

Schriften zur Produktionsplanung

Band 3

Herausgeber:
Thorsten Claus / Frank Herrmann

Frederick Lange

Ermittlung produktspezifischer Clearing Funktionen und deren Einsatz in der Auftragsfreigabe und Losgrößenplanung



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Schriften zur Produktionsplanung

Band 3





Schriften zur Produktionsplanung

Band 3

Herausgeber:
Thorsten Claus / Frank Herrmann

Frederick Lange

Ermittlung produktspezifischer Clearing Funktionen und deren Einsatz in der Auftragsfreigabe und Losgrößenplanung



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2018

Zugl.: (TU) Dresden, Univ., Diss., 2018

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2018

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2018

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9753-0

eISBN 978-3-7369-8753-1



Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Zusammenfassung | v |
| Danksagung | vii |
| Abbildungsverzeichnis | vii |
| Tabellenverzeichnis | xi |
| Symbolverzeichnis | xvii |
| 1. Einführung | 1 |
| 1.1. Motivation der Forschungsarbeit | 1 |
| 1.2. Aufbau und Ziel der Forschungsarbeit | 5 |
| 2. Hierarchische Produktionsplanung und -steuerung | 7 |
| 2.1. Konzept der hierarchischen Produktionsplanung und -steuerung | 7 |
| 2.2. Methoden und Modelle der Auftragsfreigabe | 11 |
| 2.2.1. Regelbasierte Ansätze der Auftragsfreigabe | 12 |
| 2.2.2. Optimierungsmodelle zur Auftragsfreigabe | 16 |
| 2.2.3. Schwächen und Nachteile der beschriebenen Ansätze | 26 |
| 2.3. Methoden und Modelle der einstufigen Losgrößenplanung | 28 |
| 2.3.1. Einstufige statische Losgrößenplanung | 28 |
| 2.3.2. Einstufige dynamische Losgrößenplanung | 30 |
| 2.3.3. Erweiterte dynamische einstufige Losgrößenmodelle | 35 |
| 2.3.4. Schwächen und Nachteile der beschriebenen Modelle | 36 |
| 3. Clearing Funktionen | 39 |
| 3.1. Konzept der Clearing Funktionen | 39 |
| 3.2. Simulationsgestützte Ermittlung von Clearing Funktionen | 42 |
| 3.2.1. Aggregierte Ansätze in der Literatur | 43 |
| 3.2.2. Produktspezifische Ansätze in der Literatur | 49 |
| 3.2.3. Schwächen und Nachteile der aus der Literatur bekannten Konzepte | 55 |
| 3.3. Ermittlung produktspezifischer Clearing Funktionen durch Langzeitsimu- lation | 56 |
| 3.3.1. Statistische Signifikanz durch Langzeitsimulation | 56 |
| 3.3.2. Vorgehen zur Ermittlung produktspezifischer Clearing Funktionen | 59 |



| | |
|--|------------|
| 4. Fallstudie | 63 |
| 4.1. Aufbau der Fallstudie | 63 |
| 4.1.1. Daten der Fallstudie | 63 |
| 4.1.2. Analyse der Engpasssituation | 65 |
| 4.2. Beschreibung des Simulationsmodells | 68 |
| 4.3. Gemessene Clearing Funktionen | 72 |
| 5. Auftragsfreigabe unter Verwendung von Clearing Funktionen | 79 |
| 5.1. Ansätze und Methoden aus der Literatur | 79 |
| 5.1.1. Integration aggregierter Clearing Funktion | 79 |
| 5.1.2. Disaggregation der Clearing Funktion | 81 |
| 5.1.3. Linearisierung der Clearing Funktion | 82 |
| 5.1.4. Integration produktspezifischer Clearing Funktionen | 83 |
| 5.2. Ansätze und Methoden dieser Forschungsarbeit | 84 |
| 5.2.1. Direkte Integration der Clearing Funktion | 84 |
| 5.2.2. Ermittlung der Durchlaufzeiten durch die Clearing Funktion | 85 |
| 5.2.3. Entscheidungsmodell AFP^{CF-DLZ} | 88 |
| 5.2.4. Experimentdesign | 91 |
| 5.2.5. Vergleichsmodelle | 93 |
| 5.2.6. Ergebnisse der Experimente | 101 |
| 5.2.7. Zusammenfassung der Ergebnisse | 111 |
| 5.3. Berücksichtigung von Bedarfsunsicherheiten durch Servicegrade | 113 |
| 5.3.1. Integration von Servicegraden | 114 |
| 5.3.2. Entscheidungsmodelle $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ und AFP_{β}^{CF-DLZ} | 122 |
| 5.3.3. Experimentdesign | 129 |
| 5.3.4. Vergleichsmodelle | 132 |
| 5.3.5. Ergebnisse der Experimente | 133 |
| 5.3.6. Zusammenfassung der Ergebnisse | 142 |
| 6. Einstufige Losgrößenplanung unter Verwendung der Clearing Funktion | 145 |
| 6.1. Entscheidungsmodelle zur einstufigen Losgrößenplanung | 145 |
| 6.1.1. Entscheidungsmodell $CLSP_{F,\Delta}$ | 145 |
| 6.1.2. Entscheidungsmodell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ | 150 |
| 6.1.3. Entscheidungsmodell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ | 153 |
| 6.1.4. Entscheidungsmodell $CLSP_{F,\Delta}^*$ | 154 |
| 6.2. Experimentdesign | 154 |
| 6.3. Ergebnisse der Experimente | 155 |
| 6.4. Untersuchungen zum Einfluss von Prioritätsregeln | 166 |
| 6.4.1. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel ODD | 167 |
| 6.4.2. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel SPT | 168 |
| 6.4.3. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel EDD | 170 |
| 6.5. Zusammenfassung der Ergebnisse | 172 |



| | |
|--|------------|
| 7. Fazit und Ausblick | 177 |
| A. Anhang | 181 |
| A.1. Detailergebnisse zu Kapitel 5 | 182 |
| A.1.1. Ergebnisse des Modells AFP_{ρ}^{FDLZ} | 182 |
| A.1.2. Ergebnisse der Modelle $AFP_{0,7}^{FDLZ}$, $AFP_{0,6}^{FDLZ}$, AFP^{CF-DLZ} sowie AFP^{CF-KON} | 183 |
| A.1.3. Ergebnisse Alpha-Servicegrad 90% | 184 |
| A.1.4. Ergebnisse Alpha-Servicegrad 95% | 185 |
| A.1.5. Ergebnisse Alpha-Servicegrad 97,5% | 186 |
| A.1.6. Ergebnisse Beta-Servicegrad 90% | 187 |
| A.1.7. Ergebnisse Beta-Servicegrad 95% | 188 |
| A.1.8. Ergebnisse Beta-Servicegrad 97,5% | 189 |
| A.2. Detailergebnisse zu Kapitel 6 | 190 |
| A.2.1. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel FIFO | 190 |
| A.2.2. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel ODD | 191 |
| A.2.3. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel SPT | 192 |
| A.2.4. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel EDD | 193 |





Zusammenfassung

In Produktionssystemen mit knappen Ressourcen existieren nicht lineare Abhängigkeiten zwischen der Last im Produktionssystem und den Ausbringungsmengen. Durch sogenannte Clearing Funktionen können diese nicht linearen Abhängigkeiten beschrieben und quantifiziert werden. In dieser Forschungsarbeit wird eine Methodik zur simulationsgestützten Ermittlung von produktspezifischen Clearing Funktionen in einer Werkstattfertigung mit geschlossener Produktion vorgestellt. Diese Clearing Funktionen werden in ein Modell zur Auftragsfreigabe integriert, um eine Abschätzung der Durchlaufzeiten in Abhängigkeit von der Auslastung zu erhalten. Hierdurch können die Planungsergebnisse signifikant verbessert werden. Durch solche produktspezifischen Clearing Funktionen können zudem die im Produktionssystem tatsächlich und effektiv nutzbaren Kapazitäten abgeleitet werden. Diese verbesserte Einschätzung der Kapazitäten wird in weiterführenden Untersuchungen im Rahmen der Losgrößenplanung verwendet, was zu einer deutlichen Verbesserung der Planungsergebnisse führt.





Danksagung

An dieser Stelle möchte ich den Personen danken, die mich in meinem Vorhaben der Promotion unterstützt und die Erstellung dieser Arbeit ermöglicht haben.

Besonderer Dank gilt meinen Betreuern Herrn Prof. Dr. Herrmann und Herrn Prof. Dr. Claus. Herr Prof. Dr. Herrmann hat mit sehr großem Engagement meine Arbeit fachlich betreut und sehr viel Zeit in intensive fachliche Diskussionen investiert, sodass durch seine Expertise immer wieder neue Impulse für die Arbeit geschaffen wurden. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Claus für die vielen fachlichen Gespräche, durch die die Arbeit konstruktiv und positiv beeinflusst wurde. Bei Herrn Prof. Dr. Manitz und Herrn Prof. Dr. Almeder bedanke ich mich für die gemeinsamen Treffen, in denen ein fachlicher Austausch erfolgte, wodurch die Arbeit positiv beeinflusst wurde. Mein Dank geht auch an Herrn Prof. Dr. Buscher für die Bereitschaft zur Erstellung eines Gutachtens für diese Dissertationsschrift.

Einen besonderen Dank widme ich meinen Eltern, Elisabeth und Reinhard, die mich mit sehr viel Zuneigung und Liebe großgezogen und jederzeit in allen Lebenslagen unterstützt haben. Hierdurch war es mir erst möglich zu studieren und den Weg einzuschlagen, den ich bisher erfolgreich beschritten habe.

Herrn Dr. Julian Englberger danke ich für die vielen fachlichen Gespräche sowie die sehr gute und stets kollegiale Zusammenarbeit im Innovationszentrum für Produktionslogistik und Fabrikplanung an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg. Ein großes Dankeschön geht an Frau Judith Englhardt für die stets spontane Bereitschaft zur Beantwortung von grammatikalischen Fragen und die Zeit, die sie hierfür aufgewendet hat. Meiner Ehefrau Alexandra danke ich für die unermüdliche Unterstützung in meinem Vorhaben der Promotion und dem Verständnis der notwendigen aufzubringenden Zeit für die Erstellung dieser Arbeit. Ohne diesen Rückhalt wäre es denkbar schwer gewesen die Zeit und Energie für ein solches Vorhaben aufzubringen.





Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 1.1. | Bestandteile der Durchlaufzeit (Abbildung in Anlehnung an Herrmann (2011), S. 291). | 2 |
| 1.2. | Das Durchlaufzeitsyndrom (Abbildung in Anlehnung an Corsten u. Gösinger (2012), S. 587). | 4 |
| 1.3. | Abhängigkeiten zwischen der Durchlaufzeit und der Auslastung (Abbildung in Anlehnung an Hopp u. Spearman (2008), S. 317 und Irdem (2009), S. 2). | 5 |
| 2.1. | Übersicht der Planungsaufgaben in der industriellen Praxis (Abbildung in Anlehnung an Günther u. Tempelmeier (2012), S. 342). | 9 |
| 2.2. | Zielkonflikt der gegenläufigen Kosten in der Losgrößenplanung (Abbildung in Anlehnung an Harris (1913), S. 948 und Herrmann (2009), S. 214). | 29 |
| 2.3. | Grundsätzliche Verfahrensstruktur von Heuristiken zur Losgrößenplanung (Abbildung in Anlehnung an Günther u. Tempelmeier (2012), S. 212). | 32 |
| 3.1. | Arten von Clearing Funktionen (Quelle der Abbildung: Karmarkar (1989), S. 108f.). | 40 |
| 3.2. | Grundsätzliches Vorgehen zur simulationsgestützten Ermittlung einer Clearing Funktion. | 43 |
| 3.3. | Linearisierung der Clearing Funktion in fünf Segmente (Abbildung in Anlehnung an Pahl u. a. (2007), S. 318). | 48 |
| 3.4. | Schwankungen der Mittelwerte bei steigendem Simulationshorizont T. | 58 |
| 3.5. | Vorgehen zur Ermittlung einer Clearing Funktion. | 62 |
| 3.6. | Ermittlung einer Clearing Funktion auf Basis von Messwerten. | 62 |
| 4.1. | Darstellung des Produktionsprozesses des zugrundeliegenden Produktionssystems. | 64 |
| 4.2. | Darstellung der Arbeitslast der Bearbeitungsstationen in Stunden über fünf Perioden. | 67 |
| 4.3. | Zusammenhang zwischen Ereignissen, Aktivitäten und Prozessen der ereignisgesteuerten diskreten Simulation (Quelle der Abbildung: Eley (2012), S. 8). | 69 |
| 4.4. | Prinzipieller Ablauf der Simulation. | 71 |
| 4.5. | Gemessene Clearing Funktion der Produkte Part01 und Part05. | 73 |
| 4.6. | Gemessene Clearing Funktion der Produkte Part02 und Part06. | 74 |
| 4.7. | Gemessene Clearing Funktion der Produkte Part03 und Part07. | 75 |



| | | |
|-------|---|-----|
| 4.8. | Gemessene Clearing Funktion der Produkte Part04 und Part08. | 76 |
| 4.9. | Gemessene Clearing Funktionen der Produkte Part01 bis Part04 im direkten Vergleich. | 76 |
| 4.10. | Kumulierte Clearing Funktion über alle Produkte. | 77 |
| 5.1. | Exemplarische Darstellung der Aufteilung der aggregierten Clearing Funktion (Quelle der Abbildung: Pahl u. a. (2007), S. 318). | 82 |
| 5.2. | Durchführung einer rollierenden und überlappenden Planung über den gesamten Simulationshorizont (Abbildung in Anlehnung an Herrmann (2011), S. 250). | 92 |
| 5.3. | Vorgehen zur Ermittlung der Durchlaufzeiten für das Modell AFP_{ρ}^{FDLZ} | 95 |
| 5.4. | Reduktion der verfügbaren Kapazität durch ρ für das Bedarfsszenario S-1. | 102 |
| 5.5. | Reduktion der verfügbaren Kapazität durch ρ für das Bedarfsszenario S-2. | 103 |
| 5.6. | Reduktion der verfügbaren Kapazität durch ρ für das Bedarfsszenario S-3. | 104 |
| 5.7. | Reduktion der verfügbaren Kapazität durch ρ für das Bedarfsszenario S-4. | 105 |
| 5.8. | Ergebnisse der Simulationsexperimente für das Bedarfsszenario S-1. | 106 |
| 5.9. | Ergebnisse der Simulationsexperimente für das Bedarfsszenario S-2. | 107 |
| 5.10. | Ergebnisse der Simulationsexperimente für das Bedarfsszenario S-3. | 108 |
| 5.11. | Ergebnisse der Simulationsexperimente für das Bedarfsszenario S-4. | 110 |
| 5.12. | Gegenläufige Kostenentwicklung der Fehlmengen- und Lagerbestandskosten (Quelle der Abbildung: Corsten u. Gössinger (2012), S. 503). | 114 |
| 5.13. | Ermittlung der Freigabemengen R_t auf Basis der im Entscheidungsmodell bestimmten Bestandsänderung Y_t und den tatsächlich eintretenden Bedarfsmengen D_t | 119 |
| 5.14. | Exemplarische Darstellung der schwankenden Bedarfsmittelwerte und resultierenden Bedarfsmengen. | 131 |
| 5.15. | Erzielte mittlere Alpha-Servicegrade bei einem definierten Servicegrad von 90%. | 135 |
| 5.16. | Erzielte mittlere Alpha-Servicegrade bei einem definierten Servicegrad von 95%. | 136 |
| 5.17. | Erzielte mittlere Alpha-Servicegrade bei einem definierten Servicegrad von 97,5%. | 138 |
| 5.18. | Erzielte mittlere Beta-Servicegrade bei einem definierten Servicegrad von 90%. | 139 |
| 5.19. | Erzielte mittlere Beta-Servicegrade bei einem definierten Servicegrad von 95%. | 140 |
| 5.20. | Erzielte mittlere Beta-Servicegrade bei einem definierten Servicegrad von 97,5%. | 142 |
| 6.1. | Relevante Werte der Clearing Funktion zur Abschätzung der verfügbaren Kapazitäten. | 153 |
| 6.2. | Anzahl der verspäteten Aufträge je Modell für das Bedarfsszenario S-1. | 158 |
| 6.3. | Erzielte Rüst- und Lagerkosten je Modell für das Bedarfsszenario S-1. | 159 |
| 6.4. | Anzahl der verspäteten Aufträge je Modell für das Bedarfsszenario S-2. | 159 |



| | | |
|-------|--|-----|
| 6.5. | Erzielte Rüst- und Lagerkosten je Modell für das Bedarfsszenario S-2. . . | 161 |
| 6.6. | Anzahl der verspäteten Aufträge je Modell für das Bedarfsszenario S-3. . | 162 |
| 6.7. | Erzielte Rüst- und Lagerkosten je Modell für das Bedarfsszenario S-3. . . | 163 |
| 6.8. | Anzahl der verspäteten Aufträge je Modell für das Bedarfsszenario S-4. . | 164 |
| 6.9. | Erzielte Rüst- und Lagerkosten je Modell für das Bedarfsszenario S-4. . . | 164 |
| 6.10. | Übersicht der in dieser Forschungsarbeit verwendeten unterschiedlichen Ansätze der Losgrößenplanung. | 173 |





Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| 2.1. Arbeitslast und Abzinsfaktoren je Bearbeitungsstation des freizugehenden Auftrags. | 14 |
| 2.2. Bestandskonto der Bearbeitungsstationen zum Zeitpunkt t und $t + 1$ | 15 |
| 3.1. Beispiel zur Aufteilung der Bedarfe bei unterschiedlichen Produktionsverhältnissen. | 54 |
| 3.2. Beispiel zur Aufteilung des WIP-Bestands bei unterschiedlichen Produktionsverhältnissen. | 60 |
| 4.1. Produktspezifische Arbeitspläne des zugrundeliegenden Produktionssystems. | 65 |
| 4.2. Kumulierte Stückbearbeitungszeiten und Rüstzeiten je Produkt. | 65 |
| 4.3. Produktspezifische Kostensätze des Produktionssystems. | 66 |
| 4.4. Produktspezifische Kostensätze des Produktionssystems. | 66 |
| 4.5. Bedarfsmengen über fünf Perioden. | 66 |
| 4.6. Arbeitslast der Bearbeitungsstationen in Stunden über fünf Perioden. . . . | 68 |
| 4.7. Relative Arbeitslast zur ausgeprägten Engpassmaschine je Periode. | 68 |
| 4.8. Lineare Bereiche und maximale Ausbringungsmengen der gemessenen Clearing Funktionen. | 77 |
| 5.1. Beispielhafte Darstellung des Vektors CF | 85 |
| 5.2. Beispiel einer geschlossenen Produktion. | 86 |
| 5.3. Beispiel des Vektors $VR_{k,t,\tau}$ bei einer geschlossenen Produktion. | 87 |
| 5.4. Beispiel des Vektors $VB_{k,t,\tau}$ bei einer geschlossenen Produktion. | 87 |
| 5.5. Parameter der Normalverteilung der einzelnen Bedarfsszenarien. | 91 |
| 5.6. Anteil der verspätet ausgelieferten Bedarfe von Bedarfsszenario S-1. . . . | 105 |
| 5.7. Mittlere Auslastung des Produktionssystems für Bedarfsszenario S-1. . . . | 106 |
| 5.8. Anteil der verspätet ausgelieferten Bedarfe von Bedarfsszenario S-2. . . . | 107 |
| 5.9. Anteil der verspätet ausgelieferten Bedarfe von Bedarfsszenario S-3. . . . | 108 |
| 5.10. Mittlere Auslastung des Produktionssystems für Bedarfsszenario S-2. . . . | 109 |
| 5.11. Mittlere Auslastung des Produktionssystems für Bedarfsszenario S-3. . . . | 109 |
| 5.12. Anteil der verspätet ausgelieferten Bedarfe von Bedarfsszenario S-4. . . . | 109 |
| 5.13. Mittlere Auslastung des Produktionssystems für Bedarfsszenario S-4. . . . | 110 |
| 5.14. Einfluss des Parameter ρ auf die prozentualen Fehlmengen. | 111 |
| 5.15. Reduktion der Fehlmengen in Prozent, im Vergleich zur Verwendung von belastungsunabhängigen Durchlaufzeiten. | 112 |



| | |
|---|-----|
| 5.16. Ermittlung der Durchlaufzeit von Freigabe bis zur Einlagerung durch den binären Vektor $VB_{k,t,\tau}$ | 122 |
| 5.17. Vektor V_v^{sqr} zur Ermittlung der Wurzel der Durchlaufzeiten. | 123 |
| 5.18. Parameter zur Erzeugung der Bedarfsszenarien für die Simulationsexperimente. | 131 |
| 5.19. Simulationsergebnisse für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} von 90%. | 134 |
| 5.20. Simulationsergebnisse für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} von 95%. | 135 |
| 5.21. Simulationsergebnisse für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} von 97,5%. | 137 |
| 5.22. Simulationsergebnisse für einen Beta-Servicegrad β von 90%. | 139 |
| 5.23. Simulationsergebnisse für einen Beta-Servicegrad β von 95%. | 140 |
| 5.24. Simulationsergebnisse für einen Beta-Servicegrad β von 97,5%. | 141 |
| 6.1. Parameter der Normalverteilung der jeweiligen Bedarfsszenarien. | 155 |
| 6.2. Mittelwerte und Standardabweichungen der stückbezogenen Durchlaufzeiten je Produkt k und Bedarfsszenario S in Sekunden. | 156 |
| 6.3. Mittlere Auslastung des Produktionssystems bei Bedarfsszenario S-1. | 157 |
| 6.4. Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ für Bedarfsszenario S-1. | 160 |
| 6.5. Mittlere Auslastung des Produktionssystems bei Bedarfsszenario S-2. | 160 |
| 6.6. Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ für Bedarfsszenario S-2. | 162 |
| 6.7. Mittlere Auslastung des Produktionssystems bei Bedarfsszenario S-3. | 162 |
| 6.8. Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ für Bedarfsszenario S-3. | 163 |
| 6.9. Mittlere Auslastung des Produktionssystems bei Bedarfsszenario S-4. | 163 |
| 6.10. Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ für Bedarfsszenario S-4. | 165 |
| 6.11. Prioritätsregelabhängige gemessene stückbezogene Durchlaufzeiten je Bedarfsszenario S und Produkt k | 167 |
| 6.12. Ermittelte Anzahl verspäteter Aufträge je Modell bei Verwendung der Prioritätsregel ODD. | 168 |
| 6.13. Ermittelte Kosten je Modell bei Verwendung der Prioritätsregel ODD. | 169 |
| 6.14. Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ bei Verwendung der Prioritätsregel ODD. | 169 |
| 6.15. Ermittelte Anzahl verspäteter Aufträge je Modell bei Verwendung der Prioritätsregel SPT. | 170 |
| 6.16. Ermittelte Kosten je Modell bei Verwendung der Prioritätsregel SPT. | 170 |
| 6.17. Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ bei Verwendung der Prioritätsregel SPT. | 171 |



| | |
|--|-----|
| 6.18. Ermittelte Anzahl verspäteter Aufträge je Modell bei Verwendung der Prioritätsregel EDD. | 171 |
| 6.19. Ermittelte Kosten je Modell bei Verwendung der Prioritätsregel EDD. . . | 172 |
| 6.20. Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ bei Verwendung der Prioritätsregel EDD. . | 172 |
| 6.21. Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ im Vergleich zum Modell $CLSP_{F,\Delta}$ je Bedarfsszenario und Prioritätsregel. . . | 175 |
| A.1. Detailergebnisse des Modells AFP_{ρ}^{FDLZ} bei der Reduktion des Parameters ρ . | 182 |
| A.2. Detailergebnisse der Modelle $AFP_{0,7}^{FDLZ}$, $AFP_{0,6}^{FDLZ}$ sowie AFP^{CF-DLZ} und AFP^{CF-KON} | 183 |
| A.3. Simulationsergebnisse für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} von 90%. | 184 |
| A.4. Simulationsergebnisse für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} von 95%. | 185 |
| A.5. Simulationsergebnisse für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} von 97,5%. | 186 |
| A.6. Simulationsergebnisse für einen Beta-Servicegrad β von 90%. | 187 |
| A.7. Simulationsergebnisse für einen Beta-Servicegrad β von 95%. | 188 |
| A.8. Simulationsergebnisse für einen Beta-Servicegrad β von 97,5%. | 189 |
| A.9. Detailergebnisse der Untersuchungen zur Losgrößenplanung bei Verwendung der Prioritätsregel FIFO. | 190 |
| A.10. Detailergebnisse der Untersuchungen zur Losgrößenplanung bei Verwendung der Prioritätsregel ODD. | 191 |
| A.11. Detailergebnisse der Untersuchungen zur Losgrößenplanung bei Verwendung der Prioritätsregel SPT. | 192 |
| A.12. Detailergebnisse der Untersuchungen zur Losgrößenplanung bei Verwendung der Prioritätsregel EDD. | 193 |





Symbolverzeichnis

| | |
|---------------------------|--|
| $\alpha_{k,WBZ}$: | Wiederbeschaffungszeitbezogener Alpha-Servicegrad von Produkt k |
| α_{WBZ}^{μ} : | Mittelwert der wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrade über alle Produkte |
| α_{WBZ}^{σ} : | Standardabweichung der wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrade über alle Produkte |
| α_{Per} : | Periodenbezogener Alpha-Servicegrad |
| α_{WBZ} : | Wiederbeschaffungszeitbezogener Alpha-Servicegrad |
| β^{μ} : | Mittelwert der Beta-Servicegrade über alle Produkte |
| β_k : | Betaservicegrad von Produkt k |
| β^{σ} : | Standardabweichung der Beta-Servicegrade über alle Produkte |
| $\delta_{k,t}$: | Mengeneinheiten von Produkt k in Periode t , die nicht vollständig bearbeitet werden können |
| δ_{min} : | Minimale Anzahl Perioden bis zu einer Änderung der Bedarfsmittelwerte |
| δ_{max} : | Maximale Anzahl Perioden bis zu einer Änderung der Bedarfsmittelwerte |
| Δ^m : | Abstand in Perioden zu einem Zeitpunkt m bis eine Änderung der Bedarfsmittelwerte erfolgt |
| Δ^t : | Länge einer Planungsperiode t |
| ε_t : | Zusätzlicher Kapazitätsbedarf in Periode t zur Fertigstellung offener Lose aus vorherigen Planungsläufen |



| | |
|-------------------|--|
| φ_k : | Produktionsverhältnis von Produkt k zur Ermittlung einer Ausbringungsmenge der Clearing Funktion |
| φ_{max} : | Größter möglicher Mittelwert der Bedarfe |
| φ_{min} : | Kleinster möglicher Mittelwert der Bedarfe |
| γ_t : | Binäre Rüstvariable in Periode t |
| $\gamma_{k,t}$: | Binäre Rüstvariable von Produkt k in Periode t |
| κ_j : | Abzinsfaktor von Bearbeitungsstation j in Prozent |
| κ_k : | WIP-Bestand, bis zu welchem die Clearing Funktion von Produkt k im linearen Bereich ist |
| λ : | Maximale Auslastung im Produktionssystem |
| $\lambda_{j,t}$: | Auslastung einer Bearbeitungsstation j je Periode t |
| $\lambda_{k,t}$: | Die im Produktionssystem vorhandene Arbeitslast von Produkt k und Periode t |
| λ_t : | Maximale Auslastung je Periode t |
| $\mu_{k,t}$: | Mittelwert der Bedarfsmengen von Produkt k in Periode t |
| μ_k^s : | Mittelwert der tatsächlich eintretenden Bedarfe für Produkt k in Bedarfsszenario s |
| μ_m : | Mittelwert der Bedarfe zu einem Zeitpunkt m |
| μ_t : | Mittelwert des normalverteilten Bedarfs in Periode t |
| ρ : | Faktor zur Reduktion der verfügbaren Kapazität |
| $\sigma_{k,t}$: | Standardabweichung der Bedarfsmengen von Produkt k in Periode t |
| σ_k^s : | Standardabweichung der tatsächlich eintretenden Bedarfe für Produkt k in Bedarfsszenario s |
| a_n : | Steigung der Clearing Funktion im linearen Segment n |



| | |
|--------------------------|---|
| B_j : | Arbeitslast an Bearbeitungsstation j |
| b_n : | Achsenabschnitt der Clearing Funktion im linearen Segment n |
| BK_j : | Arbeitslast des Bestandskontos von Bearbeitungsstation j |
| C : | Verfügbare Kapazität |
| C_j : | Verfügbare Kapazität der Bearbeitungsstation j |
| $C_{j,t}$: | Verfügbare Kapazität der Bearbeitungsstation j in Periode t |
| C_t : | Verfügbare Kapazität je Periode t |
| CF : | Clearing Funktion |
| $CF_{k,n}$: | Vektor zur Clearing Funktion für Produkt k und Wert n |
| D : | Konstanter Bedarf |
| $D_{k,t}$: | Bedarf von Produkt k in Periode t |
| D_k^{Min} : | Kleinster auftretender Bedarf von Produkt k |
| D_t : | Bedarf in Periode t |
| D_t^{Min} : | Kleinster auftretender Bedarf in Periode t |
| $E(\widehat{L}_{k,o})$: | Gerundete Durchlaufzeit je Produkt k und Operation o |
| $E(L_{k,o})$: | Gemessene mittlere Durchlaufzeit je Produkt k und Operation o |
| FF_k : | Verhältnis zwischen gemessener mittlerer Durchlaufzeit und der Summe der Bearbeitungszeiten über alle Operationen für Produkt k |
| f_k : | Kosten für eine Einheit an Fehlmengen von Produkt k |
| $F_{k,t}$: | Fehlmengen von Produkt k in Periode t |
| $FL_{k,t}$: | Vollständig bearbeitete Lose von Produkt k in Periode t |
| h : | Lagerkostensatz |



| | |
|-------------------|---|
| h_k : | Lagerkostensatz einer Einheit von Produkt k |
| $I_{k,t}$: | Lagerbestand von Produkt k am Ende von Periode t |
| I_t : | Lagerbestand am Ende von Periode t |
| I_t^D : | Disponibler Lagerbestand in Periode t |
| $L_{k,o}$: | Durchlaufzeit von Produkt k vom Freigabezeitpunkt bis zum Abschluss von Operation o |
| $L_{k,t}$: | Durchlaufzeit von Produkt k in Periode t |
| L_k^{AVG} : | Mittlere Durchlaufzeit von Produkt k |
| L^{max} : | Maximalwert der Durchlaufzeiten |
| $LZ_{k,t}$: | Lagerzugang von Produkt k in Periode t |
| M : | Große Zahl |
| $q_{k,t}$: | Los von Produkt k in Periode t |
| $q_{k,t}^+$: | Lagerzugang von Produkt k in Periode t von noch offenen Losen aus vorherigen Planungsläufen |
| q_k^{max} : | Maximal erlaubte Losgröße von Produkt k |
| $q_{k,t}^{max}$: | Maximal erlaubte Losgröße von Produkt k in Periode t |
| q_{opt} : | Optimale Losgröße |
| q_t : | Los in Periode t |
| $R_{j,t}$: | Freigabemenge an einer Bearbeitungsstation j in Periode t |
| $R_{k,t}$: | Freigabemenge von Produkt k in Periode t |
| $R_{k,t,j}$: | Freigabemenge von Produkt k in Periode t für Bearbeitungsstation j |
| $R_{k,t,o}$: | Freigabemenge von Produkt k in Periode t für Operation o |



| | |
|----------------------|---|
| R_t : | Freigabemenge in Periode t |
| s : | Rüstkostensatz (Losgrößenplanung) |
| s_k : | Rüstkostensatz von Produkt k (Losgrößenplanung) |
| $s_{k,t}$: | Notwendiger Bestand von Produkt k in Periode t zur Erfüllung der Servicegradanforderungen (Auftragsfreigabe) |
| s_k^α : | Bestellpunkt von Produkt k zur Erreichung des Alpha-Servicegrads (Auftragsfreigabe) |
| s_k^β : | Bestellpunkt von Produkt k zur Erreichung des Beta-Servicegrads (Auftragsfreigabe) |
| $T_{k,t}^{Fertig}$: | Zeitpunkt der Fertigstellung eines Loses von Produkt k in Periode t |
| $T_{k,t}^{Start}$: | Zeitpunkt der Freigabe eines Loses von Produkt k in Periode t |
| tb_k : | Stückbearbeitungszeit von Produkt k |
| $tb_{k,j}$: | Stückbearbeitungszeit von Produkt k an Bearbeitungsstation j |
| $tb_{k,o}$: | Stückbearbeitungszeit von Produkt k für Operation o |
| tr_k : | Rüstzeit von Produkt k |
| $tr_{k,j}$: | Rüstzeit von Produkt k an Bearbeitungsstation j |
| $tr_{k,o}$: | Rüstzeit von Produkt k für Operation o |
| $VB_{k,t,\tau}$: | Binärvektor von Produkt k zur Ermittlung der Fertigstellungsperiode τ einer Freigabemenge, welche in Periode t freigegeben wurde |
| $VB_{k,t}^{sqr}$: | Binärvektor von Produkt k in Periode t zur Ermittlung der Wurzel der Durchlaufzeit |
| $VI_{k,t,n}$: | Binärer Vektor zur Transformation der Clearing Funktion |
| $VR_{k,t,\tau}$: | Vektor von Produkt k zur Ermittlung der Fertigstellungsperiode τ einer Freigabemenge, welche in Periode t freigegeben wurde |



| | |
|-----------------------|--|
| $V_v^{sqr t}$: | Werte der Wurzel der Durchlaufzeit |
| w : | Kosten für eine Einheit WIP-Bestand |
| $W_{j,t}$: | WIP-Bestand an einer Bearbeitungsstation j in Periode t |
| $\widehat{W}_{j,t}$: | WIP-Bestand an einer Bearbeitungsstation j in Periode t zur Ermittlung einer Ausbringungsmenge in Abhängigkeit von der Clearing Funktion |
| w_k : | Kosten für eine Einheit WIP-Bestand von Produkt k |
| $W_{k,t}$: | WIP-Bestand von Produkt k am Ende von Periode t |
| $W_{k,t,j}$: | WIP-Bestand von Produkt k an Bearbeitungsstation j am Ende von Periode t |
| $W_{k,t,o}$: | WIP-Bestand von Produkt k bei Operation o am Ende von Periode t |
| $\widehat{W}_{k,t}$: | WIP-Bestand von Produkt k in Periode t zur Ermittlung der Ausbringungsmenge in Abhängigkeit von der Clearing Funktion |
| W_t : | WIP-Bestand am Ende von Periode t |
| $X_{j,t}$: | Ausbringungsmenge an einer Bearbeitungsstation j in Periode t |
| $X_{k,t}$: | Ausbringungsmenge von Produkt k in Periode t |
| $X_{k,t,j}$: | Ausbringungsmenge von Produkt k an der Bearbeitungsstation j in Periode t |
| $X_{k,t,o}$: | Ausbringungsmenge von Produkt k für Operation o in Periode t |
| X_t : | Ausbringungsmenge in Periode t |
| $Y_{k,t}$: | Notwendige Bestandsänderung zur Erreichung des vorgegebenen Servicegrades für Produkt k in Periode t |
| Y_t : | Notwendige Bestandsänderung zur Erreichung des vorgegebenen Servicegrades in Periode t |
| $Z_{k,t}$: | Hilfsvariable zur Disaggregation von Clearing Funktionen für ein Produkt k in Periode t |

1. Einführung

1.1. Motivation der Forschungsarbeit

Die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ist in der Regel maßgeblich für die Effizienz, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit für ein produzierendes Unternehmen verantwortlich. Eine gute und robuste Planung ermöglicht es, die zur Verfügung stehenden Ressourcen optimal zu nutzen sowie die eintreffenden (Kunden-)Bedarfe in Art, Menge und Termin zu erfüllen. Die Wichtigkeit wird unter anderem auch durch die immense Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen, Fach- und Praxisvorträgen sowie der auf dem Markt befindlichen Enterprise Resource Planning Systeme (ERP-Systeme) und Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungssysteme (PPS-Systeme) deutlich.

Bei gleichzeitiger Berücksichtigung aller Steuergrößen, Restriktionen und Bedingungen kann über einen simultanen Planungsansatz ein optimaler Produktionsplan ermittelt werden. Das resultierende Optimierungsproblem ist aber aufgrund der hohen Anzahl an Parametern und Entscheidungsvariablen, die in der industriellen Praxis vorliegen, mit keinem derzeit bekannten Lösungsalgorithmus in hinnehmbarer Zeit lösbar. Ein weiteres Problem stellt die Bereitstellung aller zum Planungszeitpunkt notwendigen Informationen über den relevanten Planungshorizont in ausreichender Qualität dar.¹ Aus diesem Grund hat sich bereits vor über 40 Jahren der Ansatz der hierarchischen Produktionsplanung etabliert, der die methodische Grundlage kommerziell eingesetzter ERP- und PPS-Systeme bildet.² Hierbei erfolgt durch eine Dekomposition des Gesamtproblems in Teilplanungsprobleme eine sequentielle Betrachtung und Lösung der einzelnen Planungsmodule. In der Regel ergeben sich hieraus die Planungsmodule: Produktionsprogrammplanung, Bedarfsplanung und Fertigungssteuerung.³ Die große Diskrepanz zwischen der in der wissenschaftlichen Literatur forcierten Ansätze und Modelle zur optimalen Lösung dieser Planungsmodule und der in der industriellen Praxis verwendeten Heuristiken zeigt, dass bei weitem nicht alle theoretischen Methoden und Modelle praxisrelevant eingesetzt werden können. Auch hier sind als Gründe die hohe Laufzeit zur Lösung der Optimierungsmodelle, die Schwierigkeit der Bereitstellung der notwendigen Daten in ausreichender Menge und Qualität sowie eine mangelnde hierarchische Abstimmung der einzelnen Planungsaufgaben im Unternehmen anzuführen.

Maßgeblich für gute Planungsergebnisse in den einzelnen Planungsmodulen ist eine möglichst genaue Abschätzung der auftretenden Durchlaufzeiten. Die auftragsbezogene Durchlaufzeit beschreibt die Zeitspanne zwischen der Freigabe des Auftrags in das Produktions-

¹Vgl. Claus u. a. (2015), S. 3ff. sowie Herrmann u. Manitz (2015), S. 7ff.

²Siehe hierzu die Arbeit von Hax u. Meal (1973).

³Siehe hierzu u. a. Herrmann (2011) und Günther u. Tempelmeier (2012).



system und der Fertigstellung des Auftrags, sodass dieser für nachfolgende Produktionsschritte verwendet, eingelagert oder zur Bedarfsdeckung ausgeliefert werden kann. In der Regel muss jeder Auftrag eine Folge von n Bearbeitungsschritten (nachfolgend als Vorgänge bezeichnet) auf den jeweiligen Bearbeitungsstationen durchlaufen. Die hier auftretenden Zeiten werden in Übergangs- sowie Durchführungszeiten unterteilt.⁴ Übergangszeiten sind Wartezeiten aufgrund anderer Aufträge an der Bearbeitungsstation, prozessbedingte Liegezeiten (zum Beispiel Abkühlzeiten bei wärmebehandelnden Prozessen), Transportzeiten zu nachgelagerten Bearbeitungsstationen sowie der Transport in das Lager. Zu den Durchführungszeiten zählen das Rüsten der Bearbeitungsstation, die tatsächliche Bearbeitungszeit sowie das anschließende Abrüsten der Bearbeitungsstation. In Abbildung 1.1 sind die Bestandteile der auftragsbezogenen bzw. vorgangsbezogenen Durchlaufzeiten dargestellt.

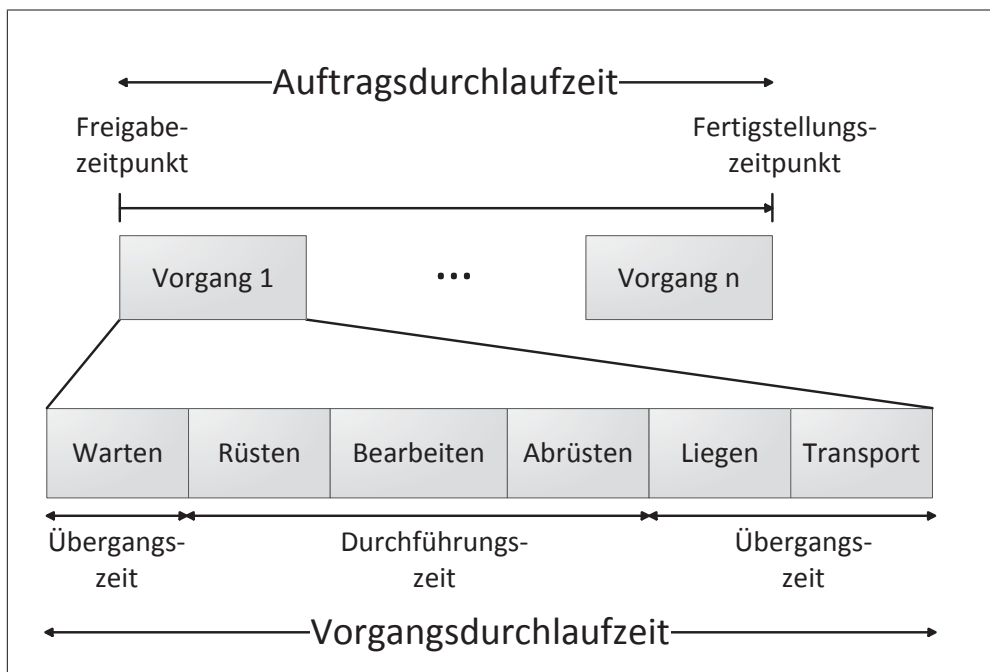


Abbildung 1.1.: Bestandteile der Durchlaufzeit (Abbildung in Anlehnung an Herrmann (2011), S. 291).

Die Durchführungszeiten sind in der Regel deterministische Größen, welche über die Stückbearbeitungszeiten und Rüstzeiten der Arbeitspläne gegeben sind.⁵ Auch wenn diese Informationen nicht vorliegen, ist es möglich, diese über Messungen zu ermitteln und hierdurch eine gute Abschätzung dieser Werte zu erhalten. Analog trifft dies für die Liege- und Transportzeiten zu. Auch diese Zeiten können in der Regel hinreichend genau bestimmt

⁴Vgl. Corsten u. Gössinger (2012), S. 531 und Herrmann (2011), S. 291.

⁵Vgl. Corsten u. Gössinger (2012), S. 530.

werden. Die Wartezeit hingegen ist abhängig von der dynamischen Situation an den Bearbeitungsstationen. Ist ein großer Auftragsbestand vorhanden, so steigen die Wartezeiten der Vorgänge der individuellen Aufträge an. Die Wartezeit ist somit abhängig von den anderen Vorgängen, welche an der Bearbeitungsstation bearbeitet werden müssen, und ergibt sich somit aus der Konkurrenzsituation um die Bearbeitungsstation.⁶ Untersuchungen zeigen, dass die Wartezeit einen erheblichen Anteil an der Durchlaufzeit hat. So wurden Anteile von bis zu 85% der Durchlaufzeit als Wartezeit gemessen.⁷ Trotz dieser offensichtlichen Abhängigkeiten zwischen den Wartezeiten und dem Auftragsbestand im Produktionssystem werden Wartezeiten oft geschätzt und sind somit unabhängig von der Belastungssituation der Bearbeitungsstationen bzw. des Produktionssystems. Dies führt, wenn diese Wartezeiten und somit die Durchlaufzeiten unterschätzt werden, zu einer verspäteten Fertigstellung, wodurch eine termingerechte Bedarfsdeckung in der Regel nicht möglich ist.

