwendung der einfachen Buchungslimits x_{qk} handelt es sich um die Strategie PBL. Darüber hinaus wurden die drei Schachtelungsstrategien NDV, RNBL und NWCS in Kapitel 7.1 eingeführt. Bei der NDV Strategie werden die Produkte qk auf Basis der Nachfragewertigkeit geschachtelt. Folglich sind die Aufträge von C-Kunden an oberster und von A-Kunden an unterster Stelle in der Schachtelungshierarchie angesiedelt. Anders herum ist es bei der RNBL Strategie. Dort werden die Produkte qk für die Schachtelung auf Basis des Kundenwertes sortiert. Bei der NWCS Strategie werden die Buchungslimits x_{qk} nur innerhalb eines Kundensegments k geschachtelt. Somit entfällt der segmentübergreifende Zugriff auf die für andere Produkte reservierte Kapazität.

Durch die Anwendung der entwickelten, mengenorientierten Strategien kann gezeigt werden, dass die entwickelten Ansätze funktionieren und zu unterschiedlichen Kompromissen hinsichtlich der konkurrierenden Zielen führen. Hervorzuheben sind insbesondere die Strategien NDV und RNBL. Mit der NDV Strategie kann über alle Fallstudien hinweg ein Profitergebnis von mindestens 95% im Vergleich zu dem Ergebnis der FCFS Strategie erzielt werden. Allerdings fällt aufgrund der verwendeten Schachtelungshierarchie das erreichte Servicelevel der A-Kunden eher niedriger aus. Anders ist dies bei der RNBL Strategie. Dadurch, dass die A-Kunden in der Hierarchie an oberster Stelle stehen, werden vermehrt Aufträge der A-Kunden angenommen. Die RNBL Strategie ist somit die einzige Strategie, mit welcher in allen Fallstudien das hohe Servicelevel α_A von 90% und gleichzeitig auch die Servicelevels α_B sowie α_C eingehalten werden können. Dadurch, dass mit Aufträgen von A-Kunden ein geringerer Deckungsbeitrag erwirtschaftet wird, fällt jedoch das Profitergebnis der RNBL Strategie meist etwas niedriger als das der NDV Strategie aus. Im Vergleich zu dem mit der FCFS Strategie erreichten Ergebnis ist das Profitergebnis der RNBL Strategie mit über 92% in allen Fallstudien jedoch immer noch sehr gut. Abhängig von der Wichtigkeit der konkurrierenden Ziele können somit zwei unterschiedliche Handlungsempfehlungen ausgesprochen werden: Für den Fall, dass für ein produzierendes Unternehmen das Ziel der Profitmaximierung im Vordergrund steht und die Erreichung der angestrebten Servicelevels α_k vernachlässigt werden kann, ist die NDV Strategie besonders geeignet. Sollte es jedoch anders herum sein und die Erreichung der angestrebten Servicelevels α_k – und insbesondere die Erreichung von α_A der wichtigen A-Kunden – von großer Bedeutung sein, so sollte die RNBL Strategie verwendet werden.

Darüber hinaus kann in dieser Arbeit die in der Literatur ausgesprochene Empfehlung bestätigt werden, zur Anpassung der geschachtelten Buchungslimits xn_{qk} das Standard Nesting und nicht das Theft Nesting zu verwenden, wenn die Aufträge in willkürlicher Reihenfolge eintreffen (Gallego & Topaloglu, 2019, S. 33; Klein & Steinhardt, 2008, S. 134 f.; Phillips, 2021, S. 189). Der Vergleich zwischen den Ergebnissen bei Verwendung des Standard Nestings und des Theft Nestings zeigt, dass die Ergebnisse bei Anwendung des Theft Nestings denen bei Anwendung des Standard Nestings in jeder Hinsicht unterlegen sind (s. Kapitel 7.4). Insgesamt sind somit bei den mengenorientierten Ansätzen die Strategien RNBL (wegen der durchweg besten Servicelevels für die A-Kunden) und NDV (wegen der sehr hohen Profitergebnisse) unter Verwendung des Standard Nestings besonders hervorzuheben.

In Kapitel 8 wurden vier erlösorientierte Ansätze, bei welchen die Auftragsannahmeentscheidung der ersten Hürde auf Basis eines Bid-Preises getroffen wird, präsentiert und analysiert. Ähnlich wie in Hintsches et al. (2010) basiert der Bid-Preis auf dem Schattenpreis der Kapazitätsrestriktion (5.2). Um allerdings auch den Kundenwert in der ersten Hürde der erlösorientierten Ansätzen zu berücksichtigen, wurden in dieser Arbeit kundenspezifische Multiplikatoren $multi_k$ eingeführt. Die Werte dieser Multiplikatoren sind zwischen 0 und 1 zu wählen. Umso höher der Kundenwert eines Segments k ist, desto niedriger ist der dazugehörige Multiplikator $multi_k$ zu wählen, um eine vorläufige Annahme in der ersten Hürde des zweistufigen Auftragsannahmeprozesses zu erleichtern. Vier verschiedene Multiplikatorenansätze wurden im Rahmen dieser Arbeit untersucht (s. Tabelle 8.1). Der Multiplikatorenansatz M I zeichnet sich maßgeblich durch sehr hohe und recht ähnliche Werte aus. Ebenfalls sehr ähnliche Werte besitzt der Multiplikatorenansatz M III, jedoch fallen die Werte generell sehr niedrig aus. Bei dem Multiplikatorenansatz M II sind die Unterschiede zwischen den Werten deutlich größer. Die Werte des Multiplikatorenansatzes M IV ergeben sich aus der Rechnung $1 - \alpha_k$ (mit α_k als Dezimalzahl) und sind somit ebenfalls recht unterschiedlich.

Mit der Durchführung der erlösorientierten Ansätze kann gezeigt werden, dass auch diese Ansätze funktionieren und zu unterschiedlichen Kompromissen hinsichtlich der konkurrierenden Ziele führen. Besonders positiv hervorzuheben sind die Ergebnisse bei Verwendung der Multiplikatorenansätze M III und M IV. Mit dem Multiplikatorenansatz M III weicht das erzielte Profitergebnis um weniger als 1% von dem Ergebnis der FCFS Strategie ab und übertrifft somit die Profitergebnisse der NDV Strategie. Hinsichtlich des zweiten Ziels, der Erreichung der angestrebten Servicelevels, führt bei den erlösorientierten Ansätzen insbesondere die Verwendung des Multiplikatorenansatzes M IV zu sehr guten Ergebnissen, wenn auch diese Ergebnisse den erreichten Servicelevels der RNBL Strategie leicht unterlegen sind.

Die Performance der vier besten Strategien (RNBL, NDV sowie die erlösorientierten Ansätze unter Verwendung der Multiplikatorenansätze M III und M IV) wurden im Rahmen von Sensitivitätsanalysen tiefgreifender untersucht (s. Kapitel 9.2). Weiterhin führt über alle Sensitivitätsanalysen hinweg – und somit auch bei Variation der angestrebten Servicelevels α_k – die RNBL Strategie zu den besten Ergebnissen hinsichtlich der erreichten Servicelevels. Bezüglich des Profits ist die erlösorientierte

Strategie bei Verwendung des dritten Multiplikatorenansatzes hervorzuheben. Darüber hinaus ist positiv zu erwähnen, dass – mit Ausnahme der RNBL Strategie – die ausgewählten RM Strategien zu einem besseren Profitergebnis als die Vergleichsstrategie FCFS führen, wenn die Nachfrage die Kapazität noch deutlicher übersteigt und somit die Entscheidung über die Auftragsannahme noch bedeutsamer wird. Bei Variation des Strafkostensatzes PT_k kann sogar mit allen ausgewählten RM Strategien das Profitergebnis der FCFS Strategie übertroffen werden. Umso höher die Strafkosten PT_k angesetzt sind, desto höher fällt auch das Profitergebnis der RNBL Strategie aus, sodass dieses ab dem vervierfachen Strafkostensatz PT_k (Variation 2) sogar das Profitergebnis der NDV Strategie übersteigt. Da über alle Fallstudien und Sensitivitätsanalysen hinweg mit der RNBL Strategie die zum Teil mit Abstand besten Servicelevels erzielt werden können und auch die Profitergebnisse immer sehr gut, wenn auch zum Teil etwas geringer als bei anderen Strategien ausfallen, führt diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit neu entwickelte Strategie zu einem besonders guten Kompromiss zwischen den konkurrierenden Zielsetzungen der Profitmaximierung und der Erreichung der angestrebten Servicelevels α_k . Insbesondere die RNBL Strategie leistet somit einen großen Beitrag zu verbesserten Auftragsannahmeentscheidungen unter Berücksichtigung von Kundenwertigkeiten und einer optimierten Produktionsplanung.

Darüber hinaus bieten die entwickelten Ansätze auch Potenzial für zukünftige Forschungsarbeiten. Im Rahmen des Kapitels 10 wurden neben der Kritik verschiedene Forschungsrichtungen aufgezeigt. So könnte beispielsweise untersucht werden, wie der einzelne Kunde noch stärker in den Fokus gerückt werden kann oder wie gut die Performance der entwickelten Ansätze ist, wenn die tatsächliche Nachfrage von der prognostizierten Nachfrage abweicht. Auch eine Weiterentwicklung der in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze in Richtung einer ATO Produktion ist denkbar.

Alles in allem können somit weitere interessante Richtungen, in welche die entwickelten Ansätze erweitert werden könnten, aufgezeigt werden. Das Anwendungsgebiet der MTO Produktion bleibt somit ein spannendes und vielversprechendes Forschungs- und Anwendungsgebiet des RM.

Literaturverzeichnis

- Abedi, A., & Zhu, W. (2020). An Advanced Order Acceptance Model for Hybrid Production Strategy. *Journal of Manufacturing Systems*, 55, 82-93.
- Amaruchkul, K., Cooper, W. L., & Gupta, D. (2007). Single-Leg Air-Cargo Revenue Management. *Transportation Science*, 41(4), 457-469.
- Anderson, C. K., & Blair, M. (2004). Performance Monitor: The Opportunity Costs of Revenue Management. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 2(4), 353-367.
- Aydın, N., Birbil, S. İ., Frenk, J. B. G., & Noyan, N. (2013). Single-Leg Airline Revenue Management with Overbooking. *Transportation Science*, 47(4), 560-583.
- Balakrishnan, N., Sridharan, V., & Patterson, J. W. (1996). Rationing Capacity Between Two Product Classes. *Decision Sciences*, 27(2), 185-214.
- Barnhart, C., & Cohn, A. (2004). Airline Schedule Planning: Accomplishments and Opportunities. *Manufacturing & Service Operations Management*, 6(1), 3-22.
- Barut, M., & Sridharan, V. (2005). Revenue Management in Order-Driven Production Systems. *Decision Sciences*, 36(2), 287-316.
- Barz, C., & Gartner, D. (2016). Air Cargo Network Revenue Management. *Transportation Science*, 50(4), 1206-1222.
- Bauer, J. (2014). *Produktionslogistik/Produktionssteuerung kompakt: Schneller Einstieg in die Produktionslogistik mit SAP-ERP*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bauer, J. (2021). Grundlagen der Produktionslogistik. In A. Böge & W. Böge (Hrsg.), *Handbuch Maschinenbau* (24. Auflage, S. 1701-1707). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bauernhansl, T. (2017). Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl & M. ten Hompel (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4* (2. Auflage, S. 1-31). Berlin: Springer Vieweg.
- Baykasoğlu, A., Subulan, K., Güçdemir, H., Dudaklı, N., & Eren Akyol, D. (2020). Revenue Management for Make-to-Order Manufacturing Systems with a Real-Life Application. *The Engineering Economist*, 65(1), 27-65.

- Beckmann, H. (2012). *Prozessorientiertes Supply Chain Engineering* (1. Auflage). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Berger, P. D., Eechambadi, N., George, M., Lehmann, D. R., Rizley, R., & Venkatesan, R. (2006). From Customer Lifetime Value to Shareholder Value: Theory, Empirical Evidence, and Issues for Future Research. *Journal of Service Research*, 9(2), 156–167.
- Bertsimas, D., & Shioda, R. (2003). Restaurant Revenue Management. *Operations Research*, 51(3), 472-486.
- Binesh, F., Belarmino, A., & Raab, C. (2021). A Meta-Analysis of Hotel Revenue Management. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 20(5), 546-558.
- Bouchet, A., Troilo, M., & Walkup, B. R. (2016). Dynamic Pricing Usage in Sports for Revenue Management. *Managerial Finance*, 42(9), 913-921.
- Capocchi, A. (2019). *Economic Value and Revenue Management Systems* (1. Auflage). Cham: Palgrave Macmillan.
- Chakraborty, S., Basu, S., Ray, S., & Sharma, M. (2021). Advertisement Revenue Management: Determining the Optimal Mix of Skippable and Non-Skippable Ads for Online Video Sharing Platforms. *European Journal of Operational Research*, 292(1), 213-229.
- Chatwin, R. E. (1998). Multiperiod Airline Overbooking with a Single Fare Class. *Operations Research*, 46(6), 805-819.
- Chiang, W.-C., Chen, J. C., & Xu, X. (2007). An Overview of Research on Revenue Management: Current Issues and Future Research. *International Journal of Revenue Management*, 1(1), 97-128.
- Dan, B., Gao, H., Zhang, Y., Liu, R., & Ma, S. (2018). Integrated Order Acceptance and Scheduling Decision Making in Product Service Supply Chain with Hard Time Windows Constraints. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 14(1), 165-182.
- Defregger, F. (2009). *Revenue Management for Manufacturing Companies* (1. Auflage). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Defregger, F., & Kuhn, H. (2007). Revenue Management for a Make-to-Order Company with Limited Inventory Capacity. *OR Spectrum*, 29(1), 137-156.
- Drayer, J., Shapiro, S. L., & Lee, S. (2012). Dynamic Ticket Pricing in Sport: An Agenda for Research and Practice. *Sport Marketing Quarterly*, 21(3), 184-194.
- Elimam, A. A., & Dodin, B. M. (2001). Incentives and Yield Management in Improving Productivity of Manufacturing Facilities. *IIE Transactions*, 33(6), 449-462.

- Fan, L., & Chen, X. (2008). Order Acceptance and Capacity Allocation Policies Based on Revenue Management. *2008 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, 248-251.
- Ford, H. (1923). *My Life and Work*. New York: Doubleday, Page & Company.
- Frank, M., Friedemann, M., Mederer, M., & Schroeder, A. (2006). Airline Revenue Management: A Simulation of Dynamic Capacity Management. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 5(1), 62-71.
- Gallego, G., & Topaloglu, H. (2019). *Revenue Management and Pricing Analytics* (1. Auflage). New York: Springer.
- Gallien, J., Tallec, Y. L., & Schoenmeyr, T. (2004). A Model for Make-to-Order Revenue Management. *Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge*.
- Geraghty, M. K., & Johnson, E. (1997). Revenue Management Saves National Car Rental. *Inform's Journal on Applied Analytics*, 27(1), 107-127.
- Grabner, T. (2019). *Operations Management: Auftrags fulfillment bei Sach- und Dienstleistungen* (4. Auflage). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Graf, M., & Kimms, A. (2011). An Option-Based Revenue Management Procedure for Strategic Airline Alliances. *European Journal of Operational Research*, 215(2), 459-469.
- Guadix, J., Cortés, P., Onieva, L., & Muñuzuri, J. (2010). Technology Revenue Management System for Customer Groups in Hotels. *Journal of Business Research*, 63(5), 519-527.
- Guhlich, H., Fleischmann, M., Mönch, L., & Stolletz, R. (2018). A Clearing Function Based Bid-Price Approach to Integrated Order Acceptance and Release Decisions. *European Journal of Operational Research*, 268(1), 243-254.
- Guhlich, H., Fleischmann, M., Mönch, L., & Stolletz, R. (2015a). *Revenue Management in a Multi-Stage Make-to-Order Production System* (SSRN Scholarly Paper ID 2718930). Social Science Research Network.
- Guhlich, H., Fleischmann, M., & Stolletz, R. (2015b). Revenue Management Approach to Due Date Quoting and Scheduling in an Assemble-to-Order Production System. *OR Spectrum*, 37(4), 951-982.
- Günther, H.-O., & Tempelmeier, H. (2016). *Produktion und Logistik Supply Chain und Operations Management* (12. Auflage). Norderstedt: BoD – Books on Demand.
- Gupta, S., Hanssens, D., Hardie, B., Kahn, W., Kumar, V., Lin, N., Ravishanker, N., & Sriram, S. (2006). Modeling Customer Lifetime Value. *Journal of Service Research*, 9(2), 139–155.

- Hadjinicola, G. C., & Panayi, C. (1997). The Overbooking Problem in Hotels with Multiple Tour-Operators. *International Journal of Operations & Production Management*, 17(9), 874-885.
- Haensel, A., Mederer, M., & Schmidt, H. (2012). Revenue Management in the Car Rental Industry: A Stochastic Programming Approach. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 11(1), 99-108.
- Halfmann, M., & Rennhak, C. (2006). Kundenwert. In C. Rennhak (Hrsg.), *Herausforderung Kundenbindung* (1. Auflage, S. 15–24). Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Hall, J. M., Kopalle, P. K., & Pyke, D. F. (2009). Static and Dynamic Pricing of Excess Capacity in a Make-to-Order Environment. *Production and Operations Management*, 18(4), 411-425.
- Harris, F. H. deB., & Pinder, J. P. (1995). A Revenue Management Approach to Demand Management and Order Booking in Assemble-to-Order Manufacturing. *Journal of Operations Management*, 13(4), 299-309.
- Hendler, R., & Hendler, F. (2004). Revenue Management in Fabulous Las Vegas: Combining Customer Relationship Management and Revenue Management to Maximise Profitability. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 3(1), 73-79.
- Herde, F. (2018). *Revenue-Management-Ansatz für eine Annahmesteuerung kundenspezifischer Regenerationsaufträge komplexer Investitionsgüter* (1. Auflage). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Hintsches, A. (2012). *Dynamische Kapazitätssteuerung bei kundenindividueller Auftragsproduktion in der stahlverarbeitenden Industrie* (1. Auflage). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Hintsches, A., Spengler, T. S., Volling, T., Wittek, K., & Priegnitz, G. (2010). Revenue Management in Make-to-Order Manufacturing: Case Study of Capacity Control at ThyssenKrupp VDM. *Business Research*, 3(2), 173-190.
- IG Metall (2017) Holz und Kunststoff: Löhne, Gehälter, Ausbildungsvergütungen, Urlaub und mehr, von <https://www.igmetall.de/holzbearbeitende-industrie-loehne-gehaelter-und-916.htm>, letzter Zugriff am 20. September 2017.
- Jalora, A. (2006). *Order Acceptance and Scheduling at a Make-to-Order System Using Revenue Management* (Veröffentlichungsnummer 3231638) [Dissertation, Texas A&M University]. ProQuest Dissertations Publishing.
- Karbassi Yazdi, A., Kaviani, M. A., Hanne, T., & Ramos, A. (2020). A Binary Differential Evolution Algorithm for Airline Revenue Management: A Case Study. *Soft Computing*, 24(18), 14221-14234.
- Kasilingam, R. G. (1997). Air Cargo Revenue Management: Characteristics and Complexities. *European Journal of Operational Research*, 96(1), 36-44.

- Kimms, A., & Klein, R. (2005). Revenue Management im Branchenvergleich. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Ergänzungsheft 1 „Revenue Management“*, 1-30.
- Kimms, A., & Klein, R. (2007). Revenue Management. *OR Spectrum*, 29(1), 1-3.
- Klein, R. (2001). Revenue Management: Quantitative Methoden zur Erlösmaximierung in der Dienstleistungsproduktion. *Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis*, 53, 245-259.
- Klein, R., & Steinhardt, C. (2008). *Revenue Management: Grundlagen und Mathematische Methoden* (1. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kraft, E. R., Srikar, B. N., & Phillips, R. L. (2000). Revenue Management in Railroad Applications. *Journal of the Transportation Research Forum*, 39(1), 157-176.
- Kroll, K. M. (1999). A New Tool for Manufacturers. *Industry Week/IW*, 248(9), 25-27.
- Kubickova, M. (2022). Revenue Management in Manufacturing: Systematic Review of Literature. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 21(2), 147-152.
- Kuhn, H., & Defregger, F. (2004). Revenue Management in der Sachgüterproduktion. *WiSt-Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 33(5), 319-324.
- Kumar, S., & Frederick, J. L. (2007). Revenue Management for a Home Construction Products Manufacturer. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 5(4), 256-270.
- Kumar, V., & George, M. (2007). Measuring and Maximizing Customer Equity: A Critical Analysis. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 35(2), 157-171.
- Lasch, R. (2018). *Strategisches und operatives Logistikmanagement: Prozesse* (2. Auflage). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Lasch, R., & Gießmann, M. (2009). Ganzheitliche Ansätze zum Komplexitätsmanagement – Eine kritische Würdigung aus Sicht der Beschaffungslogistik. In R. Bogaschewsky, M. Essig, R. Lasch, & W. Stölzle (Hrsg.), *Supply Management Research* (S. 195-231). Wiesbaden: Gabler.
- Lasch, R., & Janker, C. G. (2017). *Übungsbuch Logistik* (4. Auflage). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Lebefromm, U. (2003). *Produktionsmanagement* (5. Auflage). München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Leimeister, J. M. (2020). *Dienstleistungsengineering und -management: Data-Driven Service Innovation* (2. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.
- Li, D., & Pang, Z. (2017). Dynamic Booking Control for Car Rental Revenue Management: A Decomposition Approach. *European Journal of Operational Research*, 256(3), 850-867.
- Li, D., Pang, Z., & Qian, L. (2021). *Bid Price Controls for Car Rental Network Revenue Management* (SSRN Scholarly Paper Nr. 3933032). Social Science Research Network.

- Lieberman, W. H., & Dieck, T. (2002). Expanding the Revenue Management Frontier: Optimal Air Planning in the Cruise Industry. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 1(1), 7-24.
- Lippman, B. W. (2003). Retail Revenue Management – Competitive Strategy for Grocery Retailers. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 2(3), 229-233.
- Lödding, H. (2016). *Verfahren der Fertigungssteuerung* (3. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Lödding, H. (2019). Produktionslogistik. In K. Furmans & C. Kilger (Hrsg.), *Betrieb von Logistiksystemen* (1. Auflage, S. 107-131). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Lohnert, N., & Fischer, K. (2019a). Booking Limit Based Revenue Management Approaches for Customer-Value Oriented Make-to-Order Production. In C. Bierwirth, T. Kirschstein, & D. Sackmann (Hrsg.), *Logistics Management: Strategies and Instruments for Digitalizing and Decarbonizing Supply Chains – Proceedings of the German Academic Association for Business Research, Halle, 2019* (1. Auflage, S. 268-282). Cham: Springer.
- Lohnert, N., & Fischer, K. (2019b). Einsatz des Revenue Managements in der Make-to-Order-Produktion. In M. Schröder & K. Wegner (Hrsg.), *Logistik im Wandel der Zeit – Von der Produktionssteuerung zu vernetzten Supply Chains: Festschrift für Wolfgang Kersten zum 60. Geburtstag* (1. Auflage, S. 235-262). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Lohnert, N., & Fischer, K. (2021). Bid-Preis gesteuerte Auftragsannahme in der Make-to-Order-Produktion unter Berücksichtigung von Kundenwertigkeiten. In R. Fritzsche, S. Winter, & J. Lohmer (Hrsg.), *Logistik in Wissenschaft und Praxis: Von der Datenanalyse zur Gestaltung komplexer Logistikprozesse* (1. Auflage, S. 409-436). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Lorscheid, I., Heine, B.-O., & Meyer, M. (2012). Opening the ‘Black Box’ of Simulations: Increased Transparency and Effective Communication Through the Systematic Design of Experiments. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 18(1), 22-62.
- Maglaras, C. (2006). Revenue Management for a Multiclass Single-Server Queue via a Fluid Model Analysis. *Operations Research*, 54(5), 914-932.
- Martínez, E., & Arredondo, F. (2010). Order Acceptance for Revenue Management and Capacity Allocation in Make-to-Order Batch Plants. In S. Pierucci & G. B. Ferraris (Hrsg.), *Computer Aided Chemical Engineering* (Band 28, S. 1189-1194). Amsterdam: Elsevier.
- Meffert, H., Bruhn, M., & Hadwich, K. (2018). *Dienstleistungsmarketing* (9. Auflage). Wiesbaden: Springer Gabler.

- Metters, R., Queenan, C., Ferguson, M., Harrison, L., Higbie, J., Ward, S., Barfield, B., Farley, T., Kuyumcu, H. A., & Duggasani, A. (2008). The “Killer Application” of Revenue Management: Harrah’s Cherokee Casino & Hotel. *Interfaces*, 38(3), 161-175.
- Mild, A., Natter, M., Reutterer, T., Taudes, A., & Wockl, J. (2009). Retail Revenue Management. *European Retail Research*, 23(2), 89-106.
- Modarres, M., Zaefarian, T., & Sharifyazdi, M. (2012). Stochastic Capacity Allocation, Revenue Management Approach: The Existence of Modularity Property. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(5), 707-722.
- Mohaupt, M., & Hilbert, A. (2013). Decision Support System for Customer Value-based Revenue Management in Manufacturing. *PACIS 2013 Proceedings*, 264.
- Mohaupt, M., & Hilbert, A. (2014). Customer-Centric Revenue Management in Manufacturing – A Decision Support System. *ECIS 2014 Proceedings*. Twenty Second European Conference on Information Systems, Tel Aviv, 1-15.
- Müller-Bungart, M. (2007). *Revenue Management with Flexible Products: Models and Methods for the Broadcasting Industry*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Nebl, T. (2011). *Produktionswirtschaft* (7. Auflage). München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Nyhuis, P., & Wiendahl, H.-P. (2012). *Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen* (3. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Olhager, J. (2003). Strategic Positioning of the Order Penetration Point. *International Journal of Production Economics*, 85(3), 319-329.
- Özdemir-Akyıldırım, Ö., Denizel, M., & Ferguson, M. (2014). Allocation of Returned Products Among Different Recovery Options Through an Opportunity Cost-Based Dynamic Approach. *Decision Sciences*, 45(6), 1083-1116.
- Palakiti, V. P., Mohan, U., & Ganesan, V. K. (2019). Order Acceptance and Scheduling: Overview and Complexity Results. *International Journal of Operational Research*, 34(3), 369-386.
- Pawellek, G. (2007). *Produktionslogistik: Planung – Steuerung – Controlling* (1. Auflage). München: Hanser Verlag.
- Pfohl, H.-C. (2016). *Logistikmanagement: Konzepte und Funktionen* (3. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Pfohl, H.-C. (2018). *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen* (9. Auflage). Berlin: Springer Vieweg.

- Phillips, R. L. (2021). *Pricing and Revenue Optimization* (2. Auflage). Stanford: Stanford University Press.
- Plümer, T., & Steinfatt, E. (2017). *Produktions- und Logistikmanagement* (2. Auflage). Berlin, Boston: De Gruyter.
- Rehkopf, S. (2006). *Revenue Management-Konzepte zur Auftragsannahme bei kundenindividueller Produktion: Am Beispiel der Eisen und Stahl erzeugenden Industrie* (1. Auflage). Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Rehkopf, S., & Spengler, T. (2005). Revenue Management in a Make-to-Order Environment. In H. Fleuren, D. den Hertog, & P. Kort (Hrsg.), *Operations Research Proceedings 2004* (S. 470-478). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Rizzo, S. G., Chen, Y., Pang, L., Lucas, J., Kaoudi, Z., Quiane, J., & Chawla, S. (2020). Prescriptive Learning for Air-Cargo Revenue Management. *2020 IEEE International Conference on Data Mining (ICDM)*, 462-471.
- Roels, G., & Fridgeirsdottir, K. (2009). Dynamic Revenue Management for Online Display Advertising. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 8(5), 452-466.
- Scherrer, C. R., & Griffin, P. (2009). Dynamic Pricing for Project-Oriented Production: A Comparison to Current Pricing Techniques. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 8(4), 373-387.
- Schuh, G., Brandenburg, U., & Cuber, S. (2012). Aufgaben. In G. Schuh & V. Stich (Hrsg.), *Produktionsplanung und -steuerung 1: Grundlagen der PPS* (4. Auflage, S. 29-81). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Schuh, G., Brosze, T., & Brandenburg, U. (2012). Aachener PPS-Modell. In G. Schuh & V. Stich (Hrsg.), *Produktionsplanung und -steuerung 1: Grundlagen der PPS* (4. Auflage, S. 11-28). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Seeck, S. (2010). *Erfolgsfaktor Logistik: Klassische Fehler erkennen und vermeiden* (1. Auflage). Wiesbaden: Gabler.
- Sensen, B. (2018). *Revenue Management im Hotel: Von Kennzahlen bis MICE am Beispiel erklärt* (1. Auflage). Berlin, Boston: De Gruyter.
- Sharifyazdi, M., & Modarres, M. (2007). Service Level Based Capacity Rationing Procedure for Make-to-Order Manufacturing Systems. *International Journal of Engineering*, 20(1), 1-16.
- Slotnick, S. A. (2011). Order Acceptance and Scheduling: A Taxonomy and Review. *European Journal of Operational Research*, 212(1), 1-11.
- Smith, B. C., Leimkuhler, J. F., & Darrow, R. M. (1992). Yield Management at American Airlines. *Interfaces*, 22(1), 8-31.

- Spengler, T., & Rehkopf, S. (2005). Revenue Management Konzepte zur Entscheidungsunterstützung bei der Annahme von Kundenaufträgen. *Zeitschrift für Planung & Unternehmenssteuerung*, 16(2), 123-146.
- Spengler, T., Rehkopf, S., & Volling, T. (2007). Revenue Management in Make-to-Order Manufacturing – An application to the Iron and Steel Industry. *OR Spectrum*, 29(1), 157-171.
- Spengler, T., Volling, T., Wittek, K., & Akyol, D. E. (2009). Dynamic Bid-Price Policies for Make-to-Order Revenue Management. In B. Fleischmann, K.-H. Borgwardt, R. Klein, & A. Tuma (Hrsg.), *Operations Research Proceedings 2008* (1. Auflage, S. 103-108). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Stevenson, M., Hendry, L. C., & Kingsman, B. G. (2005). A Review of Production Planning and Control: The Applicability of Key Concepts to the Make-to-Order Industry. *International Journal of Production Research*, 43(5), 869-898.
- Stich, V., Quick, J., & Cuber, S. (2013). Konfiguration logistischer Netzwerk. In G. Schuh & V. Stich (Hrsg.), *Logistikmanagement* (2. Auflage, S. 35-75). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Sturm, D., & Fischer, K. (2019). A Cabin Capacity Allocation Model for Revenue Management in the Cruise Industry. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 18(6), 441-450.
- Sucky, E. (2009). Revenue Management bei Auftragsfertigung – Ein Ansatz zur Kapazitätssteuerung. In S. Voss, J. Pahl, S. Schwarze (Hrsg.), *Logistik Management: Systeme, Methoden, Integration* (1. Auflage, S. 77-96). Berlin, Heidelberg: Physica-Verlag.
- Syska, A. (2006). *Produktionsmanagement: Das A-Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute* (1. Auflage). Wiesbaden: Gabler.
- Talluri, K. T. (2001). Airline Revenue Management with Passenger Routing Control: A New Model with Solution Approaches. *International Journal of Services Technology and Management*, 2(1-2), 102-115.
- Talluri, K. T., & Van Ryzin, G. J. (2004). *The Theory and Practice of Revenue Management* (1. Auflage). New York: Springer.
- Tang, J., Repetti, T., & Raab, C. (2019). Perceived Fairness of Revenue Management Practices in Casual and Fine-Dining Restaurants. *Journal of Hospitality and Tourism Insights*, 2(1), 92-108.
- Thevenin, S., Zufferey, N., & Widmer, M. (2016). Order Acceptance and Scheduling with Earliness and Tardiness Penalties. *Journal of Heuristics*, 22(6), 849-890.
- Ting, S.-C., & Tzeng, G.-H. (2004). An Optimal Containership Slot Allocation for Liner Shipping Revenue Management. *Maritime Policy & Management*, 31(3), 199-211.

- Tomczak, T., & Heidig, W. (2014). Revenue Management aus Kundensicht. In T. Tomczak & W. Heidig (Hrsg.). *Revenue Management aus der Kundenperspektive: Grundlagen, Problemfelder und Lösungsstrategien* (S. 1-17). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Vinod, B. (2004). Unlocking the Value of Revenue Management in the Hotel Industry. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 3(2), 178-190.
- Volling, T., Eren Akyol, D., Wittek, K., & Spengler, T. S. (2012). A Two-Stage Bid-Price Control for Make-to-Order Revenue Management. *Computers & Operations Research*, 39(5), 1021-1032.
- von Martens, T. (2009). *Kundenwertorientiertes Revenue Management im Dienstleistungsbereich* (1. Auflage). Wiesbaden: Gabler.
- von Martens, T., & Hilbert, A. (2011). Customer-Value-Based Revenue Management. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 10(1), 87-98.
- Wang, Y., Lan, B. X., & Zhang, L. (2012). A Revenue Management Model for High-Speed Railway. In: Ni, YQ., Ye, XW. (Hrsg.). *Proceedings of the 1st International Workshop on High-Speed and Intercity Railways* (S. 95-103). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Wiendahl, H.-P., & Wiendahl, H.-H. (2019). *Betriebsorganisation für Ingenieure* (9. Auflage). München: Hanser Verlag.
- Wildemann, H. (2010). *Logistik Prozeßmanagement: Organisation und Methoden* (5. Auflage). München: Transfer-Centrum-Verlag.
- Wortmann, J. C. (1992). Production Management Systems for One-of-a-Kind Products. *Computers in Industry*, 19(1), 79-88.
- Wu, A., Chiang, D., & Chang, C.-W. (2010). Using Order Admission Control to Maximize Revenue Under Capacity Utilization Requirements in MTO B2B Industries. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 53(4), 270-288.
- Zaerpour, N., Rabbani, M., Gharehgozli, A. H., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2009). A Comprehensive Decision Making Structure for Partitioning of Make-to-Order, Make-to-Stock and Hybrid Products. *Soft Computing*, 13(11), 1035-1054.
- Zurheide, S., & Fischer, K. (2015). Revenue Management Methods for the Liner Shipping Industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(2), 200-223.