Um Verspätungen zu vermeiden, können die Produktionsaufträge früher freigegeben werden, um somit einen zusätzlichen zeitlichen Puffer zwischen dem Freigabezeitpunkt und dem Bedarfszeitpunkt zu erhalten. Durch eine solche frühzeitige Freigabe der Produktionsaufträge erhöht sich im Gegenzug aber der Auftragsbestand und somit die Warteschlange vor den Bearbeitungsstationen. Dies führt dazu, dass die resultierenden Durchlaufzeiten steigen, was zur Konsequenz eine zusätzliche Erhöhung des zeitlichen Puffers notwendig macht. Durch eine noch frühere Freigabe der Aufträge steigen der Auftragsbestand und die resultierenden Durchlaufzeiten aber weiter an. Dieses Phänomen ist als sogenanntes Durchlaufzeitsyndrom bekannt, welches in Abbildung 1.2 dargestellt und als eine der Hauptursachen für die Entstehung von stark schwankenden Durchlaufzeiten anzusehen ist.⁸

Die Durchlaufzeiten werden maßgeblich durch die auftretenden Wartezeiten an den Bearbeitungsstationen bestimmt, welche von der Arbeitslast im Produktionssystem abhängen. Trotz dieser Abhängigkeiten werden die Durchlaufzeiten oft als Schätzwerte, basierend auf gemessenen Durchlaufzeiten, im Rahmen der Planung verwendet. So werden zum Beispiel durch den Planungsparameter der Vorlaufzeit diese geschätzten Durchlaufzeiten in der Materialbedarfsplanung berücksichtigt, um eine frühzeitige Freigabe zu realisieren.⁹ In kommerziellen ERP- und PPS-Systemen wird der Parameter der Vorlaufzeit als Konstante hinterlegt und ist somit unabhängig von den tatsächlich geplanten Produktionsmengen sowie den daraus resultierenden Belastungen im Produktionssystem.¹⁰ Diese Vorlaufzeiten entsprechen in der Regel einem Vielfachen der Planungsperiode und sind in diesem Fall ganzzahlige Werte. Wie in Hackman u. Leachman dargestellt, kann allerdings auch die Verwendung von reellen Werten der Vorlaufzeit sowie die Berücksichtigung von unterschiedlich großen Perioden erfolgen.¹¹ Generell sind aber diese detaillierteren Vorlaufzei-

⁶Vgl. Herrmann (2011), S. 290.

⁷Vgl. Stommel (1976), S. 142ff. und Corsten u. Gössinger (2012), S. 530.

⁸Vgl. Corsten u. Gössinger (2012), S. 585.

⁹Vgl. Orlicky (1975), S. 91f.

¹⁰Vgl. Herrmann (2011), S. 247.

¹¹Vgl. Hackman u. Leachman (1989), S. 487f. sowie auf S. 489f.

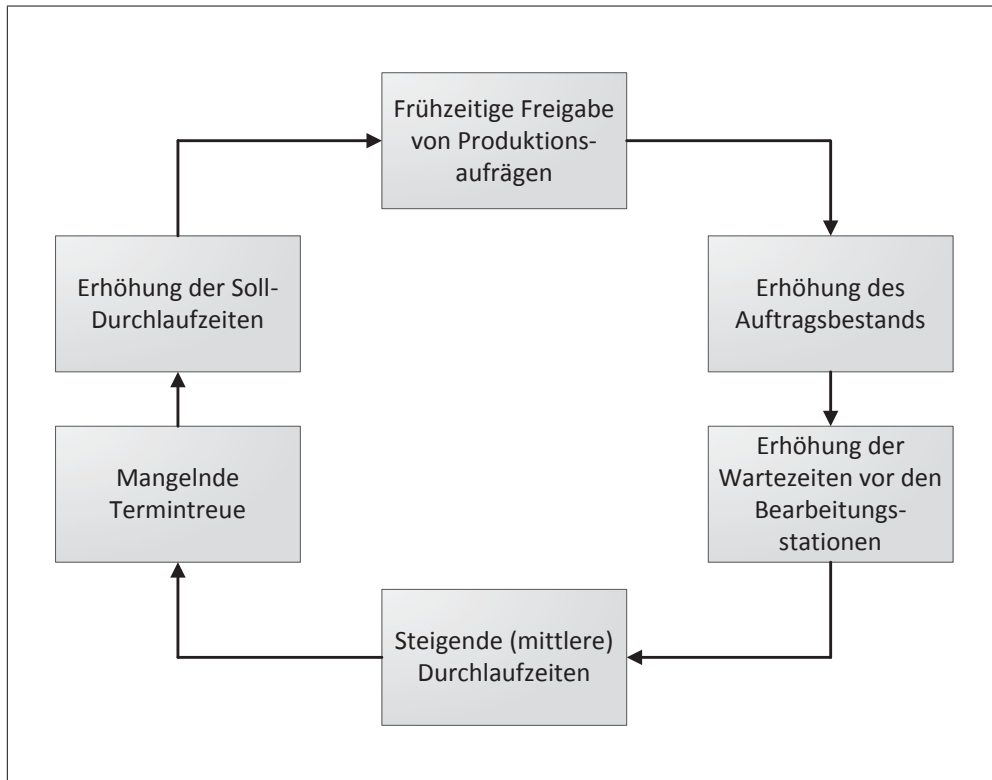


Abbildung 1.2.: Das Durchlaufzeitsyndrom (Abbildung in Anlehnung an Corsten u. Gössinger (2012), S. 587).

ten ebenfalls unabhängig von der Belastungssituation im Produktionssystem, sodass das grundsätzliche Problem hierdurch nicht entscheidend verbessert werden kann.

Bei steigender Auslastung einer Ressource steigen die mittlere Arbeitslast sowie die mittlere Durchlaufzeit nicht linear an.¹² Somit ist bei steigendem WIP-Bestand im Produktionssystem eine nicht lineare Erhöhung der Durchlaufzeiten und somit eine nicht lineare Verringerung der Ausbringungsmengen zu beobachten (siehe Abbildung 1.3).

Die Wartezeiten an den Bearbeitungsstationen sind abhängig vom Auftragsbestand, also der Arbeitslast im Produktionssystem, welche wiederum durch die Planungsentscheidungen bedingt wird.¹³ Zur Berücksichtigung dieser nicht linearen Abhängigkeiten zwischen der Durchlaufzeit und der Arbeitslast im Produktionssystem werden in einer Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten sogenannte nicht lineare Clearing Funktionen¹⁴ diskutiert. Durch solche Clearing Funktionen können die Abhängigkeiten zwischen der Arbeitslast und der Ausbringungsmenge beschrieben und im Rahmen von Planungsmodellen berücksichtigt werden. Hierdurch kann in der Regel eine Verbesserung der Planungsergebnisse erzielt werden.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird der methodische Ansatz der Clearing Funktionen verfolgt, weiterentwickelt und anhand der Auftragsfreigabe sowie Losgrößenplanung in praxisrelevanten Planungsproblemen eingesetzt, untersucht und evaluiert.

¹²Vgl. Hopp u. Spearman (2008), S. 317.

¹³Vgl. Missbauer u. Uzsoy (2011), S. 441.

¹⁴In der englischsprachigen Literatur wird der Begriff *clearing function* verwendet.

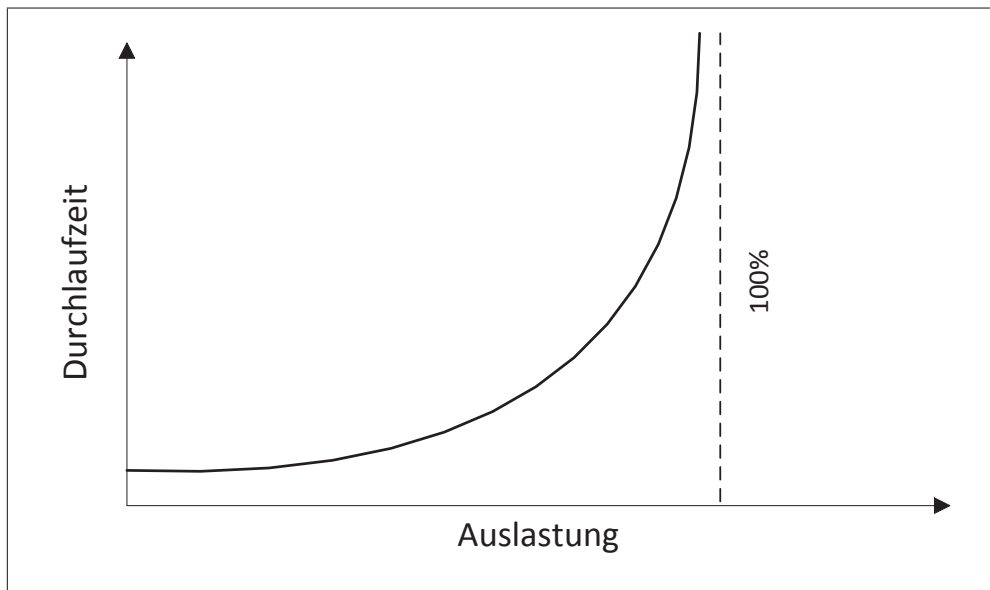


Abbildung 1.3.: Abhängigkeiten zwischen der Durchlaufzeit und der Auslastung (Abbildung in Anlehnung an Hopp u. Spearman (2008), S. 317 und Irdem (2009), S. 2).

1.2. Aufbau und Ziel der Forschungsarbeit

Diese Arbeit basiert auf dem Konzept der hierarchischen Produktionsplanung. In Kapitel 2 werden das Konzept der hierarchischen Produktionsplanung, ausgewählte Methoden der Auftragsfreigabe sowie Ansätze und Modelle der einstufigen Losgrößenplanung aufgezeigt. In der Literatur werden unterschiedliche Ansätze diskutiert, wie eine solche Clearing Funktion aufgestellt werden kann. In Kapitel 3 erfolgt eine Übersicht der relevanten Literatur zur Clearing Funktion sowie der darin beschriebenen Möglichkeiten, eine solche Funktion zu ermitteln. Grundsätzlich kann hierbei zwischen einer analytischen und simulationsbasierten Ermittlung unterschieden werden. In dieser Forschungsarbeit wird der simulationsbasierte Ansatz verfolgt und ein Vorgehen zur Ermittlung von produktspezifischen Clearing Funktionen vorgestellt. In Kapitel 4 wird das Produktionssystem, welches dieser Forschungsarbeit zu Grunde liegt, dargestellt. Basierend auf diesem Produktionssystem erfolgt die Anwendung des in dieser Forschungsarbeit entwickelten Ansatzes zur Messung von produktspezifischen Clearing Funktionen sowie die Untersuchung und Evaluierung der entwickelten Modelle und Ansätze zur Verwendung der Clearing Funktion im Rahmen der Auftragsfreigabe und einstufigen Losgrößenplanung. Die Verwendung der Clearing Funktion im Rahmen der Auftragsfreigabe wird in Kapitel 5 beschrieben. Hier erfolgt eine Übersicht der aus der Literatur bekannten Modelle, in welche eine Integration der Clearing Funktion durchgeführt wird. Hierauf aufbauend wird ein Modell mit produkt- und periodenspezifischen Durchlaufzeiten entwickelt, die durch eine Integration der produktspezifischen Clearing Funktionen bestimmt werden. In einer erweiterten Betrachtung wird die Berücksichtigung von Bedarfsunsicherheiten durch die Integration von Servicegraden untersucht. Im Rahmen von Langzeitsimulationsstudien erfolgen eine Untersuchung sowie



ein Vergleich der in dieser Forschungsarbeit entwickelten und der aus der Literatur bekannten Modelle. Durch die Clearing Funktion ist es möglich, belastungsabhängige Durchlaufzeiten zu ermitteln und zu berücksichtigen. Hierdurch kann auch eine Abschätzung der für die Produktion benötigten sowie der verfügbaren Kapazitäten abgeleitet werden. Im Rahmen der dynamischen einstufigen Losgrößenplanung wird aufgezeigt, wie die Clearing Funktion in diesem Sinne, also einer Abschätzung der verfügbaren bzw. benötigten Kapazitäten, verwendet werden kann. Hierzu werden in Kapitel 6, aufbauend auf dem aus der Literatur bekannten Modell zur einstufigen Losgrößenplanung, unterschiedliche Modellvarianten entwickelt, welche die Informationen der Clearing Funktion verwenden, um eine Verbesserung der Kapazitätsabschätzung zu erreichen. Diese Modelle werden mit den aus der Literatur bekannten und aus der industriellen Praxis angewendeten Modelle durch Langzeitsimulationsstudien miteinander verglichen. In Kapitel 7 erfolgt eine Zusammenfassung dieser Arbeit sowie ein Ausblick.

Der Beitrag sowie die Ziele dieser Forschungsarbeit sind nachfolgend nochmals zusammengefasst:

- Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung von produktspezifischen Clearing Funktionen durch den Einsatz von Langzeitsimulationen
- Erweiterung der aus der Literatur bekannten Modelle der Auftragsfreigabe für eine direkte Integration der produktspezifischen Clearing Funktionen zur Ermittlung und Berücksichtigung von belastungsabhängigen Durchlaufzeiten
- Integration von Servicegraden in die erweiterten Modelle der Auftragsfreigabe zur Berücksichtigung von Bedarfsunsicherheiten
- Evaluierung der Planungsgüte der hierdurch entwickelten Modelle zur Auftragsfreigabe durch Experimente auf Basis von Langzeitsimulationsstudien
- Erweiterung der dynamischen einstufigen Losgrößenplanung um Kapazitätsinformationen basierend auf den produktspezifischen Clearing Funktionen
- Evaluierung der Planungsgüte der hierdurch entwickelten Modelle zur Losgrößenplanung durch Experimente auf Basis von Langzeitsimulationsstudien

2. Hierarchische Produktionsplanung und -steuerung

In diesem Abschnitt erfolgt ein Überblick über die in der Literatur sowie industriellen Praxis weit verbreitete und eingesetzte hierarchische Produktionsplanung und -steuerung. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden die Planungsprobleme der Auftragsfreigabe sowie der einstufigen Losgrößenplanung fokussiert. Grundsätzliche Methoden der Auftragsfreigabe sowie der einstufigen Losgrößenplanung werden aufgezeigt und Ansatzpunkte zur Nutzung von Clearing Funktionen beschrieben.

2.1. Konzept der hierarchischen Produktionsplanung und -steuerung

In der industriellen Praxis ist der Einsatz von Enterprise Resource Planning (ERP) Systemen und Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungssystemen (PPS-Systemen) unabdingbar, um den Anforderungen einer ganzheitlichen Planung gerecht zu werden. Unter Berücksichtigung aller Steuergrößen, Restriktionen und Bedingungen kann durch einen simultanen Planungsansatz ein optimaler Produktionsplan erstellt werden. Eine solche Simultanplanung erreicht in einem einzigen Planungsschritt ein Optimum bei Einhaltung aller Restriktionen unter Berücksichtigung aller relevanten Entscheidungsparameter sowie vorliegenden Interdependenzen.¹ Das hierbei entstehende Optimierungsmodell ist unter industriellen Rahmenbedingungen aufgrund der immensen Anzahl von Entscheidungsvariablen, Parametern und Restriktionen auch mit den schnellsten bekannten Lösungsalgorithmen nicht in annehmbarer Zeit lösbar.² Darüber hinaus erfordert eine simultane Betrachtung aller Planungsaspekte eine sehr gute und insbesondere detaillierte Datenbasis über den gesamten Planungszeitraum sowie eine Integration der hierarchischen Strukturen des Unternehmens, was in der industriellen Praxis in der Regel nur sehr schwer realisiert werden kann.³ Aus diesen Gründen hat sich in der Praxis der Einsatz von sogenannten hierarchischen Planungskonzepten etabliert, die auf einer hierarchischen Sukzessivplanung beruhen und einen zunehmenden Detaillierungsgrad aufweisen.

Bereits in den 80er Jahren wurde der Begriff der Produktionsplanung und -steuerung geprägt, um Planungsaufgaben der produzierenden Industrie unter einem übergreifenden

¹Vgl. Hansmann (2006), S. 244ff.

²Vgl. Herrmann (2011), S. 195.

³Vgl. Corsten u. Gössinger (2012), S. 565.



Konzept zusammenzufassen. Diese sind ein zentraler Bestandteil der produzierenden Unternehmen.⁴ In industriellen Unternehmen erfolgt im Rahmen der Produktionsplanung die Festlegung des Produktionsprogramms, die Bereitstellung der notwendigen Produktionsfaktoren⁵ sowie die Gestaltung der Produktionsprozesse.⁶ Der Begriff der Produktion wird von Steven als „eine sinnvolle, zweckgerichtete Kombination der elementaren Produktionsfaktoren Betriebsmittel, Werkstoffe und objektbezogener Arbeit und ihre Transformation in Sachgüter und Dienstleistungen“⁷ definiert. Somit ist der Begriff Produktion im industriellen Umfeld als die Erzeugung von Gütern aus Produktionsfaktoren unter Berücksichtigung technischer Randbedingungen aufzufassen.⁸ Ferner ist der Begriff Planung als systematisch durchgeführter Entscheidungsprozess zu definieren.⁹ Die Aufgaben der operativen PPS sieht Zäpfel darin, „aufgrund erwarteter und/oder vorliegender Kundenaufträge den mengenmäßigen und zeitlichen Produktionsablauf unter Beachtung der verfügbaren Ressourcen (z. B. Kapazitäten) durch Planvorgaben festzulegen, diese zu veranlassen sowie zu überwachen und bei Abweichungen Maßnahmen zu ergreifen, sodass bestimmte betriebliche Ziele erreicht werden“¹⁰. Somit ist die Produktionsplanung und -steuerung ein zentraler Bestandteil eines jeden produzierenden Unternehmens.

In heute kommerziell eingesetzten ERP- und PPS-Systemen bildet die von Hax u. Meal vorgeschlagene hierarchische Produktionsplanung die methodische Grundlage.¹¹ Hierbei erfolgt eine Aufteilung der Aufgabenbereiche der PPS in hierarchische Stufen, welche sequentiell gelöst werden. In der Regel führt diese Dekomposition zu den Planungsmodulen: Produktionsprogrammplanung, Bedarfsplanung und Ressourcenbelegungsplanung, wie in Abbildung 2.1 aufgezeigt.¹² Die Ergebnisse einer hierarchisch übergeordneten Planungsstufe bilden die Rahmendaten der hierarchisch nachfolgenden Planungsstufe, sodass die Qualität der Planungsergebnisse eines Teilplanungsproblems maßgeblich für die Qualität der nachfolgenden Planungsentscheidungen verantwortlich ist.¹³

Im Rahmen der Produktionsprogrammplanung erfolgt die Planung nach Art, Menge und Termin der herzustellenden Enderzeugnisse sowie verkaufsfähigen Zwischenerzeugnisse unter Berücksichtigung der Absatzmöglichkeiten sowie der verfügbaren Ressourcen.¹⁴ Die Planung wird hierbei über einen langen Planungshorizont von bis zu mehreren Jahren und einer Periodeneinteilung auf Monatsbasis durchgeführt. Die Produktionsprogrammplanung wird in der Regel in zwei Planungsschritten, welche sich wesentlich im Grad der zeitlichen und sachlichen Aggregation unterscheiden, ausgeführt.¹⁵ So beschreiben Drexl

⁴Vgl. Schuh (2006), S. 4ff.

⁵Als Produktionsfaktoren werden Betriebsmittel (z. B. technische Geräte), Leistungsobjekte (z. B. Werkstoffe) sowie Arbeit (z. B. menschliche Arbeitsleistung) unterschieden (vgl. Diederich (1989), S. 134).

⁶Vgl. Gutenberg (1983), S. 149.

⁷Steven (1994), S. 4.

⁸Vgl. Günther u. Tempelmeier (2012), S. 6.

⁹Vgl. Diederich (1989), S. 66f.

¹⁰Zäpfel (2001), S. 56.

¹¹Vgl. Hax u. Meal (1973), S. 3ff.

¹²Vgl. Herrmann (2011), S. 195ff. und Günther u. Tempelmeier (2012), S. 145ff.

¹³Vgl. Melzer-Ridinger (1994), S. 32ff.

¹⁴Vgl. Zäpfel (2001), S. 56f.

¹⁵Vgl. Kiener (2012), S. 178.

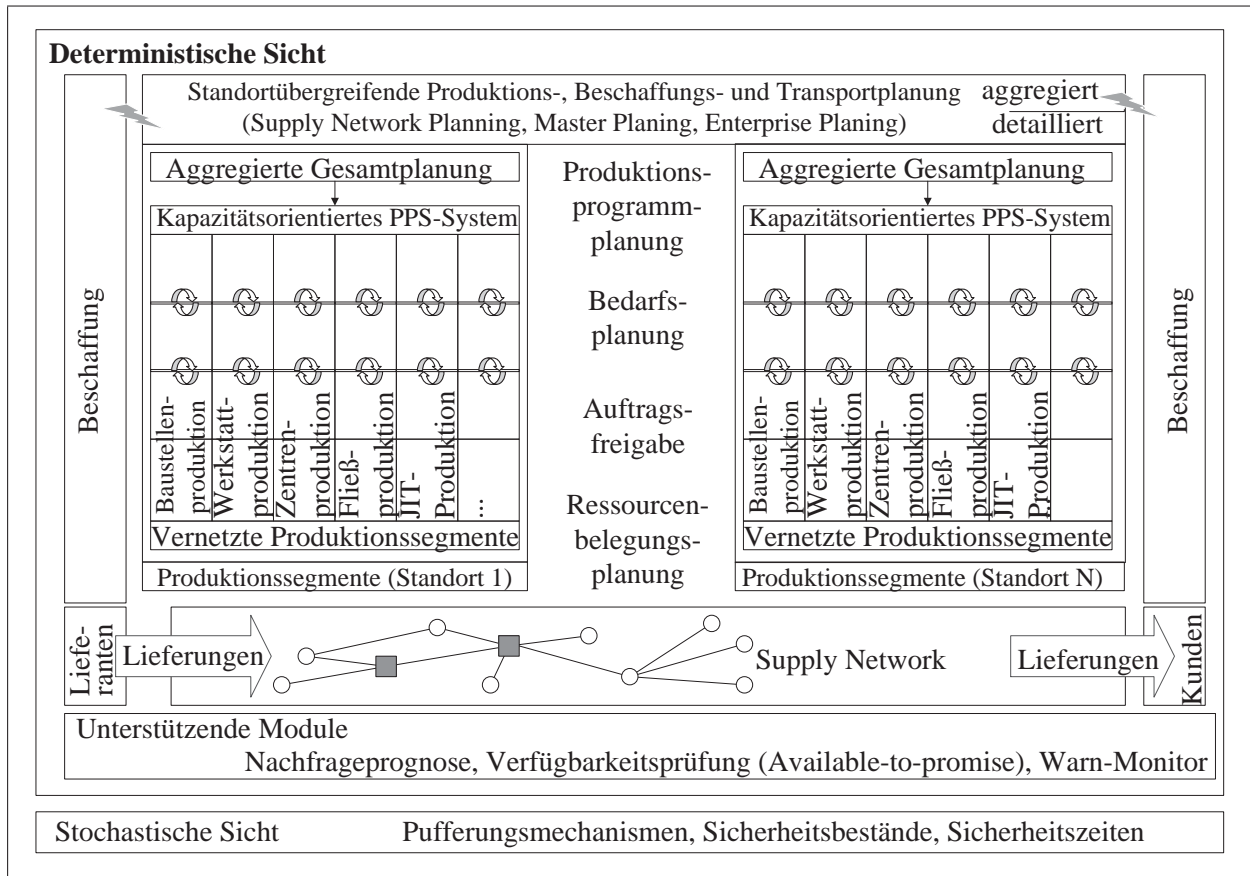


Abbildung 2.1.: Übersicht der Planungsaufgaben in der industriellen Praxis (Abbildung in Anlehnung an Günther u. Tempelmeier (2012), S. 342).

u. a. sowie Günther u. Tempelmeier die aggregierte Produktionsprogrammplanung¹⁶ sowie die Hauptproduktionsprogrammplanung¹⁷ zur Festlegung des optimalen Produktionsprogramms, bei welchem die Summe der Lagerkosten sowie die Kosten für Überkapazitäten minimal sind.¹⁸ Unter industriellen Randbedingungen kann die Produktionsprogrammplanung effektiv und in moderater Laufzeit gelöst werden.¹⁹ Dies ist aufgrund des hohen Aggregationsgrades sowohl auf der Produktebene durch die Bildung von Produkttypen, auf der Ressourcenebene durch die Zusammenfassung gleichartiger Maschinen, als auch auf der zeitlichen Ebene durch die Betrachtung langer und großer Zeitperioden zurückzuführen. Um das Produktionsprogramm umsetzen und die Endprodukte herstellen zu können, müssen die dazu benötigten Materialien und Komponenten in der richtigen Menge und zum richtigen Zeitpunkt bereitgestellt werden. Hierzu ist ein mehrstufiges Losgrößenproblem mit beschränkten Kapazitäten zu lösen. Das zu lösende Optimierungsproblem ist in

¹⁶Bekannt als das Optimierungsmodell AGGRPLAN (vgl. Günther u. Tempelmeier (2012), S. 162).

¹⁷Bekannt als das Optimierungsmodell HPPLAN (vgl. Günther u. Tempelmeier (2012), S. 175).

¹⁸Vgl. Günther u. Tempelmeier (2012), S. 147f. und S. 175f.

¹⁹Vgl. Günther u. Tempelmeier (2012), S. 163 und S. 177.



der Literatur als *Multi-Level Capacitated Lot-Sizing Problem (MLCLSP)* bekannt.²⁰ Das MLCLSP ist NP-Vollständig²¹, sodass eine exakte Lösung, insbesondere unter industriellen Randbedingungen, nicht ohne Weiteres möglich ist.²² Aus diesem Grund werden Heuristiken und problemspezifische Ansätze zur Lösung dieses Optimierungsproblems entwickelt und angewendet.²³ Die Planung erfolgt hierbei auf Basis von Wochen bzw. Tagen und ist somit deutlich disaggregierter als in der Produktionsprogrammplanung. In der nachfolgenden Planungsstufe erfolgt die Ressourcenbelegungsplanung und somit die konkrete Zuweisung der Produktionsaufträge zu den entsprechenden Arbeitsstationen. Das hierbei zu lösende Problem ist in der Literatur als das *Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)* bekannt.²⁴ Hierbei erfolgt eine sekundengenaue Zuteilung der Produktionsaufträge auf die Bearbeitungsstationen unter Beachtung derer Rüstzustände, Verfügbarkeiten sowie der verfügbaren Kapazitäten. Ziel ist eine Minimierung der Durchlaufzeit unter Einhaltung der vorliegenden Restriktionen, sodass alle Arbeitsgänge rechtzeitig beendet, die Reihenfolge der Arbeitsgänge eingehalten sowie die verfügbaren Kapazitäten nicht überschritten werden. Auch das RCPSP ist NP-Vollständig²⁵, sodass eine exakte Lösung unter industriellen Rahmenbedingungen nicht ohne Weiteres möglich ist. Aus diesem Grund wurden ebenfalls für dieses Optimierungsproblem spezielle Algorithmen und Heuristiken entwickelt.²⁶

Trotz der Entwicklung solcher speziellen Heuristiken werden in kommerziell verfügbaren PPS-Systemen in der Regel mit einfachen Ansätzen die Planungsprobleme gelöst. So erfolgt die Bedarfsplanung im Rahmen der programmorientierten Materialbedarfsplanung (*Material Requirement Planning (MRP)*)²⁷ durch einfache Algorithmen, wie zum Beispiel dem Dispositionsstufenverfahren.²⁸ Hierbei wird eine isolierte Ermittlung der Auftragsgrößen für jedes End- bzw. Vorprodukt ohne Beachtung der gegenseitigen Abhängigkeiten und der Konkurrenz der Erzeugnisse um begrenzte Ressourcen durchgeführt. Zudem werden die durch die Mehrstufigkeit der Erzeugnisstruktur bedingten kostenmäßigen Interdependenzen nicht ausreichend berücksichtigt.²⁹ Dies führt dazu, dass die erzielten Planungsergebnisse oft unzureichend sind und nicht selten in unzulässige Produktionspläne resultieren. Durch Erweiterungen des MRP um die Berücksichtigung von beschränkten Kapazitäten sowie die Prävention offensichtlicher Kapazitätsüberlastungen³⁰, können die Pla-

²⁰Vgl. Billington u. a. (1983), S. 1131, Tempelmeier (2008), S. 205f., Herrmann (2009), S. 333f., Buschkühl u. a. (2010), S. 233 sowie Tempelmeier (2012), S. 130ff.

²¹Ein Optimierungsproblem ist NP-Vollständig, wenn der Lösungsaufwand (also die Laufzeit zur Lösungsfindung) exponentielle bzw. polynomial mit der Problemgröße ansteigt (vgl. Herrmann (2011), S. 13).

²²Vgl. Maes u. a. (1991), S. 135.

²³Siehe hierzu Sahling u. Helber (2010), S. 42ff. und Tempelmeier (2012), S. 209ff.

²⁴Vgl. Brucker u. a. (1999), S. 4ff. und Günther u. Tempelmeier (2012), S. 219f.

²⁵Vgl. Brucker u. Knust (2006), S. 91.

²⁶Siehe hierzu u. a. die Arbeiten von Bouleimen u. Lecocq (2003), Gonçalves u. a. (2008), Valls u. a. (2008), Mendes u. a. (2009), Damak u. a. (2009) sowie Paraskevopoulos u. a. (2012).

²⁷Vgl. Orlicky (1975), S. 33ff.

²⁸Vgl. Herrmann (2009), S. 294ff. Herrmann (2011), S. 229ff. oder Günther u. Tempelmeier (2012), S. 196ff.

²⁹Vgl. Herrmann (2011), S. 248 und Günther u. Tempelmeier (2012), S. 199.

³⁰Vgl. Billington u. a. (1983), S.1130ff., Tardif u. Spearman (1997), S. 870ff., Vollmann (2010), S. 250ff.

nungsergebnisse teilweise verbessert werden. Das grundsätzliche Problem der mangelnden Berücksichtigung der beschränkten Kapazitäten und vorliegenden Interdependenzen kann hierdurch aber grundsätzlich nicht gelöst werden.

Für die aus der Materialbedarfsplanung erzeugten Planaufträge werden im Rahmen einer anschließenden Terminierung die Start- und Endtermine festgelegt. Hierbei werden Verfahren der Netzplantechnik³¹ verwendet, um die kritischen Pfade sowie die vorhandenen Puffer zu ermitteln. Dies erfolgt zunächst ohne Berücksichtigung von Kapazitäten. Anschließend werden die resultierenden Kapazitätsbelastungen ermittelt und im Rahmen eines Kapazitätsbelastungsausgleichs beseitigt.³² Ein solcher Kapazitätsbelastungsausgleich kann zum einen über eine Anpassung des Kapazitätsbedarfs an das Kapazitätsangebot (zum Beispiel durch das zeitliche Verschieben von Planaufträgen in andere Perioden) oder zum anderen durch eine Anpassung des Kapazitätsangebotes an den Kapazitätsbedarf (zum Beispiel durch den Einsatz von Überstunden oder Zusatzschichten) erfolgen.³³

Die aus der übergeordneten Planung ermittelten Planaufträge werden im Rahmen der Auftragsfreigabe in das Produktionssystem freigegeben und zu Produktionsaufträgen. Somit ist die Auftragsfreigabe als Schnittstelle zwischen der Planung und der Produktion zu sehen. Die unterschiedlichen Konzepte und Modelle zur Auftragsfreigabe werden in Kapitel 2.2 beschrieben, sodass an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen wird. Die Zuteilung der Produktionsaufträge an die Bearbeitungsmaschinen erfolgt in der industriellen Praxis oft auf Basis von Prioritätskennzahlen, welche durch Prioritätsregeln ermittelt werden. Durch solche Prioritätsregeln können die Produktionsaufträge nach definierten Regeln priorisiert und sortiert werden.³⁴ Prioritätsregeln können dahingehend unterschieden werden, ob diese nur Informationen des anstehenden Bearbeitungsprozesses an der aktuellen Bearbeitungsstation oder Informationen des gesamten Produktionsprozesses einbeziehen.³⁵ Die Effizienz unterschiedlicher Prioritätsregeln hängt von den zu erreichenden Zielgrößen ab.³⁶ Hierbei können unterschiedliche Prioritätsregeln auch additiv, multiplikativ oder alternativ verknüpft und über eine Gewichtung aufeinander abgestimmt werden.³⁷

2.2. Methoden und Modelle der Auftragsfreigabe

Die Auftragsfreigabe wird als Bindeglied zwischen der Produktionsplanung und Produktionssteuerung angesehen.³⁸ Im Rahmen der Produktionsplanung wurden Produktionspläne erstellt, welche zur Deckung der Bedarfe an Endprodukten sowie Komponenten umgesetzt werden müssen. Im Rahmen der Auftragsfreigabe wird der Zeitpunkt bestimmt, ab

³¹Vgl. Küpper u. Helber (2004), S. 238ff. und Domschke u. Drexl (2011), S. 97ff.

³²Vgl. Günther u. Tempelmeier (2012), S. 223ff.

³³Vgl. Corsten u. Gössinger (2012), S. 529ff. und Günther u. Tempelmeier (2012), S. 226ff.

³⁴Eine ausführliche Beschreibung von elementaren Prioritätsregeln ist u. a. in Herrmann (2011), S. 318ff. sowie Corsten u. Gössinger (2012), S. 559ff. aufgeführt.

³⁵Vgl. Schneider (2005), S. 185.

³⁶Vgl. Schweitzer (1994), S. 700.

³⁷Vgl. Schneider (2005), S. 186.

³⁸Vgl. Hansmann (2006), S. 152.



dem die Bearbeitung eines Produktionsauftrags begonnen werden darf und dieser in das Produktionssystem eingelastet wird.³⁹

Die Entscheidung über die Freigabe von Planaufträgen hat direkten Einfluss auf die Belastungssituation im Produktionssystem. Diese ist im Rahmen der Freigabeentscheidung zu berücksichtigen, um unkontrolliert steigende Wartezeiten und somit steigende Durchlaufzeiten zu vermeiden. Aus der industriellen Praxis haben sich regelbasierte Ansätze etabliert, welche für einen in der Regel kurzen Zeithorizont eine Freigabeentscheidung treffen.⁴⁰ Ein anderer methodischer Ansatz basiert auf der Formulierung von Optimierungsmodellen, welche für einen in der Regel längeren Zeitraum Freigabeentscheidungen treffen und unter Einhaltung definierter Restriktionen einen optimalen Freigabeplan erzeugen. Die bekanntesten und gängigsten Ansätze zu diesen grundsätzlichen Methoden werden nachfolgend beschrieben.

2.2.1. Regelbasierte Ansätze der Auftragsfreigabe

Die Entscheidung darüber, ob ein Auftrag in die Fertigung freigegeben wird, erfolgt nach definierten Kriterien und Regeln. Hierbei kann nach Lödning zwischen drei Funktionslogiken unterschieden werden:⁴¹

1. Sofortige Auftragsfreigabe
2. Auftragsfreigabe nach Termin
3. Bestandsregelnde Auftragsfreigabe

Bei einer sofortigen Freigabe der Aufträge werden keine Regeln oder Kriterien bei der Entscheidung zur Freigabe angewendet. Sobald ein Auftrag erstellt wird, wird dieser in das Produktionssystem freigegeben. Bei einer Auftragsfreigabe nach Termin erfolgt eine direkte Umsetzung des Produktionsplans und die Planaufträge werden zum Soll-Starttermin in das Produktionssystem freigegeben. Bei beiden dieser Ansätze erfolgt keine Berücksichtigung der Bestände bzw. der Belastung im Produktionssystem, sodass hohe und insbesondere stark schwankende Durchlaufzeiten zu erwarten sind. Insbesondere bei komplexen Fertigungsstrukturen mit vielen Varianten und Arbeitsgängen führt diese Art der Auftragsfreigabe zu einem unkontrollierten Bestandsaufbau.⁴²

Bei den bestandsregelnden Verfahren der Auftragsfreigabe erfolgt eine Berücksichtigung der erbrachten Arbeitsleistung des Produktionssystems zur Bestimmung der freizugebenden Aufträge. Somit werden die Zugänge in das Produktionssystem an die Abgänge des Produktionssystems gekoppelt, um einen unkontrollierten Anstieg der Bestände in der Fertigung zu vermeiden. Bereits in den 70er Jahren wurden solche Ansätze diskutiert⁴³ und

³⁹Vgl. Arnold (2008), S. 334.

⁴⁰Vgl. Missbauer u. Uzsoy (2011), S. 442.

⁴¹Vgl. Lödning (2010), S. 311.

⁴²Vgl. Lödning (2010), S. 227.

⁴³Siehe Wight (1970), Plossl u. Wight (1973) und Belt (1978).

ein erstes Verfahren⁴⁴ einer derartigen Auftragssteuerung beschrieben.⁴⁵ Um einen Auftrag gemäß dieser Freigabelogik in das Produktionssystem freigeben zu dürfen, müssen zwei Kriterien erfüllt sein. Zum einen muss der aktuelle Bestand unterhalb einer definierten Bestandsgrenze liegen und zum anderen muss der Freigabetermin⁴⁶ erreicht sein.⁴⁷ Das wohl bekannteste und meist diskutierte Verfahren einer solchen bestandsregelnden Auftragsfreigabe ist die belastungsorientierte Auftragsfreigabe.⁴⁸ Dieses Verfahren wurde in den 80er Jahren am Institut für Fabrikanlagen (IFA) in Hannover von Kettner u. Bechte⁴⁹ beschrieben und durch Wiendahl⁵⁰ fortentwickelt.⁵¹ Ziel der belastungsorientierten Auftragsfreigabe ist es, den Auftragsbestand im Produktionssystem bzw. für jede einzelne Bearbeitungsstation auf einem vordefinierten Niveau zu halten, um hierdurch niedrige Durchlaufzeiten, eine bessere Termineinhaltung sowie eine gute Ausnutzung der verfügbaren Kapazitäten zu erreichen.⁵² Das Konzept der belastungsorientierten Auftragsfreigabe basiert auf dem sogenannten Trichtermodell⁵³ und gliedert sich im Allgemeinen in die folgenden drei Schritte:⁵⁴

1. Festlegung der freizugebenden Aufträge
2. Bestimmung der Kapazitätsbelastung
3. Freigabe der Aufträge

Ein Auftrag kann dann freigegeben werden, wenn der Plan-Starttermin innerhalb des definierten Vorgriffshorizontes liegt. Alle Aufträge, welche diese Eigenschaft erfüllen, sind in der Liste freizugebender Aufträge enthalten. Diese Aufträge werden nach ihrem Plan-Starttermin aufsteigend sortiert.

Um die Kapazitätsbelastung zu bestimmen, wird für jede Bearbeitungsstation ein sogenanntes Bestandskonto geführt. Wird ein Auftrag in das Produktionssystem freigegeben,

⁴⁴Siehe Irastorza u. Deane (1974).

⁴⁵Vgl. Kingsman (2000), S. 75.

⁴⁶Der Freigabetermin ergibt sich aus dem Plan-Starttermin abzüglich eines Vorgriffshorizonts. Dieser Vorgriffshorizont ermöglicht es, Aufträge auch vor dem Plan-Starttermin freigeben zu können. Dies stellt zum einen sicher, dass das Produktionssystem nicht leer läuft und zum anderen kann hierdurch ein zusätzlicher zeitlicher Puffer realisiert werden.

⁴⁷Vgl. Lödding (2010), S. 301.

⁴⁸Vgl. Lödding (2010), S. 373.

⁴⁹Siehe Kettner u. Bechte (1981).

⁵⁰Siehe Wiendahl (1987).

⁵¹Vgl. Hansmann (2006), S. 340.

⁵²Vgl. Corsten u. Gössinger (2012), S. 603.

⁵³Das Produktionssystem bzw. die Bearbeitungsstation wird als Trichter angesehen. Ankommende bzw. freigegebene Produktionsaufträge bilden den Bestand (gemessen in Arbeits- bzw. Maschinenstunden), also die Füllhöhe des Trichters. Nach Bearbeitung eines Produktionsauftrags fließt dieser aus dem Trichter ab, was zum einen den Auftragsbestand reduziert und zum anderen die Bearbeitung des nächsten Produktionsauftrags möglich macht. Die Leistung der Ressource wird durch den Durchmesser des Trichters symbolisiert (vgl. Nyhuis u. Wiendahl (2012), S. 25).

⁵⁴Vgl. Hansmann (2006), S. 343.



so wird auf jedem Bestandskonto der Bearbeitungsstationen, welche diesen Auftrag bearbeiten, der Zugang an Arbeit⁵⁵ vermerkt. Hierbei wird unterschieden, ob der Auftrag die Bearbeitungsstation direkt oder indirekt belastet. Eine direkte Belastung einer Bearbeitungsstation liegt vor, wenn der Auftrag unmittelbar an dieser Bearbeitungsstation bearbeitet wird. Die Bearbeitungsstationen, an denen der Auftrag erst anschließend bearbeitet werden kann, werden durch den Auftrag zunächst nur indirekt belastet. Liegt eine direkte Belastung vor, so ist der Auftrag in vollem Umfang im Bestandskonto der Bearbeitungsstation zu verbuchen. Bei einer indirekten Belastung erfolgt nur eine abgezinste (reduzierte) Berücksichtigung der Auftragslast für diese nachgelagerte Bearbeitungsstation. Durch diese Reduktion der Auftragslast an nachgelagerten Bearbeitungsstationen wird die Wahrscheinlichkeit beschrieben, dass der Auftrag in dieser Planungsperiode auch die nachgelagerten Bearbeitungsstationen belastet.⁵⁶ Somit ergibt sich die Belastung im Bestandskonto je Bearbeitungsstation durch:⁵⁷

Parameter:

- BK_j : Arbeitslast des Bestandskontos von Bearbeitungsstation j ($1 \leq j \leq J$)
 B_j : Arbeitslast an Bearbeitungsstation j ($1 \leq j \leq J$)
 κ_j : Abzinsfaktor von Bearbeitungsstation j in Prozent ($1 \leq j \leq J$)
 τ : Index der aktuellen Bearbeitungsstation

$$BK_j = \begin{cases} B_j & \text{falls } \tau = j \\ B_j \cdot \prod_{i=\tau}^{j-1} \left(\frac{\kappa_i}{100} \right) & \text{falls } \tau \leq j \end{cases} \quad (2.1)$$

Dieses Vorgehen wird anhand des nachfolgenden Beispiels illustriert: Ein Auftrag muss in Folge drei Bearbeitungsstationen ($J = 3$) durchlaufen. Die Arbeitslast B_j je Bearbeitungsstation für diesen Auftrag ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

| Bearbeitungsstation | $j = 1$ | $j = 2$ | $j = 3$ |
|-----------------------------|---------|---------|---------|
| Arbeitslast B_j [Stunden] | 6 | 8 | 4 |
| Abzinsfaktor κ_j | 100% | 50% | 50% |

Tabelle 2.1.: Arbeitslast und Abzinsfaktoren je Bearbeitungsstation des freizugebenden Auftrags.

⁵⁵Hierfür wird in der Regel die Bearbeitungszeit des Auftrags verwendet.

⁵⁶Vgl. Zimmermann (1987), S. 131.

⁵⁷Vgl. Lödging (2010), S. 374.