A Beispiel zur Erläuterung des Standard und Theft Nestings

Um die Anpassung des Standard Nestings und des Theft Nestings im unmittelbaren Vergleich zu verdeutlichen, wird auf das Beispiel in Tabelle A.1 verwiesen, welches nachfolgend erläutert wird. In dem Beispiel wird die Annahme von drei verschiedenen Produkten (P_1 bis P_3) gesteuert. P_1 ist das hochwertigste Produkt, P_3 das niederwertigste. Die einfachen Buchungslimits werden wie folgt angenommen: $\bar{x}_{P_1} = 3$, $\bar{x}_{P_2} = 1$, $\bar{x}_{P_3} = 3$. Daraus ergeben sich die geschachtelten Buchungslimits: $\bar{x}\bar{n}_{P_1} = 7$, $\bar{x}\bar{n}_{P_2} = 4$, $\bar{x}\bar{n}_{P_3} = 3$.

Tabelle A.1: Vergleich des Standard Nestings und des Theft Nestings

Anfrage für	Standard Nesting				Theft Nesting			
	$\bar{x}\bar{n}_{P_1}$	$\bar{x}\bar{n}_{P_2}$	$\bar{x}\bar{n}_{P_3}$	Annahme	$\bar{x}\bar{n}_{P_1}$	$\bar{x}\bar{n}_{P_2}$	$\bar{x}\bar{n}_{P_3}$	Annahme
P_3	7	4	3	✓	7	4	3	✓
P_2	6	3	2	✓	6	3	2	✓
P_1	5	2	2	✓	5	2	1	✓
P_2	4	2	2	✓	4	1	0	✓
P_3	3	1	1	✓	3	0	0	✗
P_2	2	0	0	✗	3	0	0	✗
P_1	2	0	0	✓	3	0	0	✓
P_3	1	0	0	✗	2	0	0	✗
P_1	1	0	0	✓	2	0	0	✓
P_1	0	0	0	✗	1	0	0	✓
	0	0	0		0	0	0	

Nach Annahme der ersten Anfrage (für Produkt P_3) werden bei beiden Nesting Verfahren alle geschachtelten Buchungslimits um eine Einheit reduziert. Die Reduzierung aller Buchungslimits um eine Einheit ist bei Annahme einer Buchung beim Theft Nesting der Regelfall, beim Standard Nesting jedoch nur bei der Annahme einer Anfrage des niederwertigsten Produkts. Bei der zweiten Anfrage (für Produkt

P_2) sind die Anpassungen der Buchungslimits unterschiedlich. Beim Standard Nesting werden lediglich die geschachtelten Buchungslimits $\bar{x}n_{P_1}$ und $\bar{x}n_{P_2}$ um eine Einheit reduziert, wohingegen beim Theft Nesting weiterhin die Buchungslimits für alle Produkte um eine Einheit vermindert werden. Nach Annahme der dritten Anfrage (für Produkt P_1) wird beim Standard Nesting lediglich das geschachtelte Buchungslimit $\bar{x}n_{P_1}$ reduziert. Auch die vierte Anfrage (für Produkt P_2) kann bei beiden Nesting Verfahren angenommen werden. Jedoch tritt an dieser Stelle bei der Anpassung nach dem Standard Nesting der Sonderfall auf, dass nicht nur die geschachtelten Buchungslimits $\bar{x}n_{P_2}$ und $\bar{x}n_{P_1}$ des nachgefragten Produkts P_2 und des höherwertigen Produkts P_1 reduziert werden, sondern ebenfalls das des niederwertigen Produkts P_3 , da ansonsten das geschachtelte Buchungslimit $\bar{x}n_{P_3}$ einen größeren Wert als das geschachtelte Buchungslimit $\bar{x}n_{P_2}$ des nachgefragten Produkts P_2 aufweisen würde. Folglich wurde an dieser Stelle Gebrauch von der Schachtelung der Buchungslimits gemacht, da insgesamt bereits zwei Anfragen hinsichtlich des Produkts P_2 angenommen wurden, obwohl das einfache Buchungslimit $\bar{x}n_{P_2}$ nur die Annahme einer Anfrage bezüglich des Produkts P_2 vorgesehen hatte. Bei der fünften Anfrage (für Produkt P_3) fallen die Annahmeentscheidungen des Standard Nestings und des Theft Nestings unterschiedlich aus. Da beim Theft Nesting durchgängig bei jeder Annahme alle Buchungslimits um eine Einheit reduziert wurden, ist für die fünfte Anfrage (für Produkt P_3) beim Theft Nesting das geschachtelte Buchungslimit $\bar{x}n_{P_3}$ bereits erschöpft. Folglich wird diese Anfrage abgelehnt. Gemäß dem Standard Nesting ist noch ausreichend Kapazität für die Anfrage vorhanden, weshalb die Anfrage angenommen wird und alle Buchungslimits anschließend um eine Einheit reduziert werden. Bei den weiteren Anfragen wird wie zuvor beschrieben weiter verfahren.

Insgesamt können in diesem Beispiel mit dem Standard Nesting drei Anfragen bezüglich des Produkts P_1 und jeweils zwei Anfragen bezüglich der Produkte P_2 und P_3 angenommen werden. Mit dem Theft Nesting hingegen wird eine Anfrage mehr bezüglich des Produkts P_1 und dafür eine Anfrage weniger bezüglich des Produkts P_3 akzeptiert. In diesem Beispiel führt das Theft Nesting zu einem besseren Ergebnis. Dies liegt daran, dass Anfragen bezüglich des Produkts P_1 vermehrt am Ende auftreten und die Nachfrage bezüglich dieses Produkts mit insgesamt vier Anfragen das einfache Buchungslimit $\bar{x}n_{P_1}$, welches zu Beginn drei entsprach, übersteigt. Wenn die letzte Anfrage (für Produkt P_1) nicht eingetroffen wäre, würde durch die Anpassung nach dem Theft Nesting eine Kapazitätseinheit ungenutzt bleiben, was beim Standard Nesting nicht der Fall wäre.

B Auftragspezifische Daten beispielhafter Datensätze

B.1 Fallstudie 1

Tabelle B.1: Auftragspezifische Daten des Datensatzes 228 der Fallstudie 1

Auftragsnummer j	Auftragsingangstag	Kundensegment k	Auftragsgruppe q	Bearbeitungszeit $Prod_j$	Verfrühter Freigabezeitpunkt \bar{R}_j	Regulärer Freigabezeitpunkt R_j	Gewünschter Fertigstellungszeitpunkt D_j	Deadline \bar{D}_j	Deckungsbeitrag CM_j
1	-3	A	mittel	1	0	0	4	9	627,90
2	-3	B	kurz	0,5	0	0	2	5	378,75
3	-3	B	kurz	0,5	0	0	2	5	382,50
4	-3	A	kurz	0,4	0	0	2	4	343,00
5	-1	B	mittel	0,6	0	2	4	7	806,60
6	-1	C	kurz	0,5	0	2	4	7	440,00
7	0	A	kurz	0,4	1	3	5	7	332,50
8	0	C	mittel	0,7	1	3	6	9	742,60
9	1	B	kurz	0,5	2	4	6	9	390,00
10	1	A	kurz	0,5	2	4	6	9	339,50
11	2	C	mittel	0,8	3	5	8	12	742,60
12	2	C	lang	1,3	3	5	10	17	1.275,30
13	2	A	lang	1,5	3	5	11	19	1.101,60
14	3	A	kurz	0,4	4	6	8	10	346,50
15	3	A	mittel	0,8	4	6	9	13	703,80
16	3	C	kurz	0,5	4	6	8	11	388,00
17	4	A	mittel	0,9	5	7	11	15	655,50

24
24
24
24
24
24

²⁴ Der Planungshorizont (= Produktionszeitraum) verläuft von Tag 0 bis (inkl.) Tag 19. Dadurch, dass der Buchungszeitraum im Vergleich zum Planungshorizont um drei Tage nach vorne versetzt ist (s. Abbildung 5.1), verläuft dieser von Tag -3 bis Tag 16. Aufträge, welche zwischen den Tagen -3 und -1 eintreffen, können jedoch weiterhin frühestens zum Zeitpunkt 0 bearbeitet werden. Aus diesem Grund sind die verfrühten Freigabezeitpunkte \bar{R}_j für diese Aufträge gleich 0.

Tabelle B.2: Auftragspezifische Daten des Datensatzes 228 der Fallstudie 1, fortführend

Auftragsnummer j	Auftragsingangstag	Kundensegment k	Auftragsgruppe q	Bearbeitungszeit $Prod_j$	Verfrühter Freigabezeitpunkt \bar{R}_j	Regulärer Freigabezeitpunkt R_j	Gewünschter Fertigstellungszeitpunkt D_j	Deadline \bar{D}_j	Deckungsbeitrag CM_j
18	4	A	mittel	0,9	5	7	11	15	641,70
19	5	B	mittel	0,7	6	8	11	14	799,20
20	5	A	lang	1,2	6	8	13	19	1.111,80
21	6	A	kurz	0,3	7	9	10	12	371,00
22	7	A	mittel	1	8	10	14	19	724,50
23	7	B	kurz	0,3	8	10	11	13	401,25
24	8	C	kurz	0,5	9	11	13	15	416,00
25	8	B	kurz	0,3	9	11	12	14	363,75
26	9	A	kurz	0,4	10	12	14	16	367,50
27	9	A	kurz	0,3	10	12	13	15	353,50
28	9	A	kurz	0,5	10	12	14	17	315,00
29	10	A	lang	1,3	11	13	18	25	1.060,80
30	10	B	lang	1,3	11	13	18	25	1.073,10
31	11	B	mittel	1	12	14	18	23	791,80
32	11	A	kurz	0,4	12	14	16	18	385,00
33	13	B	lang	1,3	14	16	21	28	1.062,15
34	13	A	kurz	0,3	14	16	17	19	343,00
35	13	B	mittel	1	14	16	20	25	688,20
36	13	C	mittel	1	14	16	20	25	821,60
37	14	C	kurz	0,3	15	17	18	20	364,00
38	14	B	kurz	0,4	15	17	19	21	348,75
39	15	A	mittel	0,9	16	18	22	26	634,80
40	16	A	mittel	0,6	17	19	21	24	703,80

Tabelle B.3: Rüstzeiten ST_{jt} des Datensatzes 228 der Fallstudie 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0,03	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,04	0,04	0,01
1	0,00	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
2	0,04	0,00	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
3	0,04	0,03	0,00	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
4	0,04	0,03	0,03	0,00	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
5	0,05	0,04	0,04	0,04	0,00	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
6	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,00	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
7	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,00	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
8	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,00	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
9	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,00	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
10	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,00	0,04	0,05	0,05	0,03
11	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,00	0,06	0,06	0,04
12	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,00	0,07	0,05
13	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,07	0,00	0,05
14	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,00
15	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
16	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
17	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
18	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
19	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
20	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,05
21	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
22	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
23	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
24	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
25	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
26	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
27	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
28	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
29	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,05
30	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,05
31	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
32	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
33	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,05
34	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
35	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
36	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
37	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
38	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03
39	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
40	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04

Tabelle B.4: Rüstzeiten ST_{jt} des Datensatzes 228 der Fallstudie 1, fortführend

	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
0	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
2	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
3	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
4	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
5	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
6	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
7	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
8	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
9	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
10	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
11	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
12	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
13	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
14	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
15	0,00	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
16	0,04	0,00	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
17	0,05	0,04	0,00	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
18	0,05	0,04	0,05	0,00	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
19	0,05	0,04	0,05	0,05	0,00	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
20	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,00	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
21	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,00	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
22	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
23	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
24	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03
25	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03	0,03
26	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03
27	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00	0,03
28	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00
29	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
30	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
31	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
32	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
33	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
34	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
35	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
36	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
37	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
38	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
39	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
40	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

Tabelle B.5: Rüstzeit ST_{jt} des Datensatzes 228 der Fallstudie 1, fortführend

	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	n+1
0	0,04	0,04	0,03	0,01	0,04	0,01	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03	0,00
1	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
2	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
3	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
4	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
5	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
6	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
7	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
8	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
9	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
10	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
11	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
12	0,07	0,07	0,06	0,05	0,07	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,04
13	0,07	0,07	0,06	0,05	0,07	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,04
14	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
15	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
16	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
17	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
18	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
19	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
20	0,07	0,07	0,06	0,05	0,07	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,04
21	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
22	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
23	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
24	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
25	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
26	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
27	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
28	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
29	0,00	0,07	0,06	0,05	0,07	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,04
30	0,07	0,00	0,06	0,05	0,07	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,04
31	0,06	0,06	0,00	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
32	0,05	0,05	0,04	0,00	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
33	0,07	0,07	0,06	0,05	0,00	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,04
34	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,00	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01
35	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,00	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
36	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,00	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
37	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,00	0,03	0,04	0,04	0,01
38	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,00	0,04	0,04	0,01
39	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,00	0,05	0,03
40	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,00	0,03

Tabelle B.6: Rüstkosten SC_{jt} des Datensatzes 228 der Fallstudie 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	2,92	1,46	1,46	1,46	2,92	1,46	1,46	2,92	1,46	1,46	2,92	4,38	4,38	1,46
1	0,00	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	7,30	7,30	4,38
2	4,38	0,00	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
3	4,38	2,92	0,00	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
4	4,38	2,92	2,92	0,00	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
5	5,84	4,38	4,38	4,38	0,00	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	7,30	7,30	4,38
6	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	0,00	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
7	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	0,00	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
8	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	0,00	4,38	4,38	5,84	7,30	7,30	4,38
9	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	0,00	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
10	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	0,00	4,38	5,84	5,84	2,92
11	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	0,00	7,30	7,30	4,38
12	7,30	5,84	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	0,00	8,76	5,84
13	7,30	5,84	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	8,76	0,00	5,84
14	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	0,00
15	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	7,30	7,30	4,38
16	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
17	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	7,30	7,30	4,38
18	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	7,30	7,30	4,38
19	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	7,30	7,30	4,38
20	7,30	5,84	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	8,76	8,76	5,84
21	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
22	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	7,30	7,30	4,38
23	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
24	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
25	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
26	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
27	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
28	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
29	7,30	5,84	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	8,76	8,76	5,84
30	7,30	5,84	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	8,76	8,76	5,84
31	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	7,30	7,30	4,38
32	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
33	7,30	5,84	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	8,76	8,76	5,84
34	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
35	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	7,30	7,30	4,38
36	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	7,30	7,30	4,38
37	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	5,84	5,84	2,92
39	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	7,30	7,30	4,38
40	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	7,30	7,30	4,38

Tabelle B.7: Rüstkosten SC_{jt} des Datensatzes 228 der Fallstudie 1, fortführend

	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
0	2,92	1,46	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46	2,92	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46
1	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
2	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
3	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
4	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
5	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
6	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
7	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
8	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
9	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
10	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
11	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
12	7,30	5,84	7,30	7,30	7,30	8,76	5,84	7,30	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84
13	7,30	5,84	7,30	7,30	7,30	8,76	5,84	7,30	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84
14	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
15	0,00	4,38	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
16	4,38	0,00	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
17	5,84	4,38	0,00	5,84	5,84	7,30	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
18	5,84	4,38	5,84	0,00	5,84	7,30	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
19	5,84	4,38	5,84	5,84	0,00	7,30	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
20	7,30	5,84	7,30	7,30	7,30	0,00	5,84	7,30	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84
21	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	0,00	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
22	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38	0,00	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
23	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	0,00	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
24	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	0,00	2,92	2,92	2,92	2,92
25	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	0,00	2,92	2,92	2,92
26	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	0,00	2,92	2,92
27	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	0,00	2,92
28	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	0,00
29	7,30	5,84	7,30	7,30	7,30	8,76	5,84	7,30	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84
30	7,30	5,84	7,30	7,30	7,30	8,76	5,84	7,30	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84
31	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
32	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
33	7,30	5,84	7,30	7,30	7,30	8,76	5,84	7,30	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84
34	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
35	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
36	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
37	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
39	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
40	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38

Tabelle B.8: Rüstkosten SC_{jt} des Datensatzes 228 der Fallstudie 1, fortführend

	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	n+1
0	4,38	4,38	2,92	1,46	4,38	1,46	2,92	2,92	1,46	1,46	2,92	2,92	0,00
1	7,30	7,30	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	2,92
2	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
3	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
4	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
5	7,30	7,30	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	2,92
6	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
7	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
8	7,30	7,30	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	2,92
9	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
10	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
11	7,30	7,30	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	2,92
12	8,76	8,76	7,30	5,84	8,76	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	7,30	7,30	4,38
13	8,76	8,76	7,30	5,84	8,76	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	7,30	7,30	4,38
14	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
15	7,30	7,30	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	2,92
16	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
17	7,30	7,30	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	2,92
18	7,30	7,30	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	2,92
19	7,30	7,30	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	2,92
20	8,76	8,76	7,30	5,84	8,76	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	7,30	7,30	4,38
21	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
22	7,30	7,30	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	2,92
23	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
24	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
25	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
26	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
27	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
28	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
29	0,00	8,76	7,30	5,84	8,76	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	7,30	7,30	4,38
30	8,76	0,00	7,30	5,84	8,76	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	7,30	7,30	4,38
31	7,30	7,30	0,00	4,38	7,30	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	2,92
32	5,84	5,84	4,38	0,00	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
33	8,76	8,76	7,30	5,84	0,00	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	7,30	7,30	4,38
34	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	0,00	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	1,46
35	7,30	7,30	5,84	4,38	7,30	4,38	0,00	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	2,92
36	7,30	7,30	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	0,00	4,38	4,38	5,84	5,84	2,92
37	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	0,00	2,92	4,38	4,38	1,46
38	5,84	5,84	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	4,38	2,92	0,00	4,38	4,38	1,46
39	7,30	7,30	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	0,00	5,84	2,92
40	7,30	7,30	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	0,00	2,92