Bei Freigabe des Auftrags zum Zeitpunkt t wird die erste zu durchlaufende Bearbeitungsstation in jedem Fall erreicht und somit zu 100% belastet. Die nachfolgenden Bearbeitungsstationen werden jeweils nur zu 50% durch diesen Auftrag belastet, sodass die Arbeitslast auf den Bestandskonten der nachgelagerten zwei Bearbeitungsstationen entsprechend geringer ist. Ist die Bearbeitung des Auftrags zum Zeitpunkt $t + 1$ an der ersten Bearbeitungsstation abgeschlossen, so werden die Bestandskonten entsprechend aktualisiert. Die Bestandskonten der Bearbeitungsstationen zu den jeweiligen Zeitpunkten sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

| Zeitpunkt t : | | | |
|--------------------------------|---------|---------|---------|
| Bearbeitungsstation | $j = 1$ | $j = 2$ | $j = 3$ |
| Bestandskonto BK_j [Stunden] | 6 | 4 | 1 |

| Zeitpunkt $t+1$: | | | |
|--------------------------------|---------|---------|---------|
| Bearbeitungsstation | $j = 1$ | $j = 2$ | $j = 3$ |
| Bestandskonto BK_j [Stunden] | 0 | 8 | 2 |

Tabelle 2.2.: Bestandskonto der Bearbeitungsstationen zum Zeitpunkt t und $t + 1$.

So liegt die Arbeitslast zum Zeitpunkt t an der zweiten Bearbeitungsstation nur bei 50% und bei der dritten bei 25% der gesamten Arbeitslast B_j . Zum Zeitpunkt $t + 1$ ist die zweite Bearbeitungsstation zu 100% und die dritte zu 50% durch diesen Auftrag belastet.

Durch die Bestandskonten ist die Arbeitslast je Bearbeitungsstation ersichtlich. Diese Arbeitslast beinhaltet die direkt zugeordneten Aufträge sowie Aufträge, welche im Produktionssystem freigegeben sind, aber erst zu einem späteren Zeitpunkt die Bearbeitungsstation belasten. Über die Betrachtung der in Arbeitsstunden gemessenen Zugangs-, Abgangs- und Bestandsgrößen im Zeitverlauf, welche als Durchlaufdiagramm⁵⁸ dargestellt werden, erfolgt die Berechnung der Kapazitätsbelastung sowie der Arbeitsleistung der einzelnen Ressource.⁵⁹ Die Belastungsschranke ergibt sich aus der Summe der Arbeitsleistung der Bearbeitungsstation zuzüglich einem geplanten mittleren Bestand.⁶⁰ Dabei wird im Rahmen des Verfahrens der belastungsorientierten Auftragsfreigabe der Zusammenhang zwischen der mittleren Durchlaufzeit, dem Bestand und der Leistung aus der idealisierten Modellvorstellung der *Arbeitsinhalt-Zeit-Funktion* abgeleitet.⁶¹

Nachdem durch die Bestandskonten die Arbeitslast der Bearbeitungsstationen vorliegen, erfolgt die Prüfung, ob ein neuer Auftrag in das Produktionssystem freigegeben werden

⁵⁸Auch als *Arbeitsinhalt-Zeit-Funktion* bezeichnet (vgl. Corsten u. Gössinger (2012), S. 603).

⁵⁹Vgl. Kiener (2012), S. 296 und Bechte (1984), S. 36ff.

⁶⁰Um sicherstellen zu können, dass die Bearbeitungsstationen immer einen Arbeitsvorrat haben, ist der Arbeitsbestand größer als die Arbeitsleistung zu setzen (vgl. Hansmann (2006), S. 343).

⁶¹Vgl. Zäpfel (2001), S. 196.



darf. Dies ist der Fall, wenn hierdurch die definierten Belastungsschranken der jeweiligen Bearbeitungsstationen nicht überschritten werden.⁶²

Nach der Logik der belastungsorientierten Auftragsfreigabe können auch weitere regelbasierte Verfahren abgebildet werden.⁶³ So verzichtet das Verfahren der sogenannten *Workload Control* auf eine Abzinsung der Arbeitsbelastung der nachfolgenden Bearbeitungsstationen, sodass der freigegebene Auftrag in vollem Umfang alle Bearbeitungsstationen, welche durch diesen Auftrag durchlaufen werden, belastet. Somit ist der Abzinsfaktor für alle Bearbeitungsstationen entsprechend auf 100% zu setzen, um eine Abzinsung zu vermeiden. Das Verfahren *CONWIP* berücksichtigt lediglich die Belastungsschranke der letzten Bearbeitungsstation, sodass die Belastungsschranken aller vorgelagerten Bearbeitungsstationen beliebig hoch sein dürfen. Auch im Rahmen dieses Verfahrens ist keine Abzinsung der Arbeitslast vorzunehmen. Analog wird im Verfahren *Engpasssteuerung* lediglich die Bearbeitungsstation betrachtet, welche den Engpass darstellt. Somit ist die Belastungsschranke des Engpasses maßgeblich für die Entscheidung der Freigabe von Aufträgen. Alle diese Verfahren folgen der gleichen Logik, sodass Aufträge nur dann freigegeben werden, wenn eine definierte Belastungsschranke dies zulässt.

2.2.2. Optimierungsmodelle zur Auftragsfreigabe

Als Alternative zu regelbasierten Verfahren der Auftragsfreigabe wurden mathematische Entscheidungsmodelle formuliert. Diese Modelle minimieren die entstehenden Kosten unter Berücksichtigung der definierten Restriktionen und Parameter. Untersuchungen zeigen, dass durch die Verwendung von Optimierungsmodellen deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden können als durch den Einsatz von regelbasierten Ansätzen.⁶⁴

Die grundsätzliche Planungsentscheidung des Optimierungsmodells zur Auftragsfreigabe besteht darin, Produktionsmengen je Produkt k und Periode t , welche in das Produktionssystem freigegeben werden, so zu planen, dass die eintretenden Bedarfe gedeckt und minimale Lagerbestände erzielt werden. Hierbei wird der Planungshorizont T in gleich lange Planungsperioden t unterteilt ($1 \leq t \leq T$). Somit ist in jeder Periode t eine Freigabemenge $R_{k,t}$ zu ermitteln, sodass der Bedarf $D_{k,t}$ gedeckt werden kann. Liegen die Bedarfe je Periode t immer unterhalb der maximal möglichen Ausbringungsmenge des Produktionssystems oder liegt keine Beschränkung der Ausbringungsmenge vor, so kann eine optimale Lösung durch eine bedarfssynchrone (*Just-in-Time*) Produktion erzielt werden.⁶⁵ Übersteigt der Bedarf in einzelnen Perioden die verfügbare Kapazität, so sind diese Mengen über den Lagerbestand $I_{k,t}$ zu decken und somit in vorgelagerten Perioden zu produzieren. Mathematisch lässt sich ein solches Modell wie nachfolgend dargestellt formulieren.⁶⁶ Die Ausbringungsmenge $X_{k,t}$, welche je Periode t zu einem Lagerzugang führt, ist in diesem

⁶²Vgl. Corsten u. Gössinger (2012), S. 606.

⁶³Vgl. Lödding (2008), S. 389.

⁶⁴Vgl. Pürgstaller u. Missbauer (2012), S. 679.

⁶⁵Vgl. Hopp u. Spearman (2008), S. 555.

⁶⁶Die Modellformulierung orientiert sich an Hackman u. Leachman (1989), S. 483f. und Johnson u. Montgomery (1974), S. 201f.

Modell gleich der Freigabemenge ($X_{k,t} = R_{k,t}$) und somit redundant, sodass die Modellformulierung nur eine dieser Entscheidungsvariablen beinhaltet.⁶⁷

Basismodell

Parameter:

- C : Verfügbare Kapazität
 $D_{k,t}$: Bedarf von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 h_k : Lagerkostensatz für Produkt k ($1 \leq k \leq K$)

Variablen:

- $I_{k,t}$: Lagerbestand von Produkt k zum Ende einer Periode t
 ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 $X_{k,t}$: Ausbringungsmenge von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (I_{k,t} \cdot h_k) \quad (2.2)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} + X_{k,t} - D_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.3)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{k,t} \leq C \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.4)$$

$$I_{k,t}, X_{k,t} \geq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.5)$$

In der Zielfunktion (2.2) erfolgt die Minimierung der Lagerbestände über alle Perioden und Produkte unter Verwendung des Lagerkostensatzes h_k je Produkt k . Über die Lagerbilanzgleichung (2.3) erfolgt die Ermittlung des Lagerbestands am Ende jeder Periode t . Dieser ergibt sich aus dem Lagerbestand am Ende der Vorperiode, zuzüglich der Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ und abzüglich des zu deckenden Bedarfs $D_{k,t}$ je Periode t . Durch die Kapazitätsrestriktion (2.4) wird sichergestellt, dass die Ausbringungsmenge die verfügbare Kapazität nicht überschreitet. Die Entscheidungsvariablen dürfen nicht negativ werden, was über die Nicht-Negativitäts-Bedingung (2.5) festgelegt wird.

In Planungsmodellen, wie dem soeben gezeigten, kann die Annahme getroffen werden, dass alle Bedarfsmengen zum Bedarfszeitpunkt gedeckt werden müssen und somit keine

⁶⁷Vgl. Aouam u. Uzsoy (2012), S. 183.

Fehlmengen auftreten dürfen.⁶⁸ Ist dies nicht möglich, da auch in vorgelagerten Perioden die Kapazität ausgeschöpft ist, so kann durch zusätzliche Kapazitäten (z. B. Überstunden) oder eine externe Beschaffung der notwendigen Mengen die Bedarfsdeckung gewährleistet werden. Liegen diese Möglichkeiten nicht vor, so ist es sinnvoll, das Auftreten von Auftragsrückständen bzw. Fehlmengen $F_{k,t}$ je Produkt k und Periode t zu ermöglichen. Existiert zum Beispiel zu Beginn des Planungszeitpunkts kein Lagerbestand und übersteigt der erste zu deckende Bedarf die verfügbare Kapazität, so ist es nicht möglich, den Bedarf termingerecht zu decken und es treten Fehlmengen auf. Da der Bedarf, zwar verspätet, aber trotzdem in voller Höhe zu decken ist, müssen diese Fehlmengen in nachgelagerten Perioden produziert werden. Auftretende Fehlmengen gilt es zu vermeiden, sodass diese im Rahmen der Zielfunktion zu berücksichtigen und mit Fehlmengenkosten f_k je Produkt k zu bewerten sind. Somit sind die Zielfunktion, die Lagerbilanzgleichung sowie die Nicht-Negativität-Bedingung entsprechend um die Fehlmengen $F_{k,t}$ zu erweitern. Das entstehende Optimierungsmodell ist nachfolgend dargestellt.

Basismodell mit Fehlmengen

Parameter:

f_k : Kosten für eine Einheit an Fehlmengen von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)

Variablen:

$F_{k,t}$: Fehlmengen von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (I_{k,t} \cdot h_k + F_{k,t} \cdot f_k) \quad (2.6)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} - F_{k,t-1} + X_{k,t} - D_{k,t} + F_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.7)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{k,t} \leq C \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.8)$$

$$F_{k,t}, I_{k,t}, X_{k,t} \geq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.9)$$

Im Rahmen solcher Modelle zur Auftragsfreigabeplanung sind die WIP-Bestände zu integrieren.⁶⁹ Zudem ist zu berücksichtigen, dass eine Freigabemenge $R_{k,t}$, welche von Produkt k in einer Periode t freigegeben wird, erst nach einer definierten Durchlaufzeit $L_{k,t}$

⁶⁸Vgl. Günther u. Tempelmeier (2012), S. 11.

⁶⁹Vgl. Karmarkar (1989), S. 113f.

zu einer Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ führt und bis dahin als WIP-Bestand $W_{k,t}$ im Produktionssystem vorliegt. Diese Durchlaufzeit $L_{k,t}$ ist bei den Freigabemengen $R_{k,t}$ bzw. den Ausbringungsmengen $X_{k,t}$ zu berücksichtigen, sodass das Modell um die folgende Bedingung zu ergänzen ist:⁷⁰

$$R_{k,t} = X_{k,t+L_{k,t}} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge \forall 1 \leq t \leq T - L_{k,t} \quad (2.10)$$

Die Freigabemengen $R_{k,t}$ erhöhen die WIP-Bestände $W_{k,t}$, da neue Produktionsmengen in das Produktionssystem freigegeben werden. Die Ausbringungsmengen $X_{k,t}$ verringern die WIP-Bestände $W_{k,t}$, da diese Mengen das Produktionssystem verlassen und zu Lagerzugängen führen. Die WIP-Bestände $W_{k,t}$ am Ende einer Periode t können wie folgt berechnet werden:

$$W_{k,t} = W_{k,t-1} + R_{k,t} - X_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.11)$$

Diese berechneten WIP-Bestände $W_{k,t}$ am Ende einer Periode t sind in der Zielfunktion zu berücksichtigen und mit WIP-Bestandskosten w_k zu bewerten. Somit ist die Zielfunktion (2.6) um die WIP-Bestände $W_{k,t}$ und den Kostensatz w_k entsprechend zu erweitern. Durch diese Erweiterungen ergibt sich das nachfolgend beschriebene Optimierungsmodell, welches in dieser Arbeit als AFP^{FDLZ} bezeichnet⁷¹ wird.

AFP^{FDLZ}

Parameter:

- $L_{k,t}$: Durchlaufzeit von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 w_k : Kosten für eine Einheit WIP-Bestand von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)

Variablen:

- $R_{k,t}$: Freigabemenge von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 $W_{k,t}$: WIP-Bestand von Produkt k am Ende einer Periode t
 ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)

$$\text{Min} \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (I_{k,t} \cdot h_k + W_{k,t} \cdot w_k + F_{k,t} \cdot f_k) \quad (2.12)$$

⁷⁰Vgl. Aouam u. Uzsoy (2012), S. 184 und Asmundsson u. a. (2006) S. 99.

⁷¹Eine eindeutige Bezeichnung dieser Modelle in der Literatur ist nicht vorhanden, sodass die Modellbezeichnung im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird: **Auftragsfreigabeplanung mit festen Durchlaufzeiten.**



Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} - F_{k,t-1} + X_{k,t} - D_{k,t} + F_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.13)$$

$$R_{k,t} = X_{k,t+L_{k,t}} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge \forall 1 \leq t \leq T - L_{k,t} \quad (2.14)$$

$$W_{k,t} = W_{k,t-1} + R_{k,t} - X_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.15)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{k,t} \leq C \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.16)$$

$$F_{k,t}, I_{k,t}, R_{k,t}, X_{k,t} \geq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.17)$$

Üblicherweise durchläuft ein Produkt k eine Folge von Operationen o an den jeweiligen Bearbeitungsstationen j , welche gemäß den produktspezifischen Arbeitsplänen definiert sind (mit $o \in O_j$). Zudem ist hierbei die Stückbearbeitungszeit $tb_{k,o}$ je Produkt k und Operation o im Rahmen der Kapazitätsrestriktion zu berücksichtigen. Ein solches Modell ist nachfolgend dargestellt und wird als MS-AFP^{FDLZ} bezeichnet⁷². In diesem Modell gilt die Annahme, dass jede Bearbeitungsstation genau einen Vorgänger bzw. Nachfolger hat.⁷³

MS-AFP^{FDLZ}

Parameter:

- C_j : Verfügbare Kapazität von Bearbeitungsstation j in Zeiteinheiten ($1 \leq j \leq J$)
- $D_{k,t}$: Bedarf von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
- f_k : Kosten für eine Einheit an Fehlmengen von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
- h_k : Lagerkostensatz für eine Einheit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
- $L_{k,o}$: Durchlaufzeit von Produkt k vom Freigabezeitpunkt bis zum Abschluss von Operation o ($1 \leq k \leq K \wedge o \in O_j$)
- $tb_{k,o}$: Stückbearbeitungszeit von Produkt k für Operation o ($1 \leq k \leq K \wedge o \in O_j$)
- w_k : Kosten für eine Einheit WIP-Bestand von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)

⁷²Eine eindeutige Bezeichnung dieser Modelle ist in der Literatur nicht vorhanden, sodass diese Modellbezeichnung im Rahmen der Arbeit verwendet wird: **Mehrstufige Auftragsfreigabeplanung mit festen Durchlaufzeiten.**

⁷³Vgl. Kacar u. a. (2013b), S. 604f. und Leachman u. Carmon (1992), S. 64.



Variablen:

- $F_{k,t}$: Fehlmengen von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 $I_{k,t}$: Lagerbestand von Produkt k am Ende von Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 $R_{k,t}$: Freigabemenge von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 $R_{k,t,o}$: Freigabemenge von Produkt k in Periode t für Operation o ; diese entspricht der Ausbringungsmenge der direkt davor ausgeführten Operation $o-1$:
 $R_{k,t,o} = X_{k,t,o-1}$ ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge o \in O_j$)
 $R_{k,t,j}$: Freigabemenge von Produkt k in Periode t für Bearbeitungsstation j
mit $R_{k,t,j} = \sum_{o \in O_j} R_{k,t,o}$ ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq j \leq J$)
 $W_{k,t,o}$: WIP-Bestand von Produkt k bei Operation o am Ende von Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge o \in O_j$)
 $W_{k,t,j}$: WIP-Bestand von Produkt k an Bearbeitungsstation j am Ende von Periode t
mit $W_{k,t,j} = \sum_{o \in O_j} W_{k,t,o}$ ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq j \leq J$)
 $X_{k,t,o}$: Ausbringungsmenge von Produkt k für Operation o in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge o \in O_j$)
 $X_{k,t,j}$: Ausbringungsmenge von Produkt k an der Bearbeitungsstation j in Periode t
mit $X_{k,t,j} = \sum_{o \in O_j} X_{k,t,o}$ ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq j \leq J$)
 $X_{k,t}$: Ausbringungsmenge von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
mit $X_{k,t} = X_{k,t,o^*}$ (mit o^* als letzte Operation des Bearbeitungsprozesses)

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{k=1}^K \left(\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J w_k \cdot W_{k,t,j} + \sum_{t=1}^T (h_k \cdot I_{k,t} + f_k \cdot F_{k,t}) \right) \quad (2.18)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$W_{k,t,o} = W_{k,t-1,o} + R_{k,t,o} - X_{k,t,o} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge o \in O_j \quad (2.19)$$

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} - F_{k,t-1} - D_{k,t} + X_{k,t} + F_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (2.20)$$

$$R_{k,t-L_{k,o}} = X_{k,t,o} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge o \in O_j \quad (2.21)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{o \in O_j} t b_{k,o} \cdot X_{k,t,o} \leq C_j \quad \forall 1 \leq j \leq J \wedge 1 \leq t \leq T \quad (2.22)$$

$$F_{k,t}, I_{k,t}, R_{k,t}, R_{k,t,o}, W_{k,t,o}, X_{k,t,o} \geq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge o \in O \quad (2.23)$$

In der Zielfunktion (2.18) werden die Kosten der WIP-Bestände, der Lagerbestände sowie der auftretenden Fehlmengen minimiert. Der WIP-Bestand $W_{k,t,o}$ je Produkt k und Operation o am Ende einer Periode t errechnet sich aus dem WIP-Bestand am Ende der Vorperiode $W_{k,t-1,o}$ zuzüglich der Freigabemenge $R_{k,t,o}$ und abzüglich der Ausbringungsmenge $X_{k,t,o}$ (siehe Formel 2.19). Die Freigabemenge $R_{k,t,o}$ entspricht hierbei der Ausbringungsmenge der vorgelagerten Operation ($X_{k,t,o-1}$) oder bei der ersten Operation der in das Produktionssystem freigegebenen Menge $R_{k,t}$. Die Lagerbilanzgleichung (2.20) ermittelt den Lagerbestand $I_{k,t}$ je Produkt k am Ende einer Periode t . Dieser berechnet sich aus dem Lagerbestand am Ende der Vorperiode $I_{k,t-1}$ abzüglich der Fehlmengen $F_{k,t-1}$ der Vorperiode sowie des aktuellen Bedarfs $D_{k,t}$ und zuzüglich der Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ des Produktionssystems sowie etwaiger Fehlmengen $F_{k,t}$. Eine Ausbringungsmenge des Produktionssystems liegt dann vor, wenn die letzte durchzuführende Operation abgeschlossen ist. In Formel (2.21) erfolgt die Berücksichtigung der Durchlaufzeiten, indem die Freigabemenge $R_{k,t}$ von Produkt k , welche in Periode t in das Produktionssystem freigegeben wird, erst nach einer spezifizierten Durchlaufzeit $L_{k,o}$ zu einer Ausbringungsmenge $X_{k,t,o}$ bei Operation o führt. Durch die Kapazitätsrestriktion (2.22) ist sichergestellt, dass die Ausbringungsmengen $X_{k,t,o}$ einer Operation o die verfügbare Kapazität C_j der Bearbeitungsstation j , an welcher die Operation o durchgeführt wird, nicht überschreitet. Da unterschiedliche Produkte betrachtet werden und diese sich hinsichtlich des Kapazitätsbedarfs unterscheiden, werden die produktspezifischen Bearbeitungszeiten ($tb_{k,o}$) je Operation o berücksichtigt.

Durch dieses Modell wird der Produktionsprozess, also die Durchführung der jeweiligen Operationen an den Bearbeitungsstationen, berücksichtigt. Die Leistungsfähigkeit eines solchen Modells wird maßgeblich durch die Abschätzung der verwendeten Durchlaufzeiten $L_{k,o}$ bestimmt.

In dem soeben aufgezeigten Modell wird eine gute Abschätzung der auftretenden Durchlaufzeiten $L_{k,o}$ benötigt. Diese sind, unabhängig von der im Produktionssystem vorhandenen Arbeitslast sowie der aufgrund der Planungsentscheidung entstehenden Arbeitslast, zum Planungszeitpunkt vorzugeben. In der industriellen Praxis wird zur Abschätzung solcher Durchlaufzeiten oft ein Mittelwert verwendet, welcher auf Basis von Beobachtungswerten berechnet wird.⁷⁴ In Asmundsson u. a. erfolgt eine solche Ermittlung der Durchlaufzeiten durch ein Simulationsmodell.⁷⁵ Dieses Simulationsmodell bildet das Produktionssystem und die Bearbeitung der Aufträge detailliert ab.⁷⁶

Zunächst werden die ankommenden Bedarfsmengen⁷⁷ zum Bedarfszeitpunkt in das Produktionssystem freigegeben, also als Freigabemengen interpretiert, sodass auch ohne Lösung eines Entscheidungsproblems ein Freigabeplan vorliegt. Somit gilt:

⁷⁴Vgl. Asmundsson u. a. (2006), S. 105.

⁷⁵Vgl. Asmundsson u. a. (2009), S. 149f.

⁷⁶Aufträge werden in das Produktionssystem freigegeben und ihren Arbeitsplänen entsprechend an den jeweiligen Bearbeitungsstationen bearbeitet. Die Zuteilung an den Bearbeitungsstationen erfolgt hierbei nach dem FIFO-Prinzip.

⁷⁷Die Bedarfe folgen einer Normalverteilung mit bekanntem Mittelwert und bekannter Standardabweichung.

$$R_{k,t} = D_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$$

Dieser Freigabeplan wird durch das Simulationsmodell umgesetzt und simuliert. Die auf Basis dieser Freigabeentscheidung realisierten produkt- und operationsspezifischen Durchlaufzeiten je Auftrag werden gemessen und es wird eine mittlere produkt- und operationsspezifische Durchlaufzeit über alle Beobachtungswerte berechnet. Diese (initialen) Erwartungswerte der mittleren Durchlaufzeiten $E(L_{k,o}^0)$ werden als Eingangsdaten für das Optimierungsmodell verwendet. Als Ergebnis liegt wieder ein Freigabeplan vor, welcher ebenfalls durch ein Simulationsmodell simuliert wird. Die nun gemessenen Durchlaufzeiten $E(L_{k,o}^1)$ werden als Eingangsdaten für das Optimierungsmodell verwendet, um das Planungsproblem zu lösen.⁷⁸

Um statistisch signifikante Werte zu erhalten, werden mehrere Replikationen⁷⁹ durchgeführt, um so eine Vielzahl an Beobachtungswerten zu erhalten, welche die Grundlage der Mittelwertberechnung bilden.⁸⁰ Die Ermittlung dieser Durchlaufzeiten, welche im Optimierungsmodell letztlich verwendet werden, werden vor Planungsbeginn bestimmt und für die nachfolgenden Planungsläufe verwendet.

Die hierbei gemessenen mittleren Durchlaufzeiten $E(L_{k,o}^0)$ und $E(L_{k,o}^1)$ werden in der Regel keine ganzzahligen Werte sein. Die im Optimierungsmodell verwendeten Durchlaufzeiten sind allerdings Vielfache der Planungsperiode und somit ganzzahlig. Es gilt die gemessenen mittleren Durchlaufzeiten auf ganzzahlige Werte zu runden. Dies kann über ein Entscheidungsmodell (als *Integer Programming Rounding (IPR)* bezeichnet) erfolgen:⁸¹

IPR

Parameter:

$E(L_{k,o})$: Gemessene mittlere Durchlaufzeit je Produkt k und Operation o ($1 \leq k \leq K \wedge o \in O_j$)

Variablen:

$E(\hat{L}_{k,o})$: Gerundete Durchlaufzeit je Produkt k und Operation o ($1 \leq k \leq K \wedge o \in O_j$)

⁷⁸Ein ähnlicher Ansatz zur Ermittlung von mittleren Durchlaufzeiten durch den Einsatz von Simulation wird auch in der Arbeit von Kacar u. a. angewendet (vgl. Kacar u. a. (2013b), S. 605).

⁷⁹Es erfolgt die Durchführung von unabhängigen Simulationsläufen, welche sich in der Verwendung der Zufallszahlenströme unterscheiden (vgl. Altioik u. Melamed (2007), S. 15).

⁸⁰Es werden fünf unterschiedliche Bedarfsverläufe, welche über eine Normalverteilung erzeugt werden, betrachtet. Die Bearbeitungszeiten in diesem Produktionssystem werden über eine statistische Verteilung (Exponentialverteilung) beschrieben. Durch die Verwendung unterschiedlicher Zufallszahlenströme werden fünf unterschiedliche Simulationsläufe je Bedarfsverlauf durchgeführt. Somit werden die Beobachtungswerte über insgesamt 25 Replikationen (fünf Bedarfsverläufe mit jeweils fünf Simulationen) ermittelt.

⁸¹Vgl. Kacar u. a. (2013b), S. 605f. und Asmundsson u. a. (2009), Anhang B.



$$\text{Minimiere} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{o \in O_j} E(\widehat{L}_{k,o}) \quad (2.24)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$\sum_{o \in O_j} E(L_{k,o}) \leq \sum_{o \in O_j} E(\widehat{L}_{k,o}) \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (2.25)$$

$$E(\widehat{L}_{k,o}) - E(L_{k,o}) \leq 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge o \in O_j \quad (2.26)$$

$$E(L_{k,o}) - E(\widehat{L}_{k,o}) \leq 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge o \in O_j \quad (2.27)$$

$$E(\widehat{L}_{k,o-1}) \leq E(\widehat{L}_{k,o}) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge o \in O_j \quad (2.28)$$

$$E(\widehat{L}_{k,o}) \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge o \in O_j \quad (2.29)$$

Die gemessenen mittleren Durchlaufzeiten $E(L_{k,o})$ müssen in ganzzahlige Durchlaufzeiten $E(\widehat{L}_{k,o})$ gerundet werden. In der Zielfunktion (2.24) gilt es, die Summe der ganzzahligen Durchlaufzeiten zu minimieren. Hierbei muss die Summe der gerundeten Durchlaufzeiten mindestens so groß wie die Summe der gemessenen Durchlaufzeiten sein, sodass keine Unterschätzung der Durchlaufzeiten durch ein ständiges Abrunden erfolgt (2.25). Das Auf- bzw. Abrunden der gemessenen Durchlaufzeiten wird über die Bedingungen (2.26) und (2.27) gesteuert. Da die Durchlaufzeit die Zeit von der Freigabe des Auftrags bis zur vollständigen Bearbeitung des Auftrags an Operation o beschreibt und somit kumulativ ist, darf die Durchlaufzeit für eine Operation o nicht kleiner als die Durchlaufzeit für die vorherige Operation $o - 1$ sein (2.28). Letztlich ist sicherzustellen, dass die gerundeten Durchlaufzeiten ganzzahlige positive Werte sind (2.29).

Neben diesem Vorgehen wird in Kacar u. a. ein alternatives Verfahren (als *Simple Rounding Down (SRD)* bezeichnet) beschrieben und im Vergleich zum oben genannten Vorgehen untersucht.⁸² Beim SRD-Ansatz erfolgt die Messung der mittleren Durchlaufzeit eines Auftrags unter Berücksichtigung aller durchzuführenden Operationen, also vom Zeitpunkt der Freigabe des Auftrags in das Produktionssystem bis zur Fertigstellung des Auftrags durch die Beendigung der letzten durchzuführenden Operation. Das Verhältnis zwischen dieser gemessenen mittleren Durchlaufzeit und der Summe der Bearbeitungszeiten über

⁸²Vgl. Kacar u. a. (2013b), S. 605ff.

alle Operationen beschreibt der Faktor FF_k . Dieser Faktor FF_k wird je Produkt k bestimmt und hat einen Wert von ≥ 1 , da die gemessenen Durchlaufzeiten die Bearbeitungszeiten nicht unterschreiten. Zur Festlegung der operationsspezifischen Durchlaufzeiten $L_{k,o}$ wird dieser Faktor FF_k mit der Bearbeitungszeit der Operation o multipliziert und die Durchlaufzeit der direkt vorgelagerten Operation wird addiert. Es gilt:

$$L_{k,o} = tb_{k,o} \cdot FF_k + L_{k,o-1} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge o \in O_j \quad (2.30)$$

Ist die Operation o die erste durchzuführende Operation, so gilt:

$$L_{k,1} = tb_{k,1} \cdot FF_k \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (2.31)$$

Die durch dieses Vorgehen bestimmten operationsspezifischen Durchlaufzeiten $L_{k,o}$ werden nun konsequent abgerundet, um ganzzahlige Durchlaufzeiten $\hat{L}_{k,o}$ zu erhalten:

$$\hat{L}_{k,o} = \lfloor L_{k,o} \rfloor \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge o \in O_j \quad (2.32)$$

Die Ergebnisse zeigen, dass durch das Runden nach dem SRD-Verfahren bessere Ergebnisse erreicht werden als durch das IPR-Verfahren und somit dieser Ansatz zu präferieren ist.⁸³ Generell werden in den dargestellten Modellen Durchlaufzeiten verwendet, die ein Vielfaches der Planungsperiode und somit ganzzahlige Werte sind. Prinzipiell ist es auch möglich, Durchlaufzeiten zu verwenden, die keine ganzzahligen Werte (sogenannte *fractional lead times*) sind.⁸⁴

In alternativen Ansätzen zur Berücksichtigung von belastungsabhängigen Durchlaufzeiten erfolgt die Iteration zwischen einem Optimierungsmodell und einem Simulationsmodell. Eine der ersten Arbeiten zu solchen iterativen Ansätzen wurde von Hung u. Leachman vorgestellt.⁸⁵ Zur Lösung eines Optimierungsmodells werden als Eingangsdaten Abschätzungen der produkt- und operationsspezifischen Durchlaufzeiten benötigt. Zunächst wird das Optimierungsmodell mit initialen Werten für die Durchlaufzeiten, welche grobe Schätzwerte oder Mittelwerte auf Basis von Messdaten sein können, gelöst.⁸⁶ Die hierbei entstandenen Freigabepläne werden in einem Simulationsmodell umgesetzt und die tatsächlich auftretenden Durchlaufzeiten ermittelt. Diese gemessenen Durchlaufzeiten werden als Eingangsdaten für das Optimierungsmodell verwendet, um erneut einen Freigabeplan zu erhalten. Auch dieser wird wieder durch das Simulationsmodell umgesetzt und die tatsächlichen Durchlaufzeiten werden ermittelt. Diese Iteration wird so lange fortgeführt, bis ein definiertes Abbruchkriterium⁸⁷ erreicht wird.

In einem ähnlichen Ansatz von Byrne u. Bakir erfolgt im Optimierungsmodell die Modifikation der verfügbaren Kapazität C_j der Kapazitätsrestriktion (vgl. Formel 2.22). Kann die

⁸³Vgl. Kacar u. a. (2013b), S. 608ff.

⁸⁴Vgl. Hackman u. Leachman (1989), S. 487ff. und Kacar u. a. (2013a), S. 3735ff.

⁸⁵Vgl. Mönch u. a. (2013), S. 219.

⁸⁶Vgl. Hung u. Leachman (1996), S. 262.

⁸⁷Ein solches Abbruchkriterium kann z. B. über eine gewünschte maximale Differenz der im Optimierungsmodell verwendeten und der tatsächlich gemessenen Durchlaufzeiten beschrieben sein oder sich auf die maximal zulässige Anzahl der durchgeführten Iterationen beschränken.



im Optimierungsmodell geplante Produktionsmenge durch das Simulationsmodell nicht termingerecht produziert werden, so erfolgt eine Reduktion der im Optimierungsmodell beschriebenen verfügbaren Kapazität. Auf Basis dieser Modifikation wird erneut das Optimierungsmodell gelöst und durch das Simulationsmodell geprüft, ob eine Umsetzung möglich ist.⁸⁸ Kim u. Kim erweitern diesen Ansatz von Byrne u. Bakir und führen zusätzlich den Parameter *Loading ratio* ($e_{k,j}(g,t)$) ein.⁸⁹ Durch diesen Parameter wird die Belastung einer Bearbeitungsstation j durch ein Produkt k beschrieben, welche in Periode t aufgrund der Freigabeentscheidung in Periode g ($g \leq t$) eintritt. Durch die Erweiterung dieses zusätzlichen Parameters sowie der Modifikation der verfügbaren Kapazität werden belastungsabhängige Durchlaufzeiten berücksichtigt.⁹⁰ Als Konvergenzkriterium wird die absolute mittlere Abweichung der im Optimierungsmodell bestimmten und im Simulationsmodell gemessenen Ausbringungsmenge des Produktionssystems verwendet.

Diese iterativen Ansätze wurden erweitert, um zusätzliche Restriktionen sowie Parameter berücksichtigen zu können. So erfolgt in Byrne u. Hossain die Erweiterung des Optimierungsmodells, welches in Byrne u. Bakir sowie Kim u. Kim vorgestellt wurde, um die Berücksichtigung einer maximalen Auftragsmenge zu ermöglichen.⁹¹ Hierbei darf die Freigabemenge eine definierte Maximalmenge nicht überschreiten und ist in mehreren Losen entsprechend freizugeben. Somit wird die Freigabemenge über die Anzahl der freizugebenden Lose (mit identischen Auftragsmengen) bestimmt. Bang u. Kim erweitern den Ansatz von Hung u. Leachman zusätzlich um die Berücksichtigung von Wartezeiten. Die Diskrepanz der im Optimierungsmodell verwendeten und der im Simulationsmodell gemessenen Wartezeiten werden in jeder Iteration aktualisiert.⁹²

2.2.3. Schwächen und Nachteile der beschriebenen Ansätze

Insbesondere der Ansatz der belastungsorientierten Auftragsfreigabe hat zu einer Vielzahl von akademischen Diskussionen über die Stärken und Schwächen des Verfahrens geführt.⁹³ Der Einsatz⁹⁴ in der industriellen Praxis konnte allerdings vielversprechende Verbesserungen erzielen, sodass unter bestimmten Bedingungen und Voraussetzungen dieser Ansatz durchaus Vorteile bietet. Trotzdem ist die Kritik an solchen regelbasierten Ansätzen und insbesondere der belastungsorientierten Auftragsfreigabe nicht zu vernachlässigen. Um den Plan-Starttermin für die jeweiligen Aufträge zu erhalten, erfolgt ausgehend vom Bedarfstermin eine Rückwärtsterminierung, welche in der Regel gemessene mittlere Durchlaufzeiten verwendet.⁹⁵ Somit werden als Grundlage der Terminbildung belastungsunab-

⁸⁸Vgl. Byrne u. Bakir (1999), S. 307f.

⁸⁹Vgl. Kim u. Kim (2001), S. 167ff.

⁹⁰Vgl. Mönch u. a. (2013), S. 239.

⁹¹Vgl. Byrne u. Hossain (2005), S. 226f.

⁹²Vgl. Bang u. Kim (2010), S. 329f. und Kacar (2012), S. 14.

⁹³Vgl. Lödging (2010), S. 373.

⁹⁴Siehe Wiendahl (1991).

⁹⁵Dies erfolgt zum Beispiel beim Dispositionsstufenverfahren im Rahmen der Grobterminierung unter Verwendung der definierten Vorlaufzeiten (vgl. Herrmann (2009), S. 284f.).

hängige Durchlaufzeiten verwendet, um Plan-Starttermine zu erhalten.⁹⁶ Sobald ein Auftrag seinen Plan-Starttermin erreicht hat, kann dieser freigegeben werden, sofern die definierten Belastungsgrenzen dies zulassen. Hierdurch wird nicht sichergestellt, dass die Aufträge in der richtigen Reihenfolge bzw. nach Dringlichkeit sortiert freigegeben werden, sondern eine Freigabeentscheidung erfolgt abhängig vom Arbeitsinhalt des Auftrags. Dies hat zur Folge, dass kleinere Aufträge bevorzugt werden, was zu einer schlechten Termin-einhaltung führen kann.⁹⁷ Die definierten Abzinsungsfaktoren sind statisch und nicht von der tatsächlichen Bearbeitungszeit des Auftrags abhängig. Dies führt dazu, dass die eigentlich getroffene Aussage über die Wahrscheinlichkeit, dass ein Auftrag in der Planungsperiode eine Bearbeitungsstation belastet, zu allgemein ist.⁹⁸ Das Verfahren ist für einfache lineare Fertigungsstrukturen mit gleichartigen Aufträgen, relativ kurzen Durchlaufzeiten und einem kontinuierlichen Materialfluss konzipiert.⁹⁹ Zudem kann das Verfahren der belastungsorientierten Auftragsfreigabe nur bei ausreichend großen Planungsperioden und kleinen Losen praktikabel eingesetzt werden.¹⁰⁰

Letztlich hängt die Güte dieser regelbasierten Verfahren, neben den grundsätzlichen Gegebenheiten des Produktionssystems, von den Einstellungen der verwendeten Parameter ab. So gilt es, sinnvolle Werte für den Vorgriffshorizont und insbesondere für die Belastungsschranken zu definieren. In Simulationsstudien konnten nur sehr schwer gute Parameter-einstellungen ermittelt werden, welche zu guten Ergebnissen führen.¹⁰¹ Eine Reduktion der Belastungsschranke führt zu einer Verbesserung der Durchlaufzeiten, welche allerdings in einer geringen Anzahl an freigegebenen Aufträgen resultiert und eine Verschlechterung der Termintreue zur Folge hat. Zudem beschränkt sich die Freigabeentscheidung auf die aktuelle Planungsperiode, sodass die Auswirkungen auf zukünftige Entscheidungen nicht berücksichtigt werden. Durch diese beschränkte Betrachtung auf eine Periode hat ein solches Vorgehen einen statischen Charakter.¹⁰²

Entgegen den regelbasierten Ansätzen kann bei der Verwendung von Optimierungsverfahren eine grundsätzlich optimale Freigabeentscheidung getroffen werden. Die Güte dieser optimalen Lösung hängt allerdings von den vorliegenden Restriktionen sowie den Eingangsdaten ab. Die in den beschriebenen Modellen verwendeten Durchlaufzeiten sind als exogene Parameter zum Planungszeitpunkt zu definieren, sodass hierdurch letztlich eine Planung auf statischen, belastungsunabhängigen Durchlaufzeiten erfolgt. Auch wenn über zusätzliche Entscheidungsmodelle IPR und SRD¹⁰³ die Güte der verwendeten Durchlaufzeiten verbessert wird, kann das grundsätzliche Problem der Berücksichtigung von belastungsabhängigen Durchlaufzeiten nicht gelöst werden, da die im Optimierungsmodell

⁹⁶Vgl. Zäpfel u. Missbauer (1988), S. 128.

⁹⁷Vgl. Helberg (1987), S. 76. Hierbei ist ergänzend zu erwähnen, dass durch zusätzliche Regeln im Rahmen der Freigabe solche Effekte reduziert werden können.

⁹⁸Vgl. Knolmayer (1991), S. 226.

⁹⁹Vgl. Corsten u. Gössinger (2012), S. 609f. und Schröder (1989), S. 15.

¹⁰⁰Vgl. Zimmermann (1987), S. 133.

¹⁰¹Vgl. Adam (1987), S. 3.

¹⁰²Vgl. Schröder (1989), S. 15.

¹⁰³*Integer Programming Rounding* und *Simple Rounding Down* (siehe Kapitel 2.2.2 sowie Kacar u. a. (2013b), S. 605f., Asmundsson u. a. (2009), Anhang B und Kacar u. a. (2013b), S. 605ff.).



verwendeten Durchlaufzeiten maßgeblich die Festlegung der Freigabemengen beeinflussen. Die Umsetzung des Freigabepplans führt in der Regel zu neuen Belastungssituationen und somit ist davon auszugehen, dass die im Vorfeld bestimmten Durchlaufzeiten für diese neuen konkreten Belastungssituationen nicht exakt genug sind. Letztlich erfolgt bei diesem Vorgehen keine Prüfung, ob die in der Planung verwendeten Durchlaufzeiten und die auf Basis der Planungsergebnisse erzielten Durchlaufzeiten stark voneinander abweichen und hierdurch die Güte der Planungsergebnisse in Frage zu stellen ist.

Die gegenseitigen Abhängigkeiten der zur Planung verwendeten Durchlaufzeiten und der daraus resultierenden Freigabeentscheidungen, welche wiederum die tatsächlich auftretenden Durchlaufzeiten beeinflussen, sollen durch die iterativen Ansätze von Hung u. Leachman und Kim u. Kim verbessert werden. Hierbei erfolgt eine Iteration zwischen der Lösung des Optimierungsmodells zur Ermittlung von Freigabepänen und der Umsetzung dieser Freigabepäne durch eine Simulation um neue Durchlaufzeiten für das Optimierungsmodell zu erhalten. Untersuchungen zu diesen iterativen Verfahren zeigen, dass lediglich der Ansatz von Kim u. Kim konvergiert und bei Verwendung des Ansatzes von Hung u. Leachman keine eindeutige Konvergenz erreicht werden konnte.¹⁰⁴ Ein weiterer wesentlicher Nachteil dieser iterativen Ansätze besteht darin, dass während der Planung mehrmalig zeitaufwendige Simulationen durchzuführen sind und hierdurch die Laufzeit zur Lösung des Planungsproblems stark ansteigen kann.¹⁰⁵

Aufgrund dieser unzureichenden Berücksichtigung von belastungsabhängigen Durchlaufzeiten im Rahmen der Auftragsfreigabe wurden Methoden und Modelle entwickelt, wie eine Clearing Funktion im Rahmen der Auftragsfreigabe verwendet werden kann. Das grundsätzliche Konzept der Clearing Funktion wird nachfolgend im Kapitel 3 detailliert beschrieben. Die aus der Literatur bekannten und in dieser Arbeit entwickelten Ansätze und Modelle zur Verwendung einer solchen Clearing Funktion im Rahmen der Auftragsfreigabe werden in Kapitel 5 detailliert aufgezeigt.

2.3. Methoden und Modelle der einstufigen Losgrößenplanung

2.3.1. Einstufige statische Losgrößenplanung

In der Regel führen Produktwechsel auf einer Ressource zu Rüstzeiten sowie Rüstkosten, sodass es günstig(er) sein kann, mehrere Bedarfe zusammenzufassen und hierdurch die Anzahl an Rüstvorgängen zu reduzieren.¹⁰⁶ Im Gegenzug kommt es zu höheren Lagerbeständen, da Bedarfe, die erst später benötigt werden, durch diese Zusammenfassung frühzeitig produziert werden. Somit muss im Rahmen der Losgrößenplanung der Zielkonflikt zwischen den gegenläufig verlaufenden Rüst- und Lagerkosten gelöst werden, um ein optimales Produktionslos mit minimalen Gesamtkosten zu bestimmen.¹⁰⁷

¹⁰⁴Vgl. Irdem u. a. (2008), S. 2182f. und Irdem u. a. (2010), S. 454.

¹⁰⁵Vgl. Kacar u. a. (2012), S. 116.

¹⁰⁶Vgl. Sahling u. Helber (2010), S. 1ff.

¹⁰⁷Vgl. Herrmann (2009), S. 208 ff., Herrmann (2011), S. 259 sowie Günther u. Tempelmeier (2012), S. 199.



Ein erstes Modell zur Lösung dieses Zielkonflikts zwischen den Rüst- und Lagerkosten wurde bereits im Jahr 1913 in der Arbeit von Harris veröffentlicht.¹⁰⁸ Die Entwicklungen der Rüst- und Lagerkosten verlaufen zwar grundsätzlich gegenläufig, allerdings kann ein Minimum der Gesamtkosten bestimmt werden, wie exemplarisch in Abbildung 2.2 skizziert ist.

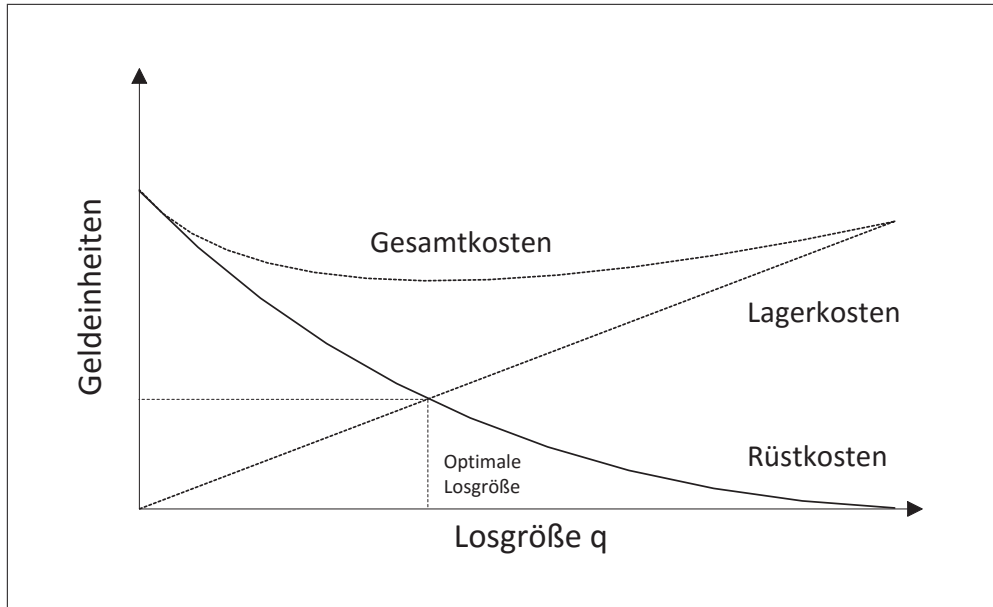


Abbildung 2.2.: Zielkonflikt der gegenläufigen Kosten in der Losgrößenplanung (Abbildung in Anlehnung an Harris (1913), S. 948 und Herrmann (2009), S. 214).

Das von Harris beschriebene mathematische Modell ist im englischsprachigen Raum als *economic order quantity (EOQ)* bekannt. Nach diesem Modell kann ein optimales Los q_{opt} unter Berücksichtigung eines konstanten Rüstkostensatzes s , dem im Zeitverlauf konstanten Bedarf D sowie des Lagerkostensatzes h wie folgt berechnet werden:¹⁰⁹

$$q_{opt} = \sqrt{\frac{2 \cdot s \cdot D}{h}}$$

Die hierdurch entstehenden optimalen Gesamtkosten $C(q_{opt})$ des optimalen Loses q_{opt} berechnen sich durch:¹¹⁰

$$C(q_{opt}) = \frac{s \cdot D}{q_{opt}} + \frac{h \cdot q_{opt}}{2}$$

¹⁰⁸Vgl. Donald Erlenkotter (1990), S. 937ff.

¹⁰⁹Vgl. u.a. Harris (1913), S. 949, Schwarz (2008) S. 141 sowie Herrmann (2009), S. 213.

¹¹⁰Vgl. Herrmann (2009), S. 212.



Wie in Abbildung 2.2 skizziert, ist die Steigung der Funktion der Gesamtkosten im Bereich einer optimalen Losgröße gering, sodass bei einer Abweichung von einer optimalen Losgröße die Gesamtkosten zunächst nur geringfügig steigen.¹¹¹ Berechnungen von Herrmann zeigen, dass beispielsweise bei einer Erhöhung der optimalen Losgröße um 20% die Gesamtkosten lediglich um 2,5% ansteigen.¹¹² Dieser Umstand begünstigt die in der industriellen Praxis zumeist vorliegende Forderung nach ganzzahligen Losen.

2.3.2. Einstufige dynamische Losgrößenplanung

Entgegen den Annahmen des Modells von Harris, liegt in der Regel kein konstanter Bedarf über den gesamten Zeitverlauf vor, sodass das Unternehmen mit einer dynamischen Nachfragesituation konfrontiert ist und die Bedarfe im Zeitverlauf gewissen Schwankungen und Unregelmäßigkeiten unterliegen. Diese Bedarfe liegen in der Regel auch nur für einen endlichen Horizont vor, sodass eine effektive Losgrößenplanung auch nur für diesen Horizont erfolgen kann. Bereits im Jahr 1958 wurde von Wagner u. Whitin ein Modell zur Berechnung von optimalen Losgrößen unter Berücksichtigung von dynamisch schwankenden Bedarfen über einen endlichen Horizont beschrieben.¹¹³ Dies führt zu dem formalen Modell, welches in der Literatur als *Single-Level Uncapacitated Lot Sizing Problem (SLULSP)* bekannt ist und nachfolgend dargestellt wird.¹¹⁴

SLULSP

Parameter:

- D_t : Bedarf in Periode t ($1 \leq t \leq T$)
 h : Lagerkostensatz einer Einheit
 s : Rüstkostensatz
 M : Große Zahl mit $M \geq \sum_{t=1}^T D_t$

Variablen:

- γ_t : Binäre Rüstvariable in Periode t ($1 \leq t \leq T$)
 q_t : Geplantes Los in Periode t ($1 \leq t \leq T$)
 I_t : Lagerbestand am Ende von Periode t ($1 \leq t \leq T$)

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{t=1}^T (s \cdot \gamma_t + h \cdot I_t) \quad (2.33)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_t = I_{t-1} + q_t - D_t \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.34)$$

¹¹¹Vgl. Abbildung 2.2 sowie Herrmann (2009), S. 215.

¹¹²Vgl. Herrmann (2009), S. 216.

¹¹³Vgl. Wagner u. Whitin (1958), S. 89ff. und Herrmann (2009), S. 250.

¹¹⁴Vgl. Tempelmeier (2008), S. 138f. sowie Herrmann (2009), S. 253f.

$$q_t - M \cdot \gamma_t \leq 0 \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.35)$$

$$I_0 = 0 \wedge I_T = 0 \quad (2.36)$$

$$I_t, q_t \geq 0 \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.37)$$

$$\gamma_t \in \{0, 1\} \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (2.38)$$

In der Zielfunktion (2.33) erfolgt eine Minimierung der Summe der Rüst- und Lagerkosten über den gesamten Planungszeitraum T . In der Lagerbilanzgleichung (2.34) wird der Lagerbestand I_t am Ende einer Periode t durch den Lagerbestand I_{t-1} am Ende der Vorperiode zuzüglich dem geplanten Los q_t in Periode t und abzüglich dem Bedarf in Periode t bestimmt. Durch die Rüstbedingung (2.35) wird sichergestellt, dass bei Vorliegen eines Loses q_t in einer Periode t die binäre Rüstvariable γ_t in dieser Periode t mit dem Wert 1 belegt ist. Der Lageranfangs- und Lagerendbestand soll mit den Bedarfen verrechnet werden, sodass die Lageranfangs- und Lagerendbestände 0 betragen müssen.¹¹⁵ Dies wird im Modell durch die Bedingung (2.36) beschrieben. Durch die Restriktion (2.37) werden negative Werte der Entscheidungsvariablen vermieden und durch (2.38) wird die binäre Rüstvariable definiert.

Basierend auf diesem mathematischen Modell haben sich zahlreiche heuristische Verfahren zur Berechnung von Losgrößen entwickelt. Der Vorteil von heuristischen Verfahren ist, dass in der Regel keine aufwendigen mathematischen Modelle zu lösen sind und diese durch einfache Algorithmen und Formeln umgesetzt werden können.¹¹⁶ Zwei der bekanntesten und leistungsfähigsten Varianten von heuristischen Verfahren im Bereich der einstufigen dynamischen Losgrößenplanung sind das Silver-Meal-Verfahren und das Groff-Verfahren.¹¹⁷ Über den gesamten Planungshorizont T wird iterativ das für die betrachtete Periode eingeplante Los um die Bedarfsmenge der nächsten Periode erhöht. Durch die verfahrensspezifischen Kriterien C_t sowie V_t wird geprüft, ob weitere Bedarfe zusammengefasst werden können oder ob hierdurch die Kosten ansteigen und somit eine weitere Erhöhung der Losgröße nicht zielführend ist. Das grundsätzliche Vorgehen heuristischer Verfahren zur Losgrößenplanung ist in Abbildung 2.3 skizziert.

¹¹⁵Vgl. Tempelmeier (2008), S. 137 sowie Herrmann (2009), S. 251.

¹¹⁶In kommerziell verfügbaren ERP- und PPS-Systemen sind in der Regel die gängigsten Heuristiken und Formeln zur Losgrößenberechnung standardmäßig verfügbar, sodass der Einsatz dieser in der industriellen Praxis häufig problemlos möglich ist.

¹¹⁷Vgl. Günther u. Tempelmeier (2012), S. 211.

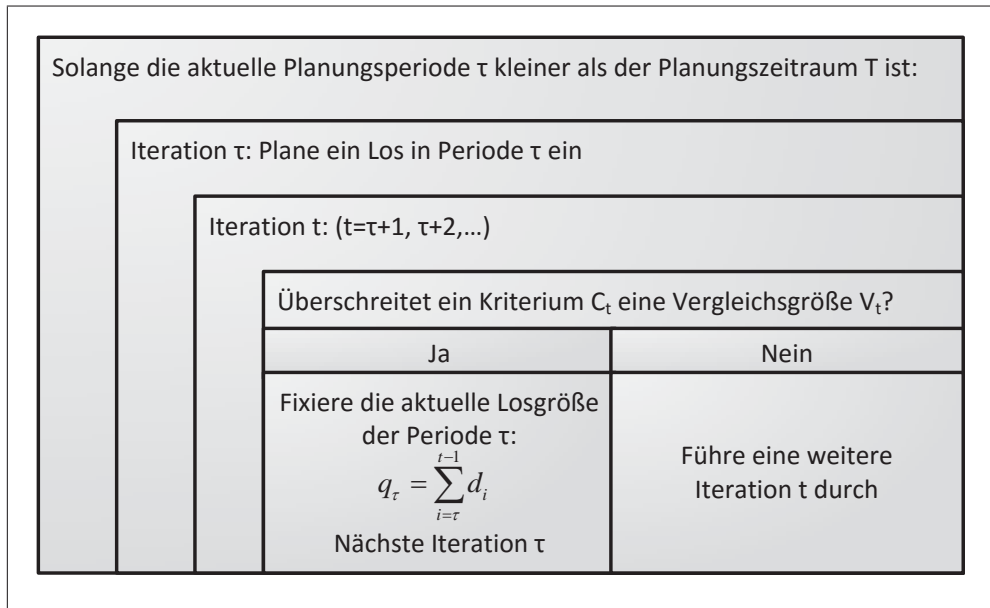


Abbildung 2.3.: Grundsätzliche Verfahrensstruktur von Heuristiken zur Losgrößenplanung (Abbildung in Anlehnung an Günther u. Tempelmeier (2012), S. 212).

Untersuchungen haben ergeben, dass durch den Einsatz des Groff-Verfahrens in der Regel die besseren Resultate erzielt werden können.¹¹⁸ Auch in der industriellen Praxis ist das Groff-Verfahren das weiter verbreitete und somit gängigere heuristische Verfahren.¹¹⁹ Das Groff-Verfahren basiert auf den Eigenschaften der Kostenfunktionen des klassischen Losgrößenmodells und der Tatsache, dass bei Vorliegen einer optimalen Losgröße die Rüst- und Lagerkosten pro Zeit- und Mengeneinheit gleich sind.¹²⁰ Die Losgröße einer bestimmten Periode τ wird so lange um die Bedarfsmengen zukünftiger Perioden erhöht, bis der Anstieg der durchschnittlichen Lagerkosten pro Periode erstmals den durchschnittlichen Anstieg der Rüstkosten pro Periode übersteigt.¹²¹ Das Kostenkriterium C_t sowie das Vergleichskriterium V_t werden wie nachfolgend dargestellt berechnet:

$$C_t = D_{\tau+j} \cdot j \cdot (j+1) \quad (2.39)$$

$$V_t = 2 \cdot \frac{s}{h} \quad (2.40)$$

Bei jeder Iteration und der Erhöhung des Loses um den nächsten Periodenbedarf wird geprüft, ob das folgende Kriterium noch erfüllt ist:

¹¹⁸Vgl. Herrmann (2011), S. 282.

¹¹⁹So ist zum Beispiel im SAP[®]-System das Groff-Verfahren als Standardverfahren verfügbar, nicht aber das Silver-Meal-Verfahren (vgl. Dittrich (2003), S. 131 sowie Pohl (2002), S. 30).

¹²⁰Vgl. Günther u. Tempelmeier (2012), S. 213 sowie Herrmann (2011), S. 276.

¹²¹Vgl. Herrmann (2011), S. 277f. sowie Günther u. Tempelmeier (2012), S. 214.

$$C_t \leq V_t \quad \text{also} \quad D_{\tau+j} \cdot j \cdot (j+1) \leq 2 \cdot \frac{s}{h} \quad (2.41)$$

Ist diese Bedingung nicht mehr erfüllt, so ist es nicht zulässig, das Los um den vorgesehenen Periodenbedarf weiter zu erhöhen.

Im Modell SLULSP sowie in den heuristischen Verfahren werden keine Kapazitätsbeschränkungen berücksichtigt. Somit ist grundsätzlich eine unendlich große Losgröße planbar, was in der industriellen Praxis in der Regel zu unzulässigen Produktionsplänen führt, die sich nicht ohne Weiteres umsetzen lassen. Die Erweiterung des Modells SLULSP um die Berücksichtigung von beschränkten Kapazitäten sowie um die Betrachtung von mehreren Produkten führt zu dem in der Literatur als *Capacitated Lot Sizing Problem (CLSP)* bekannten Modell, welches nachfolgend beschrieben wird.¹²²

CLSP

Parameter:

- $C_{j,t}$: Verfügbare Kapazität der Bearbeitungsstation j in Periode t
 $(1 \leq j \leq J \wedge 1 \leq t \leq T)$
- $D_{k,t}$: Bedarf von Produkt k in Periode t $(1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T)$
- h_k : Lagerkostensatz einer Einheit von Produkt k $(1 \leq k \leq K)$
- s_k : Rüstkostensatz je Produkt k $(1 \leq k \leq K)$
- $tb_{k,j}$: Stückbearbeitungszeit von Produkt k an Bearbeitungsstation j
 $(1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq j \leq J)$
- $tr_{k,j}$: Rüstzeit von Produkt k an Bearbeitungsstation j $(1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq j \leq J)$

Variablen:

- $\gamma_{k,t}$: Binäre Rüstvariable von Produkt k in Periode t $(1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T)$
- $q_{k,t}$: Los von Produkt k in Periode t $(1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T)$
- $I_{k,t}$: Lagerbestand von Produkt k am Ende von Periode t
 $(1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T)$

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (s_k \cdot \gamma_{k,t} + h_k \cdot I_{k,t}) \quad (2.42)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} + q_{k,t} - D_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (2.43)$$

¹²²Vgl. Salomon (1991), S. 29ff., Tempelmeier (2008), S. 161f. sowie Herrmann (2009), S. 274f.



$$\sum_{k=1}^K (tb_{k,j} \cdot q_{k,t} + tr_{k,j} \cdot \gamma_{k,t}) \leq C_{j,t} \quad \forall 1 \leq j \leq J \wedge 1 \leq t \leq T \quad (2.44)$$

$$q_{k,t} - M \cdot \gamma_{k,t} \leq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (2.45)$$

$$I_{k,0} = 0 \wedge I_{k,T} = 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (2.46)$$

$$I_{k,t}, q_{k,t} \geq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (2.47)$$

$$\gamma_{k,t} \in \{0, 1\} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (2.48)$$

Das Modell CLSP erweitert das Modell SLULSP um die Berücksichtigung von mehreren Produkten, sodass die Parameter und Entscheidungsvariablen nun produktbezogen um den Index k erweitert werden. Durch diese Unterscheidung der Produkte k wird in der Zielfunktion (2.42) die Summe der Rüst- und Lagerkosten über den Planungszeitraum T nun über alle Produkte k minimiert. Analog ändern sich die Lagerbilanzgleichung (2.43), die Rüstbedingung (2.45), die Bedingung der Anfangs- und Endlagerbestände (2.46) sowie die Nicht-Negativitäts-Bedingung (2.47) und die Definition der binären Rüstvariablen (2.48) um eine produktbezogene Unterscheidung. Durch die Kapazitätsrestriktion (2.44) wird sichergestellt, dass die verfügbare Kapazität $C_{j,t}$ einer Bearbeitungsstation j in einer Periode t nicht überschritten wird.

Das CLSP wird als *big-bucket-Modell* bezeichnet.¹²³ Dies bedeutet, dass die Periodenlänge so groß ist, dass die Anzahl der in einer Periode produzierbaren Produkte nur durch die Anzahl der Produkte beschränkt wird.¹²⁴ So können Produktionslose von verschiedenen Produkten innerhalb einer Periode geplant werden, allerdings ist nur ein Produktionslos je Produkt und Periode zulässig.¹²⁵ Die Perioden in solchen *big-bucket-Modellen* werden auch als *Makroperioden* bezeichnet.¹²⁶ Das CLSP ist bei der Berücksichtigung von (positiven) Rüstzeiten NP-Vollständig, sodass in der Regel nur mit einer sehr hohen Laufzeit eine optimale Lösung ermittelt werden kann.¹²⁷

¹²³Vgl. Tempelmeier (2008), S. 165.

¹²⁴Vgl. Herrmann (2009), S. 276.

¹²⁵Vgl. Almeder u. Traxler (2015), S. 91.

¹²⁶Vgl. Sahling u. Helber (2010), S. 16.

¹²⁷Vgl. Maes u. a. (1991), S. 143.

2.3.3. Erweiterte dynamische einstufige Losgrößenmodelle

Neben den soeben beschriebenen sogenannten *big-bucket-Modellen* gibt es Modelle, die neben der Berechnung der (optimalen) Losgröße auch die Bearbeitungsreihenfolge an den Bearbeitungsstationen ermitteln. Hierzu ist es notwendig, dass die Periodenlänge deutlich verkleinert wird, sodass bei diesen Modellen von sogenannten *Mikroperioden* gesprochen wird.¹²⁸ In der Literatur sind solche Modelle als *small-bucket-Modelle* bekannt.¹²⁹

Ein solches *small-bucket-Modell* ist in der Arbeit von Fleischmann als *discrete lot-sizing and scheduling problem (DLSP)* beschrieben. In diesem Modell werden die Makroperioden in mehrere Mikroperioden unterteilt. Innerhalb einer Mikroperiode kann maximal ein Produkt eingeplant bzw. hergestellt werden¹³⁰ und der Rüstvorgang erfolgt immer zu Beginn einer Mikroperiode.¹³¹ Hierdurch ist es möglich, dass der Rüstzustand fortgeschrieben wird und somit kein Rüstvorgang notwendig ist, wenn innerhalb von zwei aufeinanderfolgenden Mikroperioden das gleiche Produkt bearbeitet wird.¹³² Des Weiteren ist es grundsätzlich möglich reihenfolgeabhängige Rüstkosten zu berücksichtigen.¹³³

Das Modell *Continuous Setup Lotsizing Problem (CSLP)* erweitert das DLSP dahingehend, dass ein geplantes Los nicht die gesamte Kapazität der Mikroperiode belegen muss. Somit gilt nicht mehr die *all or nothing* - Annahme des DLSP, sodass mit dem CSLP praxisrelevantere Probleme gelöst werden können.¹³⁴ Weitere Erweiterungen zu diese Modell stellen die Berücksichtigung von reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten, die Übernahme von Rüstzuständen über mehrere Perioden ohne Los¹³⁵ sowie die Durchführung von Rüstvorgängen für nachgelagerte Perioden¹³⁶ dar.¹³⁷

Eine weitere Verfeinerung der genannten Modelle ist das von Drexl u. Haase beschriebene Modell *Proportional Lotsizing and Scheduling Problem (PLSP)*.¹³⁸ Diese Erweiterung verbessert das CSLP dahingehend, dass maximal ein Rüstvorgang innerhalb der Periode zulässig ist. Wenn ein Los die Kapazität einer Mikroperiode nicht vollständig verbraucht, kann ein Los eines zweiten Produkts für die noch verfügbare Kapazität eingeplant werden.¹³⁹ Somit ist es möglich maximal zwei unterschiedliche Produkte innerhalb einer Mikrope-

¹²⁸Üblicherweise repräsentieren solche Mikroperioden Stunden oder Schichten, in denen nur ein Rüstvorgang auf der Bearbeitungsstation stattfinden kann (vgl. Almeder u. Traxler (2015), S. 96).

¹²⁹Vgl. Drexl u. Haase (1995), S. 75, Tempelmeier (2008), S. 173 sowie Herrmann (2009), S. 276.

¹³⁰In diesem Modell liegt die sogenannte *all or nothing* - Annahme zu Grunde. Dies bedeutet, dass die notwendige Kapazität der Periode vollkommen ausgeschöpft werden muss, wenn ein Produkt in einer Mikroperiode eingeplant wird (vgl. Salomon u. a. (1991), S. 801f.).

¹³¹Vgl. Fleischmann u. Popp (1989), S. 510ff. sowie Fleischmann (1990), S. 338.

¹³²Vgl. Fleischmann (1990), S. 339.

¹³³Vgl. Fleischmann (1994), S. 396ff. sowie Tempelmeier (2008), S. 173.

¹³⁴Vgl. Drexl u. Kimms (1997), S. 226.

¹³⁵Wird in einer Periode kein Los eingeplant, so kann der Rüstzustand für die darauffolgenden Perioden weiter fortgeschrieben werden, bis wieder ein Los geplant wird.

¹³⁶Hierbei ist es möglich, dass in Perioden, in denen kein Los geplant wurde, ein Rüstvorgang für das in der nächsten Periode geplante Los stattfindet. Hierdurch kann die verfügbare Kapazität in der Periode ohne Los für einen Rüstvorgang verwendet werden.

¹³⁷Vgl. Salomon u. a. (1997), S. 498 sowie Gupta u. Magnusson (2005), S. 731.

¹³⁸Vgl. Haase (1994), S. 26ff. sowie Drexl u. Haase (1995), S. 74f.

¹³⁹Vgl. Drexl u. Kimms (1997), S. 226f.



riode zu fertigen. Ein solches zweites Los eines anderen Produkts kann dann eingeplant werden, wenn in einer Mikroperiode t ein Los für ein Produkt A geplant wird und das erste Los in der Folgeperiode $(t + 1)$ ebenfalls ein Los für Produkt A ist. Somit ist zu Beginn der Mikroperiode kein Rüstvorgang notwendig und nach Abschluss des ersten Loses von Produkt A in der Mikroperiode $t + 1$ kann für ein Produkt B umgerüstet und dieses ebenfalls innerhalb der Mikroperiode $t + 1$ eingeplant werden.¹⁴⁰ Analog zum Modell CSLP können die Rüstzustände über mehrere Perioden (auch ohne Los) hinweg fortgeschrieben werden, sodass bei zwei aufeinanderfolgenden Losen des gleichen Produkts keine zusätzlichen Rüstkosten bzw. Rüstzeiten anfallen. Der Lösungsraum zulässiger Lösungen des DLSP wird durch die beschriebenen Erweiterungen zum Modell CSLP und durch die Erweiterung zum Modell PLSP jeweils verkleinert. Somit kann eine optimale Lösung zum Modell DLSP nie besser sein als eine optimale Lösung des Modells CSLP, welches nie besser sein kann als eine optimale Lösung des Modells PLSP.¹⁴¹

Eine weitere Variante bzw. Erweiterung der soeben genannten Modelle ist in der Arbeit von Fleischmann u. Meyr beschrieben. Hier wird das Modell *General Lotsizing and Scheduling Problem (GLSP)* diskutiert, welches durch die Verwendung von zwei unterschiedlichen Periodenrastern sowohl auf Basis von Makro- als auch Mikroperioden eine Losgrößenplanung ermöglicht. Hierbei werden die dynamische Nachfrage sowie die Lagerkosten auf der Ebene von Makroperioden und, innerhalb dieser Makroperioden, auf der Ebene von Mikroperioden eine Planung und Abbildung der Rüstvorgänge ermöglicht.¹⁴² Die Anzahl der Mikroperioden innerhalb einer Makroperiode kann über einen Parameter gesteuert bzw. definiert werden.¹⁴³

2.3.4. Schwächen und Nachteile der beschriebenen Modelle

Basierend auf den Überlegungen von Harris zur Optimierung des Zielkonflikts zwischen den Rüst- und Lagerkosten haben sich eine Vielzahl an Modellen entwickelt. Eine grundsätzliche Unterscheidung kann aufgrund der Periodengröße erfolgen, sodass zwischen *big-bucket-* und *small-bucket-Modellen* differenziert wird.

Big-bucket-Modelle verwenden zur Planung sogenannte Makroperioden. Diese Modelle bestimmen die Produktionsmengen der einzelnen Perioden ohne eine Reihenfolge der Bearbeitung auf den Ressourcen innerhalb einer Periode vorzugeben. Die tatsächliche Reihenfolge der Bearbeitung wird in den nachfolgenden Planungsschritten bestimmt. Grundsätzlich sind die Modellvarianten ohne Berücksichtigung von Kapazitäten sowie die heuristischen Verfahren kritisch zu bewerten, da durch die Vernachlässigung von knappen Kapazitäten unzulässige Produktionspläne entstehen können. Trotzdem zeigt sich, dass ungeachtet der Vielzahl an Forschungsbemühungen und Modellen, in der industriellen Praxis sehr häufig einfache Heuristiken verwendet werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass

¹⁴⁰Vgl. Drexl u. Haase (1995), S. 75.

¹⁴¹Vgl. Drexl u. Haase (1995), S. 76 sowie Tempelmeier (2008), S. 174.

¹⁴²Vgl. Tempelmeier (2008), S. 181.

¹⁴³Vgl. Drexl u. Kimms (1997), S. 227.

bei vorliegenden Unsicherheiten¹⁴⁴ oder ungenauen Planungsparametern oft auch eine mathematisch optimale Lösung nicht ohne Weiteres umgesetzt werden kann und der Aufwand eine solche Lösung zu ermitteln dem Nutzen nicht gerecht wird. Insbesondere bei mehrstufigen Erzeugnisstrukturen steigt der Aufwand ein mehrstufiges Losgrößenproblem¹⁴⁵ zu lösen exponentiell an, sodass mit deutlich einfacheren Methoden¹⁴⁶ eine Planung in der industriellen Praxis erfolgt.

In den beschriebenen Ansätzen und Modellen der *small-bucket-Modelle* wird neben der Festlegung der Losgröße auch eine Vorgabe der Bearbeitungsreihenfolge der Lose bestimmt. Hierdurch ist es möglich eine Verzahnung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung zu realisieren. Solche Mikroperiodenmodelle sind grundsätzlich für eine kurzfristige Feinplanung geeignet, allerdings können aufgrund des hohen Detaillierungsgrades unvorhergesehene Ereignisse, wie zum Beispiel Maschinenausfälle oder Eilaufträge, noch schlechter als bei den *big-bucket-Modellen* berücksichtigt werden.¹⁴⁷ Analog zu den *big-bucket-Modellen* ist auch bei der Erweiterung der *small-bucket-Modelle* zur Mehrstufigkeit eine exponentiell steigende Komplexität zu verzeichnen, was den Einsatz in der industriellen Praxis zusätzlich erschwert.¹⁴⁸

Das eingangs beschriebene grundsätzliche Problem von belastungsabhängigen Durchlaufzeiten kann durch die beschriebenen Modelle nicht gelöst werden. Diese nicht linearen Durchlaufzeiten führen dazu, dass die verfügbaren Kapazitäten überschätzt und die im Rahmen der Losgrößenplanung erstellten Produktionspläne bei der Umsetzung und Feinplanung unzulässig werden können. Trotz der Integration von Entscheidungen der Reihenfolgeplanung im Rahmen der *small-bucket-Modelle* erfolgt keine ausreichende Berücksichtigung der nicht linearen Abhängigkeiten. Zudem sind grundsätzlich die Einsatzgebiete solcher *small-bucket-Modelle* primär im Bereich der Mehrprodukt-Fließproduktion angesiedelt und nicht in Werkstattproduktionssystemen, wie es in dieser Arbeit als zugrundeliegendes Produktionssystem¹⁴⁹ verwendet wird.¹⁵⁰

¹⁴⁴Solche Unsicherheiten können unter anderem zum Beispiel Bedarfsunsicherheiten oder Maschinenausfälle sein.

¹⁴⁵Wie zum Beispiel das *Multi Level Capacitated Lot-Sizing Problem (MLCLSP)*.

¹⁴⁶Zum Beispiel durch Heuristiken wie dem Groff-Verfahren.

¹⁴⁷Vgl. Drexl u. Haase (1995), S. 74 sowie Almeder u. Traxler (2015), S. 96.

¹⁴⁸Eine solche Erweiterung zur Mehrstufigkeit zum Beispiel des GLSP zum *General Lot-sizing and Scheduling Problem for Multiple production Stages (GLSPMS)* ist in der Arbeit von Seeanner u. Meyr beschrieben (vgl. Seeanner u. Meyr (2013), S. 37ff.). Eine Erweiterung des PLSP zum *Multi Level Proportional Lot Sizing Problem (MLPLSP)* ist in der Arbeit von Almeder u. Traxler dargestellt (vgl. Almeder u. Traxler (2015), S. 97).

¹⁴⁹Das in dieser Arbeit zugrundeliegende Produktionssystem wird im Detail in Kapitel 4 beschrieben.

¹⁵⁰Vgl. Tempelmeier (2008), S. 174.



3. Clearing Funktionen

Das Konzept einer nicht linearen Funktion zur Beschreibung der Ausbringungsmenge einer Ressource in Abhängigkeit von der Auslastung dieser Ressource wurde bereits von Srinivasan u. a. und Karmarkar Ende der 80er Jahre in wissenschaftlichen Veröffentlichungen diskutiert. Seitdem wurde eine Vielzahl von wissenschaftlichen Publikationen zu diesem Themenbereich der Clearing Funktion veröffentlicht, die die Ermittlung einer solchen Funktion über analytische und simulationsbasierte Ansätze und Methoden diskutierten. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird die Methodik der Simulation verwendet, um eine Clearing Funktion zu bestimmen bzw. aufzustellen. Die in wissenschaftlichen Publikationen diskutierten Ansätze einer simulationsgestützten Ermittlung der Clearing Funktion werden beleuchtet. Anschließend wird das im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelte Verfahren zur Bestimmung von produktspezifischen Clearing Funktionen durch Langzeitsimulationsstudien vorgestellt und von den in der Literatur bekannten Verfahren abgegrenzt.

3.1. Konzept der Clearing Funktionen

Um die nicht linearen Abhängigkeiten zwischen der Arbeitslast im Produktionssystem und der Ausbringungsmenge des Produktionssystems abbilden zu können, wurden sogenannte Clearing Funktionen entwickelt. Eine Clearing Funktion gibt an, welche Ausbringungsmenge bei einem gegebenen *work in process (WIP)* - Bestand¹ erreicht werden kann. Die aus der Literatur bekannten Arten von Clearing Funktionen sind in Abbildung 3.1 dargestellt und werden nachfolgend beschrieben.

Die Funktion *Fixed Capacity* beschreibt eine vom WIP-Bestand W unabhängige maximale Ausbringungsmenge X . Diese ist ebenfalls unabhängig von den Durchlaufzeiten, sodass eine Produktion unabhängig vom WIP-Bestand erfolgt. Die Funktion *Linear* beschreibt einen linearen Zusammenhang zwischen dem WIP-Bestand W und der Ausbringungsmenge X , sodass mit einer definierten Steigung α gilt:²

$$X = \alpha \cdot W \tag{3.1}$$

¹Der *work in process* Bestand wird als „jene Menge (oder der Wert) an Einheiten bezeichnet, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem Prozess befinden“ (Kummer u. a. (2009), S. 179). Ferner wird der WIP-Bestand als „Bestand, der zwischen zwei Lagerpositionen (meist zwischen Eingangs- und Produktionslager) unterwegs ist und sich im Produktionsprozess mit einer entsprechenden Wertschöpfung befindet“ (Loukmidis (2006), S. 838) beschrieben.

²Vgl. Graves (1986), S. 531.

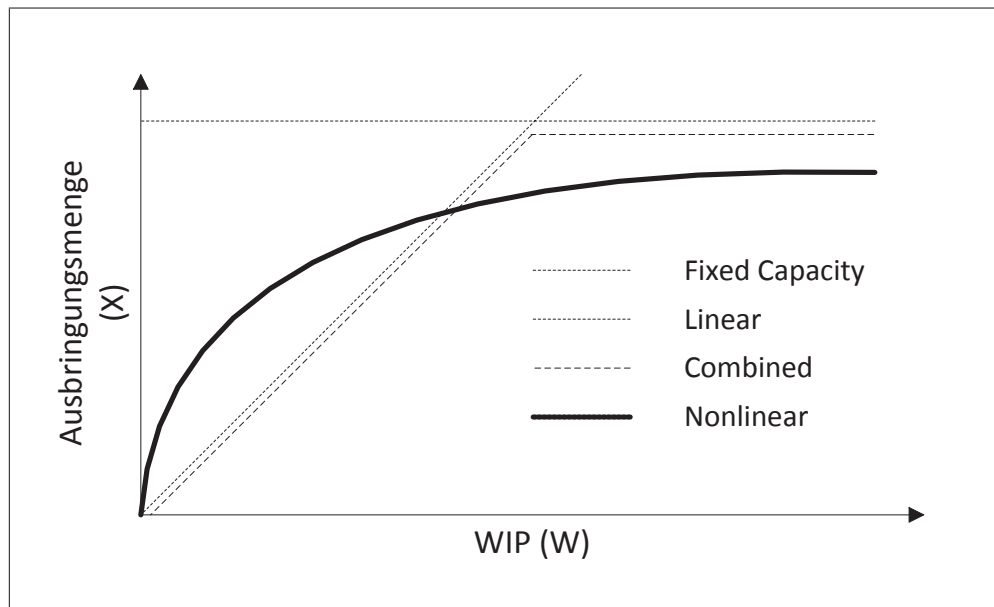


Abbildung 3.1.: Arten von Clearing Funktionen (Quelle der Abbildung: Karmarkar (1989), S. 108f.).

Hierbei wird von einer konstanten und festen Durchlaufzeit $\frac{1}{\alpha}$ ausgegangen, welche bei allen Auslastungen realisiert werden kann.³ Um bei unendlich steigendem WIP-Bestand W eine unendlich steigende Ausbringungsmenge X zu vermeiden, gibt die Funktion *Combined* eine maximale Ausbringungsmenge im Sinne einer Kapazitätsgrenze C vor:

$$X = \text{Max}(\alpha \cdot W, C) \quad (3.2)$$

Srinivasan u. a. und Karmarkar beschreiben die nicht linearen Abhängigkeiten zwischen dem WIP-Bestand W und der Ausbringungsmenge X mit ihrer Funktion *Nonlinear*. Hierbei basiert die von Srinivasan u. a. beschriebene funktionale Form auf folgender Funktionsvorschrift:⁴

$$f(W) = K_1 \cdot (1 - e^{-K_2 \cdot W}) \quad (3.3)$$

Karmarkar hat zur Bestimmung der Clearing Funktion eine alternative Funktionsvorschrift aufgestellt:⁵

$$f(W) = \frac{K_1 \cdot W}{K_2 + W} \quad (3.4)$$

In den Funktionsvorschriften (3.3) und (3.4) gibt der Parameter K_1 die maximal mögliche Ausbringungsmenge und der Parameter K_2 die Krümmung der Clearing Funktion an.

³Vgl. Kacar (2012), S. 16.

⁴Vgl. Srinivasan u. a. (1988).

⁵Vgl. Karmarkar (1989), S. 114.

Analytisch begründet sich die Clearing Funktion aus der Warteschlangentheorie. Zur Unterscheidung unterschiedlicher Wartesysteme wird die Notation nach Kendall⁶ verwendet. Basierend auf einem M|G|1-Wartesystem⁷ mit einem bekannten Mittelwert μ_b und einer bekannten Standardabweichung σ_b des Bearbeitungsprozesses b sowie einer gegebenen maximalen Kapazität C , kann eine erwartete Ausbringungsmenge $E(X_t)$ unter Berücksichtigung eines erwarteten WIP-Bestands $E(W_t)$ je Periode t (mit $1 \leq t \leq T$) wie folgt analytisch berechnet werden:⁸

$$E(X_t) = \frac{(C + k + E(W_t)) - \sqrt{C^2 + 2 \cdot C \cdot k + k^2 - 2 \cdot C \cdot E(W_t) + 2 \cdot k \cdot E(W_t) + E(W_t)^2}}{2}$$

$$\text{mit} \quad k = \frac{\mu_b \cdot \sigma_b^2}{2} + \frac{1}{2 \cdot \mu_b} \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (3.5)$$

Eine solche analytische Berechnung der Clearing Funktion gilt nur für ein System, welches sich in einem stationären Zustand befindet. Zudem muss der Auftragsankunftsprozess einer Exponentialverteilung folgen. In einem realen Produktionssystem ist in der Regel nicht von solchen Voraussetzungen auszugehen. Missbauer schlägt aus diesem Grund vor, die Gleichung (3.5) als Regressionsterm zu verwenden, um aus empirischen Daten die Parameter k und C zu ermitteln.⁸

Asmundsson u. a. bestimmen, basierend auf einem G|G|1-Wartesystem mit bekanntem Mittelwert und Standardabweichung der Zwischenankunftszeiten a ($\mu_a \wedge \sigma_a$) und Bearbeitungszeiten b ($\mu_b \wedge \sigma_b$), den WIP-Bestand W sowie, nach Umformung der Gleichung, die Auslastung p der Ressource, wie nachfolgend durch die Formeln (3.6) und (3.7) beschrieben:⁹

$$W = \frac{v_a^2 + v_b^2}{2} \cdot \frac{p^2}{(1-p)} + p \quad \text{mit} \quad v_a^2 = \frac{\sigma_a}{\mu_a} \wedge v_b^2 = \frac{\sigma_b}{\mu_b} \quad (3.6)$$

Umformung nach p :

$$p = \frac{\sqrt{(W+1)^2 + 4 \cdot W \cdot (c^2 - 1)} - (W+1)}{2 \cdot (c^2 - 1)} \quad \text{mit} \quad c = \frac{v_a^2 + v_b^2}{2} \quad (3.7)$$

Nach Asmundsson u. a. kann die Auslastung p als Ersatzgröße für die Ausbringungsmenge X angesehen werden, sodass hierdurch der Zusammenhang zwischen dem WIP-Bestand W und der Ausbringungsmenge X beschrieben ist.⁹

⁶In der von David Georg Kendall entwickelten Notation erfolgt die Darstellung der notwendigen Informationen zu einem Wartesystem in einer definierten Reihenfolge durch Buchstaben und Ziffern. So beschreibt die Notation A|B|X durch A die statistische Verteilung der Zwischenankunftszeiten, durch B die statistische Verteilung der Servicezeiten und durch X die Anzahl identischer Maschinen bzw. Stationen (vgl. Zimmermann (2008), S. 403 und Neumann u. Morlock (2004), S. 665).

⁷Über den Buchstaben M wird ein Ankunftsprozess definiert, der einer Exponentialverteilung folgt. Der Buchstabe G deutet eine beliebige Verteilung an (vgl. Medhi (2003), S. 51).

⁸Vgl. Missbauer (2002), S. 707.

⁹Vgl. Asmundsson u. a. (2009), S. 144.



Die beschriebenen analytischen Modelle zur Bestimmung der Clearing Funktion und somit zur Abbildung des Zusammenhangs zwischen dem WIP-Bestand und der Ausbringungsmenge basieren auf einfachen Warteschlangenmodellen mit einer einzelnen Bearbeitungsstation. In industriellen Produktionssystemen sind in der Regel eine Vielzahl an Bearbeitungsstationen vorhanden, sodass aufgrund der Bearbeitungsreihenfolge der Produkte gegenseitige Abhängigkeiten existieren. Simulationsexperimente zeigen, dass die Dynamiken in solchen Produktionssystemen detailliert abzubilden sind und auch Fälle, in denen kein stationärer Zustand erreicht werden kann, analysiert werden müssen.¹⁰ Die Formulierung solcher Warteschlangennetzwerke, welche die komplexen Strukturen des Produktionssystems und die vorliegende Dynamik des Materialflusses abbildet, ist sehr komplex und oft nicht ohne Weiteres möglich.¹¹ Aus diesem Grund haben sich Ansätze entwickelt, welche durch den Einsatz von Simulationsmodellen eine Clearing Funktion bestimmen. Solche simulationsbasierten Ansätze werden im Folgenden näher beschrieben und im Rahmen dieser Forschungsarbeit als zentrales Konzept zur Ermittlung von Clearing Funktionen verwendet.

3.2. Simulationsgestützte Ermittlung von Clearing Funktionen

Im Allgemeinen kann das Vorgehen zur simulationsgestützten Ermittlung einer Clearing Funktion in drei Schritte gegliedert werden (siehe Abbildung 3.2). Zunächst wird ein Simulationsmodell benötigt, welches das Produktionssystem hinreichend genau abbildet. Insbesondere die Bearbeitung von freigegebenen Aufträgen gemäß den produktspezifischen Arbeitsplänen ist möglichst exakt abzubilden, um die Abhängigkeiten des Bearbeitungsprozesses sowie der Kapazitätsbelastungen der Bearbeitungsstationen ermitteln zu können. Basierend auf diesem Simulationsmodell sind die Abhängigkeiten zwischen dem WIP-Bestand und der Ausbringungsmenge zu ermitteln und entsprechende Daten zu generieren bzw. zu messen. Anhand dieser gemessenen Daten ist der funktionale Zusammenhang zu ermitteln und eine Clearing Funktion zu bestimmen. Prinzipiell ist eine solche Clearing Funktion einmalig aufzustellen, sodass der Aufwand zur Ermittlung nur im Vorfeld der Planung anfällt und aufwendige Simulationen während der Planung somit nicht notwendig sind. Allerdings ist zu beachten, dass, sofern sich im Produktionssystem Änderungen¹² ergeben, eine erneute Ermittlung durchzuführen ist, um den Abhängigkeiten des Produktionssystems adäquat durch eine neue, den Gegebenheiten aktualisierte und angepasste Clearing Funktion gerecht zu werden.¹³

¹⁰Vgl. Missbauer (2002), S. 716.