B.2 Fallstudie 2

Tabelle B.9: Auftragspezifische Daten des Datensatzes 1 der Fallstudie 2

Auftragsnummer j	Auftragseingangstag	Kundensegment k	Auftragsgruppe q	Bearbeitungszeit $Prod_j$	Verfrühter Freigabezeitpunkt \bar{R}_j	Regulärer Freigabezeitpunkt R_j	Gewünschter Fertigstellungszeitpunkt D_j	Deadline \bar{D}_j	Deckungsbeitrag CM_j
1	-3	B	mittel	0,7	0	0	3	6	762,20
2	-2	A	mittel	1	0	1	5	10	634,80
3	0	B	kurz	0,3	1	3	4	6	412,50
4	0	C	mittel	0,6	1	3	5	8	797,90
5	0	C	mittel	0,9	1	3	7	11	742,60
6	1	C	mittel	1	2	4	8	13	774,20
7	2	B	kurz	0,4	3	5	7	9	382,50
8	2	B	mittel	1	3	5	9	14	673,40
9	2	C	lang	1,1	3	5	9	15	1.123,20
10	3	A	kurz	0,5	4	6	8	11	371,00
11	3	C	kurz	0,3	4	6	7	9	416,00
12	3	C	lang	1,2	4	6	11	17	1.146,60
13	4	A	lang	1,2	5	7	12	18	1.091,40
14	4	B	mittel	1	5	7	11	16	717,80
15	4	B	mittel	0,9	5	7	11	15	754,80
16	6	B	lang	1,5	7	9	15	23	1.105,95
17	7	B	mittel	1	8	10	14	19	688,20
18	8	A	kurz	0,5	9	11	13	15	360,50
19	9	A	mittel	1	10	12	16	21	738,30
20	9	B	mittel	0,6	10	12	14	17	725,20
21	10	C	kurz	0,5	11	13	15	17	372,00
22	11	A	kurz	0,4	12	14	16	18	329,00
23	11	B	kurz	0,4	12	14	16	18	386,25
24	11	B	mittel	0,6	12	14	16	19	732,60
25	11	C	kurz	0,4	12	14	16	18	432,00

25

25

²⁵ Der Planungshorizont (= Produktionszeitraum) verläuft von Tag 0 bis (inkl.) Tag 19. Dadurch, dass der Buchungszeitraum im Vergleich zum Planungshorizont um drei Tage nach vorne versetzt ist (s. Abbildung 5.1), verläuft dieser von Tag -3 bis Tag 16. Aufträge, welche zwischen den Tagen -3 und -1 eintreffen, können jedoch weiterhin frühestens zum Zeitpunkt 0 bearbeitet werden. Aus diesem Grund sind die verfrühten Freigabezeitpunkte \bar{R}_j für diese Aufträge gleich 0.

Tabelle B.10: Auftragspezifische Daten des Datensatzes 1 der Fallstudie 2, fortführend

Auftragsnummer j	Auftragsingangstag	Kundensegment k	Auftragsgruppe q	Bearbeitungszeit $Prod_j$	Verfrühter Freigabezeitpunkt \bar{R}_j	Regulärer Freigabezeitpunkt R_j	Gewünschter Fertigstellungszeitpunkt D_j	Deadline \bar{D}_j	Deckungsbeitrag CM_j
26	12	B	kurz	0,4	13	15	17	19	390,00
27	12	B	kurz	0,5	13	15	17	19	393,75
28	12	C	kurz	0,3	13	15	16	18	360,00
29	13	A	mittel	0,7	14	16	19	22	690,00
30	13	B	kurz	0,3	14	16	17	19	378,75
31	13	B	lang	1,3	14	16	21	28	1.127,85
32	13	C	kurz	0,3	14	16	17	19	404,00
33	14	B	kurz	0,5	15	17	19	21	386,25
34	14	B	kurz	0,5	15	17	19	21	348,75
35	15	A	kurz	0,3	16	18	19	21	325,50
36	15	B	lang	1,2	16	18	23	29	1.171,65
37	16	B	kurz	0,4	17	19	21	23	345,00
38	16	B	kurz	0,4	17	19	21	23	341,25
39	16	C	kurz	0,4	17	19	21	23	412,00
40	16	C	mittel	0,7	17	19	22	25	758,40

Tabelle B.11: Rüstzeiten ST_{jt} des Datensatzes 1 der Fallstudie 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,01	0,03	0,04	0,01	0,01	0,04	0,04	0,03
1	0,00	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
2	0,05	0,00	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
3	0,04	0,04	0,00	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
4	0,05	0,05	0,04	0,00	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
5	0,05	0,05	0,04	0,05	0,00	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
6	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,00	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
7	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,00	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
8	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,00	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
9	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,00	0,05	0,05	0,07	0,07	0,06
10	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,00	0,03	0,05	0,05	0,04
11	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,00	0,05	0,05	0,04
12	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,07	0,05	0,05	0,00	0,07	0,06
13	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,07	0,05	0,05	0,07	0,00	0,06
14	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,00
15	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
16	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,07	0,05	0,05	0,07	0,07	0,06
17	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
18	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
19	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
20	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
21	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
22	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
23	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
24	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
25	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
26	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
27	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
28	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
29	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
30	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
31	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,07	0,05	0,05	0,07	0,07	0,06
32	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
33	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
34	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
35	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
36	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,07	0,05	0,05	0,07	0,07	0,06
37	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
38	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
39	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04
40	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05

Tabelle B.12: Rüstzeiten ST_{jt} des Datensatzes 1 der Fallstudie 2, fortführend

	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
0	0,03	0,04	0,03	0,01	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
1	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
2	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
3	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
4	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
5	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
6	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
7	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
8	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
9	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
10	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
11	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
12	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
13	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
14	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
15	0,00	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
16	0,06	0,00	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
17	0,05	0,06	0,00	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
18	0,04	0,05	0,04	0,00	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
19	0,05	0,06	0,05	0,04	0,00	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
20	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,00	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
21	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,00	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
22	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,00	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
23	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,00	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
24	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04
25	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,00	0,03	0,03	0,03
26	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,00	0,03	0,03
27	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,00	0,03
28	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,00
29	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
30	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
31	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
32	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
33	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
34	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
35	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
36	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
37	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
38	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
39	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
40	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04

Tabelle B.13: Rüstzeit ST_{jt} des Datensatzes 1 der Fallstudie 2, fortführend

	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	n+1
0	0,03	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,03	0,00
1	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
2	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
3	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
4	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
5	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
6	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
7	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
8	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
9	0,06	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04
10	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
11	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
12	0,06	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04
13	0,06	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04
14	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
15	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
16	0,06	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04
17	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
18	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
19	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
20	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
21	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
22	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
23	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
24	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
25	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
26	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
27	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
28	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
29	0,00	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
30	0,04	0,00	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
31	0,06	0,05	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04
32	0,04	0,03	0,05	0,00	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
33	0,04	0,03	0,05	0,03	0,00	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
34	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,00	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
35	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,00	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,01
36	0,06	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04
37	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,00	0,03	0,03	0,04	0,01
38	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,00	0,03	0,04	0,01
39	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,00	0,04	0,01
40	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,00	0,03

Tabelle B.14: Rüstkosten SC_{jt} des Datensatzes 1 der Fallstudie 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	2,92	2,92	1,46	2,92	2,92	2,92	1,46	2,92	4,38	1,46	1,46	4,38	4,38	2,92
1	0,00	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	4,38	5,84	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	5,84
2	5,84	0,00	4,38	5,84	5,84	5,84	4,38	5,84	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	5,84
3	4,38	4,38	0,00	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
4	5,84	5,84	4,38	0,00	5,84	5,84	4,38	5,84	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	5,84
5	5,84	5,84	4,38	5,84	0,00	5,84	4,38	5,84	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	5,84
6	5,84	5,84	4,38	5,84	5,84	0,00	4,38	5,84	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	5,84
7	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	0,00	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
8	5,84	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	4,38	0,00	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	5,84
9	7,30	7,30	5,84	7,30	7,30	7,30	5,84	7,30	0,00	5,84	5,84	8,76	8,76	7,30
10	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	0,00	2,92	5,84	5,84	4,38
11	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	0,00	5,84	5,84	4,38
12	7,30	7,30	5,84	7,30	7,30	7,30	5,84	7,30	8,76	5,84	5,84	0,00	8,76	7,30
13	7,30	7,30	5,84	7,30	7,30	7,30	5,84	7,30	8,76	5,84	5,84	8,76	0,00	7,30
14	5,84	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	4,38	5,84	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	0,00
15	5,84	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	4,38	5,84	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	5,84
16	7,30	7,30	5,84	7,30	7,30	7,30	5,84	7,30	8,76	5,84	5,84	8,76	8,76	7,30
17	5,84	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	4,38	5,84	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	5,84
18	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
19	5,84	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	4,38	5,84	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	5,84
20	5,84	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	4,38	5,84	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	5,84
21	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
22	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
23	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
24	5,84	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	4,38	5,84	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	5,84
25	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
26	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
27	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
28	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
29	5,84	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	4,38	5,84	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	5,84
30	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
31	7,30	7,30	5,84	7,30	7,30	7,30	5,84	7,30	8,76	5,84	5,84	8,76	8,76	7,30
32	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
33	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
34	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
35	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
36	7,30	7,30	5,84	7,30	7,30	7,30	5,84	7,30	8,76	5,84	5,84	8,76	8,76	7,30
37	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
38	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
39	4,38	4,38	2,92	4,38	4,38	4,38	2,92	4,38	5,84	2,92	2,92	5,84	5,84	4,38
40	5,84	5,84	4,38	5,84	5,84	5,84	4,38	5,84	7,30	4,38	4,38	7,30	7,30	5,84

Tabelle B.15: Rüstkosten SC_{jt} des Datensatzes 1 der Fallstudie 2, fortführend

	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
0	2,92	4,38	2,92	1,46	2,92	2,92	1,46	1,46	1,46	2,92	1,46	1,46	1,46	1,46
1	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38
2	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38
3	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
4	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38
5	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38
6	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38
7	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
8	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38
9	7,30	8,76	7,30	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	5,84	5,84
10	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
11	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
12	7,30	8,76	7,30	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	5,84	5,84
13	7,30	8,76	7,30	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	5,84	5,84
14	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38
15	0,00	7,30	5,84	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38
16	7,30	0,00	7,30	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	5,84	5,84
17	5,84	7,30	0,00	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38
18	4,38	5,84	4,38	0,00	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
19	5,84	7,30	5,84	4,38	0,00	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38
20	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	0,00	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38
21	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	0,00	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
22	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	0,00	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
23	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	0,00	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
24	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	4,38	0,00	4,38	4,38	4,38	4,38
25	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	0,00	2,92	2,92	2,92
26	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	0,00	2,92	2,92
27	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	0,00	2,92
28	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	0,00
29	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38
30	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
31	7,30	8,76	7,30	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	5,84	5,84
32	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
33	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
34	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
35	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
36	7,30	8,76	7,30	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	5,84	5,84
37	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
39	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	2,92	2,92
40	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	4,38	4,38

Tabelle B.16: Rüstkosten SC_{jt} des Datensatzes 1 der Fallstudie 2, fortführend

	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	n+1
0	2,92	1,46	4,38	1,46	1,46	1,46	1,46	4,38	1,46	1,46	1,46	2,92	0,00
1	5,84	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92
2	5,84	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92
3	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
4	5,84	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92
5	5,84	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92
6	5,84	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92
7	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
8	5,84	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92
9	7,30	5,84	8,76	5,84	5,84	5,84	5,84	8,76	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38
10	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
11	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
12	7,30	5,84	8,76	5,84	5,84	5,84	5,84	8,76	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38
13	7,30	5,84	8,76	5,84	5,84	5,84	5,84	8,76	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38
14	5,84	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92
15	5,84	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92
16	7,30	5,84	8,76	5,84	5,84	5,84	5,84	8,76	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38
17	5,84	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92
18	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
19	5,84	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92
20	5,84	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92
21	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
22	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
23	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
24	5,84	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92
25	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
26	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
27	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
28	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
29	0,00	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	5,84	2,92
30	4,38	0,00	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
31	7,30	5,84	0,00	5,84	5,84	5,84	5,84	8,76	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38
32	4,38	2,92	5,84	0,00	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
33	4,38	2,92	5,84	2,92	0,00	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
34	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	0,00	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
35	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	0,00	5,84	2,92	2,92	2,92	4,38	1,46
36	7,30	5,84	8,76	5,84	5,84	5,84	5,84	0,00	5,84	5,84	5,84	7,30	4,38
37	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	0,00	2,92	2,92	4,38	1,46
38	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	0,00	2,92	4,38	1,46
39	4,38	2,92	5,84	2,92	2,92	2,92	2,92	5,84	2,92	2,92	0,00	4,38	1,46
40	5,84	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	4,38	7,30	4,38	4,38	4,38	0,00	2,92

B.3 Fallstudie 3

Tabelle B.17: Auftragspezifische Daten des Datensatzes 1 der Fallstudie 3

Auftragsnummer j	Auftragsingangstag	Kundensegment k	Auftragsgruppe q	Bearbeitungszeit $Prod_j$	Verfrühter Freigabezeitpunkt \bar{R}_j	Regulärer Freigabezeitpunkt R_j	Gewünschter Fertigstellungszeitpunkt D_j	Deadline \bar{D}_j	Deckungsbeitrag CM_j
1	-2	A	mittel	1	0	1	5	10	690,00
2	-2	B	mittel	0,7	0	1	4	7	769,60
3	-1	A	lang	1,3	0	2	7	14	1.009,80
4	0	A	kurz	0,5	1	3	5	7	381,50
5	0	A	kurz	0,5	1	3	5	7	336,00
6	0	C	mittel	0,7	1	3	6	9	766,30
7	1	A	kurz	0,3	2	4	5	7	371,00
8	1	B	kurz	0,3	2	4	5	7	405,00
9	1	B	mittel	0,6	2	4	6	9	806,60
10	2	A	mittel	0,8	3	5	8	12	648,60
11	2	B	kurz	0,5	3	5	7	9	341,25
12	2	C	kurz	0,5	3	5	7	9	388,00
13	2	C	mittel	0,7	3	5	8	11	758,40
14	3	A	kurz	0,3	4	6	7	9	374,50
15	4	A	kurz	0,4	5	7	9	11	329,00
16	4	C	kurz	0,3	5	7	8	10	428,00
17	5	C	kurz	0,4	6	8	10	12	368,00
18	5	C	lang	1,5	6	8	14	21	1.158,30
19	5	C	lang	1,5	6	8	14	21	1.263,60
20	6	B	kurz	0,3	7	9	10	12	363,75
21	7	C	mittel	0,6	8	10	12	15	766,30
22	8	A	mittel	0,9	9	11	15	19	648,60
23	10	A	lang	1,3	11	13	18	25	1.050,60
24	10	B	mittel	1	11	13	17	22	703,00
25	10	C	kurz	0,5	11	13	15	17	376,00

26

26

26

²⁶ Der Planungshorizont (= Produktionszeitraum) verläuft von Tag 0 bis (inkl.) Tag 19. Dadurch, dass der Buchungszeitraum im Vergleich zum Planungshorizont um drei Tage nach vorne versetzt ist (s. Abbildung 5.1), verläuft dieser von Tag -3 bis Tag 16. Aufträge, welche zwischen den Tagen -3 und -1 eintreffen, können jedoch weiterhin frühestens zum Zeitpunkt 0 bearbeitet werden. Aus diesem Grund sind die verfrühten Freigabezeitpunkte \bar{R}_j für diese Aufträge gleich 0.