¹¹Vgl. Haskose u. a. (2002), S. 280 und Pahl u. a. (2007), S. 316.

¹²Solche Änderungen sind z. B. das Hinzufügen von weiteren Bearbeitungsstationen oder wenn der Bearbeitungsprozesse und die Arbeitspläne geändert werden.

¹³Vgl. Asmundsson u. a. (2006), S. 100.

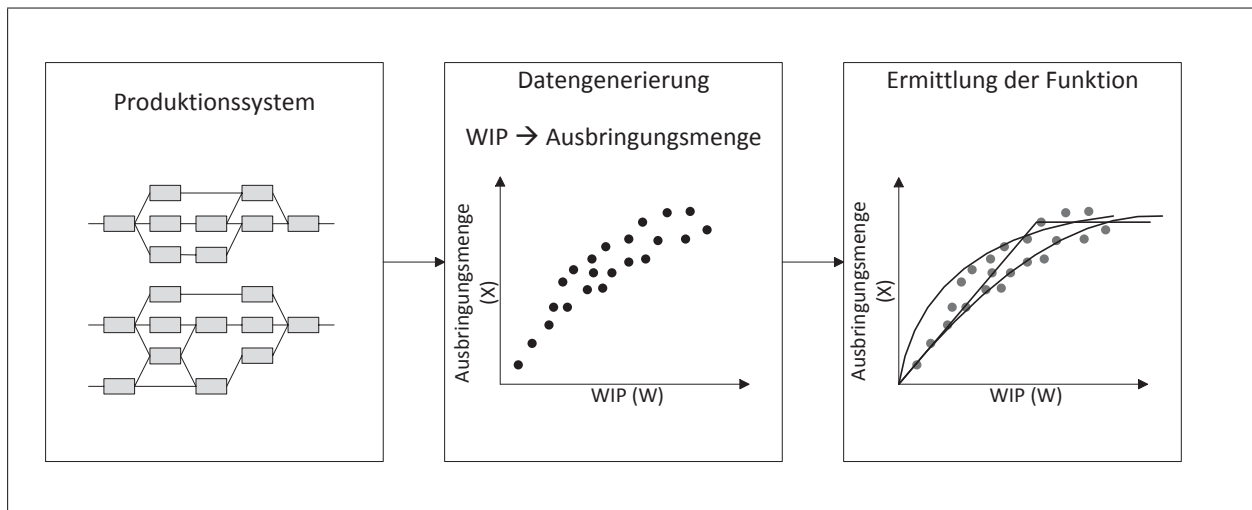


Abbildung 3.2.: Grundsätzliches Vorgehen zur simulationsgestützten Ermittlung einer Clearing Funktion.

3.2.1. Aggregierte Ansätze in der Literatur

Die Ermittlung von Clearing Funktionen unter Verwendung eines Simulationsmodells ist in der Literatur weit verbreitet. Insbesondere auf Basis des von Kayton u. a.¹⁴ beschriebenen Produktionssystems bzw. Simulationsmodells werden in einer Reihe von wissenschaftlichen Arbeiten Clearing Funktionen ermittelt.¹⁵ Hierbei werden drei unterschiedliche Produkte¹⁶ gefertigt, welche auf insgesamt 11 verschiedenen Bearbeitungsstationen bearbeitet werden müssen.¹⁷ Die Bearbeitungszeiten werden über eine statistische Verteilung abgebildet.¹⁸ Die hierbei verwendeten Parameter zur Spezifizierung der Verteilung sind je Bearbeitungsstation definiert und unabhängig von dem zu bearbeitenden Produkt. Von den insgesamt 11 Bearbeitungsstationen sind zwei Bearbeitungsstationen von Maschinenausfällen betroffen. Das Auftreten sowie die Dauer eines Maschinenausfalls folgen ebenfalls einer statistischen Verteilung.¹⁹ In Kacar u. a. wird ein alternatives Produktionssystem bzw. Simulationsmodell betrachtet, welches zwei Produkte an 200 Bearbeitungsstationen fertigt. In diesem System werden die Maschinenausfälle über eine Exponentialverteilung beschrieben. Zudem sind die Bearbeitungszeiten entgegen dem soeben beschriebenen Simulationsmodell deterministisch und vorgegeben.²⁰

¹⁴Vgl. Kayton u. a. (1997).

¹⁵Siehe Asmundsson u. a. (2006), Asmundsson u. a. (2009), Kacar u. Uzsoy (2010), Kacar (2012), Kacar u. a. (2012) sowie Kacar u. Uzsoy (2014).

¹⁶Das Produktionsverhältnis dieser Produkte ist statisch und beträgt 3:1:1 (vgl. Kacar u. a. (2012), S. 112).

¹⁷Vgl. Kayton u. a. (1997), S. 51ff.

¹⁸Hierbei werden eine logarithmische Normalverteilung (vgl. Kacar u. Uzsoy (2010), S. 1702; Kacar u. a. (2012), S. 106; Kacar (2012), S. 34 sowie Kacar u. Uzsoy (2014), S. 4) als auch eine Exponentialverteilung (vgl. Asmundsson u. a. (2009), S. 152) verwendet.

¹⁹Hierbei wird eine Gamma-Verteilung (vgl. Kacar u. Uzsoy (2010), S. 1702, Kacar u. a. (2012), S. 106; Kacar (2012), S. 34 und Kacar u. Uzsoy (2014), S. 4) sowie eine Exponentialverteilung (vgl. Asmundsson u. a. (2009), S. 152) verwendet.

²⁰Vgl. Kacar u. a. (2013a), S. 606.

Die Clearing Funktionen werden für jede einzelne Bearbeitungsstation ermittelt. Hierbei ist das Ziel, den Zusammenhang zwischen dem WIP-Bestand $W_{j,t}$ und der Ausbringungsmenge $X_{j,t}$ einer Bearbeitungsstation j (mit $1 \leq j \leq J$) für eine Periode t (mit $1 \leq t \leq T$) zu ermitteln. Es gilt:

$$X_{j,t} = CF(W_{j,t}) \quad \forall 1 \leq j \leq J \wedge 1 \leq t \leq T \quad (3.8)$$

Der WIP-Bestand $W_{j,t}$, die Freigabemenge $R_{j,t}$ als auch die Ausbringungsmenge $X_{j,t}$ der Bearbeitungsstation j werden in der Einheit Anzahl Lose gemessen. Somit erfolgt eine aggregierte Betrachtung über die Mengeneinheiten, welche an einer Bearbeitungsstation fertiggestellt werden (bezeichnet als Ausbringungsmenge $X_{j,t}$) in Abhängigkeit von der Anzahl an Losen, welche die Last an der Bearbeitungsstation beschreiben (bezeichnet als WIP-Bestand $W_{j,t}$). Eine Differenzierung einzelner, individueller Lose hinsichtlich einer Losgröße erfolgt nicht, sodass alle Lose gleichwertig behandelt werden. Zudem werden der WIP-Bestand $W_{j,t}$ sowie die Ausbringungsmenge $X_{j,t}$ aggregiert über alle Produkte an dieser Bearbeitungsstation bestimmt, sodass keine Unterscheidung der jeweiligen produktspezifischen Anteile erfolgt. Auch werden die Bearbeitungszeiten über die Bearbeitungsstationen bestimmt und sind somit unabhängig von dem zu bearbeitenden Produkt sowie der Menge. Aufgrund dieser Annahmen ist hierdurch keine ausgeprägte Dynamik im Bearbeitungsprozess vorhanden. Lediglich bei der Verwendung von stochastischen Bearbeitungszeiten existiert ein stochastischer Einfluss, der allerdings für alle Produkte identisch ist, sodass die Variabilität des Produktionssystems maßgeblich durch das Vorliegen von Maschinenausfällen bestimmt wird.²¹ Ist eine Bearbeitungsstation gestört, so führt dies zu einer Verringerung der Ausbringungsmenge, was auch die nachgelagerten Bearbeitungsstationen beeinflusst, da diese leerlaufen können.

Um den WIP-Bestand $W_{j,t}$ für eine Bearbeitungsstation j und Periode t zu bestimmen, existieren in der Literatur zwei unterschiedliche Ansätze. Beim sogenannten *average WIP model* erfolgt die Ermittlung einer erwarteten Ausbringungsmenge einer Bearbeitungsstation j in einer Periode t . Dieser mittlere WIP-Bestand $\widehat{W}_{j,t}$ wird aus dem WIP-Bestand am Ende der Vorperiode $W_{j,t-1}$ sowie dem WIP-Bestand am Ende der aktuellen Periode $W_{j,t}$ gebildet. Es gilt:²²

$$\widehat{W}_{j,t} = \frac{W_{j,t} + W_{j,t-1}}{2} \quad \forall 1 \leq j \leq J \wedge 1 \leq t \leq T \quad (3.9)$$

Ein alternativer Ansatz, als *load based model* bezeichnet, betrachtet den zu Beginn der Periode erwarteten WIP-Bestand. Dieser ergibt sich aus dem WIP-Bestand am Ende der Vorperiode $W_{j,t-1}$ zuzüglich der freigegebenen Mengen $R_{j,t}$, welche in Periode t in das Produktionssystem freigegeben werden bzw. die Bearbeitungsstation j erreichen. Somit gilt:²³

$$\widehat{W}_{j,t} = W_{j,t-1} + R_{j,t} \quad \forall 1 \leq j \leq J \wedge 1 \leq t \leq T \quad (3.10)$$

²¹Vgl. Kacar u. a. (2013a), S. 606 sowie Kacar u. Uzsoy (2014), S. 4.

²²Vgl. Asmundsson u. a. (2006), S. 100 sowie Kacar u. a. (2012), S. 107.

²³Vgl. Karmarkar (1989), S. 113, Missbauer (2002), S. 711, Missbauer (2009), S. 392 sowie Kacar u. a. (2012), S. 108.

Durch eine Simulation erfolgt die Bestimmung von Ausbringungsmengen zu unterschiedlichen WIP-Beständen, sodass die Abhängigkeiten ermittelt werden können. Um unterschiedliche WIP-Bestände zu erreichen, müssen Lose in das Produktionssystem freigegeben werden. Die aus dieser Freigabe resultierenden WIP-Bestände sowie Ausbringungsmengen werden gemessen. Somit sind Freigabemengen $R_{k,t}$ je Produkt k und Periode t zu bestimmen. Die Planungsperiode umfasst eine Woche und die Freigabe der Lose erfolgt über eine Gleichverteilung über diesen Zeitraum. Abhängig von der Größe der Periode Δ_T und der Freigabemenge über alle Produkte k kann ein Zeitintervall $\Delta_{F,t}$ berechnet werden. Nach jedem Zeitintervall $\Delta_{F,t}$ wird ein Los in das Produktionssystem freigegeben.²⁴ Es gilt:

$$\Delta_{F,t} = \frac{\Delta_T}{\sum_{k=1}^K R_{k,t}} \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (3.11)$$

Müssen beispielsweise in Summe über alle Produkte 20 Mengeneinheiten freigegeben werden und beträgt die Größe der Planungsperiode 10 Zeiteinheiten, so erfolgt alle 0,5 Zeiteinheiten die Freigabe eines Loses in das Produktionssystem.

Nun werden die Freigabemengen $R_{k,t}$ so bestimmt, dass unterschiedliche Arbeitslasten im Produktionssystem generiert und die resultierenden WIP-Bestände und Ausbringungsmengen gemessen werden können. In den Arbeiten von Asmundsson u. a. (2006) und Asmundsson u. a. (2009) erfolgt die Ermittlung der Freigabemengen unter Verwendung eines Optimierungsmodells zur Auftragsfreigabe mit festen Durchlaufzeiten.²⁵ Hierbei werden Bedarfe verwendet, welche über eine Normalverteilung erzeugt werden. Der Mittelwert der Bedarfsmengen wird so gewählt, dass eine mittlere Auslastung von 90% auf der Engpassmaschine realisiert wird. Eine hohe Streuung der Bedarfe wird über einen Variationskoeffizienten von 1 erreicht. Es werden Bedarfsreihen über die Normalverteilung erzeugt, sodass für jedes Produkt k und jede Periode t ein Bedarf $D_{k,t}$ vorliegt. Insgesamt werden hierbei fünf unterschiedliche Bedarfsreihen für den gesamten Simulationshorizont T (mit $T = 70$ Perioden) bestimmt. Für jede dieser Bedarfsreihen wird ein Freigabeplan durch das Planungsmodell bestimmt, welcher durch das Simulationsmodell umgesetzt wird. Bei der Umsetzung der Freigabepläne durch die Simulation werden m unabhängige Simulationsläufe durchgeführt. Die Simulationsläufe unterscheiden sich hinsichtlich der Zufallszahlenströme, welche im Rahmen der stochastischen Bearbeitungszeiten sowie der stochastischen Maschinenausfälle angewendet werden. Als Ergebnis erhält man je Simulationslauf s , Bearbeitungsstation j und Periode t einen Messwert für den mittleren WIP-Bestand²⁶ $w_{j,t}^s$ sowie der korrespondierenden Ausbringungsmenge $x_{j,t}^s$. Durch

²⁴Vgl. Asmundsson u. a. (2006), S. 100.

²⁵Das Modell wurde im Detail in Kapitel 2.2.2 beschrieben. Die Bestimmung der zu verwendenden Durchlaufzeiten folgt unter Verwendung des Entscheidungsmodells *Integer Programming Rounding (IPR)*, welches im Detail ebenfalls in Kapitel 2.2.2 aufgezeigt wurde.

²⁶In den Arbeiten von Asmundsson u. a. wird der mittlere WIP-Bestand gemessen. Hierzu werden die Warteschlangen je Bearbeitungsstation detailliert betrachtet und jede Änderung dieser sowie der Dauer bis zur Änderung vermerkt. Hierdurch kann ein zeitabhängiger mittlerer WIP-Bestand ($w_{j,t}^m$) berechnet werden. Das Los, welches an der Bearbeitungsstation bearbeitet wird, wird ebenfalls zum WIP-Bestand hinzu gezählt (vgl. Asmundsson u. a. (2006), S. 101 und Asmundsson u. a. (2009), Anhang A).

die Verwendung des mittleren WIP-Bestands einer Periode als Grundlage der Arbeitslast folgt dieser Ansatz dem sogenannten *average WIP model* wie in Formel (3.9) dargestellt. Aus diesen Einzeldaten werden für jede Bearbeitungsstation j und Periode t über alle Simulationsläufe m die Mittelwerte gebildet, sodass jeweils die Erwartungswerte der WIP-Bestände $E(W_{j,t})$ und korrespondierenden erwarteten Ausbringungsmengen $E(X_{j,t})$ vorliegen. Es gilt:²⁷

$$E(X_{j,t}) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{s=1}^m x_{j,t}^s \wedge E(W_{j,t}) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{s=1}^m w_{j,t}^s \quad \forall 1 \leq j \leq J \wedge 1 \leq t \leq T \quad (3.12)$$

In einem alternativen Ansatz werden die Freigabemengen direkt auf Basis der Bedarfs- werte abgeleitet. Grundlage bilden hierbei Bedarfe $D_{k,t}$ je Produkt k und Periode t , welche über eine Normalverteilung generiert werden. Es werden mehrere unabhängige Bedarfs- reihen erzeugt, welche sich hinsichtlich der verwendeten Parameter der Normalverteilung unterscheiden, sodass sich hierdurch unterschiedliche mittlere Auslastungen der Engpass- maschinen ergeben.²⁸ Für den gesamten Simulationszeitraum T liegt somit für jedes Pro- dukt k und jede Periode t ein Bedarf vor.²⁹ Diese Bedarfs- werte $D_{k,t}$ werden direkt als Frei- gabemengen $R_{k,t}$ interpretiert, sodass anhand der erzeugten Bedarfsreihen entsprechende Freigabepläne entstehen. Somit gilt:

$$R_{k,t} = D_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (3.13)$$

Jeder so erzeugte Freigabeplan wird in m unabhängigen Simulationsläufen umgesetzt. Die Durchführung unabhängiger Simulationsläufe erfolgt durch die Verwendung unterschied- licher Zufallszahlenströme, analog dem soeben beschriebenen Vorgehen. Als Ergebnis er- hält man für jede Periode t , jede Bearbeitungsstation j und jeden Simulationslauf s wieder einen WIP-Bestand $w_{t,j}^s$ sowie eine korrespondierende Ausbringungsmenge $x_{t,j}^s$. Entge- gen dem Ansatz von Asmundsson u. a. werden die so ermittelten Daten direkt verwendet, sodass eine Datenwolke bestehend aus den ermittelten Einzelwerten vorliegt. Die WIP- Bestände werden bei diesem Vorgehen nach dem sogenannten *load based model* betrachtet, also auf Basis des WIP-Bestands $W_{k,t-1}$ zu Beginn einer Periode t zuzüglich der Freigabe- mengen $R_{k,t}$ in einer Periode t .³⁰

Als Ergebnis beider Ansätze erhält man Datenpunkte über die Ausbringungsmengen zu den entsprechenden WIP-Beständen. Aufgrund der vorliegenden stochastischen Einfluss- faktoren³¹ kann es hierbei vorkommen, dass identische WIP-Bestände zu unterschiedli- chen Ausbringungsmengen führen und hierdurch keine eindeutige Ausbringungsmenge

²⁷Vgl. Asmundsson u. a. (2006), S. 101.

²⁸So werden durch sieben unterschiedliche Bedarfsreihen Auslastungen an der Engpassmaschine von 50%, 60%, 70%, 77%, 87%, 94% und 99% realisiert (vgl. hierzu Kacar u. Uzsoy (2010), S. 1704, Kacar u. a. (2012), S. 111, Kacar (2012), S. 41, Kacar u. a. (2013a), S. 607 und Kacar u. Uzsoy (2014), S. 5).

²⁹Der Simulationszeitraum umfasst 52 Perioden (vgl. Kacar u. Uzsoy (2010), S. 1704, Kacar u. a. (2012), S. 110f. und Kacar u. a. (2013a), S. 607) bzw. 91 Perioden (vgl. Kacar (2012), S. 41 und Kacar u. Uzsoy (2014), S. 5).

³⁰Siehe Formel 3.10.

³¹Aufgrund der stochastischen Bearbeitungszeiten sowie Maschinenausfällen.

vorliegt. Auf Basis dieser vielen Datenpunkte ist nun in einem nachgelagerten Schritt der funktionale Zusammenhang, also die Clearing Funktion, zu ermitteln.

Asmundsson u. a. schlagen hierzu vor, die Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs über die von Srinivasan u. a. vorgeschlagene funktionale Form³² durchzuführen. Hierbei werden die zu spezifizierenden Parameter K_1 und K_2 auf Basis der gewonnenen Daten über ein Regressionsverfahren³³ bestimmt. Untersuchungen von Missbauer zeigen, dass insbesondere dann, wenn kein ausreichend stationärer Zustand vorliegt, die ermittelten Clearing Funktionen die Ausbringungsmengen überschätzen.³⁴ Besonders bei der Verwendung häufiger und langer Störungsintervalle der Bearbeitungsstationen kann es verstärkt vorkommen, dass kein ausreichend stationärer Zustand erreicht werden kann. Um diese Abweichungen zu reduzieren, verwenden Asmundsson u. a. einen Korrekturfaktor, durch welchen die ermittelte Kurve prozentual unterhalb der gemessenen Datenpunkte liegt.³⁵ In der Arbeit von Kacar u. a. konnte diese systematische Überschätzung der Ausbringungsmenge, bei Verwendung der von Srinivasan u. a. beschriebenen funktionalen Form, bestätigt werden.³⁶ Da bei der Verwendung der von Karmarkar beschriebenen funktionalen Form³⁷ eine solche Abweichung nicht festgestellt wurde, wurde diese Funktionsvorschrift in den durchgeführten Untersuchungen von Kacar u. a. bevorzugt verwendet.

Als Ergebnis dieser Messungen kann somit aus den aus der Simulation ermittelten Datenpunkten und einer Regression die funktionale Form der Clearing Funktion auf Basis der analytischen Funktionsvorschriften bestimmt werden. Diese Funktion ist nicht linear, sodass die weitere Verwendung im Rahmen eines linearen Optimierungsmodells nicht ohne Weiteres möglich ist. Aus diesem Grund erfolgt eine Approximation der Clearing Funktion durch eine Linearisierung in N Segmente.³⁸ Die Anzahl der Segmente bestimmt hierbei, wie exakt die Clearing Funktion durch die linearen Funktionen abgebildet wird. Für jedes Segment n ist die Steigung a_n sowie der Achsenabschnitt b_n zu bestimmen. Das erste lineare Segment ($n = 1$) verläuft durch den Nullpunkt, das letzte Segment ($n = N$) gibt die maximal mögliche Ausbringungsmenge an. In Abbildung 3.3 ist beispielhaft eine Linearisierung in fünf Segmente dargestellt.

Erfolgt die Messung der WIP-Bestände nach dem *load based model*, also auf Basis des WIP-Bestands zu Beginn einer Periode t zuzüglich der Freigabemenge in dieser Periode t , so zeigen die Datenpunkte nicht den erwarteten konkaven Verlauf.³⁹ Somit ist die Anwendung der funktionalen Formen von Karmarkar sowie Srinivasan u. a. bei diesen gemessenen Clearing Funktionen nicht notwendig⁴⁰. Für die Bearbeitungsstationen, welche

³²Siehe Formel 3.3.

³³Üblicherweise erfolgt hierbei die Minimierung der Summe der Fehlerquadrate (vgl. Kacar u. a. (2012), S. 110).

³⁴Vgl. Missbauer (2011), S. 404.

³⁵Die hierbei ermittelten Clearing Funktionen werden als sogenannte *konservative* Clearing Funktionen bezeichnet (vgl. Asmundsson u. a. (2009), S. 154).

³⁶Vgl. Kacar u. a. (2012), S. 110.

³⁷Siehe Formel 3.4.

³⁸Vgl. u.a. Kacar u. a. (2012), S. 107.

³⁹Vgl. Kacar u. a. (2012), S. 111 und Kacar (2012), S. 42ff.

⁴⁰Vgl. Kacar u. Uzsoy (2014), S. 5.

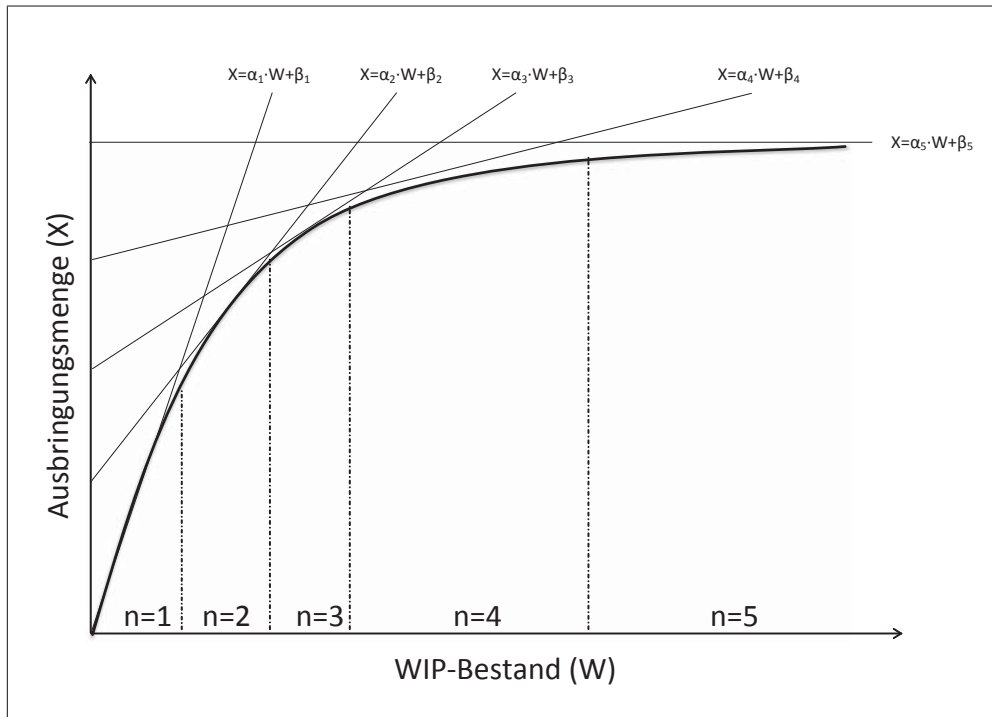


Abbildung 3.3.: Linearisierung der Clearing Funktion in fünf Segmente (Abbildung in Anlehnung an Pahl u. a. (2007), S. 318).

nicht erheblich durch die Maschinenausfälle beeinflusst werden und keine Engpassmaschine sind, zeigt sich eine lineare Abhängigkeit zwischen dem WIP-Bestand und der Ausbringungsmenge, sodass eine einfache lineare Regression auf die gesamten Daten anzuwenden ist. Bei den Bearbeitungsstationen, die von den eintretenden Maschinenausfällen betroffen oder stark ausgelastet sind, zeigt sich ein linearer Zusammenhang bis die Kapazitätsgrenze der Bearbeitungsstation erreicht ist. Für diese Bearbeitungsstationen werden die Daten in Intervalle unterteilt, sodass eine lineare Regression auf die jeweilige Teilmenge dieser Daten erfolgt.⁴¹ Das letzte lineare Segment beschreibt die maximal mögliche Ausbringungsmenge, also das Kapazitätslimit, und kann über die Periodenlänge dividiert durch die mittlere Bearbeitungszeit an dieser Bearbeitungsstation berechnet werden. Sofern an dieser Bearbeitungsstation Maschinenausfälle eintreten können, ist zusätzlich die mittlere Verfügbarkeit zu multiplizieren. Somit gilt:⁴²

$$\text{Kapazitätslimit}_j = \frac{\text{Periodenlänge}}{\text{mittlere Bearbeitungszeit}_j} \cdot \text{mittlere Verfügbarkeit}_j, \forall 1 \leq j \leq J \quad (3.14)$$

Kacar und Kacar u. Uzsoy schlagen ein iteratives Verfahren⁴³ vor, welches die Parameter der Clearing Funktion⁴⁴ modifiziert, um die durch die Verwendung der Clearing Funktion

⁴¹Vgl. Kacar u. a. (2013a), S. 608.

⁴²Vgl. Kacar (2012), S. 49f.

⁴³Dieses Verfahren wird als *Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA)* - Verfahren bezeichnet (vgl. Kacar (2012), S. 6ff. und Kacar u. Uzsoy (2014) S. 76ff.).

⁴⁴Aufgrund der Linearisierung wird die Clearing Funktion durch die segmentspezifische Steigung a_n sowie den segmentspezifischen Achsenabschnitt b_n beschrieben.

erzielten Ergebnisse zu verbessern. Die Clearing Funktion wird, wie später in Kapitel 5 beschrieben, im Rahmen eines Entscheidungsmodells zur Bestimmung von Freigabemengen eingesetzt. Die durch das Entscheidungsmodell bestimmten Freigabepläne werden durch ein Simulationsmodell umgesetzt, sodass hierdurch die Kosten sowie die erzielten Erlöse ermittelt werden können. Der prinzipielle Ablauf dieses iterativen Verfahrens ist nachfolgend skizziert:

1. Modifikation der Parameter der Clearing Funktion.
2. Anwendung der Clearing Funktion in einem Entscheidungsmodell der Auftragsfreigabe zur Ermittlung von Freigabeplänen.
3. Umsetzung der Freigabepläne durch ein Simulationsmodell und Ermittlung der erzielten Erlöse.
4. Abbruch des Verfahrens, wenn ein Abbruchkriterium erfüllt ist; sonst weiter mit Schritt 1.

Ein Abbruchkriterium ist erfüllt, wenn die maximal zulässige Anzahl an Iterationen erreicht ist oder wenn keine weiteren Verbesserungen erzielt werden können.⁴⁵ Eine eindeutige Konvergenz konnte in den Untersuchungen von Kacar u. Uzsoy nicht erzielt werden, sodass eine maximale Anzahl von 100 Iterationen angewendet wurde.⁴⁶

Durch diese iterative Anpassung der Parameter der Clearing Funktionen kann gegenüber den aus der linearen Regression bestimmten Parametern der Clearing Funktion eine Verbesserung der Ergebnisse⁴⁷ erzielt werden.⁴⁸ Durch dieses Vorgehen dient die simulationsgestützte Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem WIP-Bestand und der Ausbringungsmenge und die anschließende Ermittlung der Clearing Funktion durch eine lineare Regression, die auf den gemessenen Datenpunkten basiert, lediglich zur Bestimmung einer Anfangslösung, die iterativ modifiziert und verbessert wird.

3.2.2. Produktspezifische Ansätze in der Literatur

Neben diesen soeben aufgezeigten aggregierten Clearing Funktionen, welche den Zusammenhang zwischen dem WIP-Bestand und der Ausbringungsmenge einer Bearbeitungsstation über alle Produkte kumuliert betrachten, existieren in der wissenschaftlichen Literatur Ansätze, in welchen explizit die unterschiedlichen Produkte differenziert berücksichtigt werden. Insbesondere dann, wenn sich die Produkte hinsichtlich der notwendigen Bearbeitungszeiten und somit der Belastung der verfügbaren Kapazitäten an den Bearbeitungsstationen unterscheiden, können durch eine Aggregation wichtige Informationen und

⁴⁵Vgl. Kacar u. Uzsoy (2014), S. 7.

⁴⁶Vgl. Kacar u. Uzsoy (2014), S. 14.

⁴⁷Im Rahmen der von Kacar u. Uzsoy durchgeführten Untersuchungen wurde eine Minimierung der entstehenden Kosten angestrebt. Die hierbei berücksichtigten Kosten sind die Kosten für Fehlmengen, WIP-Bestände, Lagerbestände sowie Materialkosten. Diese Kosten werden von den erzielten Erlösen abgezogen, sodass letztendlich eine Maximierung des Gesamterlöses angestrebt wurde.

⁴⁸Vgl. Kacar u. Uzsoy (2014), S. 10.

gegenseitige Abhängigkeiten verloren gehen. Folglich führen die Ansätze der aggregierten Clearing Funktionen in Produktionssystemen mit mehreren Produkten, welche sich hinsichtlich der Bearbeitungsprozesse stark unterscheiden, zu Ungenauigkeiten.⁴⁹ Somit ist ein disaggregierter Ansatz und eine explizite Unterscheidung der individuellen Produkte notwendig, um mittels des Konzeptes der Clearing Funktionen diese Abhängigkeiten akkurat berücksichtigen zu können. Die Daten der Clearing Funktion werden für jedes einzelne Produkt k ermittelt. Entgegen der aggregierten Ansätze erfolgt somit eine explizite Unterscheidung der produktspezifischen Anteile der WIP-Bestände $W_{j,t,k}$ sowie Ausbringungsmengen $X_{j,t,k}$ einer Bearbeitungsstation j , einer Periode t sowie dem Produkt k . Somit gilt:⁵⁰

$$X_{j,t,k} = CF(W_{j,t,k}) \quad \forall 1 \leq j \leq J \wedge 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq k \leq K \quad (3.15)$$

Die Daten zu den produktspezifischen WIP-Beständen $W_{j,t,k}$ und Ausbringungsmengen $X_{j,t,k}$ werden, analog zu den aggregierten Ansätzen, über ein Simulationsmodell bestimmt. In den Forschungsarbeiten von Kacar u. Uzsoy sowie Kacar erfolgt dies ebenfalls über das von Kayton u. a. beschriebene Simulationsmodell⁵¹. Auch hierbei werden durch die Verwendung von sieben unterschiedlichen Bedarfsszenarien unterschiedliche Systembelastungen⁵² erzeugt. Die Freigabemenge wird auf Basis des Bedarfs bestimmt, sodass diese, analog zu Formel (3.13), bestimmt wird. Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, erfolgt hierbei die Freigabe einer Anzahl von Losen mit identischen Auftragsgrößen, welche durch eine Gleichverteilung gesteuert über die gesamte Periode freigegeben werden. Ebenfalls werden über stochastische Verteilungen die Bearbeitungszeiten sowie die Maschinenausfälle abgebildet.⁵³ Somit ist auch für diese Untersuchungen die Variabilität des Produktionssystems aufgrund der stochastischen Bearbeitungszeiten sowie der Maschinenausfälle gegeben. In jeder Periode t wird für jedes Produkt k und jede Bearbeitungsstation j der WIP-Bestand $W_{j,t,k}$ sowie die Ausbringungsmenge $X_{j,t,k}$ gemessen. Aus diesen Datenpunkten sind produktspezifische Clearing Funktionen zu ermitteln.

In den Arbeiten von Kacar u. Uzsoy und Kacar werden hierzu drei unterschiedliche Modelle zur multiplen linearen Regression vorgestellt. Hierbei gilt es, die Regressionparameter $\mu_{j,k}$ und $\beta_{j,k}^n$ auf Basis der simulationsbasierten Daten zu bestimmen. Diese drei Modelle⁵⁴ unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Variablen und sind nachfolgend exemplarisch dargestellt.⁵⁵

⁴⁹Vgl. Albey u. a. (2014), S. 4.

⁵⁰Vgl. Kacar (2012), S. 39.

⁵¹Das Simulationsmodell wurde in Kapitel 3.2.1 skizziert.

⁵²Diese Bedarfsszenarien führen zu einer mittleren Auslastung der Engpassmaschine von 49%, 60%, 70%, 77%, 87%, 94% und 99%.

⁵³Die Bearbeitungszeiten werden über eine logarithmische Normalverteilung beschrieben. Die Parameter der Verteilung sind für jede Bearbeitungsstation j individuell, gelten aber an dieser Bearbeitungsstation für alle Produkte k (vgl. Kacar (2012), S. 33f.).

⁵⁴Vgl. Kacar u. Uzsoy (2010), S. 1704 und Kacar (2012), S. 64.

⁵⁵In den Untersuchungen von Kacar u. Uzsoy und Kacar werden drei unterschiedliche Produkte betrachtet. Die dargestellten Regressionsmodelle zeigen exemplarisch die Ermittlung der Ausbringungsmenge für Produkt 1.

- Regressionsmodell 1:

$$X_{j,t,1} = \mu_{j,1} + \beta_{j,1}^1 \cdot R_{j,t,1} + \beta_{j,1}^2 \cdot W_{j,t-1,1} + \beta_{j,1}^3 \cdot R_{j,t,2} + \beta_{j,1}^4 \cdot W_{j,t-1,2} + \beta_{j,1}^5 \cdot R_{j,t,3} + \beta_{j,1}^6 \cdot W_{j,t-1,3} \quad \forall 1 \leq j \leq J \wedge 1 \leq t \leq T \quad (3.16)$$

- Regressionsmodell 2:

$$X_{j,t,1} = \mu_{j,1} + \beta_{j,1}^1 \cdot R_{j,t,1} + \beta_{j,1}^2 \cdot W_{j,t-1,1} + \beta_{j,1}^3 \cdot R_{j,t,2} + \beta_{j,1}^4 \cdot W_{j,t-1,2} + \beta_{j,1}^5 \cdot R_{j,t,3} + \beta_{j,1}^6 \cdot W_{j,t-1,3} + \beta_{j,1}^7 \cdot R_{j,t-1,1} \quad \forall 1 \leq j \leq J \wedge 1 \leq t \leq T \quad (3.17)$$

- Regressionsmodell 3:

$$X_{j,t,1} = \mu_{j,1} + \beta_{j,1}^1 \cdot R_{j,t,1} + \beta_{j,1}^2 \cdot W_{j,t-1,1} + \beta_{j,1}^3 \cdot R_{j,t,2} + \beta_{j,1}^4 \cdot W_{j,t-1,2} + \beta_{j,1}^5 \cdot R_{j,t,3} + \beta_{j,1}^6 \cdot W_{j,t-1,3} + \beta_{j,1}^7 \cdot R_{j,t-1,1} + \beta_{j,1}^8 \cdot R_{j,t-1,2} + \beta_{j,1}^9 \cdot R_{j,t-1,3} \quad \forall 1 \leq j \leq J \wedge 1 \leq t \leq T \quad (3.18)$$

Die jeweiligen Regressionsmodelle unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Informationen und Parameter. Im ersten Regressionsmodell wird die Ausbringungsmenge $X_{j,t,1}$ von Produkt 1 an einer Maschine j und für eine Periode t auf Basis der Freigabemengen $R_{j,t,k}$ der Periode t sowie dem WIP-Bestand $R_{j,t-1,k}$ am Ende der Vorperiode $t - 1$ aller weiteren Produkte k bestimmt. Das zweite Regressionsmodell verwendet zusätzlich die Freigabemenge $R_{j,t-1,1}$ von Produkt 1 der Vorperiode $t - 1$. Darüber hinaus werden im dritten Regressionsmodell die Freigabemengen $R_{j,t-1,k}$ der Vorperiode $t - 1$ aller weiteren Produkte k berücksichtigt, was die Anzahl der Regressionsparameter $\beta_{j,k}^n$ entsprechend erhöht.

Da in den Messungen von Kacar u. Uzsoy und Kacar nur sehr selten Durchlaufzeiten größer als zwei Perioden aufgetreten sind, wurden nur die Freigabemengen der direkten Vorperiode betrachtet.⁵⁶ Somit ist problemspezifisch und abhängig von den auftretenden Durchlaufzeiten das Regressionsmodell zu erweitern, was eine erneute Erhöhung der Komplexität zur Folge hat. Dies wird auch durch die von Kacar u. Uzsoy und Kacar durchgeführten Simulationsstudien belegt. In den Fällen, in denen eine geringe Auslastung vorliegt, führt das Regressionsmodell 1 zu den besten Ergebnissen. Bei einer höheren Auslastung zeigt sich, dass durch die zusätzliche Berücksichtigung der Freigabemengen der Vorperiode bessere Ergebnisse erzielt werden können. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einer höheren Auslastung die Durchlaufzeiten steigen und somit weitere Informationen berücksichtigt werden müssen.

⁵⁶Vgl. Kacar (2012), S. 65.



Auch in der Arbeit von Albey u. a. wird ein Ansatz zur Ermittlung von produktspezifischen Clearing Funktionen aufgezeigt. Die von Karmarkar beschriebene funktionale Form⁵⁷ wird erweitert und sieben unterschiedliche funktionale Formen produktspezifischer Clearing Funktionen (MDCF)⁵⁸ werden vorgestellt. Diese sieben funktionalen Formen sind nachfolgend dargestellt.⁵⁹

- MDCF 1:

$$X_k = \frac{\left(C - \sum_{i=1}^{K \setminus k} X_i \right) \cdot \bar{W}_k}{M_k + \bar{W}_k} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (3.19)$$

- MDCF 2:

$$X_k = \frac{\left(C - \sum_{i=1}^{K \setminus k} X_i \right) \cdot \bar{W}_k}{M_k - b_k \cdot \left(\sum_{i=1}^{K \setminus k} X_i \right) + \bar{W}_k} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (3.20)$$

- MDCF 3:

$$X_k = \frac{\left(C - \alpha_k \cdot \sum_{i=1}^{K \setminus k} X_i \right) \cdot \bar{W}_k}{M_k - b_k \cdot \left(\sum_{i=1}^{K \setminus k} X_i \right) + \bar{W}_k} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (3.21)$$

- MDCF 4:

$$X_k = \frac{\left(C - \sum_{i=1}^{K \setminus k} \alpha_i \cdot X_i \right) \cdot \bar{W}_k}{M_k - \left(\sum_{i=1}^{K \setminus k} b_i \cdot X_i \right) + \bar{W}_k} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (3.22)$$

- MDCF 5:

$$X_k = \frac{\left(C - \sum_{i=1}^{K \setminus k} \alpha_i \cdot \bar{W}_i \right) \cdot \bar{W}_k}{M_k - \left(\sum_{i=1}^{K \setminus k} b_i \cdot \bar{W}_i \right) + \bar{W}_k} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (3.23)$$

⁵⁷Siehe Formel 3.4.

⁵⁸Diese werden als *multi-dimensional clearing functions* (MDCF) bezeichnet.

⁵⁹Vgl. Albey u. a. (2014), S. 7.

- MDCF 6:

$$X_k = \frac{\alpha_k \cdot \bar{W}_k + b_k \cdot \sum_{i=1}^{K \setminus k} \bar{W}_i}{M_k + c_k \cdot \bar{W}_k + d_i \cdot \sum_{i=1}^{K \setminus k} \bar{W}_i} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (3.24)$$

- MDCF 7:

$$X_k = \frac{\sum_{i=1}^K (\alpha_i \cdot \bar{W}_k)}{M_k + \sum_{i=1}^K (b_i \cdot \bar{W}_i)} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (3.25)$$

Durch die Parameter \bar{W}_k wird der mittlere WIP-Bestand⁶⁰ eines Produkts k und durch den Parameter C die verfügbare Kapazität der Bearbeitungsstation beschrieben. In den ersten vier funktionalen Formen (MDCF 1 bis MDCF 4) wird die Ausbringungsmenge eines Produkts k unter Berücksichtigung der Ausbringungsmengen der weiteren Produkte ermittelt. So wird konkret in MDCF 1 die verfügbare Kapazität C durch die Ausbringungsmengen der anderen Produkte reduziert. Zusätzlich erfolgt in MDCF 2 eine Reduktion des Faktors M_k , welcher die Krümmung der Clearing Funktion, um die Ausbringungsmengen der anderen Produkte durch die Verwendung eines Skalierungsfaktors b_k , beeinflusst. Ein weiterer Skalierungsfaktor α_k wurde in MDCF 3 integriert, um die Reduktion der verfügbaren Kapazität C aufgrund der Ausbringungsmengen der weiteren Produkte anpassen zu können. In MDCF 4 erfolgt eine Unterscheidung der Skalierungsfaktoren b_i und α_i mit $i \in K \setminus k$. In den weiteren funktionalen Formen (MDCF 5 bis MDCF 7) erfolgt die Ermittlung der Ausbringungsmenge eines Produkts k in Abhängigkeit vom WIP-Bestand der anderen Produkte. Die funktionale Form MDCF 5 entspricht der funktionalen Form MDCF 4, mit dem Unterschied, dass nicht die Ausbringungsmengen, sondern die WIP-Bestände der weiteren Produkte verwendet werden, um die verfügbare Kapazität zu reduzieren und den Parameter M_k anzupassen. MDCF 6 basiert rein auf den WIP-Beständen der Produkte. Hierbei werden die WIP-Bestände der weiteren Produkte aggregiert betrachtet. Die funktionale Form MDCF 7 erweitert die funktionale Form MDCF 6 dahingehend, dass eine individuelle Berücksichtigung der produktspezifischen WIP-Bestände erfolgt.⁶¹

Um die Regressionsmodelle anwenden zu können, sind entsprechende Daten(punkte) notwendig. Durch den Einsatz eines Simulationsmodells werden für unterschiedliche WIP-Bestände die entsprechenden Ausbringungsmengen gemessen. Die Arbeitslast einer Periode t wird auf die einzelnen Produkte, entsprechend einem Produktionsverhältnis, aufgeteilt. Hierbei wird eine Vielzahl von unterschiedlichen Produktionsverhältnissen betrachtet. Dies soll anhand des folgenden Beispiels illustriert werden: Betrachtet werden zwei

⁶⁰Dieser wird ähnlich wie in Formel (3.9) dargestellt berechnet, mit der Ausnahme, dass zusätzlich die Freigabemenge berücksichtigt wird (vgl. Albey u. a. (2014), S. 9).

⁶¹Vgl. Albey u. a. (2014), S. 7ff.

unterschiedliche Produkte. In einer beliebigen Periode t gilt es, einen Bedarf von 100 Mengeneinheiten zu produzieren. Es werden drei unterschiedliche Produktionsverhältnisse untersucht, welche die Freigabemengen je Produkt für diese Periode t bestimmen. Die Aufteilung des Bedarfs auf die jeweiligen Produkte ist in Tabelle 3.1 aufgeführt.

| Produktionsverhältnis | 1:4 | 1:1 | 4:1 |
|-----------------------|-----|-----|-----|
| Produkt 1 | 20 | 50 | 80 |
| Produkt 2 | 80 | 50 | 20 |

Tabelle 3.1.: Beispiel zur Aufteilung der Bedarfe bei unterschiedlichen Produktionsverhältnissen.

Das in der Arbeit von Albey u. a. zugrundeliegende Produktionssystem besteht aus vier Produkten, welche alle an einer Bearbeitungsstation bearbeitet werden müssen. Die Bearbeitungszeiten folgen einer logarithmischen Normalverteilung mit individuellen Parametern für jedes der vier Produkte. Der Gesamtbedarf einer Periode t wird über eine Poisson-Verteilung bestimmt. Die produktspezifischen Freigabemengen werden auf Basis des Produktionsverhältnisses ermittelt und insgesamt werden 64 unterschiedliche Produktionsverhältnisse untersucht, welche im Rahmen von 100 Replikationen simuliert werden. Somit werden in Summe 6400 Simulationen über jeweils 1000 Perioden durchgeführt. Die Länge einer Periode t beträgt fünf Stunden und die Freigabe erfolgt immer zu Beginn einer Periode. Als Ergebnis dieser Simulationen erhält man eine Vielzahl von Datenpunkten für produktspezifische WIP-Bestände und Ausbringungsmengen. Durch den Einsatz einer Regression, welche die Summe der Fehlerquadrate minimiert, erfolgt die Bestimmung der Parameter der sieben beschriebenen funktionalen Formen.

Um die Güte der durch dieses Vorgehen ermittelten produktspezifischen Clearing Funktionen bewerten zu können, erfolgt die Integration dieser in ein Optimierungsmodell zur Auftragsfreigabe. Die hierdurch entstehenden Freigabepläne werden durch das Simulationsmodell umgesetzt und die durch die Umsetzung entstehenden Kosten⁶² werden ermittelt. Diese Diskrepanz zwischen den durch das Optimierungsmodell bestimmten und den durch die Simulation ermittelten Kosten soll Aufschluss über die Güte der produktspezifischen Clearing Funktionen geben. Als zusätzliche Vergleichsmodelle werden zum einen das Modell von Asmundsson u. a., welches die in Kapitel 3.2.1 beschriebene aggregierte Clearing Funktion nutzt, und zum anderen ein konventionelles Optimierungsmodell mit Verwendung einer festen Kapazitätsgrenze ohne Berücksichtigung von Durchlaufzeiten verwendet. Die in Albey u. a. publizierten Ergebnisse zeigen, dass die funktionale Form MDCF 6 die besten Ergebnisse erzielt und die Diskrepanz der Plan- und Ist-Kosten am geringsten ist. Trotz dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass durch die Verwendung der

⁶²Diese setzen sich aus den Kosten für Fehlmengen, WIP-Bestände, Lagerbestände sowie Kosten für die Freigabe zusammen.

funktionalen Formen das Entscheidungsproblem nicht konvex und somit nicht linear ist, was zu einem deutlich höheren Lösungsaufwand führt.⁶³ Eine Erweiterung um mehrere Maschinen wird in der Arbeit von Albey u. a. diskutiert. Darin wird aufgezeigt, dass der beschriebene Ansatz auch in diesem Szenario prinzipiell angewendet werden kann.⁶⁴

3.2.3. Schwächen und Nachteile der aus der Literatur bekannten Konzepte

Die in Kapitel 3.2 beschriebenen Ansätze und Methoden zur simulationsgestützten Ermittlung von Clearing Funktionen basieren auf einem Produktionssystem, in welchem die Variabilität des Bearbeitungsprozesses maßgeblich auf stochastischen Bearbeitungszeiten sowie Maschinenausfällen beruht.⁶⁵ Insbesondere da sowohl der WIP-Bestand als auch die Ausbringungsmenge in Anzahl Losen gemessen werden und alle Lose eines Produkts k eine identische Auftragsmenge haben, werden Entscheidungen aus der Losgrößenplanung⁶⁶, wie diese in der Regel im Rahmen der hierarchischen Produktionsplanung in vorgelagerten Planungsstufen getroffen werden, nicht ausreichend berücksichtigt. Bei den aggregierten Ansätzen erfolgt keine Unterscheidung der produktspezifischen Anteile der Arbeitslast, sodass hierdurch unterschiedliche Produkte und deren (Stück-)Bearbeitungszeiten nur unzureichend berücksichtigt werden. Die Freigabe der Aufträge erfolgt gleichverteilt über die Periode, was eine über die Periode konstante und geglättete Auftragsfreigabe voraussetzt. Eine solche kontinuierliche Freigabe ist in der Regel in der industriellen Praxis so nicht zu erwarten, da hier eine ERP-gestützte automatische Freigabe von Produktionsaufträgen einmal täglich⁶⁷ erfolgt. Generell ist die Periodenlänge mit einer Woche für eine auf dieser Planungsstufe durchgeführte Planung verhältnismäßig grob, da in der industriellen Praxis in der Regel eine Planung auf Tagesbasis im Rahmen der Auftragsfreigabe durchgeführt wird. Durch die stochastischen Bearbeitungszeiten sowie auftretenden Maschinenausfälle ist nur schwer ersichtlich, wie die Höhe der Auslastung bzw. des WIP-Bestands an der Ressource eine Verringerung der Ausbringungsmenge beeinflusst. So wird bei länger anhaltenden Störungen eine Verringerung der Ausbringungsmenge verursacht, die unabhängig vom tatsächlich vorhandenen WIP-Bestand ist.

Im Rahmen der produktspezifischen Ansätze werden die produktspezifischen Anteile der WIP-Bestände differenziert betrachtet. Hierbei wird eine Vielzahl von unterschiedlichen Produktionsverhältnissen betrachtet und untersucht. Die hohe Anzahl⁶⁸ dieser Produktionsverhältnisse sowie die stochastischen Bearbeitungszeiten erhöhen die Varianz der Mess-

⁶³Vgl. Albey u. a. (2014), S. 8.

⁶⁴Vgl. Albey u. a. (2014), S. 15ff.

⁶⁵Vgl. Kacar (2012), S. 46ff., Kacar u. a. (2012), S. 111, Kacar u. a. (2013b), S. 606 sowie Kacar u. Uzsoy (2014), S. 4.

⁶⁶Im Rahmen einer Losgrößenplanung unter Berücksichtigung von dynamischen Bedarfen werden in der Regel unterschiedlich große Lose je Produkt und Periode gebildet.

⁶⁷Oft werden solche automatisierten Freigaben über Nacht durchgeführt, sodass zum Arbeitsbeginn die Freigabe der Produktionsaufträge bereits erfolgt ist.

⁶⁸Insgesamt werden 64 unterschiedliche Produktionsverhältnisse betrachtet.



werte deutlich.⁶⁹ Die auf Basis dieser Werte berechneten mittleren Ausbringungsmengen unterliegen einer hohen Streuung, welche im Rahmen des Konzeptes der Clearing Funktionen in der Regel nicht weiter berücksichtigt werden und die Güte der Clearing Funktion beeinflusst.

Sowohl in den Arbeiten von Kacar u. Uzsoy und Kacar als auch in der Arbeit von Albey u. a. zeigt sich, dass durch die unterschiedlichen Regressionsmodelle und Verfahren hohe Werte für das Bestimmtheitsmaß R^2 erzielt werden können.⁷⁰ Hierbei stellt sich allerdings heraus, dass trotz sehr ähnlicher Werte für R^2 die jeweils ermittelten produktspezifischen Clearing Funktionen sehr unterschiedliche Ergebnisse im Rahmen der Entscheidungsmodelle zur Auftragsfreigabe liefern.⁷¹

3.3. Ermittlung produktspezifischer Clearing Funktionen durch Langzeitsimulation

In dem in dieser Forschungsarbeit verfolgten Ansatz werden produktspezifische Clearing Funktionen aggregiert über das gesamte Produktionssystem ermittelt. Hierdurch können die Abhängigkeiten und die vorliegende Dynamik des Bearbeitungsprozesses über alle durchzuführenden Operationen und Bearbeitungsschritte und -stationen berücksichtigt werden. Ziel ist es, aufgrund der vorliegenden Last im Produktionssystem eine Ausbringungsmenge des Produktionssystems zu bestimmen, welche vollständig bearbeitet und somit für die weitere Verwendung⁷² genutzt werden kann. Es werden einzelne individuelle Lose betrachtet, die erst nach vollständiger Bearbeitung an einer Bearbeitungsstation an der nachfolgenden Bearbeitungsstation weiter bearbeitet werden können. Somit liegt eine geschlossene Produktion vor.⁷³ Durch den Einsatz von Langzeitsimulationsstudien werden die Kennzahlen der Clearing Funktionen ermittelt.

Im Folgenden wird dargestellt, wie durch Langzeitsimulationsstudien statistisch signifikante Kennzahlen ermittelt werden können. Anschließend wird die in dieser Forschungsarbeit entwickelte Vorgehensweise zur Messung der produktspezifischen Clearing Funktionen aufgezeigt.

3.3.1. Statistische Signifikanz durch Langzeitsimulation

In Simulationsexperimenten ist es in der Regel sehr schwer, einen geeigneten Zustand des Systems zu Beginn der Simulationsexperimente zu bestimmen. Typischerweise existieren sogenannte Aufwärmphasen, in welchen das Produktionssystem noch keinen stationären

⁶⁹Vgl. Albey u. a. (2014), S. 11.

⁷⁰Vgl. Kacar (2012), S. 73f.

⁷¹Vgl. Albey u. a. (2014), S. 15.

⁷²Unter einer weiteren Verwendung kann zum einen die Einlagerung der fertigen Lose in ein Lager und zum anderen eine anschließende Auslieferung zur Deckung der Kundenbedarfe verstanden werden.

⁷³Vgl. Herrmann (2009), S. 230 sowie Herrmann (2011), S. 113f.

Zustand erreicht hat.⁷⁴ Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn z. B. die Bearbeitungsstationen in einem zu simulierenden Produktionssystem keine abzuarbeitenden Aufträge beinhalten und somit die Aufträge, die als erstes in das Simulationssystem freigegeben werden, ohne Wartezeiten abgearbeitet werden können. Um den Effekt dieser Aufwärmphasen zu reduzieren, wird in dieser Forschungsarbeit die von White vorgeschlagene MSER-m Heuristik⁷⁵ angewendet.⁷⁶

Die Länge der Aufwärmphase t^* wird, wie nachfolgend dargestellt, in Abhängigkeit der Messwerte Y_t mit $t^* \leq t \leq T$ berechnet. Hierbei gibt der Parameter m die Abschnittslänge und der Parameter $t^{*,max}$ die maximal zulässige Länge der Aufwärmphase an.⁷⁷

$$t^* = \arg \min_{0 \leq t \leq t^{*,max}} \left[\frac{1}{(T-t)^2} \cdot \sum_{i=\lfloor \frac{t}{m} \rfloor + 1}^{\lfloor \frac{T}{m} \rfloor} \cdot \left(\frac{1}{m} \cdot \sum_{n=1}^m Y_{(i-1) \cdot m + n} - \frac{1}{T-t} \cdot \sum_{j=t+1}^T Y_j \right)^2 \right] \quad (3.26)$$

Empirische Untersuchungen haben gezeigt, dass durch die Verwendung einer Abschnittslänge m von 5 gute Ergebnisse erzielt werden können⁷⁸, sodass im Rahmen der in dieser Forschungsarbeit durchgeführten statistischen Auswertung ebenfalls ein Wert von m gleich 5 verwendet wird.⁷⁹

Nachdem auf Basis von Formel 3.26 die Länge der Aufwärmphase t^* bestimmt wurde, erfolgt die Auswertung der Simulationsergebnisse über die Perioden $t^* \leq t \leq T$. Hierbei ist der Simulationshorizont T so zu bestimmen, dass das simulierte System einen stationären Zustand erreicht und die berechneten Mittelwerte stabil und somit statistisch signifikant sind. Dies ist in Abbildung 3.4 skizziert. Durch einen ausreichend großen Simulationshorizont T kann somit ein stabiler Wert bestimmt werden.

Um die statistische Signifikanz des Mittelwerts quantifizieren zu können, werden die Konfidenzintervalle berechnet. Die Konfidenzintervalle zu diesem Mittelwert werden unter Verwendung des von Meketon u. Schmeiser beschriebenen Verfahrens *Overlapping Batch Means* (OBM) durchgeführt.⁸⁰ Ausgehend von den Messwerten Y_t mit $t^* \leq t \leq T$ erfolgt die Berechnung der Varianz Var_Δ unter Berücksichtigung der Abschnittslänge Δ . Hierzu ist zunächst eine optimale Wert für Δ zu ermitteln. Hierzu wird das von Song vorgeschlagene Verfahren angewendet, welches nachfolgend beschrieben wird.⁸¹

⁷⁴Vgl. White u. a. (2000), S. 755 und Hillier u. Lieberman (2010), S. 944.

⁷⁵In der *Marginal Standard Error Rule* (MSER-m) Heuristik wird die Länge der Aufwärmphase ermittelt, welche bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden darf. Hierbei gilt es, zum einen den Effekt der Aufwärmphase zu minimieren und zum anderen den Umfang bzw. die Anzahl der Messwerte nicht unnötig zu reduzieren.

⁷⁶Vgl. White (1997), S. 326.

⁷⁷Vgl. White u. a. (2000), S. 756.

⁷⁸In der Literatur wird dieses Vorgehen als MSER-5 bezeichnet.

⁷⁹Vgl. White u. a. (2000), S. 760 sowie Hoad u. a. (2008), S. 538.

⁸⁰Vgl. Meketon u. Schmeiser (1984), S. 228.

⁸¹Vgl. Song (1996), S. 310.

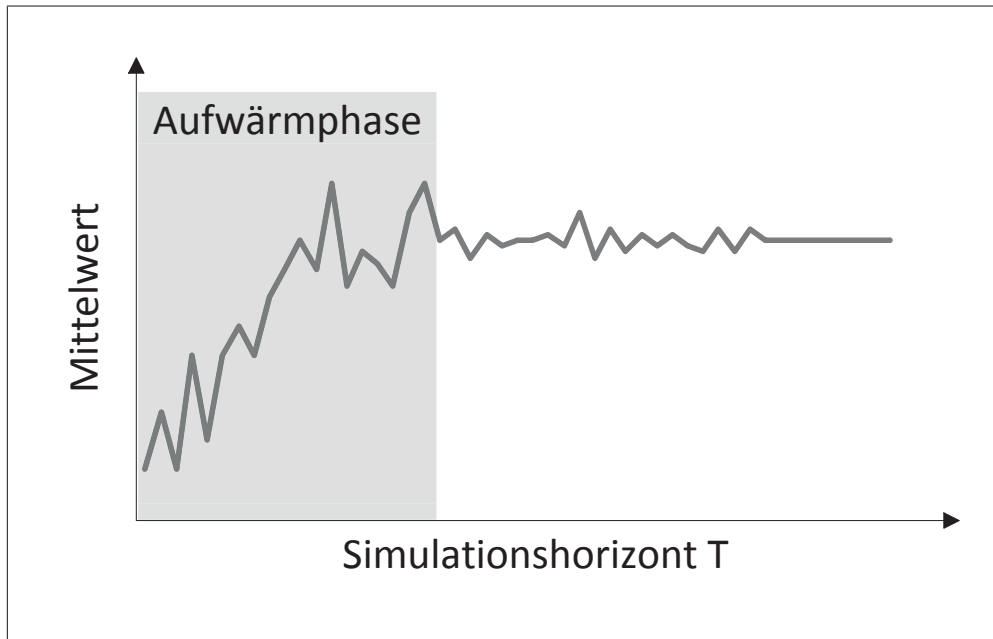


Abbildung 3.4.: Schwankungen der Mittelwerte bei steigendem Simulationshorizont T.

Schritt 1: Initialisierung

Wähle die Parameter p und q ($2 \leq q \leq 4 \wedge q = \max(3, \text{Saisonzykluslänge})$)

Setze $T^* = T - t^* + 1$

Setze $m_0 = 0$ und $\sigma = \sqrt{\frac{1}{T^*}}$

Schritt 2: Berechnung der Autokovarianz $\rho_h \forall m_0 + 1 \leq h \leq m_0 + q$:

$$\rho_h = \frac{\sum_{i=t^*}^T (Y_i - \bar{Y}) \cdot (Y_{i+h} - \bar{Y})}{\sum_{i=t^*}^T (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{mit } \bar{Y} = \frac{1}{T^*} \cdot \sum_{t=t^*}^T Y_t$$

Schritt 3: Durchlaufe $m_0 + 1 \leq h \leq m_0 + q$

Wenn $\rho_h > p \cdot \sigma$

dann:

Weiter mit Schritt 4.

sonst:

Setze $m_0 = m_0 + 1$ und $\sigma = \sqrt{\sigma^2 + \frac{2}{T} \cdot \rho_{m_0}^2}$

Weiter mit Schritt 2.



Schritt 4: Berechne die optimale Abschnittslänge Δ :

$$\Delta = 1 + \left(2 \cdot T \cdot \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{2 \cdot \sum_{h=1}^{m_0} h \cdot \rho_h}{1 + 2 \cdot \sum_{h=1}^{m_0} \rho_h} \right)^2 \right)^{\frac{1}{3}}$$

Empirische Untersuchungen zeigen, dass die Parameter p und q jeweils mit einem Wert von 3 gute Ergebnisse erzielen, wenn die Daten keinen saisonalen Einflüssen unterliegen.⁸² In den in dieser Forschungsarbeit durchgeführten statistischen Auswertungen wird somit der Wert 3 für die Parameter p und q angewendet, da keine saisonalen Einflüsse Gegenstand der Untersuchungen sind und damit nicht vorliegen. Unter Verwendung dieser optimalen Abschnittslänge Δ und der Aufwärmphase t^* und T^* (mit $T^* = T - t^* + 1$) erfolgt die Berechnung der Varianz Var_{Δ} durch:⁸³

$$Var_{\Delta}(Y) = \frac{\Delta \cdot T^*}{(T^* - \Delta + 1) \cdot (T^* - \Delta)} \cdot \sum_{t=t^*}^{T-\Delta+1} \left(\frac{1}{\Delta} \sum_{i=0}^{\Delta-1} Y_{t+i} - \bar{Y} \right)^2 \quad (3.27)$$

Die Konfidenzintervalle werden unter Verwendung der Normalverteilung⁸⁴ wie nachfolgend dargestellt berechnet:⁸⁵

$$\left[\bar{Y} - z_{1-\frac{\alpha}{2}}; \bar{Y} + z_{1-\frac{\alpha}{2}} \right] \quad (3.28)$$

Durch dieses Verfahren kann der Einfluss der Korrelation bei der Ermittlung der Konfidenzintervalle verringert und statistisch signifikante Kennzahlen aus Langzeitsimulationsstudien gewonnen werden.⁸⁶

3.3.2. Vorgehen zur Ermittlung produktspezifischer Clearing Funktionen

Durch den Einsatz von Simulation erfolgen die Messungen der produktspezifischen Clearing Funktionen systematisch für unterschiedliche WIP-Bestände \hat{W} (mit $1 \leq \hat{W} \leq \hat{W}^{max}$) im Produktionssystem. Hierbei ist der WIP-Bestand \hat{W} in Mengeneinheiten definiert. Für jeden dieser WIP-Bestände \hat{W} wird ein Simulationslauf über T Perioden (mit $1 \leq t \leq T$) durchgeführt.

Werden in einem Produktionssystem mehrere Produkte k produziert, so wird der WIP-Bestand \hat{W} entsprechend dem Produktionsverhältnis⁸⁷ φ_k angepasst. Da nur ganze Mengeneinheiten betrachtet werden, werden die Werte ganzzahlig gerundet. Somit ergeben

⁸²Vgl. Song (1996), S. 309.

⁸³Vgl. Meketon u. Schmeiser (1984), S. 228ff. und Alexopoulos u. a. (2011), S. 405ff.

⁸⁴Aufgrund der hohen Anzahl an Messwerten ($T^* > 60$) kann näherungsweise das Quantil der Standardnormalverteilung verwendet werden (vgl. Eckey u. a. (2000), S. 466).

⁸⁵Vgl. Alexopoulos u. a. (2011), S. 408f.

⁸⁶Vgl. Alexopoulos (2007), S. 156f.

⁸⁷Das Produktionsverhältnis φ_k wird hierbei als konstant und bekannt vorausgesetzt.



sich produktspezifische WIP-Bestände \widehat{W}_k , welche wie nachfolgend dargestellt ermittelt werden:

$$\widehat{W}_k = \left\lfloor \left(\widehat{W} \cdot \varphi_k \right) + 0.5 \right\rfloor \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (3.29)$$

Wird zum Beispiel ein Produkt P1 in doppelter Menge als Produkt P2 benötigt und gefertigt, so gilt: $\varphi_{P1} = 1 \wedge \varphi_{P2} = 0.5$. Wird der WIP-Bestand \widehat{W} von 100 bis 200 Mengeneinheiten untersucht, so ergeben sich die in Tabelle 3.2 beispielhaft dargestellten produktspezifischen WIP-Bestände \widehat{W}_k .

| Simulationslauf | 1 | 2 | 3 | ... | 100 |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| WIP-Bestand \widehat{W} | 100 | 101 | 102 | ... | 200 |
| \widehat{W}_{P1} | 100 | 101 | 102 | ... | 200 |
| \widehat{W}_{P2} | 50 | 51 | 51 | ... | 100 |

Tabelle 3.2.: Beispiel zur Aufteilung des WIP-Bestands bei unterschiedlichen Produktionsverhältnissen.

In jeder Periode t ist der definierte WIP-Bestand \widehat{W}_k für jedes Produkt k zu erreichen. Dies ist über die Freigabemenge $R_{k,t}$ zu gewährleisten. Hierzu wird zunächst zu Beginn einer Periode t die im Produktionssystem befindliche Arbeitslast $\lambda_{k,t}$ je Produkt k ermittelt. Diese Arbeitslast wird anhand der noch durchzuführenden Arbeitsleistung zur Fertigstellung der im Produktionssystem befindlichen Lose eines Produkts k ermittelt. Die noch zu erbringende Arbeitsleistung ist in Zeiteinheiten gegeben und muss in Mengeneinheiten umgerechnet werden. Dies wird nachfolgend anhand eines Beispiels verdeutlicht:

Betrachtet wird ein Produktionssystem bestehend aus den zwei Bearbeitungsstationen A und B. Ein Produkt P1 muss an beiden Bearbeitungsstationen bearbeitet werden. Die Stückbearbeitungszeit an Bearbeitungsstation A beträgt zehn Minuten und an Bearbeitungsstation B 15 Minuten. Zu Beginn von Periode 1 ist ein Los mit einer zu fertigenden Menge von zehn Mengeneinheiten im Produktionssystem vorhanden. Zur Fertigstellung des Loses sind somit in Summe 250 Minuten Arbeitsleistung zu erbringen (100 Minuten an Bearbeitungsstation A und 150 Minuten an Bearbeitungsstation B). Zu Beginn von Periode 2 ist die Bearbeitung an Bearbeitungsmaschine A bereits zur Hälfte abgeschlossen, sodass nur noch 50 Minuten an Restbearbeitungszeit vorliegen. Somit beträgt die noch zu erbringende Arbeitsleistung für dieses Los 200 Minuten. Diese noch zu erbringende Arbeitsleistung wird durch die Summe der Stückbearbeitungszeiten beider Bearbeitungsstationen dividiert. Somit gilt:

$$\frac{200 \text{ Minuten}}{25 \frac{\text{Minuten}}{\text{Stück}}} = 8 \text{ Stück}$$



Im oben aufgeführten Beispiel ist der zu erreichende WIP-Bestand \widehat{W}_{P1} für Produkt P1 mit zehn Mengeneinheiten definiert. Zu Beginn der Periode 1 ist eine Arbeitslast $\lambda_{P1,1}$ von acht Mengeneinheiten von Produkt P1 im Produktionssystem vorhanden. Somit muss ein Los für Produkt P1 mit der Auftragsgröße von zwei Mengeneinheiten in das Produktionssystem freigegeben werden ($R_{P1,1} = 2$), um den WIP-Bestand \widehat{W}_{P1} von zehn Mengeneinheiten zu erreichen.

Die Freigabemenge $R_{k,t}$ für ein Produkt k in Periode t berechnet sich somit aus dem zu erreichenden WIP-Bestand \widehat{W}_k abzüglich der im Produktionssystem befindlichen Arbeitslast $\lambda_{k,t}$ von Produkt k in Periode t . Da nur ganzzahlige Produktionsmengen in das Produktionssystem freigegeben werden, erfolgt auch hier eine Rundung auf den nächsten ganzzahligen Wert. Es gilt:

$$R_{k,t} = \left\lfloor \left(\widehat{W}_k - \lambda_{k,t} \right) + 0.5 \right\rfloor \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (3.30)$$

Dieses Vorgehen wird in jeder Periode t über den gesamten Simulationshorizont T so durchgeführt, dass zu Beginn jeder Periode t der definierte und zu erreichende WIP-Bestand \widehat{W}_k je Produkt k im Produktionssystem vorhanden ist. Dieser setzt sich aus Losen, welche bereits in vorgelagerten Perioden freigegeben und teilweise bearbeitet wurden, und neu freigegebenen Losen zusammen. Am Ende jeder Periode t wird die Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ des Produktionssystems ermittelt und vermerkt. Als Ergebnis erhält man für einen spezifischen WIP-Bestand \widehat{W}_k für jede einzelne Periode t einen Messwert der Ausbringungsmenge $X_{k,t}$. Grundsätzlich erfolgt die Bearbeitung innerhalb des Produktionssystems nach dem FIFO-Prinzip um eine Abarbeitung analog zu einer Warteschlange zu realisieren. Der WIP-Bestand \widehat{W} wird nach Durchführung eines Simulationslaufs systematisch schrittweise erhöht, sodass unterschiedliche WIP-Bestände untersucht und die entsprechenden Ausbringungsmengen gemessen werden können. Werden zum Beispiel die WIP-Bestände von eins bis zehn Mengeneinheiten untersucht, so sind insgesamt zehn unabhängige Simulationsläufe jeweils über T Perioden durchzuführen. Durch die schrittweise Erhöhung der zu untersuchenden WIP-Bestände \widehat{W}_k bis zu einem maximalen WIP-Bestand \widehat{W}_k^{max} können unterschiedliche WIP-Bestände untersucht und die perioden- und produktspezifischen Ausbringungsmengen $X_{k,t}$ zu diesem WIP-Bestand ermittelt werden. Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 3.5 zusammengefasst.

Die Clearing Funktion soll für einen (in der Regel) ganzzahligen WIP-Bestand eine zu erwartende Ausbringungsmenge beschreiben. Somit ist für jeden (mittleren) WIP-Bestand eine korrespondierende (mittlere) Ausbringungsmenge vorhanden. In den beschriebenen Ansätzen der Literatur erfolgt eine Regression zu einer zugrundeliegenden funktionalen Form, um aus den Datenpunkten eine Clearing Funktion zu bestimmen.⁸⁸ In dem in dieser Forschungsarbeit entwickelten Ansatz erfolgt die Bildung eines Mittelwertes sowie der Konfidenzintervalle über diese Messwerte wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben. Somit ist entgegen den Ansätzen der Literatur das Ergebnis der Simulation keine Datenwolke, welche

⁸⁸Bei den aggregierten Ansätzen, welche in Kapitel 3.2 beschrieben sind, wird die von Karmarkar und Srinivasan u. a. (siehe Formel 3.4 sowie Formel 3.3) beschriebene funktionale Form verwendet. Die produktspezifischen Ansätze nutzen für die Regression die funktionalen Formen, welche in den Formeln 3.16 bis 3.18 sowie 3.19 bis 3.25 dargestellt sind.

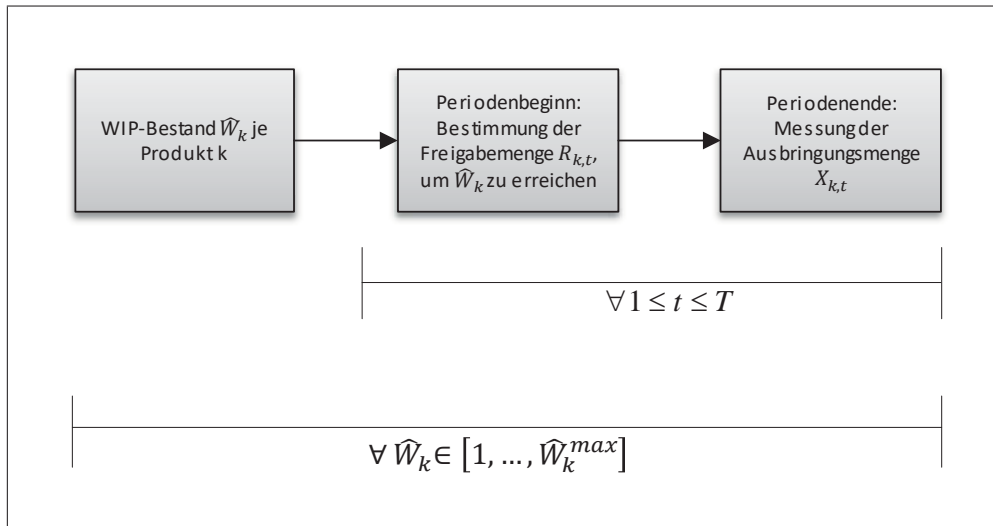


Abbildung 3.5.: Vorgehen zur Ermittlung einer Clearing Funktion.

durch eine Regression auf wenige Punkte reduziert werden muss, sondern ein statistisch signifikanter Mittelwert mit ausweisbaren Konfidenzintervallen (vgl. Abbildung 3.5).

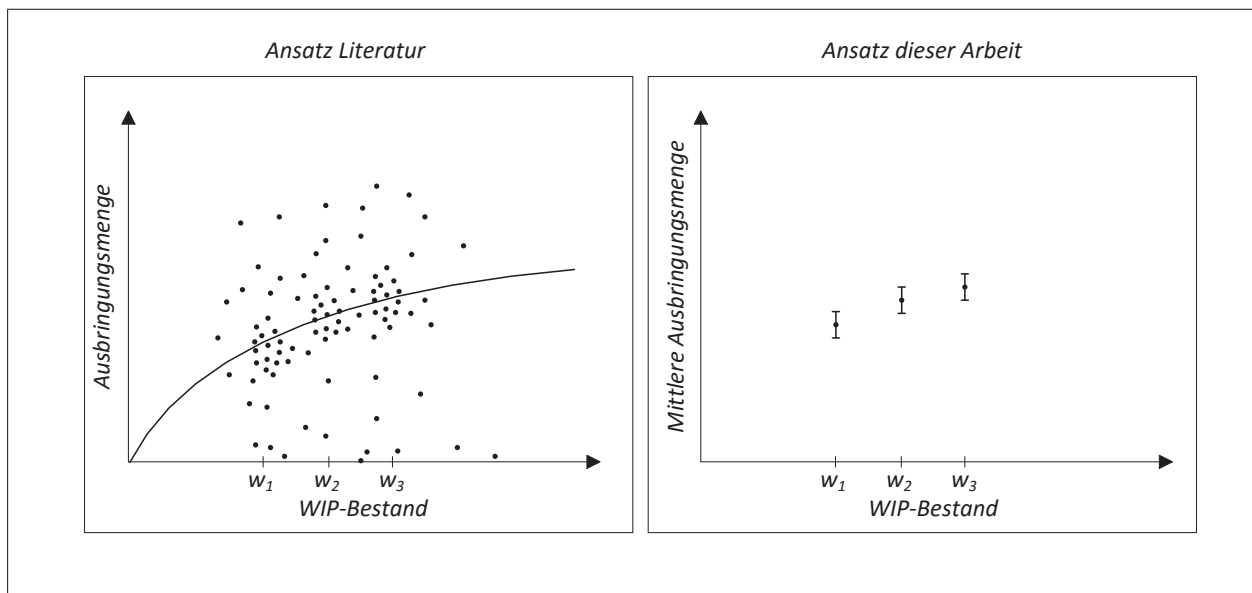


Abbildung 3.6.: Ermittlung einer Clearing Funktion auf Basis von Messwerten.

4. Fallstudie

Um die Daten der produktspezifischen Clearing Funktionen ermitteln zu können, wird das in Kapitel 3.3 beschriebene Verfahren anhand einer Fallstudie angewendet. Diese Fallstudie basiert auf einem abstrahierten, realen Produktionsprozess eines Elektroteileherstellers aus Deutschland. Diese Fallstudie wurde in ein Simulationsmodell implementiert, sodass der Produktionsprozess simuliert und relevante Kennzahlen ermittelt werden können. In diesem Abschnitt wird der Aufbau dieser Fallstudie sowie des Simulationsmodells beschrieben. Die auf Basis dieses Produktionssystems gemessenen produktspezifischen Clearing Funktionen werden anschließend aufgezeigt.

4.1. Aufbau der Fallstudie

4.1.1. Daten der Fallstudie

In dem vorliegenden Produktionssystem erfolgt die Produktion von acht individuellen Produkten. Diese Produkte müssen eine Folge von Bearbeitungsstationen durchlaufen bis der Produktionsprozess vollständig abgeschlossen ist. Insgesamt existieren fünf unterschiedliche Bearbeitungsstationen, welche bestimmte Operationen durchführen und über eine identische Kapazität verfügen. Jeweils zwei der acht Produkte können in Produkttypen zusammengefasst werden, da der zugrundeliegende Produktionsprozess hinsichtlich der Arbeitspläne identisch ist. Trotzdem werden diese zwei Produkte je Produkttyp separat geplant, da keine Vermischung dieser Produkte in einem Produktionsauftrag möglich bzw. gewünscht ist und individuelle Bedarfe vorliegen. Der Produktionsprozess dieses Produktionssystems ist in Abbildung 4.1 skizziert. Die Produktion erfolgt rund um die Uhr, das heißt, es kann an sieben Tagen pro Woche jeweils 24 Stunden produziert werden. Die zur Produktion notwendigen Materialien sind in der Regel durch ausreichende Lagerbestände vorhanden, sodass eine Materialverfügbarkeit gewährleistet ist.

Die Bearbeitung der Produkte muss zwingend in der im Arbeitsplan vorgegebenen Reihenfolge durchgeführt werden. Die Bearbeitungsschritte o , welche für ein Produkt k durchzuführen sind, werden über die Menge O_k beschrieben. Je Produkt k definiert ein Arbeitsplan die Stückbearbeitungszeiten $tb_{k,o}$ sowie Rüstzeiten $tr_{k,o}$ der jeweils durchzuführenden Bearbeitungsschritte o an den entsprechenden Bearbeitungsstationen. Durch diese Arbeitspläne ist zudem die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte definiert. Diese sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Auf Basis der in Tabelle 4.1 beschriebenen Arbeitspläne ergeben sich die in Tabelle 4.2 aufgezeigten kumulierten Bearbeitungszeiten tb_k sowie Rüstzeiten tr_k je Produkt k . Diese werden aus der Summe der Stückbearbeitungszeiten $tb_{k,o}$ sowie Rüstzeiten

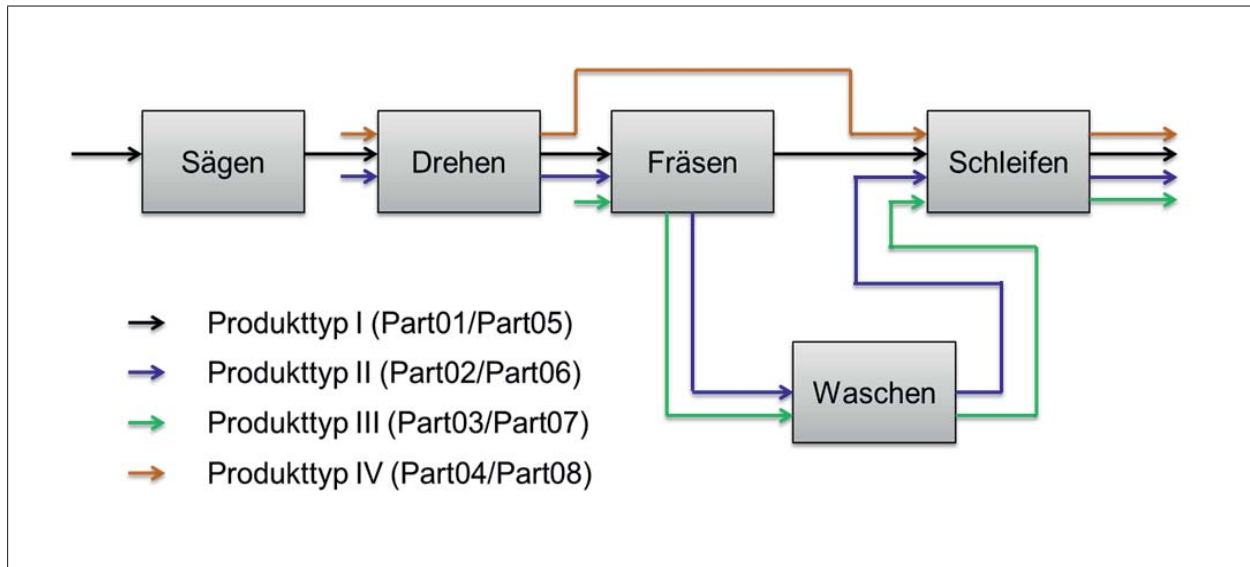


Abbildung 4.1.: Darstellung des Produktionsprozesses des zugrundeliegenden Produktionssystems.

$tr_{k,o}$ aller Bearbeitungsschritte o , welche für ein Produkt k durchzuführen sind ($o \in O_k$), ermittelt. Somit gilt:

$$tb_k = \sum_{o \in O_k} tb_{k,o} \quad \wedge \quad tr_k = \sum_{o \in O_k} tr_{k,o} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (4.1)$$

Die in dieser Fallstudie relevanten Kostensätze sind die jeweiligen Stückkosten für Lagerbestände h_k , WIP-Bestände w_k , Rüstkosten s_k sowie Fehlmengen f_k . Da Fehlmengen prinzipiell zu vermeiden sind und nach Möglichkeit eine termingerechte Bedarfsdeckung erfolgen soll, sind die Kosten für Fehlmengen, verglichen mit den Kosten für Lagerbestände und WIP-Bestände, deutlich höher angesetzt. Die Rüstkosten s_k werden über alle durchzuführenden Bearbeitungsschritte kumuliert und fallen somit je Produktionsauftrag einmalig an. Die Lagerkosten sowie WIP-Kosten sind je Produkt identisch, sodass keine Art dieser Bestände bevorzugt oder benachteiligt wird. Diese produktspezifischen Kostensätze sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Alle acht Produkte werden im Mittel in gleicher Menge benötigt, sodass ein Produktionsverhältnis von 1:1 für alle Produkte vorliegt.¹ Dieses Produktionsverhältnis ist über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant. Die aufgeführten Daten der Fallstudie gelten für alle nachfolgend beschriebenen und durchgeführten Untersuchungen und bilden die Grundlage der Experimente dieser Forschungsarbeit. Die Bedarfe der acht Produkte folgen einer Normalverteilung mit einem bekannten Mittelwert μ und einer bekannten Streuung σ und sind stochastisch unabhängig. Die spezifischen Werte der Parameter μ und σ werden in den nachfolgenden Untersuchungen und Experimenten, welche in den Kapiteln 5 und 6 beschrieben werden, detailliert aufgeführt.

¹Das Produktionsverhältnis wurde aus den Vorgaben des realen Produktionssystems direkt übernommen.

| Produkt (k) | Bearbeitungsschritt (o) | Stückbearbeitungszeit ($tb_{k,o}$) | Rüstzeit ($tr_{k,o}$) |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Part01 / Part05 | Sägen | 40 Sekunden | 500 Sekunden |
| | Drehen | 100 Sekunden | 350 Sekunden |
| | Fräsen | 55 Sekunden | 240 Sekunden |
| | Schleifen | 50 Sekunden | 160 Sekunden |
| Part02 / Part06 | Drehen | 150 Sekunden | 330 Sekunden |
| | Fräsen | 70 Sekunden | 260 Sekunden |
| | Waschen | 100 Sekunden | 150 Sekunden |
| | Schleifen | 40 Sekunden | 140 Sekunden |
| Part03 / Part07 | Fräsen | 200 Sekunden | 300 Sekunden |
| | Waschen | 80 Sekunden | 140 Sekunden |
| | Schleifen | 60 Sekunden | 180 Sekunden |
| Part04 / Part08 | Drehen | 60 Sekunden | 150 Sekunden |
| | Schleifen | 170 Sekunden | 330 Sekunden |

Tabelle 4.1.: Produktspezifische Arbeitspläne des zugrundeliegenden Produktionssystems.

| Produkte k | kumulierte Stückbearbeitungszeit (tb_k) | kumulierte Rüstzeit (tr_k) |
|-----------------|---|--------------------------------------|
| Part01 / Part05 | 245 Sekunden | 1250 Sekunden |
| Part02 / Part06 | 360 Sekunden | 880 Sekunden |
| Part03 / Part07 | 340 Sekunden | 620 Sekunden |
| Part04 / Part08 | 230 Sekunden | 480 Sekunden |

Tabelle 4.2.: Kumulierte Stückbearbeitungszeiten und Rüstzeiten je Produkt.

4.1.2. Analyse der Engpassituation

Die in Kapitel 4.1.1 dargestellten Arbeitspläne zeigen, dass an den Bearbeitungsstationen Drehen, Fräsen und Schleifen die höchste Auslastung zu erwarten ist. An diesen drei Bearbeitungsstationen fallen die höchsten kumulierten Stückbearbeitungszeiten sowie Rüstzeiten an (vgl. Tabelle 4.4), sodass diese Bearbeitungsstationen die Engpassressourcen darstellen.

Die Produkte werden im Mittel in gleicher Menge benötigt bzw. produziert. Da die Bedarfe einer Normalverteilung folgen, können in individuellen Perioden unterschiedliche Bedarfe und damit unterschiedliche Produktionsmengen je Produkt anfallen. Dies führt dazu, dass die Bearbeitungsstationen und insbesondere die Engpassressourcen unterschiedlich hoch ausgelastet werden. Dies bedeutet, dass die Bearbeitungsstationen Drehen, Fräsen und Schleifen, abhängig von den eintretenden Bedarfen in einer Periode t , einen ausgeprägten Engpass in dieser Periode t darstellen. Aufgrund dieser Variabilität der auftretenden Bedarfe der Produkte in den jeweiligen Perioden sowie den produktspezifischen Arbeitsplänen liegt eine dynamische Engpassituation vor. Dies soll nachfolgend anhand eines Beispiels illustriert werden.



| Produkte k | Lagerkosten je Stückerinheit (h_k) | WIP-Kosten je Stückerinheit (w_k) | Rüstkosten je Produktionsauftrag (s_k) | Fehlmengenkosten je Stückerinheit (b_k) |
|------------|--|---|--|---|
| Part01 | 1 | 1 | 190 | 200 |
| Part02 | 1 | 1 | 135 | 200 |
| Part03 | 1 | 1 | 95 | 200 |
| Part04 | 1 | 1 | 70 | 200 |
| Part05 | 1 | 1 | 160 | 200 |
| Part06 | 1 | 1 | 115 | 200 |
| Part07 | 1 | 1 | 100 | 200 |
| Part08 | 1 | 1 | 110 | 200 |

Tabelle 4.3.: Produktspezifische Kostensätze des Produktionssystems.

| Bearbeitungs- station | kumulierte Stück- bearbeitungszeit | kumulierte Rüstzeit |
|--------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| Sägen | 80 | 1000 |
| Drehen | 620 | 1660 |
| Fräsen | 650 | 1600 |
| Waschen | 360 | 580 |
| Schleifen | 640 | 1620 |

Tabelle 4.4.: Produktspezifische Kostensätze des Produktionssystems.