Tabelle B.18: Auftragspezifische Daten des Datensatzes 1 der Fallstudie 3, fortführend

Auftragsnummer j	Auftragsingangstag	Kundensegment k	Auftragsgruppe q	Bearbeitungszeit $Prod_j$	Verfrühter Freigabezeitpunkt \bar{R}_j	Regulärer Freigabezeitpunkt R_j	Gewünschter Fertigstellungszeitpunkt D_j	Deadline \bar{D}_j	Deckungsbeitrag CM_j
26	11	A	mittel	0,6	12	14	16	19	621,00
27	11	B	kurz	0,4	12	14	16	18	386,25
28	11	C	kurz	0,3	12	14	15	17	360,00
29	12	B	kurz	0,4	13	15	17	19	348,75
30	12	B	mittel	0,7	13	15	18	21	717,80
31	12	C	mittel	0,8	13	15	18	22	758,40
32	13	A	kurz	0,3	14	16	17	19	318,50
33	13	A	mittel	0,7	14	16	19	22	738,30
34	13	B	kurz	0,5	14	16	18	21	378,75
35	14	B	lang	1,2	15	17	22	28	1105,95
36	15	A	kurz	0,5	16	18	20	23	371,00
37	15	B	mittel	0,7	16	18	21	24	806,60
38	15	B	lang	1,4	16	18	24	31	996,45
39	15	C	kurz	0,4	16	18	20	22	372,00
40	15	C	mittel	0,8	16	18	21	25	758,40

Tabelle B.19: Rüstzeiten ST_{jt} des Datensatzes 1 der Fallstudie 3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0,03	0,03	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01
1	0,00	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
2	0,05	0,00	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
3	0,06	0,06	0,00	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05
4	0,04	0,04	0,05	0,00	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
5	0,04	0,04	0,05	0,03	0,00	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
6	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,00	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
7	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,00	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
8	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,00	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
9	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,00	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
10	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,00	0,04	0,04	0,05	0,04
11	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,00	0,03	0,04	0,03
12	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,00	0,04	0,03
13	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,00	0,04
14	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,00
15	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
16	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
17	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
18	0,06	0,06	0,07	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05
19	0,06	0,06	0,07	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05
20	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
21	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
22	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
23	0,06	0,06	0,07	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05
24	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
25	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
26	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
27	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
28	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
29	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
30	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
31	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
32	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
33	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
34	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
35	0,06	0,06	0,07	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05
36	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
37	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
38	0,06	0,06	0,07	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05
39	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
40	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04

Tabelle B.20: Rüstzeiten ST_{jt} des Datensatzes 1 der Fallstudie 3, fortführend

	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
0	0,01	0,01	0,01	0,04	0,04	0,01	0,03	0,03	0,04	0,03	0,01	0,03	0,01	0,01
1	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
2	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
3	0,05	0,05	0,05	0,07	0,07	0,05	0,06	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05
4	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
5	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
6	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
7	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
8	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
9	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
10	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
11	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
12	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
13	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
14	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
15	0,00	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
16	0,03	0,00	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
17	0,03	0,03	0,00	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
18	0,05	0,05	0,05	0,00	0,07	0,05	0,06	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05
19	0,05	0,05	0,05	0,07	0,00	0,05	0,06	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05
20	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,00	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
21	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,00	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
22	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,00	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
23	0,05	0,05	0,05	0,07	0,07	0,05	0,06	0,06	0,00	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05
24	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,00	0,04	0,05	0,04	0,04
25	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,00	0,04	0,03	0,03
26	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,00	0,04	0,04
27	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,00	0,03
28	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,00
29	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
30	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
31	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
32	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
33	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
34	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
35	0,05	0,05	0,05	0,07	0,07	0,05	0,06	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05
36	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
37	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
38	0,05	0,05	0,05	0,07	0,07	0,05	0,06	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05
39	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
40	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04

Tabelle B.21: Rüstzeit ST_{jt} des Datensatzes 1 der Fallstudie 3, fortführend

	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	n+1
0	0,01	0,03	0,03	0,01	0,03	0,01	0,04	0,01	0,03	0,04	0,01	0,03	0,00
1	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03
2	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03
3	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,07	0,05	0,06	0,07	0,05	0,06	0,04
4	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
5	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
6	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03
7	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
8	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
9	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03
10	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03
11	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
12	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
13	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03
14	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
15	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
16	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
17	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
18	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,07	0,05	0,06	0,07	0,05	0,06	0,04
19	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,07	0,05	0,06	0,07	0,05	0,06	0,04
20	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
21	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03
22	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03
23	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,07	0,05	0,06	0,07	0,05	0,06	0,04
24	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03
25	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
26	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03
27	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
28	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
29	0,00	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
30	0,04	0,00	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03
31	0,04	0,05	0,00	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03
32	0,03	0,04	0,04	0,00	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
33	0,04	0,05	0,05	0,04	0,00	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03
34	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,00	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
35	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,00	0,05	0,06	0,07	0,05	0,06	0,04
36	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,00	0,04	0,05	0,03	0,04	0,01
37	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,00	0,06	0,04	0,05	0,03
38	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,07	0,05	0,06	0,00	0,05	0,06	0,04
39	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,00	0,04	0,01
40	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,00	0,03

Tabelle B.22: Rüstkosten SC_{jt} des Datensatzes 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	2,92	2,92	4,38	1,46	1,46	2,92	1,46	1,46	2,92	2,92	1,46	1,46	2,92	1,46
1	0,00	5,84	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38
2	5,84	0,00	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38
3	7,30	7,30	0,00	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	7,30	5,84
4	4,38	4,38	5,84	0,00	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
5	4,38	4,38	5,84	2,92	0,00	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
6	5,84	5,84	7,30	4,38	4,38	0,00	4,38	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38
7	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	0,00	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
8	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	0,00	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
9	5,84	5,84	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	0,00	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38
10	5,84	5,84	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	0,00	4,38	4,38	5,84	4,38
11	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	0,00	2,92	4,38	2,92
12	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	0,00	4,38	2,92
13	5,84	5,84	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	0,00	4,38
14	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	0,00
15	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
16	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
17	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
18	7,30	7,30	8,76	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	7,30	5,84
19	7,30	7,30	8,76	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	7,30	5,84
20	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
21	5,84	5,84	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38
22	5,84	5,84	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38
23	7,30	7,30	8,76	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	7,30	5,84
24	5,84	5,84	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38
25	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
26	5,84	5,84	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38
27	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
28	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
29	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
30	5,84	5,84	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38
31	5,84	5,84	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38
32	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
33	5,84	5,84	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38
34	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
35	7,30	7,30	8,76	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	7,30	5,84
36	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
37	5,84	5,84	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38
38	7,30	7,30	8,76	5,84	5,84	7,30	5,84	5,84	7,30	7,30	5,84	5,84	7,30	5,84
39	4,38	4,38	5,84	2,92	2,92	4,38	2,92	2,92	4,38	4,38	2,92	2,92	4,38	2,92
40	5,84	5,84	7,30	4,38	4,38	5,84	4,38	4,38	5,84	5,84	4,38	4,38	5,84	4,38

Tabelle B.23: Rüstkosten SC_{jt} des Datensatzes 1, fortführend

	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
0	1,46	1,46	1,46	4,38	4,38	1,46	2,92	2,92	4,38	2,92	1,46	2,92	1,46	1,46
1	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	4,38	4,38
2	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	4,38	4,38
3	5,84	5,84	5,84	8,76	8,76	5,84	7,30	7,30	8,76	7,30	5,84	7,30	5,84	5,84
4	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
5	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
6	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	4,38	4,38
7	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
8	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
9	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	4,38	4,38
10	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	4,38	4,38
11	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
12	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
13	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	4,38	4,38
14	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
15	0,00	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
16	2,92	0,00	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
17	2,92	2,92	0,00	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
18	5,84	5,84	5,84	0,00	8,76	5,84	7,30	7,30	8,76	7,30	5,84	7,30	5,84	5,84
19	5,84	5,84	5,84	8,76	0,00	5,84	7,30	7,30	8,76	7,30	5,84	7,30	5,84	5,84
20	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	0,00	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
21	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	0,00	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	4,38	4,38
22	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	0,00	7,30	5,84	4,38	5,84	4,38	4,38
23	5,84	5,84	5,84	8,76	8,76	5,84	7,30	7,30	0,00	7,30	5,84	7,30	5,84	5,84
24	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	5,84	7,30	0,00	4,38	5,84	4,38	4,38
25	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	0,00	4,38	2,92	2,92
26	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	5,84	7,30	5,84	4,38	0,00	4,38	4,38
27	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	0,00	2,92
28	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	0,00
29	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
30	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	4,38	4,38
31	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	4,38	4,38
32	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
33	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	4,38	4,38
34	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
35	5,84	5,84	5,84	8,76	8,76	5,84	7,30	7,30	8,76	7,30	5,84	7,30	5,84	5,84
36	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
37	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	4,38	4,38
38	5,84	5,84	5,84	8,76	8,76	5,84	7,30	7,30	8,76	7,30	5,84	7,30	5,84	5,84
39	2,92	2,92	2,92	5,84	5,84	2,92	4,38	4,38	5,84	4,38	2,92	4,38	2,92	2,92
40	4,38	4,38	4,38	7,30	7,30	4,38	5,84	5,84	7,30	5,84	4,38	5,84	4,38	4,38

Tabelle B.24: Rüstkosten SC_{jt} des Datensatzes 1, fortführend

	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	n+1
0	1,46	2,92	2,92	1,46	2,92	1,46	4,38	1,46	2,92	4,38	1,46	2,92	0,00
1	4,38	5,84	5,84	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	5,84	2,92
2	4,38	5,84	5,84	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	5,84	2,92
3	5,84	7,30	7,30	5,84	7,30	5,84	8,76	5,84	7,30	8,76	5,84	7,30	4,38
4	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
5	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
6	4,38	5,84	5,84	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	5,84	2,92
7	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
8	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
9	4,38	5,84	5,84	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	5,84	2,92
10	4,38	5,84	5,84	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	5,84	2,92
11	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
12	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
13	4,38	5,84	5,84	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	5,84	2,92
14	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
15	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
16	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
17	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
18	5,84	7,30	7,30	5,84	7,30	5,84	8,76	5,84	7,30	8,76	5,84	7,30	4,38
19	5,84	7,30	7,30	5,84	7,30	5,84	8,76	5,84	7,30	8,76	5,84	7,30	4,38
20	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
21	4,38	5,84	5,84	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	5,84	2,92
22	4,38	5,84	5,84	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	5,84	2,92
23	5,84	7,30	7,30	5,84	7,30	5,84	8,76	5,84	7,30	8,76	5,84	7,30	4,38
24	4,38	5,84	5,84	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	5,84	2,92
25	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
26	4,38	5,84	5,84	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	5,84	2,92
27	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
28	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
29	0,00	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
30	4,38	0,00	5,84	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	5,84	2,92
31	4,38	5,84	0,00	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	5,84	2,92
32	2,92	4,38	4,38	0,00	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
33	4,38	5,84	5,84	4,38	0,00	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	5,84	2,92
34	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	0,00	5,84	2,92	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
35	5,84	7,30	7,30	5,84	7,30	5,84	0,00	5,84	7,30	8,76	5,84	7,30	4,38
36	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	0,00	4,38	5,84	2,92	4,38	1,46
37	4,38	5,84	5,84	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	0,00	7,30	4,38	5,84	2,92
38	5,84	7,30	7,30	5,84	7,30	5,84	8,76	5,84	7,30	0,00	5,84	7,30	4,38
39	2,92	4,38	4,38	2,92	4,38	2,92	5,84	2,92	4,38	5,84	0,00	4,38	1,46
40	4,38	5,84	5,84	4,38	5,84	4,38	7,30	4,38	5,84	7,30	4,38	0,00	2,92

C Robustheitsanalysen der Servicelevelergebnisse der mengenorientierten Ansätze

Da die Ergebnisse, welche mit den Strategien PBL und NWCS erzielt werden, identisch sind, liegen die Linien dieser Strategien in den nachfolgenden Abbildungen C.1 bis C. 9 übereinander.

C.1 Fallstudie 1

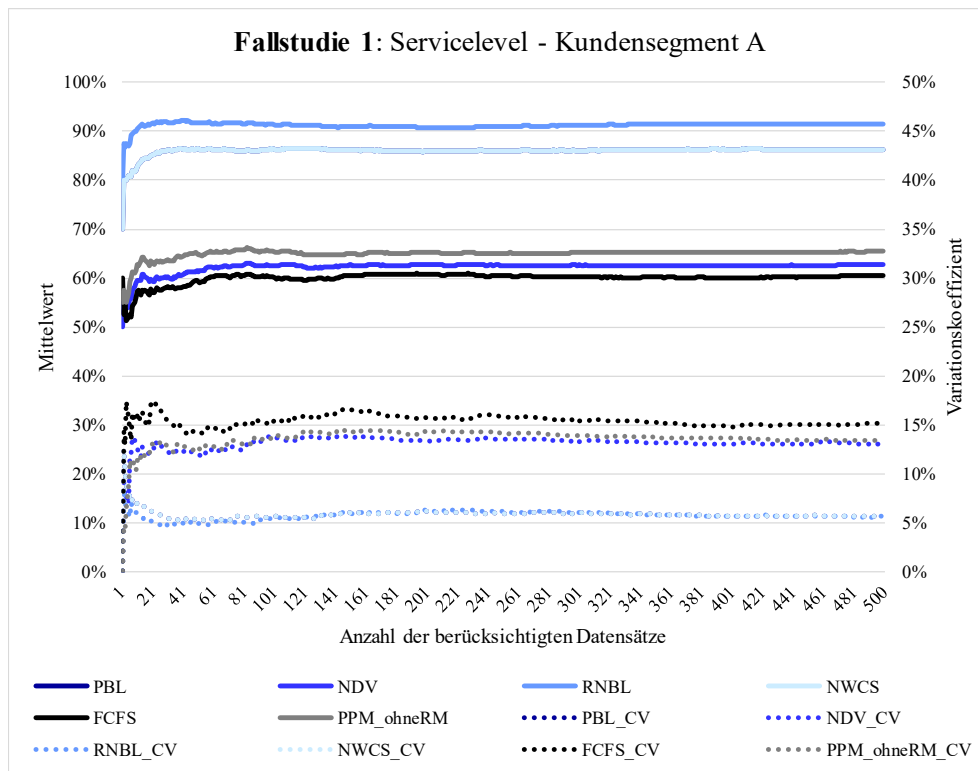


Abbildung C.1: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments A der Fallstudie 1

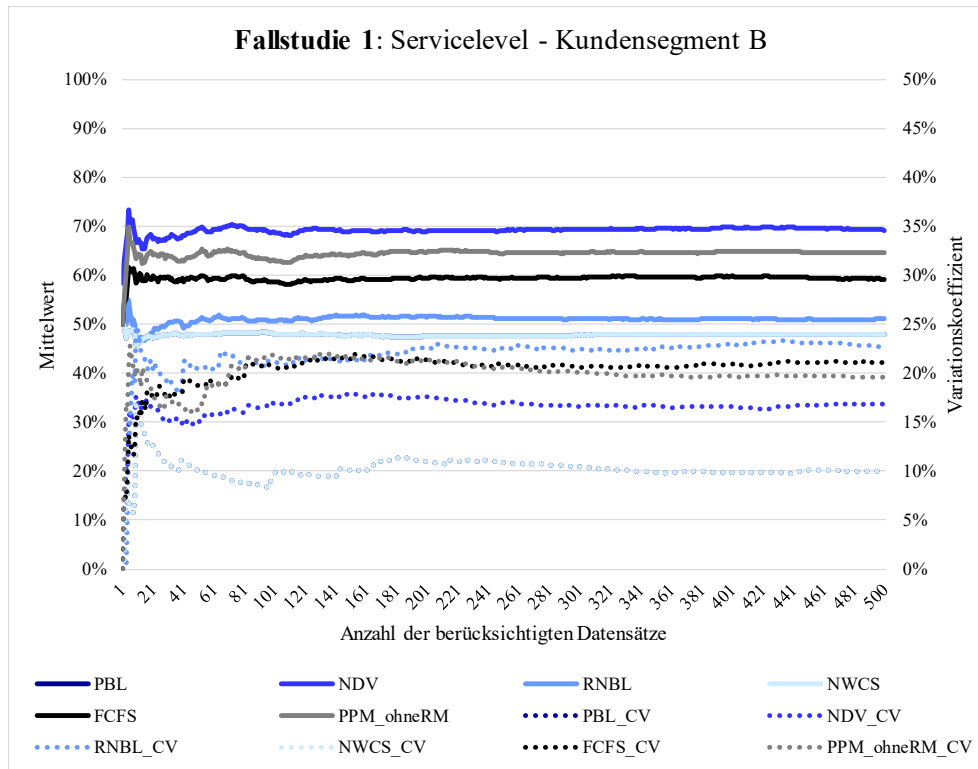


Abbildung C.2: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments B der Fallstudie 1

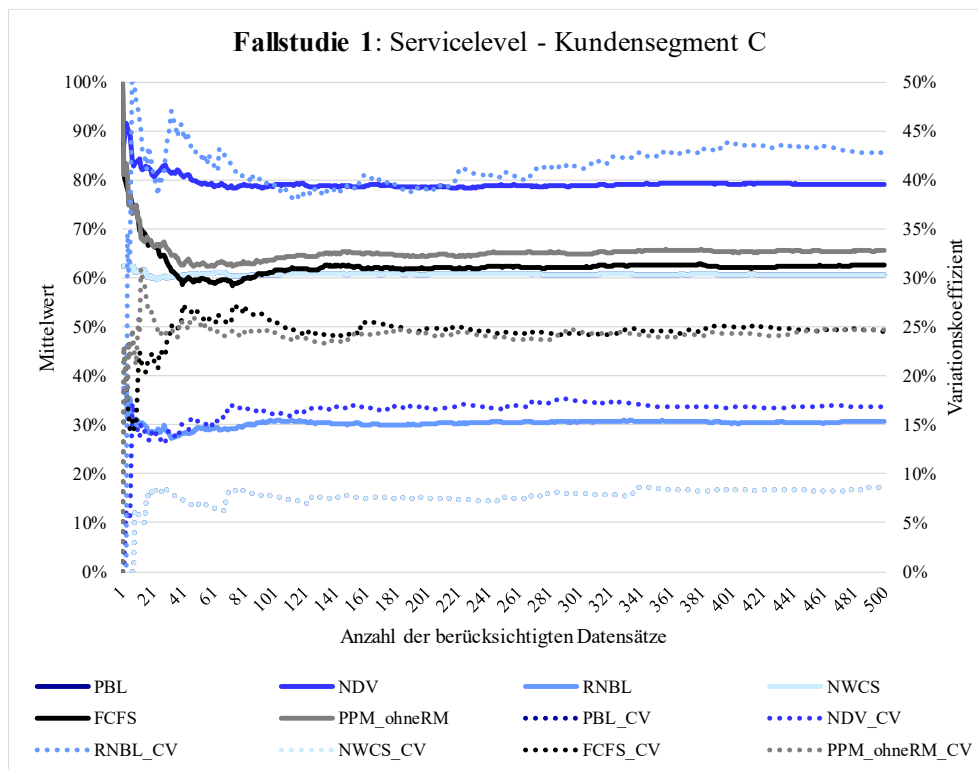


Abbildung C.3: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments C der Fallstudie 1