Unter Verwendung einer Normalverteilung mit den Verteilungsparametern $\mu = 80$ und $\sigma = 40$ erfolgt die Generierung von Bedarfsmengen je Produkt über fünf Perioden. Diese sind in Tabelle 4.5 aufgeführt.

| Produkt | Periode | | | | |
|---------|---------|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Part01 | 61 | 86 | 107 | 25 | 105 |
| Part02 | 35 | 32 | 89 | 83 | 21 |
| Part03 | 61 | 18 | 68 | 92 | 23 |
| Part04 | 17 | 155 | 90 | 46 | 125 |
| Part05 | 63 | 96 | 42 | 73 | 96 |
| Part06 | 75 | 51 | 139 | 64 | 102 |
| Part07 | 117 | 77 | 56 | 108 | 112 |
| Part08 | 35 | 70 | 100 | 84 | 112 |

Tabelle 4.5.: Bedarfsmengen über fünf Perioden.



Basierend auf diesen Bedarfsmengen erfolgt die Berechnung der Arbeitslast je Bearbeitungsstation in Stunden. Hierzu werden unter Berücksichtigung der Bedarfsmengen und Arbeitspläne die über alle Produkte entstehenden Bearbeitungs- und Rüstzeiten je Periode und Bearbeitungsstation addiert. Es zeigt sich, dass die drei Engpassmaschinen Drehen, Fräsen und Schleifen die höchste Arbeitslast aufweisen. Die Bearbeitungsstation Sägen ist, da diese nur von zwei Produkten belegt wird, am geringsten belastet und trotz der Bedarfsschwankungen dieser Produkte ist nur eine geringe Schwankung der Last zu beobachten. Für die Bearbeitungsstation Waschen liegt eine höhere Arbeitslast vor, verglichen mit den Engpassmaschinen fällt diese Arbeitslast aber deutlich geringer aus. Abhängig von den auftretenden Bedarfen zeigt sich, dass die Engpassmaschinen in den einzelnen Perioden unterschiedlich hohe Arbeitslasten zu bewältigen haben, sodass die Bearbeitungsstation mit der höchsten Last je Periode variiert. Die Schwankungen der Arbeitslast sind deutlich höher, da diese Bearbeitungsstationen von sechs bzw. allen acht Produkten belegt werden (vgl. Abbildung 4.2). Die jeweilige Arbeitslast in Stunden ist in Tabelle 4.5 aufgeführt.

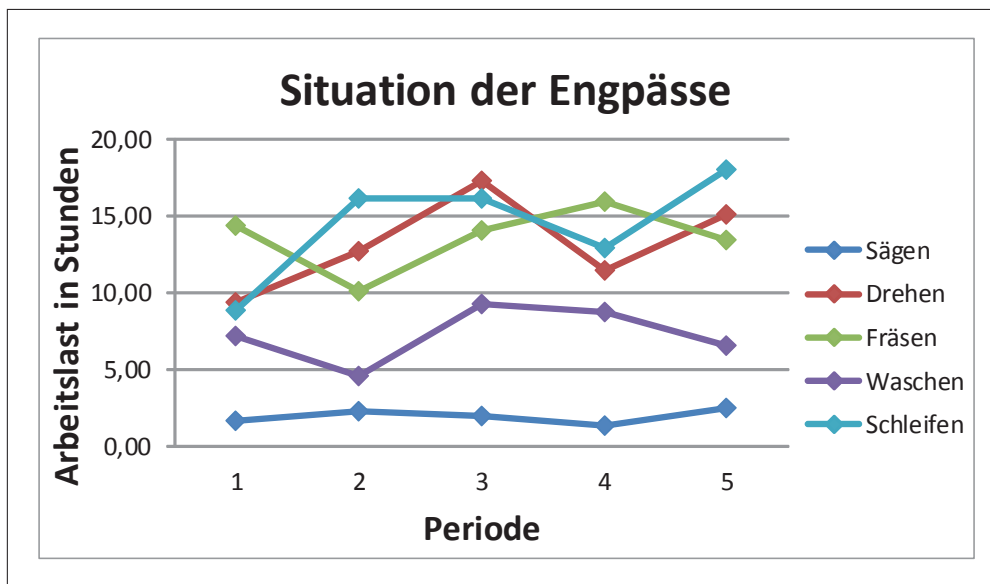


Abbildung 4.2.: Darstellung der Arbeitslast der Bearbeitungsstationen in Stunden über fünf Perioden.

Die Bearbeitungsstation, welche in einer Periode t die höchste Arbeitslast zu bewältigen hat, ist in der Tabelle 4.6 grau hinterlegt. Es folgt eine Normierung dieser maximalen Arbeitslast je Periode auf 100%. Relativ dazu werden die Arbeitslasten der anderen Bearbeitungsstationen bestimmt. So zeigt sich beispielsweise in Periode 1, dass die Bearbeitungsstationen Drehen und Schleifen lediglich eine Arbeitslast von 65% bzw. 61% verglichen mit der ausgeprägten Engpassmaschine Fräsen haben (vgl. Tabelle 4.7). Dies zeigt, dass abhängig von den Bedarfen dynamisch wandelnde Engpässe vorliegen.



| Bearbeitungsstation | Periode | | | | |
|---------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Sägen | 1.66 | 2.30 | 1.93 | 1.37 | 2.51 |
| Drehen | 9.36 | 12.73 | 17.27 | 11.48 | 15.12 |
| Fräsen | 14.37 | 10.12 | 14.04 | 15.91 | 13.41 |
| Waschen | 7.17 | 4.58 | 9.25 | 8.69 | 6.58 |
| Schleifen | 8.82 | 16.11 | 16.09 | 12.92 | 18.05 |

Tabelle 4.6.: Arbeitslast der Bearbeitungsstationen in Stunden über fünf Perioden.

| Bearbeitungsstation | Periode | | | | |
|---------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Sägen | 11.52% | 14.28% | 11.20% | 8.59% | 13.91% |
| Drehen | 65.12% | 79.00% | 100% | 72.12% | 83.76% |
| Fräsen | 100% | 62.80% | 81.33% | 100% | 74.28% |
| Waschen | 49.92% | 28.42% | 53.57% | 54.61% | 36.44% |
| Schleifen | 61.37% | 100% | 93.19% | 81.18% | 100% |

Tabelle 4.7.: Relative Arbeitslast zur ausgeprägten Engpassmaschine je Periode.

4.2. Beschreibung des Simulationsmodells

Die in Kapitel 4.1 beschriebene Fallstudie ist über ein Simulationsmodell abgebildet. Dieses Simulationsmodell ist mit dem Simulationswerkzeug Tecnomatix Plant Simulation erstellt. Durch das Simulationswerkzeug Plant Simulation können diskrete ereignisorientierte Simulationsmodelle erstellt werden, durch welche ein vorhandenes logistisches System, wie zum Beispiel eine Produktion, abgebildet und untersucht werden kann. Bei einer ereignisorientierten Simulation erfolgt eine Zustandsänderung durch Ereignisse, welche zu diskreten Zeitpunkten auftreten. Hierbei ist ein Ereignis als „eine atomare Begebenheit, die eine Zustandsänderung bewirkt“², definiert. Solche Ereignisse können in regelmäßigen Abständen (zum Beispiel das Auftreten eines Ereignisses immer zu Beginn einer Periode) oder unregelmäßig (zum Beispiel der Abschluss eines Produktionsvorgangs) auftreten. Ereignisse führen in der Regel zur Durchführung von Aktivitäten, welche zu einem Prozess zusammengefasst werden können. Der Zusammenhang von Ereignissen, Aktivitäten und Prozessen ist in Abbildung 4.3 anhand eines einfachen Beispiels zur Produktion von zwei Produkten dargestellt. Die Ankunft der Aufträge, der Beginn der Bearbeitung sowie das Ende der Bearbeitung sind als Ereignisse vorhanden, welche Aktivitäten auslösen können. Entgegen einer kontinuierlichen Simulation sind die konkreten Zustandsänderungen während der Bearbeitung (wie diese zum Beispiel bei Umform- oder Schmelzprozessen auftreten) nicht Gegenstand der Simulation. Lediglich die Zustandsänderung von „wird bearbeitet“ zu „Bearbeitung abgeschlossen“ ist relevant. Solche ereignisdiskreten Simula-

²Verein Deutscher Ingenieure (2013), S. 7.



tionsmodelle werden vorzugsweise für die Abbildung von logistischen Systemen verwendet.³

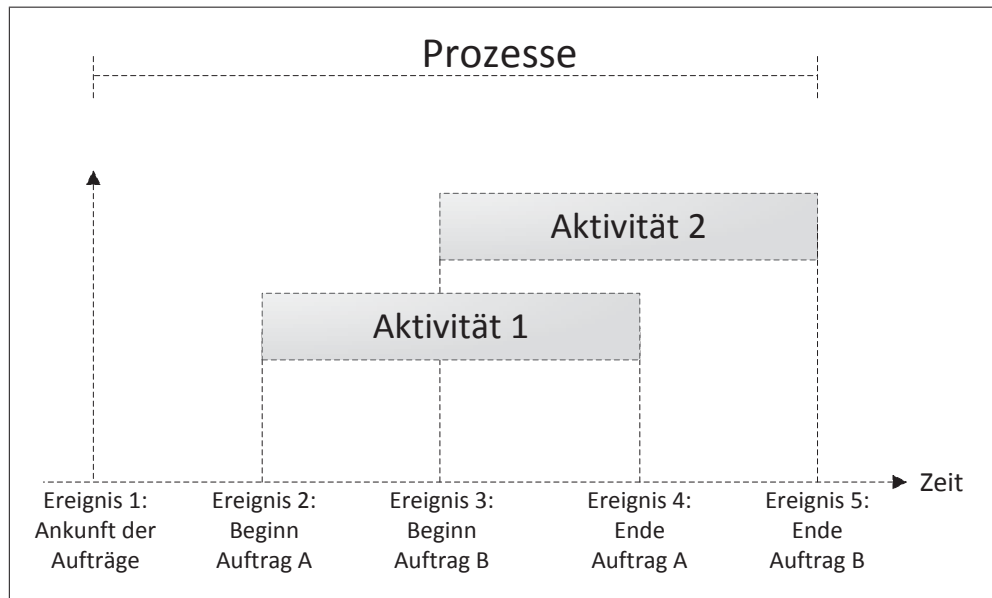


Abbildung 4.3.: Zusammenhang zwischen Ereignissen, Aktivitäten und Prozessen der ereignisgesteuerten diskreten Simulation (Quelle der Abbildung: Eley (2012), S. 8).

Nachfolgend wird das in dieser Arbeit verwendete Simulationsmodell näher beschrieben. Durch übergeordnete Planungsmodelle, wie diese in den Kapiteln 5 und 6 beschrieben werden, erfolgt die Festlegung von Produktionslosen bzw. Freigabemengen⁴ auf Basis der vorliegenden Bedarfsinformationen. Die Bedarfsmengen treten zu Beginn einer Periode auf und sind zu Beginn dieser Periode aus den vorliegenden Lagerbeständen zu decken. Hierbei ist nur eine vollständige Bedarfsdeckung möglich, sodass keine Teilauslieferung erfolgt. Reichen die Bestände zur Bedarfsdeckung nicht aus, so entstehen Fehlmengen und der Bedarf kann nicht termingerecht befriedigt werden. Bevor ein Bedarf einer Periode gedeckt werden kann, müssen zunächst alle noch offenen Bedarfe aus Vorperioden gedeckt werden. Jedes aus der Planung resultierende Produktionslos beinhaltet die nachfolgend aufgeführten Informationen:

- Produktname
- Produktionsmenge
- Startperiode

³Vgl. Eley (2012), S. 8.

⁴Die durch die Planungsmodelle ermittelten und zu produzierenden Mengen werden nachfolgend als Produktionslose bezeichnet.



Der prinzipielle Ablauf der Simulation ist in Abbildung 4.4 skizziert und wird nachfolgend beschrieben.

Zu Beginn jeder Periode erfolgt die Prüfung, ob die Bearbeitung dieser geplanten Produktionslose begonnen werden kann. Dies ist der Fall, wenn die geplante Startperiode der jeweiligen Produktionslose erreicht ist.⁵ Wird ein Produktionslos in die Produktion eingelastet, so kann die Bearbeitung gemäß der durch die Arbeitspläne definierten Bearbeitungsreihenfolge durchgeführt werden. An einer Bearbeitungsstation kann immer nur ein Produktionslos gleichzeitig bearbeitet werden. Alle anderen Produktionslose müssen auf die Bearbeitung warten und befinden sich somit in einer Warteschlange. Wurde ein Produktionslos vollständig an einer Bearbeitungsstation bearbeitet, so kann die Bearbeitung des nächsten Produktionsloses aus der Warteschlange begonnen werden. Hierbei wird durch die Verwendung von Prioritätsregeln das nächste Produktionslos zur Bearbeitung bestimmt.⁶ Wurden alle Bearbeitungsschritte eines Produktionsloses durchgeführt, so ist die Bearbeitung abgeschlossen. Die Einlagerung und weitere Verwendung dieser fertigen Produktionsmengen erfolgt zu Beginn der Folgeperiode. Somit kann ein Produktionslos, welches in einer Periode t vollständig bearbeitet wurde, erst in Periode $t + 1$ zur Bedarfsdeckung verwendet werden. Bei der Durchführung der Simulation werden eine Vielzahl an Statistiken erhoben. So werden unter anderem je Periode die Höhe der Fehlmengen und Lagerbestände sowie die Termintreue bei der Bedarfsdeckung ermittelt. Des Weiteren können Daten zu den Auslastungen der Bearbeitungsstationen je Periode sowie Daten über die Durchlaufzeiten einzelner Bearbeitungsschritte als auch ganzer Lose erhoben werden.

Produktionspausen und Störungen an den Bearbeitungsstationen werden nicht berücksichtigt, sodass jederzeit uneingeschränkt produziert werden kann. Transportzeiten zwischen den jeweiligen Bearbeitungsstationen werden ebenfalls nicht betrachtet, sodass ein Produkt nach Beendigung der Bearbeitung an einer Bearbeitungsstation direkt an der nachgelagerten Bearbeitungsstation bearbeitet werden kann bzw. in der Warteschlange auf die Bearbeitung wartet.

⁵Aufgrund der Annahme, dass die zur Produktion benötigten Materialien vorhanden sind, wird lediglich die geplante Startperiode als Kriterium herangezogen.

⁶Mit Ausnahme von den in Kapitel 6.4 durchgeführten Untersuchungen, erfolgt die Bearbeitung nach dem FIFO-Prinzip.

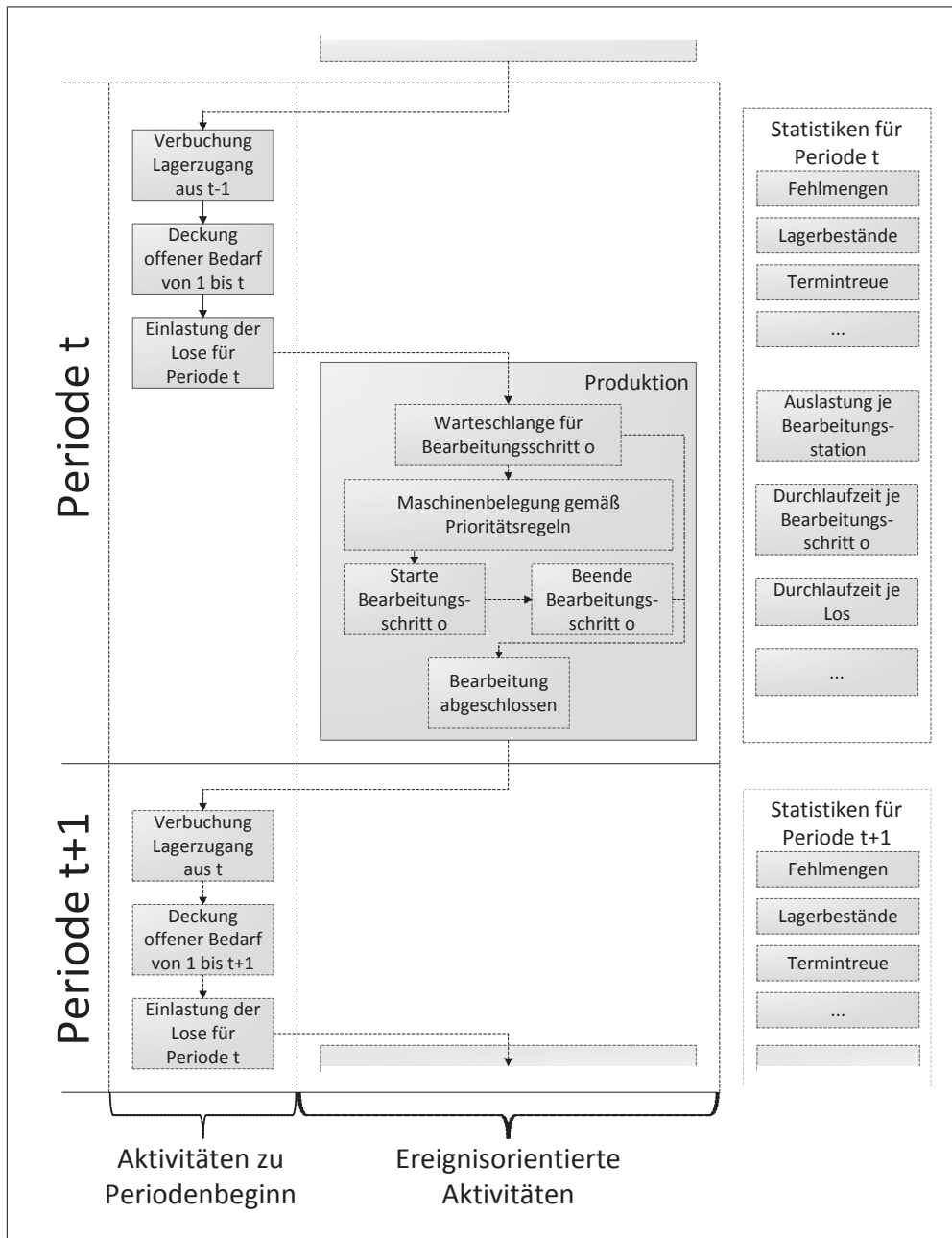


Abbildung 4.4.: Prinzipieller Ablauf der Simulation.



4.3. Gemessene Clearing Funktionen

Basierend auf der in Kapitel 3.3 beschriebenen Methode erfolgt die Ermittlung der produktspezifischen Clearing Funktionen für das zugrundeliegende Produktionssystem. Das Produktionsverhältnis der Produkte untereinander ist, wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, identisch. Somit wird im Mittel jedes Produkt gleich häufig benötigt. Die Produktionslose werden an den Bearbeitungsstationen nach dem FIFO-Prinzip abgearbeitet.

Zu Beginn jedes Simulationslaufs werden in das noch leere Produktionssystem für jedes Produkt k die Freigabemengen $R_{k,t}$ bestimmt. Begonnen wird mit einem WIP-Bestand $\widehat{W}_{k,t}$ von 1 Mengeneinheit. Somit wird zu Beginn der ersten Periode ($t = 1$) je Produkt k 1 Mengeneinheit in das Produktionssystem freigegeben. Aufgrund der hierdurch entstehenden sehr geringen Last können alle freigegebenen Mengen innerhalb der ersten Periode produziert werden. Somit ist zu Beginn der zweiten Periode ($t = 2$) das Produktionssystem wieder leer, sodass erneut je Produkt k ein Produktionslos mit der Größe von 1 Mengeneinheit freigegeben wird. Dies wird über die gesamte Simulationslaufzeit von 1000 Perioden so durchgeführt. Aufgrund der deterministischen Stückbearbeitungszeiten zeigt sich, wie zu erwarten war, zunächst ein streng linearer Zusammenhang, das heißt, die WIP-Bestände $\widehat{W}_{k,t}$ bzw. Freigabemengen $R_{k,t}$ können innerhalb einer Periode produziert werden. Erst bei steigendem WIP-Bestand kommt es vor, dass die freigegebenen Produktionslose nicht alle innerhalb einer Periode komplett fertiggestellt werden können. Dies führt zu einer Verringerung der Ausbringungsmenge. Wie in Kapitel 3.3.1 dargestellt, werden die Aufwärmphase sowie die notwendige Länge der Simulationsexperimente bestimmt. Es zeigt sich, dass im Schnitt eine Aufwärmphase von maximal 20 Perioden ausreichend ist. Die Untersuchungen zeigen zudem, dass ein Simulationshorizont T je Simulationslauf mit 1000 Perioden ausreicht, um statistisch signifikante Kennzahlen zu erhalten. Nach diesem Vorgehen wurden die WIP-Bestände je Produkt von 1 bis 500 Mengeneinheiten untersucht.⁷

Die Clearing Funktionen der jeweiligen Produkttypen⁸ haben einen nahezu identischen Verlauf, da die Produktionsprozesse identisch sind. Die gemessenen Clearing Funktionen werden im Nachfolgenden aufgezeigt. Hierbei zeigt die blaue Kurve die Ausbringungsmenge in Abhängigkeit vom WIP-Bestand und die rote Kurve gibt die prozentuale Breite des Konfidenzintervalls bei einem Konfidenzniveau von 95% an.

In Abbildung 4.5 sind die Clearing Funktionen der Produkte Part01 und Part05 dargestellt. Bis zu einem WIP-Bestand von 89 Mengeneinheiten haben die Clearing Funktionen einen linearen Verlauf. Entsprechend ist bis zu diesem WIP-Bestand keine Varianz der Messwerte vorhanden, da der gesamte WIP-Bestand (bzw. die gesamte Freigabemenge) innerhalb einer Periode komplett fertiggestellt werden kann. Ab einem WIP-Bestand von 90 Mengeneinheiten zeigt sich, dass die Ausbringungsmengen nicht mehr proportional zum WIP-Bestand steigen, sondern darunter liegen. Die gemessenen Konfidenzintervalle schwanken

⁷Eine weitere Erhöhung der WIP-Bestände bzw. Untersuchung dieser ist aufgrund einer bereits erreichten 100%igen Auslastung der Bearbeitungsstationen nicht notwendig.

⁸Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, haben die Produkte Part01/Part05, Part02/Part06, Part03/Part07 und Part04/Part08 identische Arbeitspläne und werden daher als Produkttypen bezeichnet.



ab diesem Bereich und erreichen einen maximalen Wert von etwas über 1%. Insgesamt zeigt sich, dass bei höheren WIP-Beständen Schwankungen der Ausbringungsmengen um bis zu 20 Mengeneinheiten auftreten.

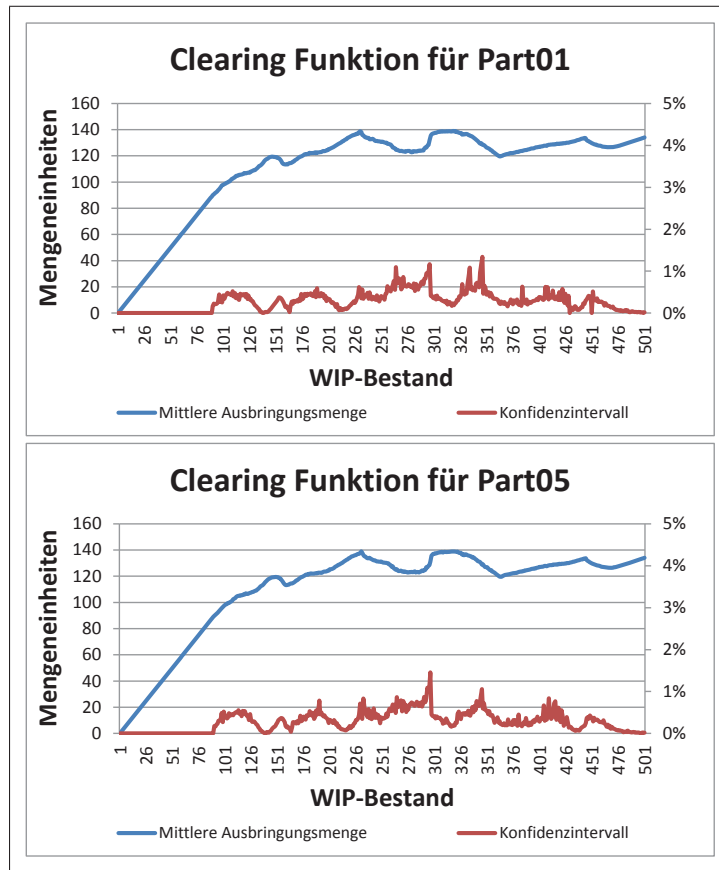


Abbildung 4.5.: Gemessene Clearing Funktion der Produkte Part01 und Part05.

In Abbildung 4.6 sind die gemessenen Clearing Funktionen der Produkte Part02 und Part06 dargestellt. Der lineare Bereich der Clearing Funktionen endet bei diesen Produkten bei einem WIP-Bestand von 90 Mengeneinheiten. Die maximal erzielte Ausbringungsmenge beträgt 148 Mengeneinheiten. Auch bei diesen Clearing Funktionen konnten geringe Konfidenzintervalle mit maximalen Breiten von etwas über 1% erzielt werden. Analog zu den gemessenen Clearing Funktionen der Produkte Part01 und Part05 können auch hier hohe Schwankungen der Ausbringungsmengen bei steigendem WIP-Bestand beobachtet werden.

Deutlich anders sehen die gemessenen Clearing Funktionen der Produkte Part03 und Part07 aus. Diese sind in Abbildung 4.7 dargestellt. Der lineare Bereich endet bei einem WIP-Bestand von 111 Mengeneinheiten und die maximal gemessene Ausbringungsmenge beträgt 140 Mengeneinheiten. Bei einem WIP-Bestand zwischen 155 und 165 Mengeneinheiten konnte die höchste Ausbringungsmenge erzielt werden. Steigt der WIP-Bestand

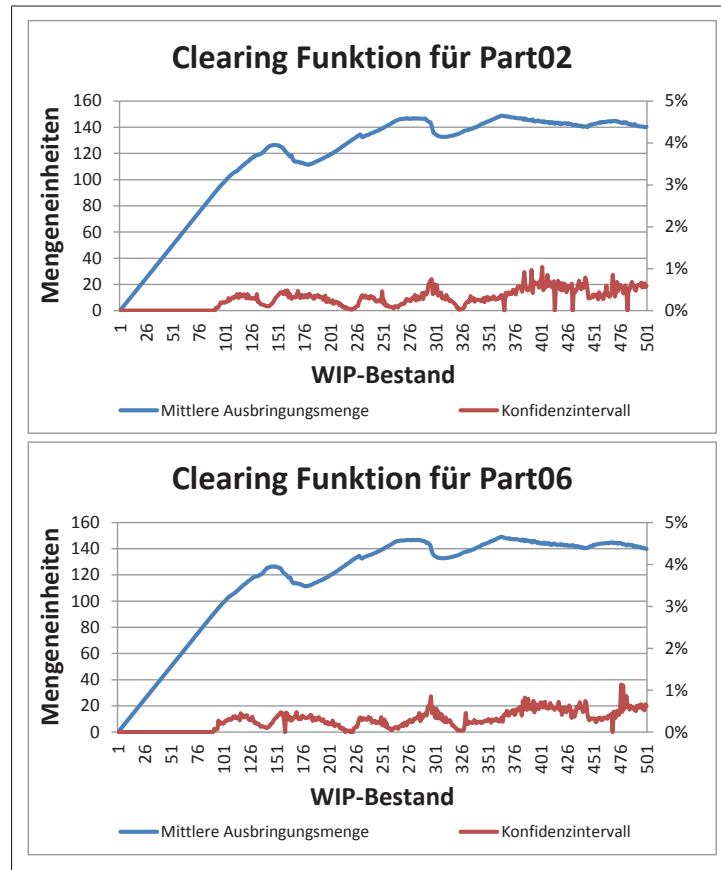


Abbildung 4.6.: Gemessene Clearing Funktion der Produkte Part02 und Part06.

weiter an, verringert sich die Ausbringungsmenge wieder und bleibt auf einem konstanten Niveau. Analog zu den anderen gemessenen Kurven konnten geringe Konfidenzintervalle gemessen werden.

Die Clearing Funktionen der Produkte Part04 und Part08 ähneln den Ergebnissen von Part03 und Part07. Wie Abbildung 4.8 zeigt, endet der lineare Bereich der Clearing Funktion bei einem WIP-Bestand von 124 Mengeneinheiten. Als maximale Ausbringungsmenge wurden 140 Mengeneinheiten erreicht und diese konnte ebenfalls bei einem WIP-Bestand zwischen 155 und 165 Mengeneinheiten gemessen werden. Bei weiter steigendem WIP-Bestand verringert sich die Ausbringungsmenge geringfügig und verläuft relativ konstant. Die Kurven der Produkte Part01/Part07 bzw. Part02/Part06 (vgl. Abbildungen 4.5 und 4.6) zeigen hohe Schwankungen der Ausbringungsmenge bei steigendem WIP-Bestand. Diese Produkte müssen im Rahmen des Bearbeitungsprozesses an allen drei Engpassmaschinen bearbeitet werden. Die Produkte Part03/Part07 sowie Part04/Part08 werden hingegen nur an zwei der Engpassmaschinen bearbeitet. Bei diesen Produkten zeigt sich, dass sich die gemessenen Ausbringungsmengen bei steigendem WIP-Bestand wieder etwas verringern, allerdings keinen größeren Schwankungen unterliegen.

Betrachtet man im direkten Vergleich die jeweiligen Clearing Funktionen, so erkennt man, dass eine gegenseitige Beeinflussung der Ausbringungsmengen vorliegt, welche die vorliegenden Schwankungen der einzelnen Clearing Funktionen verursacht (vgl. Abbildung

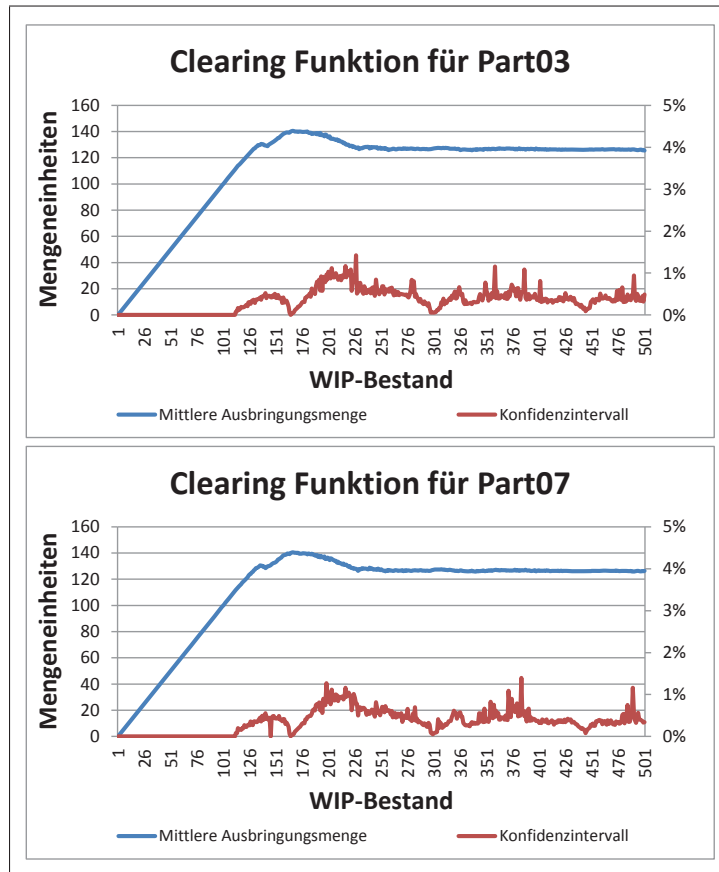


Abbildung 4.7.: Gemessene Clearing Funktion der Produkte Part03 und Part07.

4.9)⁹. Kann für ein Produkt eine hohe Ausbringungsmenge erreicht werden, so wirkt sich dies negativ auf die Ausbringungsmengen der anderen Produkte aus. Insbesondere bei hohen Auslastungen bzw. WIP-Beständen zeigt sich hierdurch die ausgeprägte Ressourcenkonkurrenz an den Engpassmaschinen.

Werden alle Ausbringungsmengen kumuliert, gleichen sich die gegenseitigen Beeinflussungen aus, sodass eine „glatte“ Funktion entsteht, die der analytischen Clearing Funktion, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, entspricht (siehe Abbildung 4.10). Hierdurch wird deutlich, dass die Clearing Funktionen der individuellen Produkte abhängig von den Bearbeitungsanteilen an den Engpassmaschinen sind und idealtypische produktspezifische Kurven aufgrund der ausgeprägten Ressourcenkonkurrenz sowie der wandernden Engpässe nicht vorliegen und auch nicht zu erwarten sind. Das Vorliegen einer geschlossenen Produktion verstärkt die Effekte, da bei größeren Losen die Engpassmaschinen länger belegt sind und bei ähnlichen Bearbeitungsreihenfolgen hierdurch die Ausbringungsmenge einzelner Produkte stark reduziert werden kann.

Die gemessenen linearen Bereiche sowie maximalen Ausbringungsmengen der produktspezifischen Clearing Funktionen sind in Tabelle 4.8 nochmals zusammengefasst.

⁹Aus Gründen der Übersichtlichkeit erfolgt der Vergleich nur mit den Clearing Funktionen der Produkte Part01, Part02, Part03 sowie Part04.

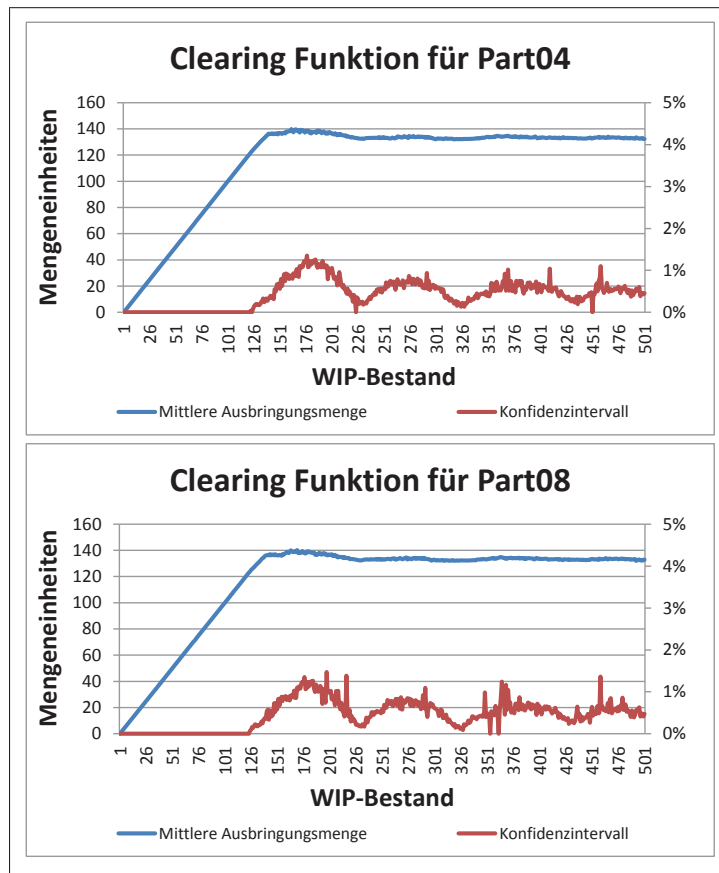


Abbildung 4.8.: Gemessene Clearing Funktion der Produkte Part04 und Part08.

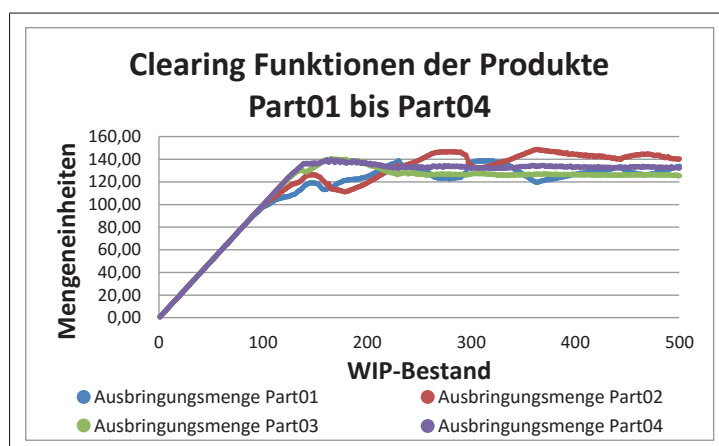


Abbildung 4.9.: Gemessene Clearing Funktionen der Produkte Part01 bis Part04 im direkten Vergleich.

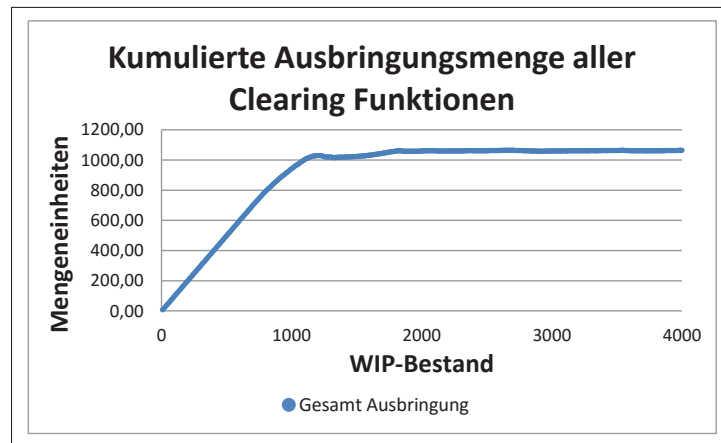


Abbildung 4.10.: Kumulierte Clearing Funktion über alle Produkte.

| Clearing Funktion für Produkt | Linearer Bereich | Maximale Ausbringungsmenge |
|-------------------------------|-------------------|----------------------------|
| Part01 / Part05 | 89 Mengeinheiten | 140 Mengeinheiten |
| Part02 / Part06 | 90 Mengeinheiten | 148 Mengeinheiten |
| Part03 / Part07 | 111 Mengeinheiten | 140 Mengeinheiten |
| Part04 / Part08 | 124 Mengeinheiten | 140 Mengeinheiten |

Tabelle 4.8.: Lineare Bereiche und maximale Ausbringungsmengen der gemessenen Clearing Funktionen.



5. Auftragsfreigabe unter Verwendung von Clearing Funktionen

Durch die Integration von Clearing Funktionen in Modelle der Auftragsfreigabe können die Planungsergebnisse verbessert werden. In diesem Kapitel werden zunächst die aus der Literatur bekannten Modelle und Methoden zur Verwendung der Clearing Funktion im Rahmen von Entscheidungsmodellen zur Auftragsfreigabe aufgezeigt und beschrieben. Hierauf aufbauend wird das Modell erweitert, sodass produktspezifische Clearing Funktionen verwendet werden können. Aufgrund der vorliegenden geschlossenen Produktion ist zudem ein modifizierter Ansatz zu verwenden, um die belastungsabhängigen Durchlaufzeiten zu bestimmen. Diese Ansätze und Modelle werden beschrieben und durch Simulationsexperimente analysiert und bewertet. Da es oft nicht möglich ist, die zukünftig eintreffenden Bedarfe vorherzusehen, liegen Bedarfsunsicherheiten vor. Das Eintreten von Fehlmengen aufgrund solcher Bedarfsunsicherheiten kann durch die Verwendung von Servicegraden reduziert werden. Es werden Ansätze und Modelle, wie durch die Integration unterschiedlicher Servicegrade mit Bedarfsunsicherheiten umgegangen werden kann, aufgezeigt und durch Simulationsexperimente analysiert und bewertet.

5.1. Ansätze und Methoden aus der Literatur

Das Ziel der Entscheidungsmodelle zur Auftragsfreigabeplanung ist, die Freigabemengen $R_{k,t}$ je Produkt k und Periode t so festzulegen, dass ein kostenoptimaler Produktionsplan unter Einhaltung aller Restriktionen vorliegt. Wie bereits in Kapitel 2.2.2 dargestellt, existieren hierzu unterschiedliche Entscheidungsmodelle, welche für diese Planungsaufgabe entwickelt worden sind. Die hierbei beschriebenen Modelle AFP^{FDLZ} und $MS\text{-}AFP^{FDLZ}$ verwenden beide eine belastungsunabhängige Durchlaufzeit, welche zum Planungszeitpunkt fest vorgegeben ist. Um die Belastungen im Produktionssystem, welche aufgrund der getroffenen Planungsentscheidungen resultieren, und die Auswirkung dieser auf die Durchlaufzeiten berücksichtigen zu können, erfolgt eine Integration der Clearing Funktion in das Entscheidungsmodell.

5.1.1. Integration aggregierter Clearing Funktion

Bereits Karmarkar hat ein Entscheidungsmodell formuliert, in welchem eine Clearing Funktion zur Abschätzung der Ausbringungsmengen in Abhängigkeit vom WIP-Bestand ver-

wendet wird.¹ Dieses Modell berücksichtigt nur den Fall, dass ein einziges Produkt gefertigt wird. Eine direkte Erweiterung dieses Modells um die Berücksichtigung von mehreren Produkten ist in Asmundsson u. a. beschrieben.² Wie bereits in Kapitel 3.2.1 gezeigt, existieren zwei unterschiedliche Ansätze, wie der WIP-Bestand bei Ermittlung der Clearing Funktion bestimmt werden kann (vgl. Formel (3.9) sowie Formel (3.10)). Entsprechend ist die Art des WIP-Bestands, welcher im Rahmen der Clearing Funktion verwendet wird, zu definieren.³ Das Entscheidungsmodell ist nachfolgend aufgeführt und wird in dieser Arbeit als AFP^{CF} bezeichnet.⁴

AFP^{CF}

Parameter:

- CF : Clearing Funktion
 $D_{k,t}$: Bedarf von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 h_k : Lagerkostensatz einer Einheit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
 tb_k : Stückbearbeitungszeit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
 w_k : Kosten für eine Einheit WIP-Bestand von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)

Variablen:

- $I_{k,t}$: Lagerbestand von Produkt k am Ende einer Periode t
 ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 $R_{k,t}$: Freigabemenge von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 $W_{k,t}$: WIP-Bestand von Produkt k am Ende von Periode t
 ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 $\widehat{W}_{k,t}$: WIP-Bestand von Produkt k in Periode t zur Ermittlung der Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ in Abhängigkeit der Clearing Funktion ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 $X_{k,t}$: Ausbringungsmenge von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{t=1}^T (I_{k,t} \cdot h_k + W_{k,t} \cdot w_k) \quad (5.1)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} + X_{k,t} - D_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.2)$$

¹Vgl. Karmarkar (1989), S. 116.