C.2 Fallstudie 2

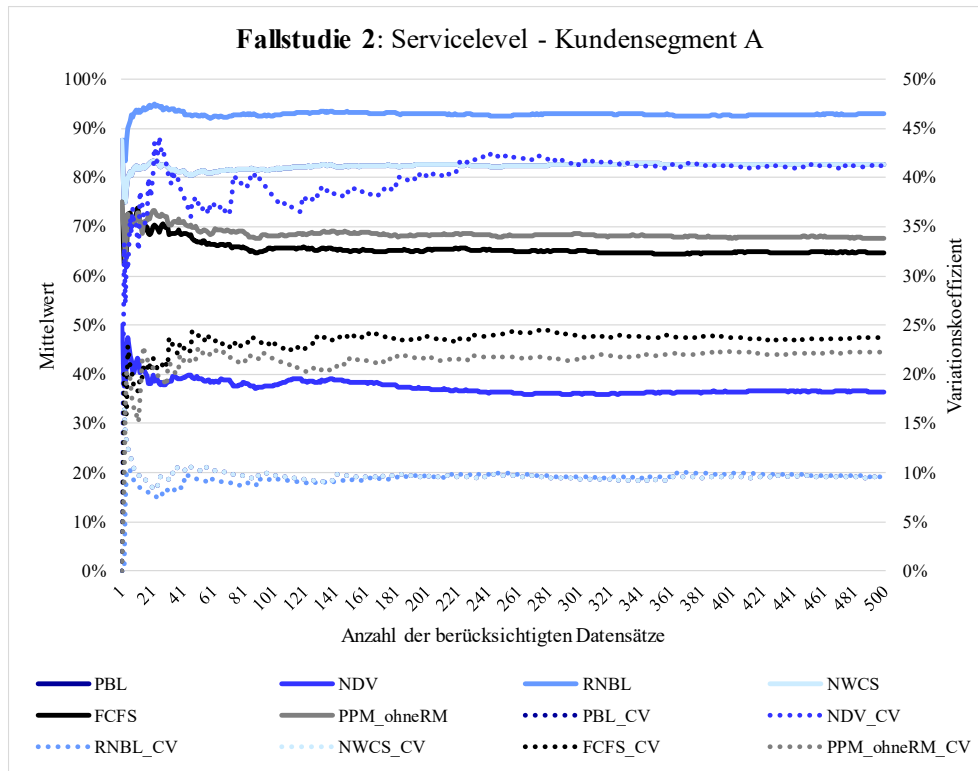


Abbildung C.4: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments A der Fallstudie 2

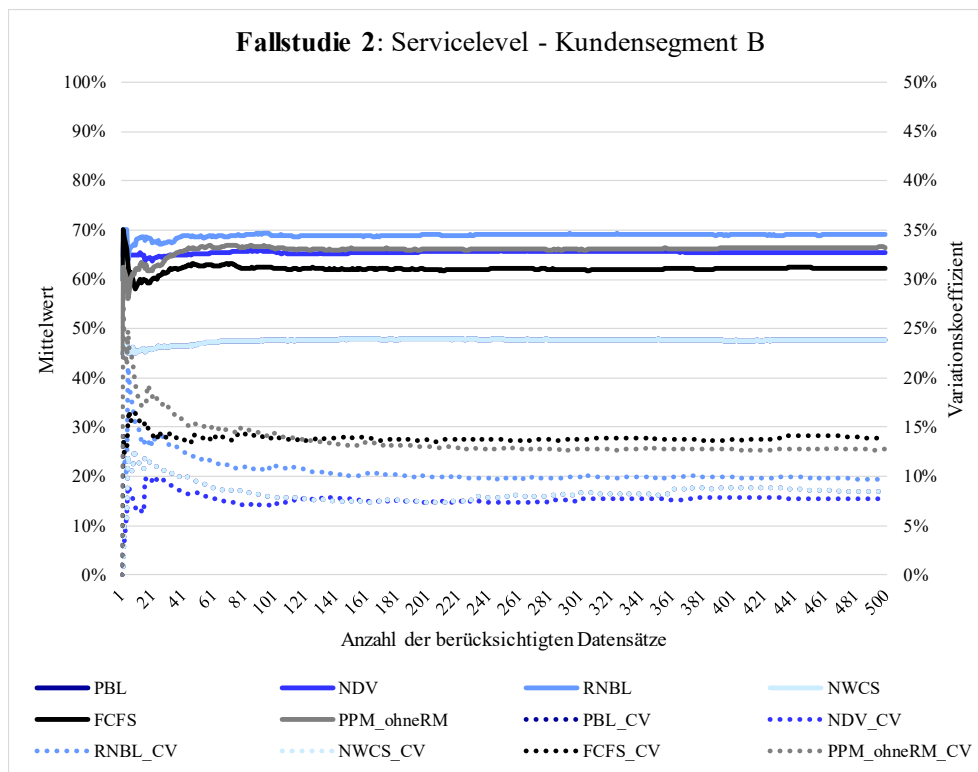


Abbildung C.5: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments B der Fallstudie 2

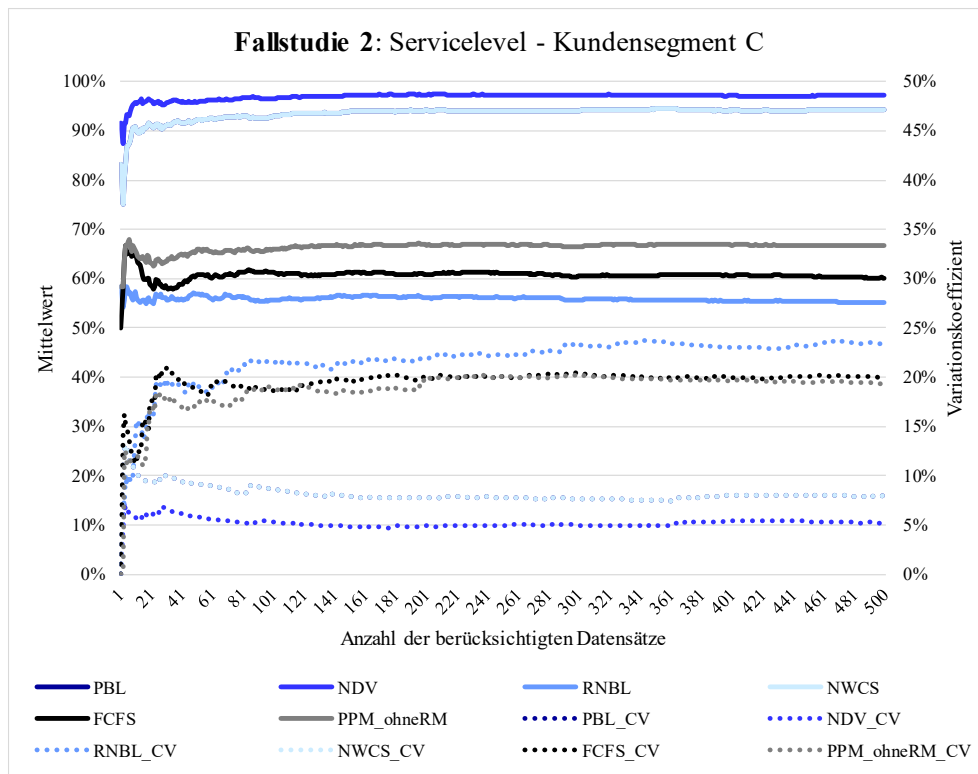


Abbildung C.6: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments C der Fallstudie 2

C.3 Fallstudie 3

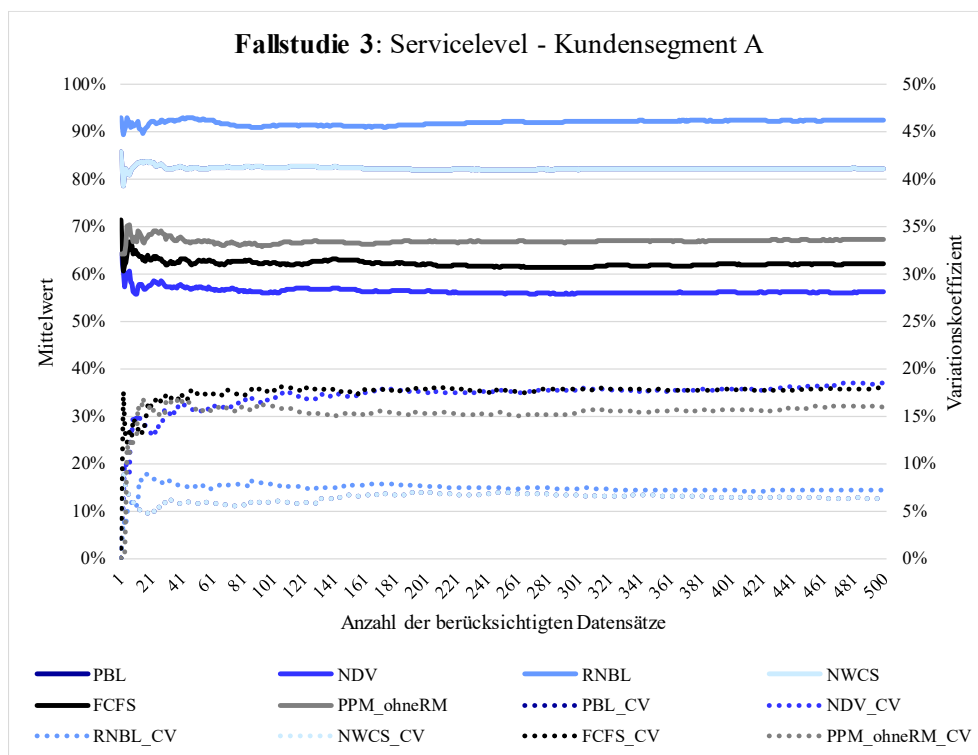


Abbildung C.7: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments A der Fallstudie 3

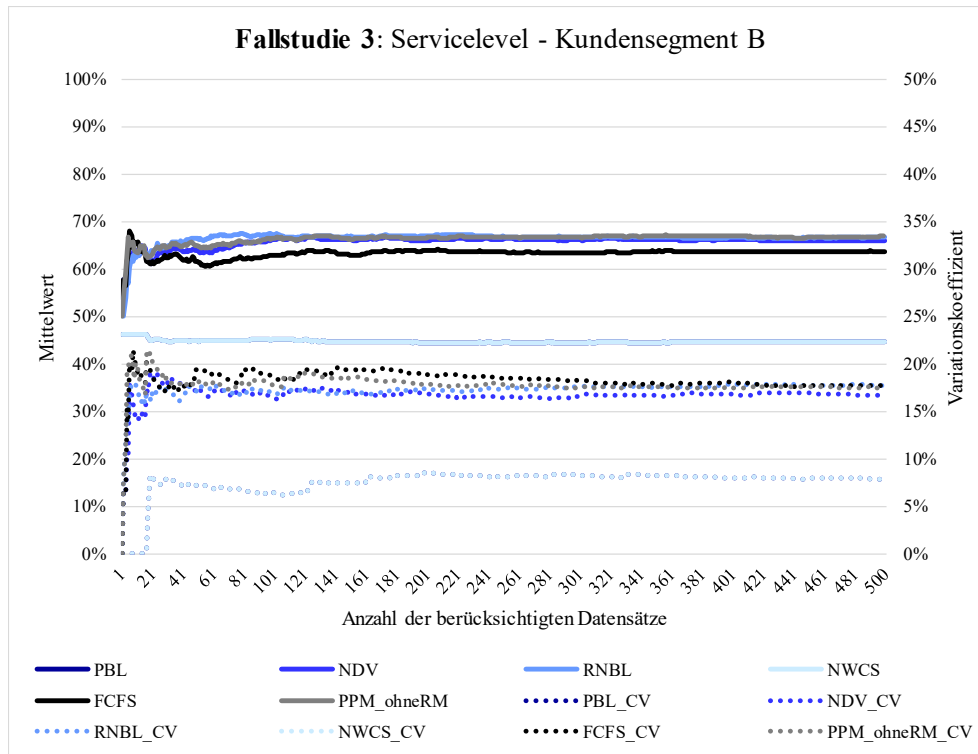


Abbildung C.8: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments B der Fallstudie 3

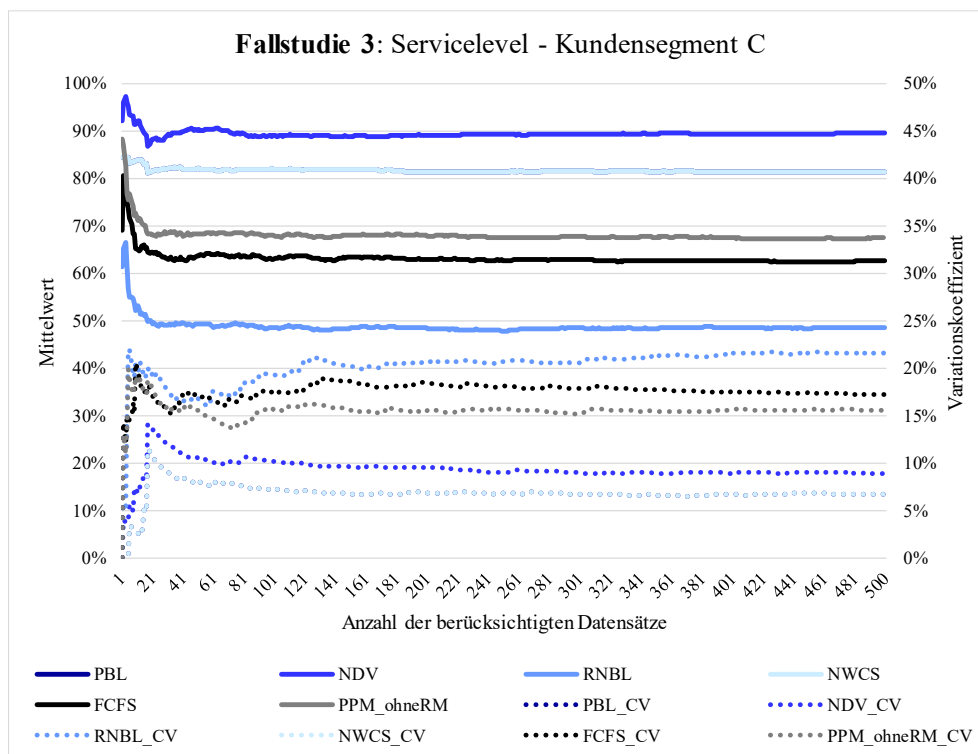


Abbildung C.9: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments C der Fallstudie 3

D Robustheitsanalysen der Servicelevelergebnisse der erlösorientierten Ansätze

D.1 Fallstudie 1

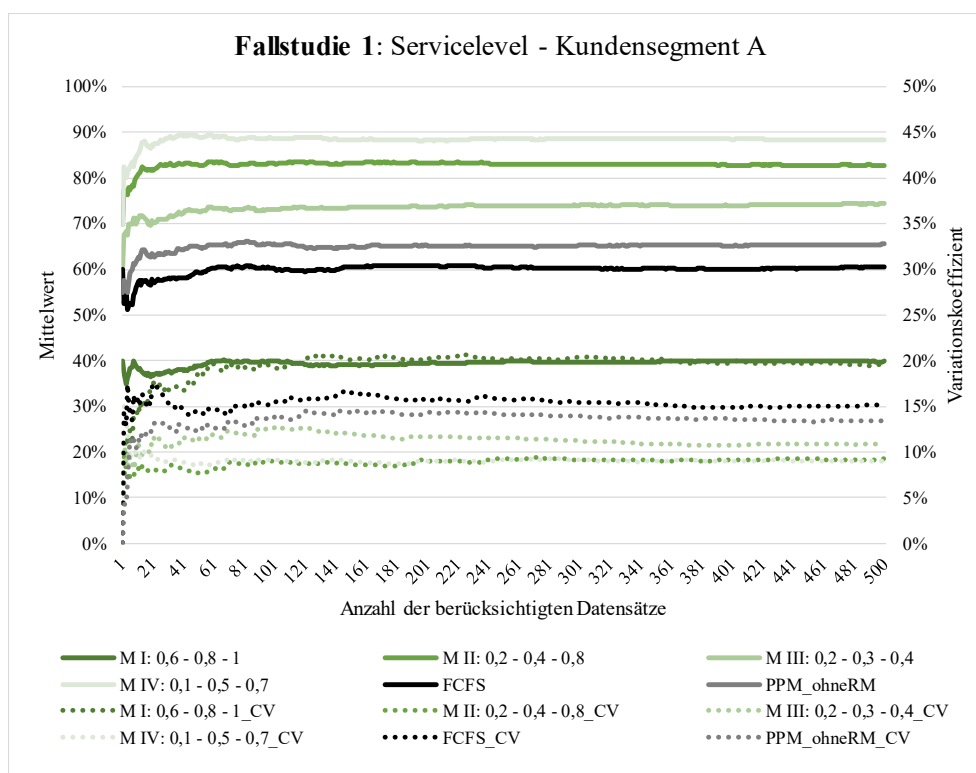


Abbildung D.1: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments A der Fallstudie 1

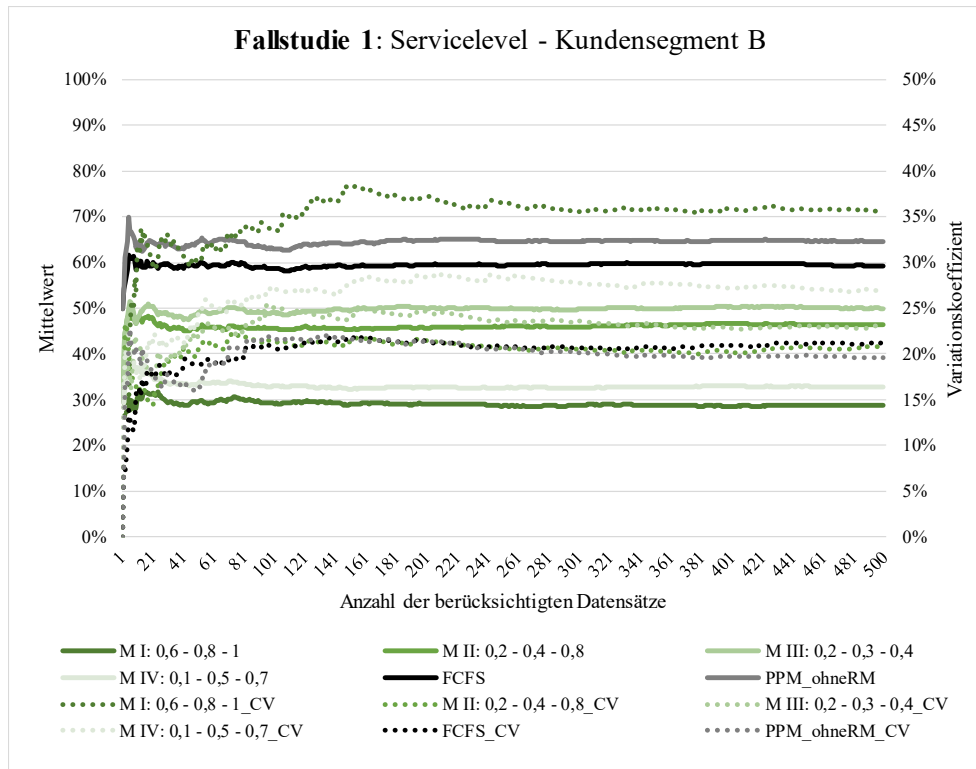


Abbildung D.2: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments B der Fallstudie 1

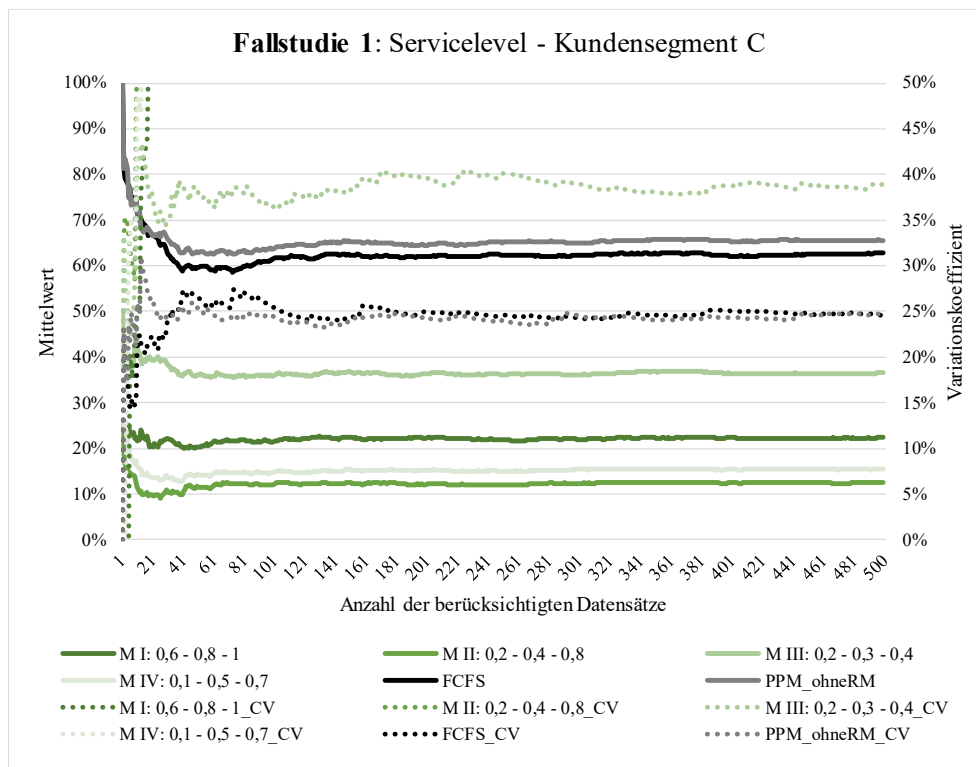


Abbildung D.3: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments C der Fallstudie 1

D.2 Fallstudie 2

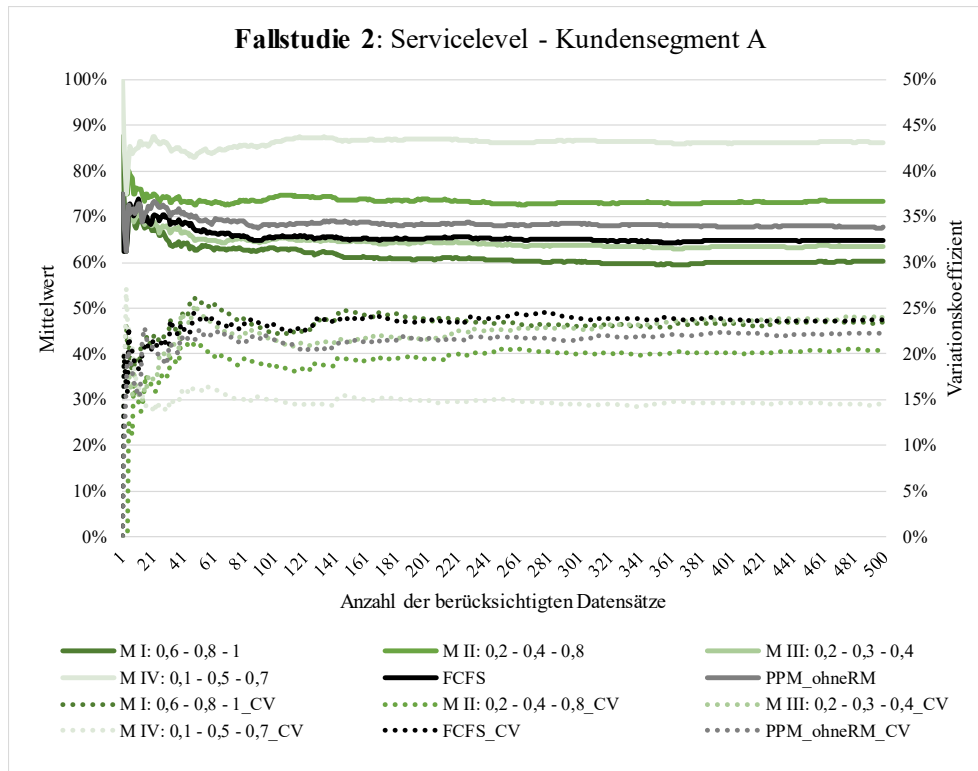


Abbildung D.4: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments A der Fallstudie 2

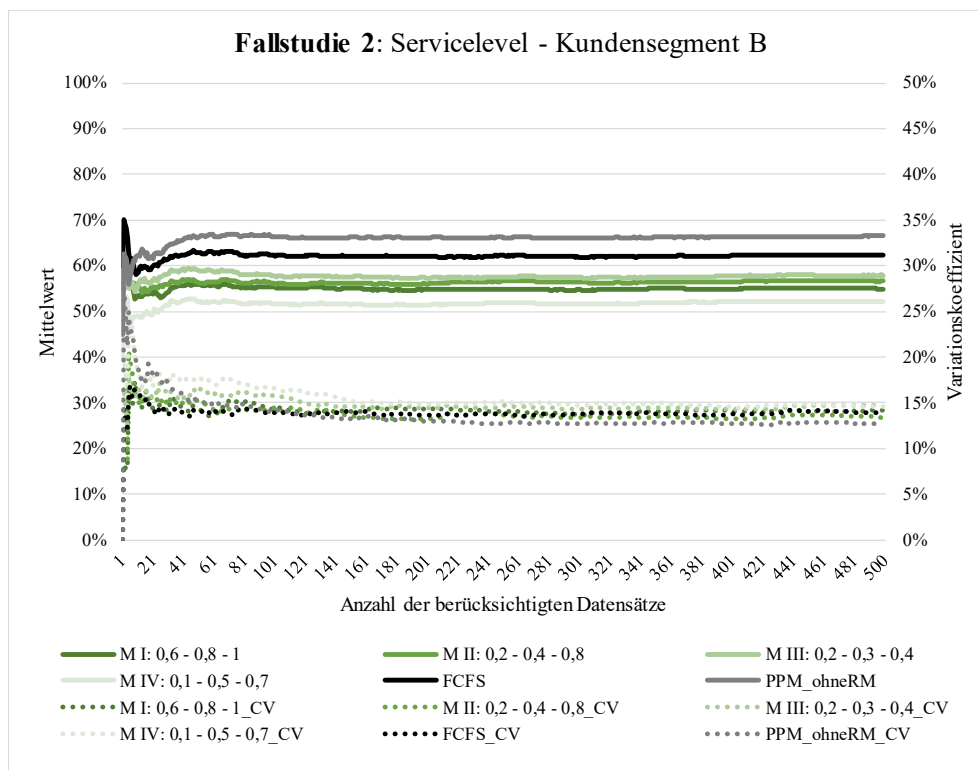


Abbildung D.5: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments B der Fallstudie 2

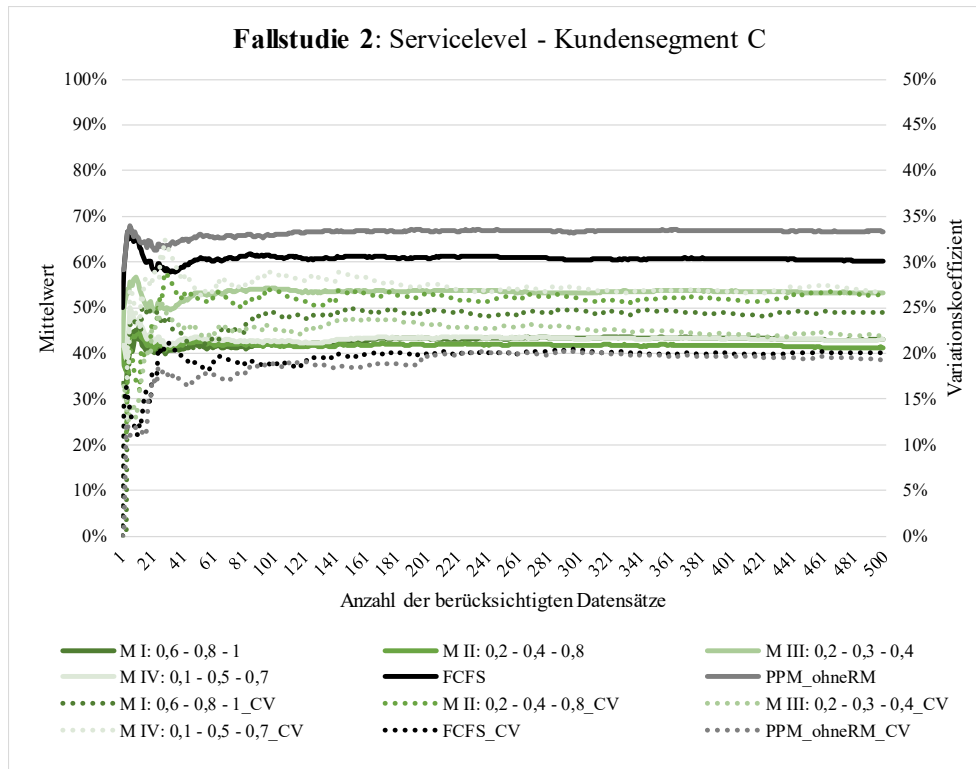


Abbildung D.6: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments C der Fallstudie 2

D.3 Fallstudie 3

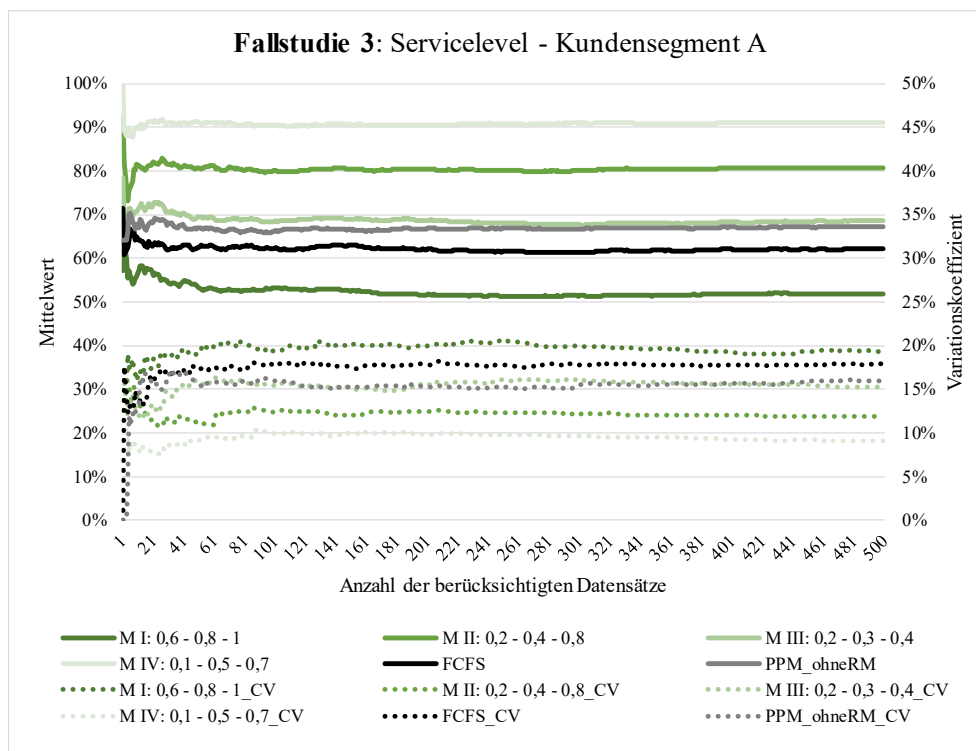


Abbildung D.7: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments A der Fallstudie 3

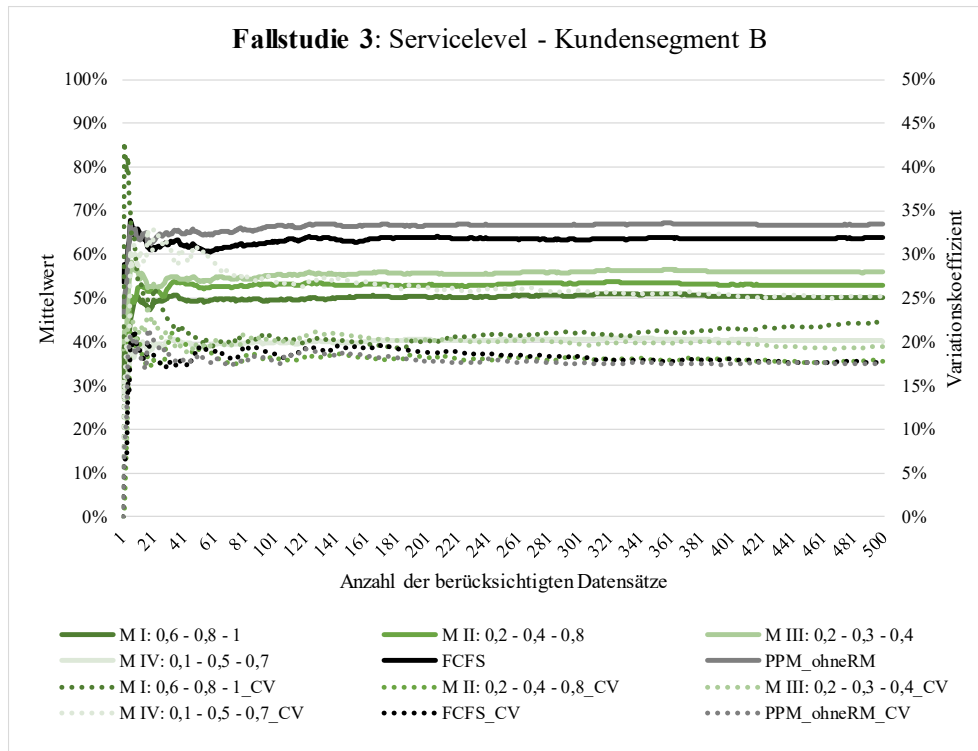


Abbildung D.8: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments B der Fallstudie 3

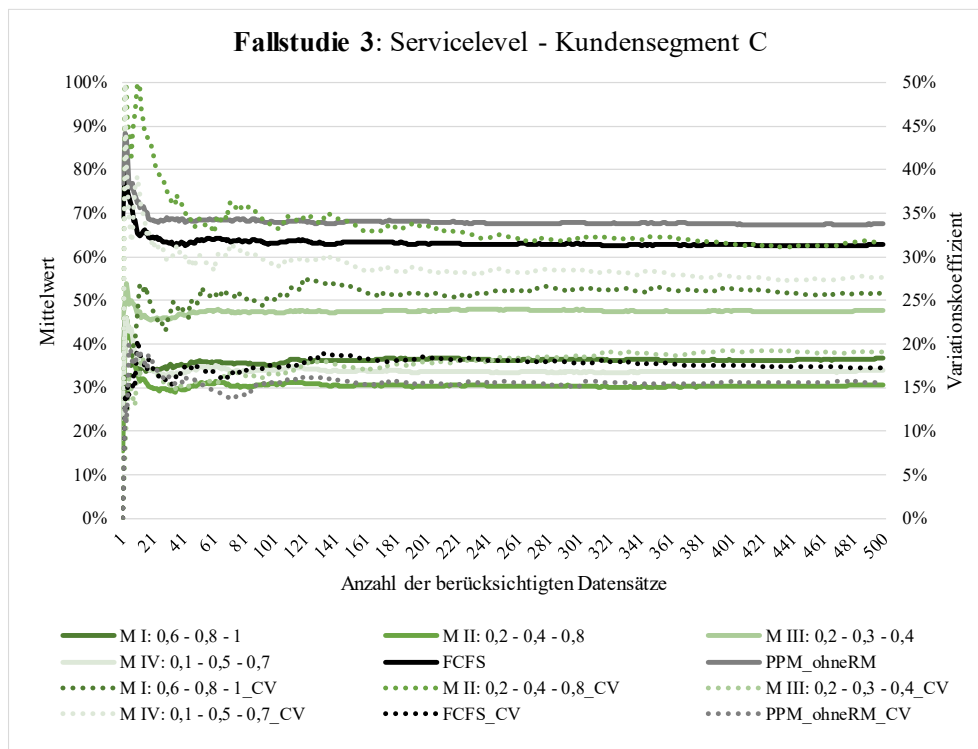


Abbildung D.9: Robustheitsanalyse der Servicelevelergebnisse des Kundensegments C der Fallstudie 3

E Analyse des variierten Strafkostensatzes PT_k

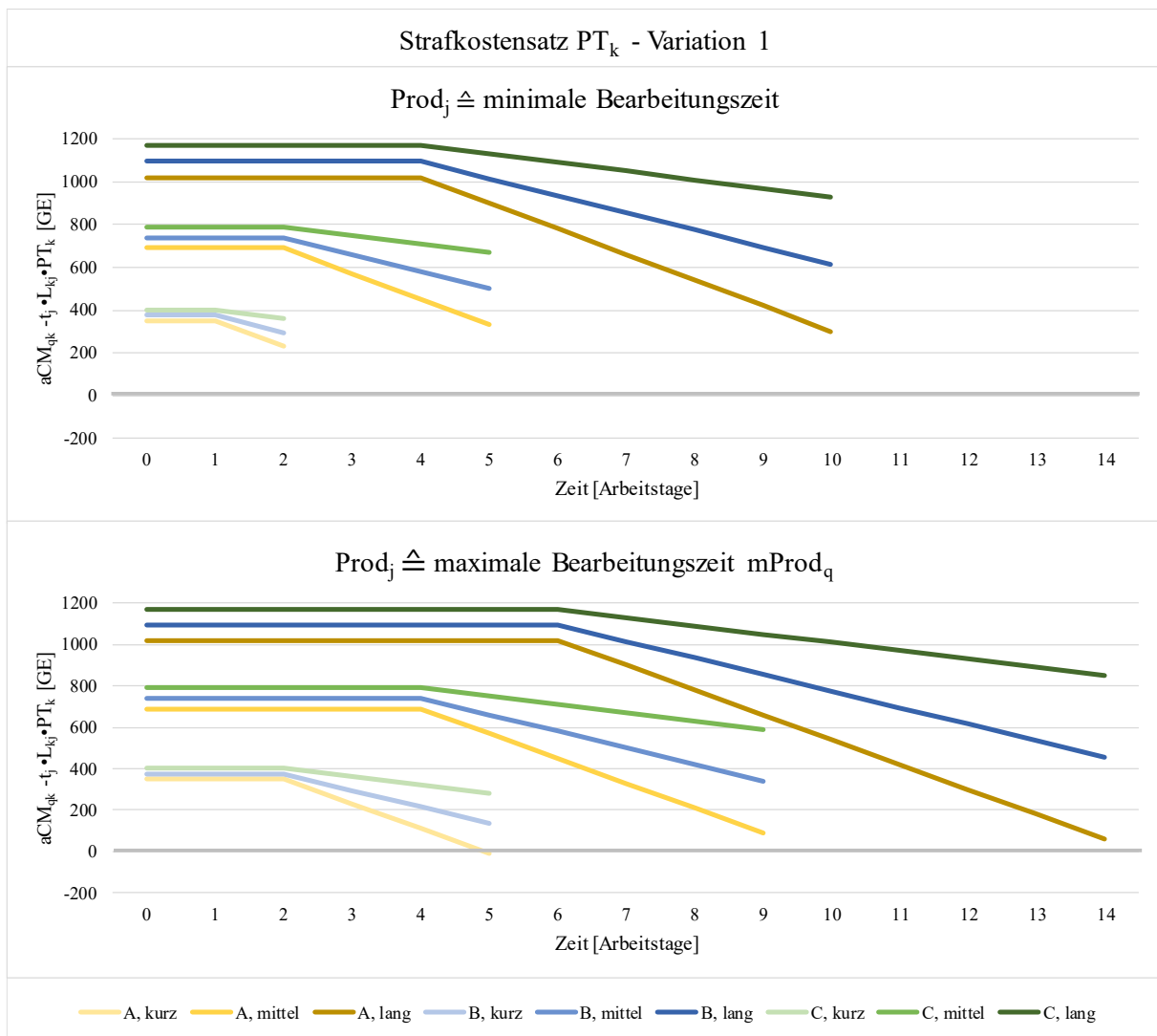


Abbildung E.1: Analyse des verdoppelten Strafkostensatzes PT_k (Variation 1)

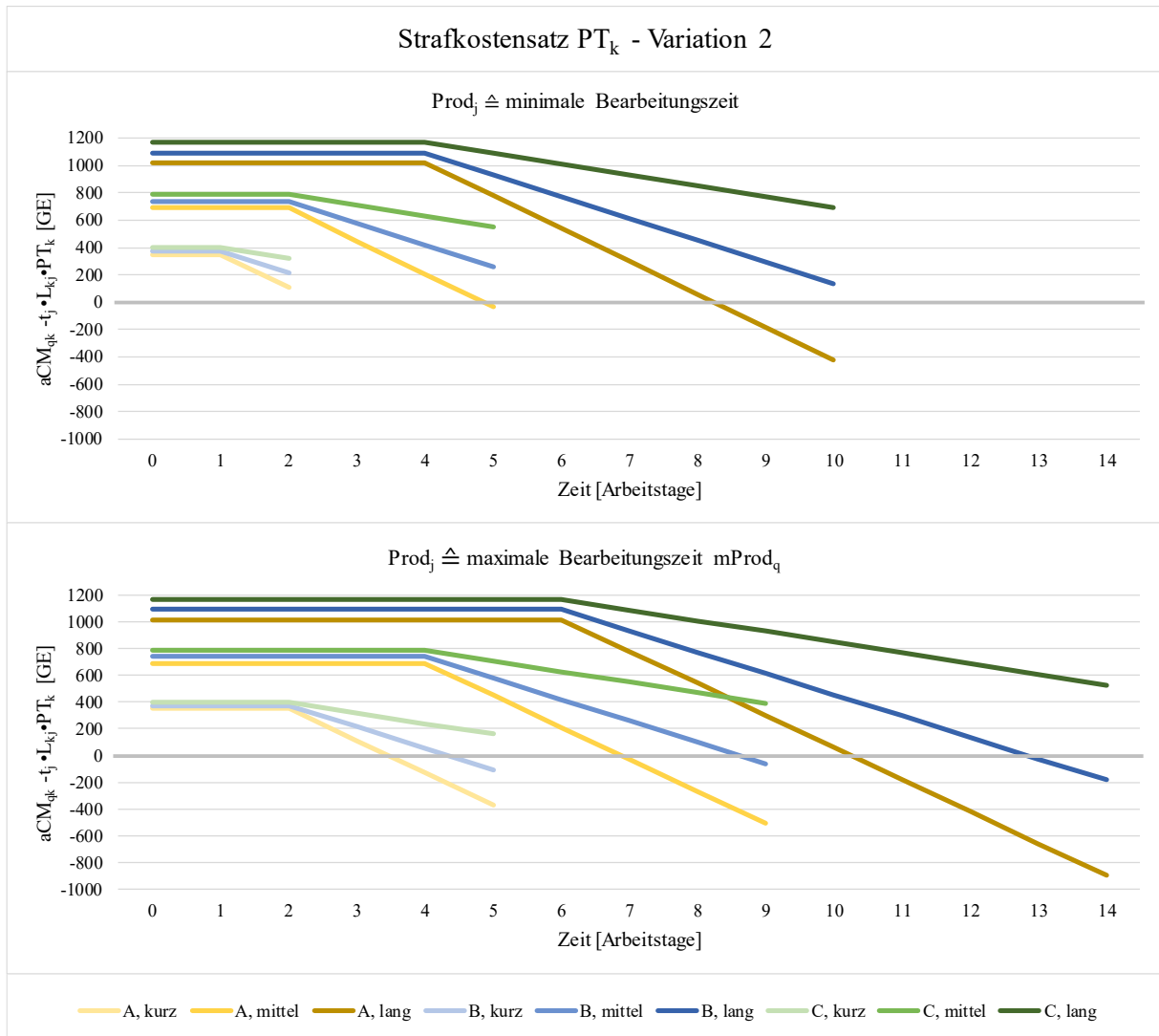


Abbildung E.2: Analyse des vervierfachen Strafkostensatzes PT_k (Variation 2)

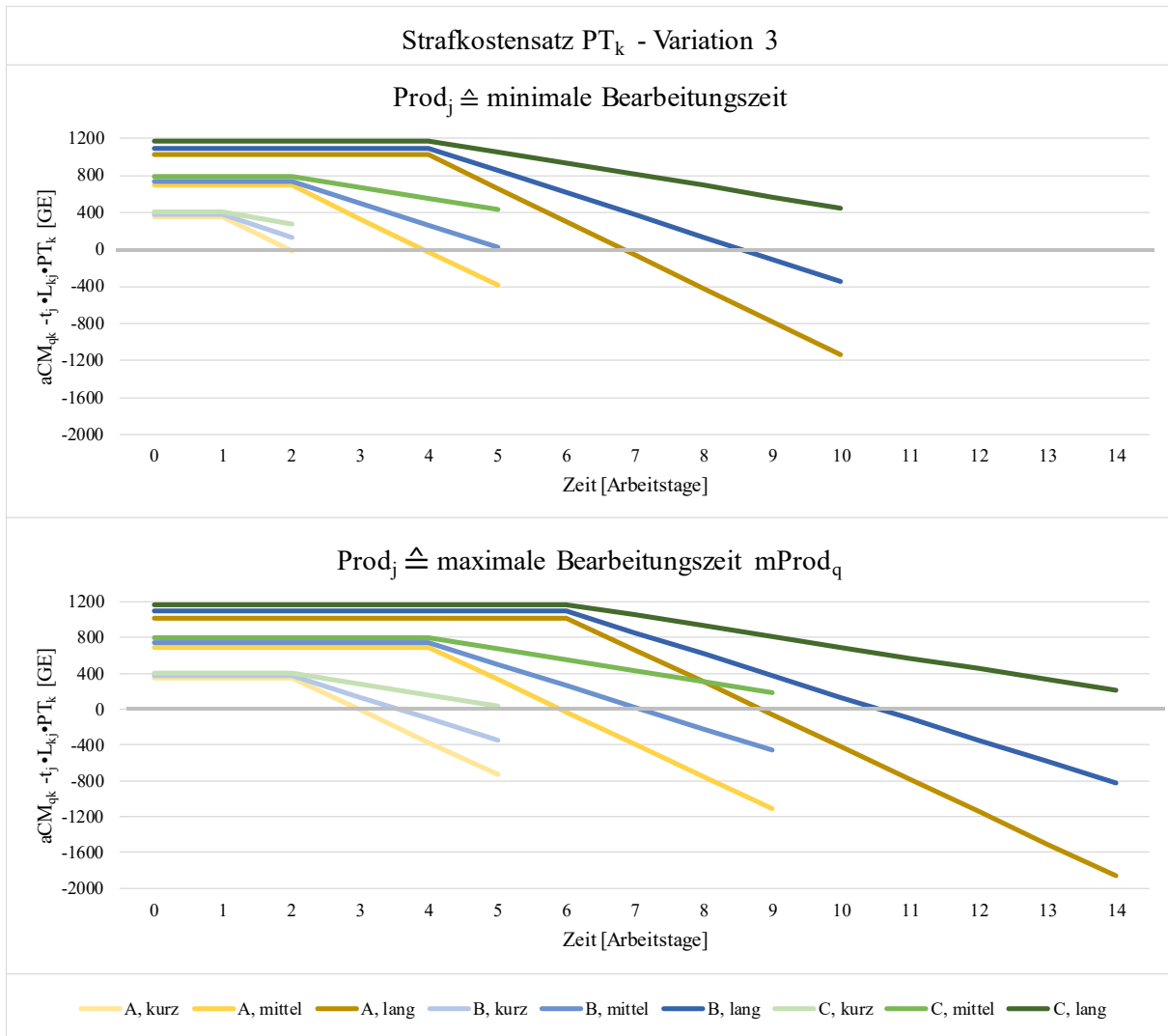


Abbildung E.3: Analyse des versechsfachten Strafkostensatzes PT_k (Variation 3)

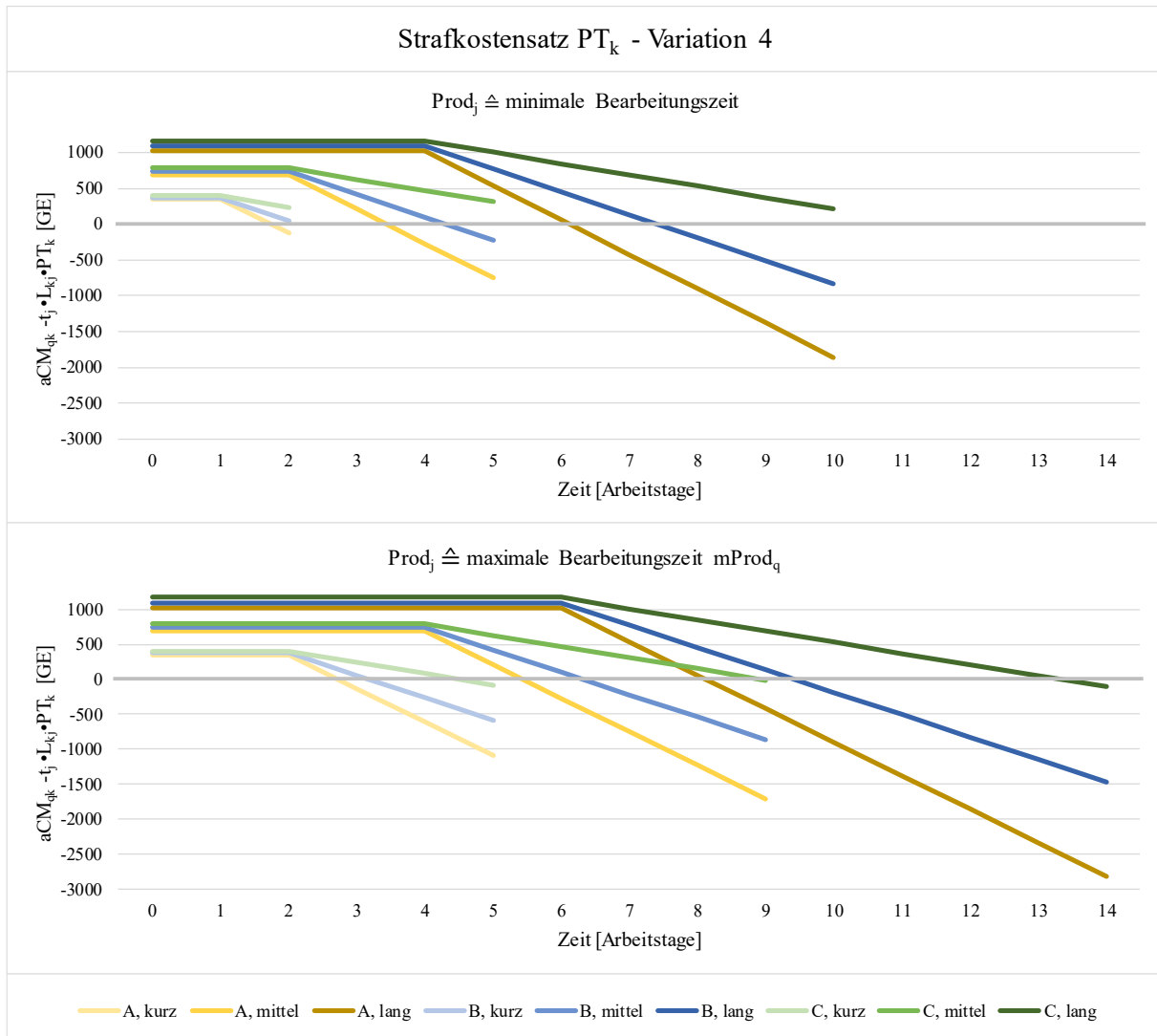


Abbildung E.4: Analyse des verachteten Strafkostensatzes PT_k (Variation 4)