²Vgl. Asmundsson u. a. (2002), S. 11 und Asmundsson u. a. (2006), S. 97.

³Somit gilt: $\widehat{W}_{k,t} = W_{k,t-1} + R_{k,t}$ oder $\widehat{W}_{k,t} = \frac{W_{k,t-1} + W_{k,t}}{2}$.

⁴Die Modellformulierung in der Literatur berücksichtigt in der Zielfunktion zusätzlich Produktions- und Freigabekosten (vgl. Karmarkar (1989), S. 116 und Asmundsson u. a. (2002), S. 12.). Diese werden im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit berücksichtigt.

$$W_{k,t} = W_{k,t-1} + R_{k,t} - X_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.3)$$

$$\sum_{k=1}^K (tb_k \cdot X_{k,t}) \leq CF \left(\sum_{k=1}^K (tb_k \cdot \widehat{W}_{k,t}) \right) \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.4)$$

$$I_{k,t}, R_{k,t}, W_{k,t}, X_{k,t} \geq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.5)$$

In der Zielfunktion (5.1) erfolgt die Minimierung der anfallenden Kosten, bestehend aus Bestandskosten für WIP- und Lagerbestände. Durch die Lagerbilanzgleichung (5.2) wird die Ermittlung der Lagerbestände $I_{k,t}$ am Ende einer Periode t durchgeführt. Dieser ergibt sich aus dem Lagerbestand am Ende der Vorperiode $I_{k,t-1}$ zuzüglich der Produktionsmengen $X_{k,t}$, welche in Periode t fertiggestellt wurden und abzüglich der Bedarfe $D_{k,t}$ in Periode t . Analog wird über Gleichung (5.3) der WIP-Bestand $W_{k,t}$ am Ende einer Periode t berechnet. Der WIP-Bestand ergibt sich aus dem WIP-Bestand am Ende der Vorperiode $W_{k,t-1}$ zuzüglich der Freigabemengen $R_{k,t}$, welche in Periode t in das Produktionssystem freigegeben werden und abzüglich der Produktionsmengen $X_{k,t}$, welche in Periode t fertiggestellt werden und das Produktionssystem verlassen. Die Ausbringungsmenge $X_{k,t}$, welche je Produkt k und Periode t realisiert werden kann, wird über die Clearing Funktion CF in Abhängigkeit vom WIP-Bestand $\widehat{W}_{k,t}$ bestimmt. Durch eine Multiplikation der Stückbearbeitungszeiten tb_k erfolgt die Berücksichtigung des WIP-Bestands in Zeiteinheiten. Die Entscheidungsvariablen dürfen keine negativen Werte annehmen, was über die Bedingung (5.5) sichergestellt wird.

5.1.2. Disaggregation der Clearing Funktion

Die soeben beschriebene Integration der Clearing Funktion in das Entscheidungsmodell zur Auftragsfreigabe ist naheliegend, führt aber zu Problemen. So kann es vorkommen, dass für ein Produkt A eine Ausbringungsmenge ermittelt wird, obwohl nur für ein Produkt B ein WIP-Bestand vorhanden ist. Die Kapazitätsrestriktion kann für den Fall von zwei Produkten (A und B) wie nachfolgend dargestellt formuliert werden:⁵

$$X_A + X_B \leq CF(W_A + W_B) \quad (5.6)$$

Eine zulässige Lösung dieser Kapazitätsrestriktion ist auch gegeben, wenn gilt:

$$X_A > 0, X_B = 0, W_A = 0, W_B > 0.$$

Somit kann eine Ausbringungsmenge für Produkt A ermöglicht werden, obwohl nur für Produkt B ein WIP-Bestand existiert. Um dieses Problem zu umgehen, schlagen Asmundsson u. a. vor, die aggregierte Clearing Funktion und die bestimmte Ausbringungsmenge auf die jeweiligen Produkte proportional zum WIP-Bestand des Produkts, wie in Abbildung 5.1 exemplarisch für zwei Produkte A und B dargestellt⁶, zu verteilen.

⁵Vgl. Asmundsson u. a. (2002), S. 13.

⁶Vgl. Pahl u. a. (2007), S. 318.

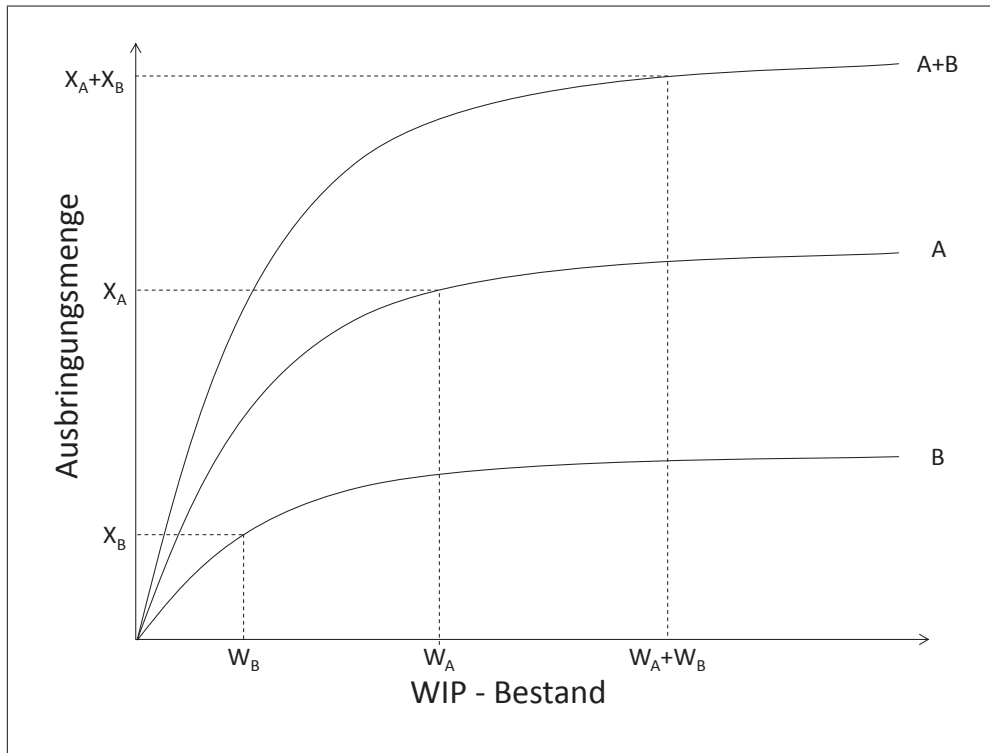


Abbildung 5.1.: Exemplarische Darstellung der Aufteilung der aggregierten Clearing Funktion (Quelle der Abbildung: Pahl u. a. (2007), S. 318).

Hierzu wird eine Variable $Z_{k,t}$ eingeführt, sodass die folgenden Restriktionen zu beachten sind:⁷

$$tb_k \cdot X_{k,t} \leq Z_{k,t} \cdot CF \left(\sum_{i=1}^K \frac{tb_i \cdot \widehat{W}_{i,t}}{Z_{i,t}} \right) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.7)$$

$$\sum_{k=1}^K Z_{k,t} = 1 \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.8)$$

5.1.3. Linearisierung der Clearing Funktion

Um ein lineares Optimierungsmodell zu erhalten, erfolgt, wie in Kapitel 3.2.1 in Abbildung 3.3 aufgezeigt, eine Linearisierung der Clearing Funktion in N Segmente. Für jedes lineare Segment n wird eine Steigung a_n sowie ein Achsenabschnitt b_n definiert. Hierbei gilt:⁸

⁷Vgl. Asmundsson u. a. (2002), S. 14 sowie Asmundsson u. a. (2009), S. 147.

⁸Vgl. Missbauer u. Uzsoy (2011), S. 467.

$$b_1 = 0 \quad \wedge \quad a_1 > a_2 > \dots > a_N = 0 \quad (5.9)$$

Durch Formel (5.9) wird sichergestellt, dass im ersten Segment die lineare Funktion durch den Nullpunkt verläuft. Die Steigung a_n muss monoton fallen und der letzte Wert muss parallel zur Abszisse verlaufen, damit bei steigendem WIP-Bestand keine Erhöhung der Ausbringungsmenge mehr resultiert und somit die maximale Ausbringungsmenge erreicht ist. Diese Linearisierung führt zu der nachfolgend aufgeführten Kapazitätsrestriktion:⁹

$$tb_k \cdot X_{k,t} \leq a_n \cdot tb_k \cdot \widehat{W}_{k,t} + Z_{k,t} \cdot b_n \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq n \leq N \quad (5.10)$$

Durch diese Anpassungen und zusätzlichen Variablen und Restriktionen entsteht ein Entscheidungsmodell, welches in der Literatur als die *Allocated Clearing Function* (ACF) bezeichnet wird und die über alle Produkte aggregierte Clearing Funktion produktspezifisch aufteilt.¹⁰

5.1.4. Integration produktspezifischer Clearing Funktionen

Wird eine produktspezifische Clearing Funktion ermittelt, wie in Kapitel 3.2.2 aufgezeigt, so erfolgt die Integration der spezifischen funktionalen Form ($MDCF_k$)¹¹ in das Entscheidungsmodell. Eine Variable $Z_{k,t}$ ist aufgrund der bereits produktspezifischen Clearing Funktion nicht notwendig, sodass eine Kapazitätsrestriktion, wie nachfolgend dargestellt, resultiert.¹²

$$tb_k \cdot X_{k,t} \leq MDCF_k \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.11)$$

Durch die Integration dieser nicht linearen funktionalen Formen der Clearing Funktion resultiert ein nicht lineares Entscheidungsmodell. Entsprechende Approximationen zur Erhaltung eines linearen Optimierungsmodells sowie die Bewertung der Güte solcher Ansätze sind Gegenstand zukünftiger Forschungsbemühungen.¹³

Entgegen den Modellen, welche feste Durchlaufzeiten verwenden, erfolgt in den soeben aufgezeigten Modellen eine Abschätzung der möglichen Ausbringungsmenge $X_{K,t}$ in Abhängigkeit vom WIP-Bestand $\widehat{W}_{k,t}$. Hierdurch ist es möglich, dass eine Teilmenge der Freigabemenge $R_{k,t}$ zu einem Lagerzugang führt. Bei Verwendung einer festen Durchlaufzeit führen nur ganze Freigabemengen $R_{k,t}$ nach einer definierten Durchlaufzeit $L_{k,t}$ zu einem Lagerzugang.

⁹Vgl. Asmundsson u. a. (2009), S. 149 und Missbauer u. Uzsoy (2011), S. 468.

¹⁰Vgl. Asmundsson u. a. (2009), S. 147.

¹¹Vgl. Kapitel 3.2.2 Formel 3.16 bis 3.18 sowie Formel 3.19 bis 3.25.

¹²Vgl. Albey u. a. (2014), S. 9.

¹³Siehe Albey u. a. (2014), S. 17.



5.2. Ansätze und Methoden dieser Forschungsarbeit

Wie bereits in Kapitel 3.3 aufgezeigt, erfolgt in dieser Arbeit eine produktspezifische Ermittlung der Clearing Funktion für das gesamte Produktionssystem. Eine Unterscheidung der einzelnen Bearbeitungsstationen besteht nicht, sodass, bezogen auf die Bearbeitungsstationen, ein aggregierter Ansatz verfolgt wird. Zudem erfolgt in den Ansätzen der Literatur eine aggregierte Betrachtung und die Freigabemenge $R_{k,t}$ beschreibt eine Anzahl an (identischen) Losen, welche in das Produktionssystem freigegeben werden. Aufgrund dieser Sichtweise ist es möglich, dass eine Teilmenge von $R_{k,t}$ zu einem Lagerzugang führt. Entgegen den in der Literatur beschriebenen Ansätzen beschreibt in dieser Arbeit eine Freigabemenge $R_{k,t}$ ein Los für Produkt k in Periode t , welches in das Produktionssystem zu Beginn der Periode t freigegeben wird. Da eine geschlossene Produktion vorliegt, ist es nicht möglich, dass eine Teilmenge von $R_{k,t}$ zu einem Lagerzugang führt. Die Integration der Clearing Funktion in das Modell zur Auftragsfreigabe erfolgt zur Abschätzung der resultierenden Durchlaufzeiten einer Freigabemenge $R_{k,t}$ in Abhängigkeit von der Last im Produktionssystem. Das Vorgehen zur Integration der Clearing Funktion in diesem Ansatz wird nachfolgend erläutert.

5.2.1. Direkte Integration der Clearing Funktion

Durch die produktspezifische Clearing Funktion CF_k kann in Abhängigkeit vom WIP-Bestand $\widehat{W}_{k,t}$ eine Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ bestimmt werden. Somit gilt:

$$X_{k,t} = CF_k(\widehat{W}_{k,t}) \quad \text{mit} \quad \widehat{W}_{k,t} = W_{k,t-1} + R_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.12)$$

Die gemessenen Clearing Funktionen (siehe Kapitel 4.3) beinhalten eine hohe Dynamik, welche durch die im Produktionssystem vorhandenen Gegebenheiten bestimmt wird. Eine Linearisierung dieser Kurven oder eine Regression zu einer vordefinierten funktionalen Form, wie in der Literatur üblich, würde die vorhandene Dynamik deutlich verringern und somit die produktspezifischen Kurvenverläufe nicht mehr mit ausreichender Genauigkeit repräsentieren. Aus diesem Grund erfolgt eine exakte Integration der Clearing Funktion in das Optimierungsmodell. Hierbei wird ein Vektor $CF_{k,n}$ definiert, welcher für den jeweilig gemessenen WIP-Bestand ($1 \leq n \leq N$ mit $n \in \mathbb{Z}$ und $N = \widehat{W}_k^{max}$) eine produktspezifische Ausbringungsmenge X_k beinhaltet und somit die Werte der Clearing Funktion beschreibt. Dieser ist in Tabelle 5.1 beispielhaft dargestellt.

Abhängig vom vorliegenden WIP-Bestand $\widehat{W}_{k,t}$ eines Produkts k in einer Periode t ist die entsprechende Ausbringungsmenge X_k des Vektors $CF_{k,n}$ zu bestimmen. Um dies realisieren zu können und ein lineares Optimierungsmodell zu erhalten, erfolgt eine Transformation über einen binären Vektor $VI_{k,t,n}$. Für jedes Produkt k und jede Periode t wird über den Index n des Vektors $VI_{k,t,n}$ der Index des Vektors $CF_{k,n}$ definiert. Hierbei ist zu beachten, dass der erste Index n des Vektors $CF_{k,n}$ einen WIP-Bestand bzw. eine Ausbringungsmenge von 0 repräsentiert. Aus diesem Grund ist auf der rechten Seite der Gleichung der Wert 1



| Ausbringungsmenge | Index n | | | | | | | | | | |
|-------------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | ... | 101 | 102 | ... | 200 | 201 | N |
| X_1 | 0 | 1 | 2 | 3 | ... | 90 | 90 | ... | 90 | 90 | ... |
| X_2 | 0 | 1 | 2 | 3 | ... | 101 | 102 | ... | 150 | 150 | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| X_k | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Tabelle 5.1.: Beispielhafte Darstellung des Vektors CF .

zu addieren. Somit gilt:

$$\sum_{n=1}^N (VI_{k,t,n} \cdot n) = \widehat{W}_{k,t} + 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.13)$$

Zudem muss sichergestellt werden, dass im binären Vektor $VI_{k,t,n}$ für ein Produkt k in einer Periode t nur exakt ein Wert von n größer 1 vorliegen darf. Somit ist folgende Restriktion zu beachten:

$$\sum_{n=1}^N VI_{k,t,n} = 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.14)$$

Multipliziert man nun den binären Vektor $VI_{k,t,n}$ mit dem Vektor der Clearing Funktion $CF_{k,n}$, so kann die Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ bestimmt werden. Dies ist in der folgenden Gleichung dargestellt:

$$X_{k,t} = \sum_{n=1}^N (CF_{k,n} \cdot VI_{k,t,n}) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.15)$$

Durch diese zusätzlichen Restriktionen und Vektoren kann die Clearing Funktion direkt in das Entscheidungsmodell integriert werden, sodass keine Approximation über eine abschnittsweise Linearisierung erfolgen muss und ein lineares Optimierungsmodell entsteht.

5.2.2. Ermittlung der Durchlaufzeiten durch die Clearing Funktion

Da eine geschlossene Produktion zugrunde liegt, ist eine Freigabemenge $R_{k,t}$ erst nach vollständiger Bearbeitung fertiggestellt und kann das Produktionssystem verlassen. Somit muss eine Freigabemenge $R_{k,t}$ durch die Ausbringungsmengen $X_{k,t}$ komplett gedeckt sein. Dies soll durch das nachfolgende Beispiel verdeutlicht werden. Betrachtet werden die Freigabemengen $R_{A,t}$ eines Produkts A über fünf Perioden (siehe Tabelle 5.2). Abhängig von der Ausbringungsmenge $X_{A,t}$ erfolgt die Fertigstellung des Loses $FL_{A,t}$, wenn die Freigabemenge $R_{A,t}$ durch die Ausbringungsmenge $X_{A,t}$ gedeckt wurde.

Ein fertiggestelltes Los $FL_{k,t}$ muss durch die Ausbringungsmengen $X_{k,1}$ bis $X_{k,t}$ gedeckt sein, sodass die folgende Bedingung erfüllt sein muss:

$$\sum_{i=1}^T FL_{k,i} \leq \sum_{i=1}^T X_{k,i} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.16)$$



| Periode t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------|----|----|----|----|----|
| $R_{A,t}$ | 15 | 12 | 5 | 8 | 10 |
| $X_{A,t}$ | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| $FL_{A,t}$ | 0 | 15 | 12 | 13 | 10 |

Tabelle 5.2.: Beispiel einer geschlossenen Produktion.

Im Entscheidungsmodell muss somit die Variable des fertiggestellten Loses $FL_{k,t}$ die Freigabemengen $R_{k,t}$, welche durch die Ausbringungsmengen $X_{k,t}$ gedeckt worden sind, beinhalten. Um dies umsetzen zu können, werden zwei Vektoren eingeführt. Der Vektor $VR_{k,t,\tau}$ beinhaltet die Information darüber, dass die Freigabemenge $R_{k,t}$ von Produkt k , welche in Periode t freigegeben wurde, in Periode τ durch die Ausbringungsmengen $X_{k,i}$ (mit $1 \leq i \leq \tau$) gedeckt wurde. Die Summe aller Freigabemengen, welche in einer Periode τ fertiggestellt werden, bestimmen somit die Menge an fertiggestellten Losen $FL_{k,t}$ in dieser Periode τ . Somit gilt:

$$FL_{k,t} = \sum_{i=1}^{\tau} VR_{k,i,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.17)$$

Um sicherstellen zu können, dass im Vektor $VR_{k,t,\tau}$ die komplette Freigabemenge $R_{k,t}$ verbucht wird, ist folgende Restriktion zu beachten:

$$\sum_{\tau=0}^T VR_{k,t,\tau} = R_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \quad (5.18)$$

Für das oben aufgeführte Beispiel ergibt sich somit der Vektor $VR_{k,t,\tau}$ sowie die durch diesen Vektor bestimmten fertiggestellten Lose $FL_{k,t}$, welche in Tabelle 5.3 dargestellt sind. Somit erfolgt die Fertigstellung der Freigabemengen $R_{k,t}$ in den Perioden 2, 3, 4 und 5, wobei hierbei in Periode 4 die Freigabemengen der Perioden 3 und 4 in der gleichen Periode fertiggestellt werden.

Zusätzlich wird ein binärer Vektor $VB_{k,t,\tau}$ eingeführt. Dieser Vektor $VB_{k,t,\tau}$ ist analog dem Vektor $VR_{k,t,\tau}$ aufgebaut und beinhaltet in den Perioden, in welchen eine Freigabemenge fertiggestellt werden kann, den Wert 1, sonst den Wert 0. Dies wird durch die folgende Bedingung sichergestellt, wobei der Parameter M eine sehr große Zahl darstellt.

$$VB_{k,t,\tau} \cdot M \geq VR_{k,t,\tau} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq \tau \leq T \quad (5.19)$$

Durch diesen Vektor kann sichergestellt werden, dass eine Freigabemenge $R_{k,t}$ nur einmal als Lagerzugang verbucht wird. Somit muss gelten:

$$\sum_{\tau=1}^T VB_{k,t,\tau} \leq 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.20)$$

Hieraus ergibt sich für das oben aufgeführte Beispiel der in Tabelle 5.4 aufgeführte Vektor $VB_{k,t,\tau}$.



| | | Fertigstellung (τ) | | | | |
|--------------------------------------|----------------------|---------------------------|----|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Freigabe (t) | $VR_{k,t,\tau}$ | | | | | |
| | 1 ($R_{A,1} = 15$) | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 ($R_{A,2} = 12$) | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 |
| | 3 ($R_{A,3} = 5$) | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| | 4 ($R_{A,4} = 8$) | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 |
| | 5 ($R_{A,5} = 10$) | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 |
| $FL_{k,t} = \sum_{i=1}^t VR_{k,i,t}$ | | 0 | 15 | 12 | 13 | 10 |

Tabelle 5.3.: Beispiel des Vektors $VR_{k,t,\tau}$ bei einer geschlossenen Produktion.

| | | Fertigstellung (τ) | | | | | $\sum_{\tau=1}^T VB_{k,t,\tau} \leq 1$ |
|--------------|----------------------|---------------------------|---|---|---|---|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Freigabe (t) | $VB_{k,t,\tau}$ | | | | | | |
| | 1 ($R_{A,1} = 15$) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 2 ($R_{A,2} = 12$) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | 3 ($R_{A,3} = 5$) | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | 4 ($R_{A,4} = 8$) | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | 5 ($R_{A,5} = 10$) | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

Tabelle 5.4.: Beispiel des Vektors $VB_{k,t,\tau}$ bei einer geschlossenen Produktion.

Zudem soll die Reihenfolge der Freigabe der Lose im Rahmen der Fertigstellung berücksichtigt werden, sodass eine Reihenfolge nach dem FiFo-Prinzip eingehalten wird. Es kann vorkommen, dass zum Beispiel in Periode 1 ein Los mit 25 Mengeneinheiten und in Periode 2 ein Los mit 10 Mengeneinheiten freigegeben wird. Beträgt die Ausbringungsmenge in beiden Perioden 10 Mengeneinheiten, so könnte in Periode 2 die Freigabemenge von 10 Mengeneinheiten zu einem Lagerzugang führen, obwohl die Freigabemenge in Periode 1 noch nicht fertiggestellt wurde. Die Einhaltung des FiFo-Prinzips kann durch die nachfolgende Bedingung gewährleistet werden:

$$\sum_{i=1}^{\tau} VB_{k,t,i} \geq \sum_{i=1}^{\tau} VB_{k,t+1,i} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.21)$$

Die Lose $FL_{k,t}$, die von Produkt k in einer Periode t fertiggestellt werden, führen erst zu Beginn der Folgeperiode $t + 1$ zu einem Lagerzugang $LZ_{k,t}$.¹⁴ Um den tatsächlichen physischen Lagerzugang zu bestimmen, ist die folgende Bedingung zu ergänzen:

$$FL_{k,t} = LZ_{k,t+1} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.22)$$

¹⁴Wird ein Los in einer Periode t komplett abgeschlossen, so kann die Menge erst in der Folgeperiode $t + 1$ zur Bedarfsdeckung verwendet werden.



5.2.3. Entscheidungsmodell AFP^{CF-DLZ}

Unter Berücksichtigung der in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 dargestellten Bedingungen und Vektoren ergibt sich das nachfolgende Optimierungsmodell, welches die Grundlage der in den folgenden Abschnitten beschriebenen Untersuchungen bildet. Dieses Modell wird in dieser Arbeit als AFP^{CF-DLZ} bezeichnet. Das Modell AFP^{CF-DLZ} wird in einer rollierenden und überlappenden Planungsumgebung eingesetzt, sodass die Zuweisung von initialen Werten erfolgt und diese entsprechend berücksichtigt werden müssen. Die Produktionsmenge, welche zum Planungszeitpunkt noch im Produktionssystem vorhanden ist, wird als initiale Freigabemenge $R_{k,0}$ interpretiert. Da diese noch offenen Produktionsmengen $R_{k,0}$ teilweise schon bearbeitet sind, ist die erbrachte Arbeitsleistung mit $X_{k,0}$ ebenfalls zu berücksichtigen. Der Vektor $VR_{k,t,\tau}$ sowie der binäre Vektor $VB_{k,t,\tau}$ müssen somit um die Periode 0 erweitert werden, sodass gilt: $0 \leq t \leq T \wedge 0 \leq \tau \leq T$. Durch diese Anpassungen resultiert das nachfolgend dargestellte Entscheidungsmodell.

AFP^{CF-DLZ}

Parameter:

- $CF_{k,n}$: Vektor zur Clearing Funktion für Produkt k und Wert n
 $(1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq n \leq N)$
- f_k : Kosten für eine Einheit an Fehlmengen von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
- $D_{k,t}$: Bedarf von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
- h_k : Lagerkosten für eine Einheit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
- M : Große Zahl mit $M > \left(\sum_{k=1}^K F_{k,0} + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T D_{k,t} \right)$
- w_k : Kosten für eine Einheit WIP-Bestand von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)

Variablen:

- $F_{k,t}$: Fehlmengen von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);
 initiale Fehlmengen zum Planungsbeginn: $F_{k,0}$
- $FL_{k,t}$: Vollständig bearbeitete Lose von Produkt k in Periode t
 $(1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T)$
- $I_{k,t}$: Lagerbestand von Produkt k am Ende von Periode t
 $(1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T)$;
 initialer Lagerbestand zum Planungsbeginn: $I_{k,0}$
- $LZ_{k,t}$: Lagerzugang von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
- $R_{k,t}$: Freigabemenge von Produkt k zu Beginn von Periode t
 $(1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T)$;
 Produktionsmenge von Produkt k , welche zum Planungszeitpunkt im Produktionssystem vorhanden ist: $R_{k,0}$



- $VB_{k,t,\tau}$: Binärvektor von Produkt k zur Ermittlung der Fertigstellungsperiode τ einer Freigabemenge, welche in Periode t freigegeben wurde ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge 0 \leq \tau \leq T$)
- $VR_{k,t,\tau}$: Vektor von Produkt k zur Ermittlung der Fertigstellungsperiode τ einer Freigabemenge, welche in Periode t freigegeben wurde ($1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \wedge 0 \leq \tau \leq T$)
- $VI_{k,t,n}$: Binärer Vektor zur Transformation der Clearing Funktion zur Ermittlung einer Ausbringungsmenge zu einem WIP-Bestand ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq n \leq N$)
- $W_{k,t}$: WIP-Bestand von Produkt k am Ende von Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);
initialer WIP-Bestand zum Planungsbeginn: $W_{k,0}$
- $\widehat{W}_{k,t}$: WIP-Bestand von Produkt k in Periode t zur Ermittlung der Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ in Abhängigkeit der Clearing Funktion ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
- $X_{k,t}$: Ausbringungsmenge von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);
Ausbringungsmenge, die für die im Produktionssystem vorhandenen Freigabemengen $R_{k,0}$ bereits erbracht wurde: $X_{k,0}$

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (I_{k,t} \cdot h_k + W_{k,t} \cdot w_k + F_{k,t} \cdot f_k) \quad (5.23)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} + LZ_{k,t} - F_{k,t-1} - D_{k,t} + F_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.24)$$

$$W_{k,t} = W_{k,t-1} + R_{k,t} - X_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.25)$$

$$\widehat{W}_{k,t} = W_{k,t-1} + R_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.26)$$

$$\sum_{n=1}^N VI_{k,t,n} \cdot n = \widehat{W}_{k,t} + 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.27)$$

$$\sum_{n=1}^N VI_{k,t,n} = 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.28)$$



$$X_{k,t} = \sum_{n=1}^N (CF_{k,n} \cdot VI_{k,t,n}) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.29)$$

$$\sum_{i=0}^T FL_{k,i} \leq \sum_{i=0}^T X_{k,i} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.30)$$

$$FL_{k,t} = \sum_{i=0}^t VR_{k,i,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \quad (5.31)$$

$$\sum_{\tau=0}^T VR_{k,t,\tau} = R_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \quad (5.32)$$

$$VB_{k,t,\tau} \cdot M \geq VR_{k,t,\tau} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \wedge 0 \leq \tau \leq T \quad (5.33)$$

$$\sum_{\tau=0}^T VB_{k,t,\tau} \leq 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \quad (5.34)$$

$$\sum_{i=0}^{\tau} VB_{k,t,i} \geq \sum_{i=0}^{\tau} VB_{k,t+1,i} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T-1 \quad (5.35)$$

$$FL_{k,t} = LZ_{k,t+1} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T-1 \quad (5.36)$$

$$F_{k,t}, I_{k,t}, R_{k,t}, W_{k,t}, X_{k,t} \geq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.37)$$

Durch die Zielfunktion (5.23) erfolgt die Minimierung der entstehenden Kosten, bestehend aus Lager- und WIP-Beständen sowie der auftretenden Fehlmengen. Wie bereits in den bisher beschriebenen Modellen dargestellt, erfolgt die Ermittlung der Lager- und WIP-Bestände je Produkt am Ende einer Periode t über die Gleichungen (5.24) sowie (5.25). Die Last im Produktionssystem je Produkt k zu Beginn einer Periode t wird über die Gleichung (5.26) bestimmt. Durch die Gleichungen (5.27) - (5.29) erfolgt die Transformation

der Clearing Funktion durch den Vektor $VI_{k,t,n}$ und die Ermittlung der Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ in Abhängigkeit vom WIP-Bestand $\widehat{W}_{k,t}$ und der Clearing Funktion $CF_{k,n}$. Die Umsetzung der geschlossenen Produktion erfolgt über die Gleichungen (5.30) - (5.36). Letztlich ist über die Bedingung (5.37) sicherzustellen, dass die Entscheidungsvariablen keine negativen Werte annehmen.

Durch dieses Modell kann eine Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ in Abhängigkeit von der Arbeitslast $\widehat{W}_{k,t}$ durch die produktspezifischen Clearing Funktionen CF_k bestimmt werden. Da eine geschlossene Produktion vorliegt, führt eine Freigabemenge $R_{k,t}$ erst nach vollständiger Bearbeitung des Loses in der Folgeperiode zu einem Lagerzugang $L_{k,t}$. Somit erfolgt durch die Clearing Funktion eine Abschätzung der auftretenden Durchlaufzeiten einer Freigabemenge $R_{k,t}$.

5.2.4. Experimentdesign

Um die Leistungsfähigkeit der gemessenen produktspezifischen Clearing Funktionen und dem soeben aufgezeigten Entscheidungsmodell zur Auftragsfreigabe bewerten zu können, erfolgt die Durchführung von Simulationsstudien. Das zu untersuchende und zugrundeliegende Produktionssystem wurde bereits in Kapitel 4 beschrieben. Um statistisch signifikante Kennzahlen zu erhalten, erfolgt eine Simulation über einen Simulationshorizont T^s von 1000 Perioden. Um unterschiedlich hohe Lastsituationen zu analysieren, werden mehrere Bedarfsszenarien untersucht. Alle Bedarfe folgen einer Normalverteilung mit unterschiedlich hohen Werten des Mittelwertes sowie der Standardabweichung. Durch die Verwendung verschieden hoher Variationskoeffizienten werden unterschiedlich hohe Schwankungen der Bedarfe realisiert. Insgesamt werden somit zwei Mittelwerte mit jeweils zwei Variationskoeffizienten betrachtet, sodass insgesamt vier Bedarfsszenarien existieren. Die Parameter der jeweiligen Bedarfsszenarien sind in Tabelle 5.5 aufgeführt.

| Bedarfsszenario | Mittelwert | Standardabweichung | Variationskoeffizient |
|-----------------|------------|--------------------|-----------------------|
| S-1 | 80 | 40 | 0.5 |
| S-2 | 80 | 56 | 0.7 |
| S-3 | 90 | 45 | 0.5 |
| S-4 | 90 | 63 | 0.7 |

Tabelle 5.5.: Parameter der Normalverteilung der einzelnen Bedarfsszenarien.

Auf Basis dieser Werte erfolgt die Generierung von Bedarfen über 1000 Perioden je Produkt k unter Verwendung einer Normalverteilung. Es wird sichergestellt, dass in jeder Periode ein positiver Bedarf besteht, sodass bei Werten kleiner oder gleich null ein neuer Bedarf erzeugt wird. Es erfolgt eine rollende und überlappende Planung mit einem Planungshorizont T . Nach einem definierten Planungsabstand r ($r \leq T$) erfolgt eine Neuplanung,



ebenfalls über T Perioden. Hierdurch werden zum einen Entscheidungen vorheriger Planungsläufe revidiert und zum anderen werden weitere zukünftige Perioden in die Planung mit einbezogen. Zudem wird zu Beginn eines neuen Planungslaufs die aktuelle im Produktionssystem befindliche Situation berücksichtigt, sodass hierdurch etwaige Abweichungen zu vorherigen Planungen korrigiert werden können. In den konkreten Untersuchungen wird ein Planungshorizont T von acht Perioden angewendet. Der Planungsabstand r beträgt vier Perioden, sodass insgesamt je Bedarfsszenario und Planungsmodell 250 Planungsprobleme zu lösen sind (vgl. Abbildung 5.2). Die Bearbeitungsreihenfolge der Freigabemengen an den Bearbeitungsstationen erfolgt nach dem FIFO-Prinzip.

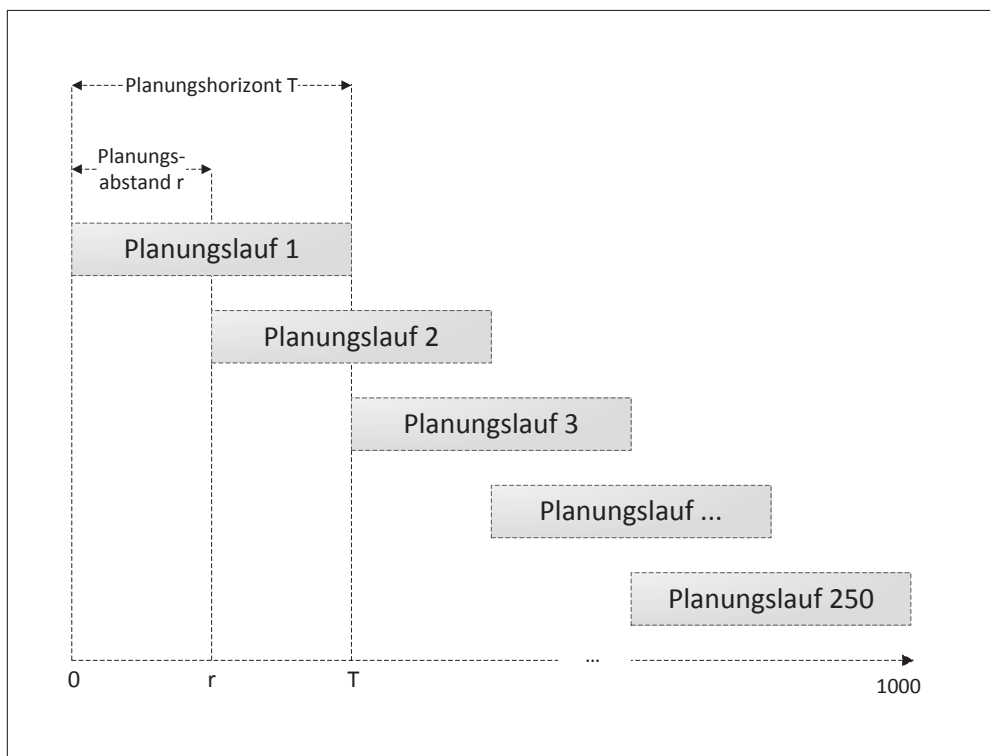


Abbildung 5.2.: Durchführung einer rollierenden und überlappenden Planung über den gesamten Simulationshorizont (Abbildung in Anlehnung an Herrmann (2011), S. 250).

Durch die Simulationsexperimente erfolgt die Messung der Fehlmengen, Lagerbestände sowie WIP-Bestände über den gesamten Simulationshorizont. Zudem wird der Anteil an Aufträgen ermittelt, welche aufgrund von Fehlmengen nur verspätet ausgeliefert werden können. Der Anteil an verspätet ausgelieferten Bedarfen VAB wird wie nachfolgend dargestellt ermittelt.

$$VAB = \frac{\text{Gesamtanzahl zu spät ausgelieferter Bedarfe}}{\text{Gesamtanzahl der Bedarfe}} \quad (5.38)$$

In jeder Periode t wird die Auslastung des Produktionssystems gemessen. Da wandelnde Engpässe existieren und aufgrund des Produktionsprozesses die Bearbeitungsstationen j ($1 \leq j \leq J$) in einer Periode t unterschiedlich stark ausgelastet sind, wird die maximale Auslastung einer Bearbeitungsstation j je Periode t ermittelt:

$$\lambda_t = \max_{j \in J} (\lambda_{j,t}) \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.39)$$

Aus dieser maximalen Auslastung λ_t je Periode t wird die mittlere Auslastung λ über den gesamten Simulationshorizont T^s bestimmt. Somit gilt:

$$\lambda = \frac{1}{T^s} \cdot \sum_{t=1}^{T^s} \lambda_t \quad (5.40)$$

5.2.5. Vergleichsmodelle

Um das Entscheidungsmodell AFP^{CF-DLZ} unter den genannten Rahmenbedingungen analysieren zu können, erfolgt ein Vergleich mit alternativen Planungsmodellen, welche nachfolgend beschrieben werden. Zum einen wird ein Entscheidungsmodell, welches feste Durchlaufzeiten verwendet, betrachtet. Ein solches Modell wurde bereits in Kapitel 2.2.2 unter der Bezeichnung AFP^{FDLZ} aufgezeigt. Dieses Modell wird problemspezifisch modifiziert. Zunächst sind die initialen WIP-Bestände $W_{k,0}$, welche zu Beginn des Planungslaufs im Produktionssystem vorhanden sind, zu berücksichtigen. Diese führen nach einer definierten Durchlaufzeit zu einer Ausbringungsmenge. Hierfür wird eine mittlere Durchlaufzeit L_k^{AVG} verwendet, welche wie folgt berechnet wird:

$$L_k^{AVG} = \left[\frac{1}{T} \cdot \sum_{t=1}^T L_{k,t} \right] \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.41)$$

Da im Entscheidungsmodell nur ganzzahlige Werte der Durchlaufzeit berücksichtigt werden, wird die berechnete mittlere Durchlaufzeit L_k^{AVG} aufgerundet. Dies ist konsistent zum vorliegenden Problem, da eine Fertigstellung innerhalb einer Periode t erst in der Folgeperiode $t + 1$ zu einem Lagerzugang führt. Unter Verwendung dieser mittleren Durchlaufzeit L_k^{AVG} erfolgt eine Approximation der zu erwartenden Durchlaufzeit der WIP-Bestände, welche zu Beginn eines Planungslaufs im Produktionssystem vorhanden sind. Somit gilt:

$$X_{k,0+L_k^{AVG}} = W_{k,0} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.42)$$

Es muss durch eine Kapazitätsrestriktion sichergestellt werden, dass die benötigte Kapazität die verfügbare Kapazität nicht überschreitet. Da jedes Produkt k eine individuelle Stückbearbeitungszeit tb_k hat, sind diese explizit zu berücksichtigen. Zudem liegen in der Fallstudie auch Rüstzeiten tr_k vor, sodass diese ebenfalls mit einzubeziehen sind. Ein Rüstvorgang erfolgt nur bei Vorliegen einer positiven Freigabemenge $R_{k,t}$, sodass über eine binäre Rüstvariable $\gamma_{k,t}$ die Notwendigkeit eines Rüstvorgangs bestimmt wird. Somit ist die

folgende Restriktion mit dem Parameter M , welche eine große Zahl beschreibt, zu ergänzen, um die Notwendigkeit eines Rüstvorgangs $\gamma_{k,t}$ zu ermitteln.

$$R_{k,t} - M \cdot \gamma_{k,t} \leq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.43)$$

Auf Basis dieser Rüstvariablen $\gamma_{k,t}$ sowie der Stückbearbeitungszeiten tb_k und Rüstzeiten tr_k ist die Kapazitätsrestriktion wie nachfolgend dargestellt zu formulieren.

$$\sum_{k=1}^K (R_{k,t} \cdot tb_k + tr_k \cdot \gamma_{k,t}) \leq C \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.44)$$

Aufgrund der aggregierten Betrachtung des Produktionssystems ist eine Bestimmung der verfügbaren Kapazität C nicht ohne Weiteres möglich. Im Produktionssystem existieren fünf Bearbeitungsstationen, welche jeweils eine verfügbare zeitliche Kapazität von 24 Stunden haben. Werden die verfügbaren Kapazitäten aufsummiert, so ergibt sich eine verfügbare Gesamtkapazität in Höhe von 120 Stunden. Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der Bearbeitungsreihenfolgen und Ressourcenkonkurrenzen diese maximal verfügbare Kapazität nicht vorliegt. Aus diesem Grund erfolgt, wie in Byrne u. Bakir vorgeschlagen, eine Reduktion der verfügbaren Kapazität durch einen Korrekturfaktor ρ ($0 < \rho \leq 1$).¹⁵ Durch diesen Korrekturfaktor ρ wird eine Reduktion der verfügbaren Kapazität C realisiert, sodass gilt:

$$\sum_{k=1}^K (R_{k,t} \cdot tb_k + tr_k \cdot \gamma_{k,t}) \leq C \cdot \rho \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.45)$$

Für dieses Modell sind die Durchlaufzeiten $L_{k,t}$ zum Planungszeitpunkt vorzugeben. Diese werden in Anlehnung an das Vorgehen von Asmundsson u. a. bestimmt.¹⁶ Hierbei werden zunächst die Bedarfe $D_{k,t}$ direkt in das Produktionssystem zu Beginn einer Periode t freigegeben ($R_{k,t} = D_{k,t}$). Die daraus resultierenden Durchlaufzeiten $L_{k,t}^0$ werden je Produkt k und Periode t ermittelt. Hierzu wird die Differenz zwischen dem Zeitpunkt der vollständigen Bearbeitung $T_{k,t}^{Fertig}$ und dem Zeitpunkt der Freigabe $T_{k,t}^{Start}$ je Produkt k und Periode t errechnet und durch die Länge der Planungsperiode Δ^t geteilt. Da ein Los, welches innerhalb einer Periode t fertiggestellt wird, erst in der Folgeperiode $t + 1$ verfügbar ist, werden die gemessenen Durchlaufzeiten ganzzahlig aufgerundet. Somit gilt:

$$L_{k,t}^0 = \left\lceil \frac{T_{k,t}^{Fertig} - T_{k,t}^{Start}}{\Delta^t} \right\rceil \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.46)$$

Diese gemessenen Durchlaufzeiten je Produkt k und Periode t werden als $L_{k,t}^0$ bezeichnet und bilden die Eingangsdaten für das Modell AFP_{ρ}^{FDLZ} . Das Modell AFP_{ρ}^{FDLZ} wird für

¹⁵Vgl. Byrne u. Bakir (1999), S. 308.

¹⁶Vgl. Asmundsson u. a. (2009), S. 150.

die Bedarfe $D_{k,t}$ und Durchlaufzeiten $L_{k,t}^0$ im Sinne einer rollierenden Planung¹⁷ gelöst und die resultierenden Freigabepäne, bestehend aus den Freigabemengen $R_{k,t}$ je Produkt k und Periode t , werden umgesetzt. Die resultierenden Durchlaufzeiten, nun als $L_{k,t}^1$ bezeichnet, werden analog zu Formel (5.46) ermittelt. Diese Durchlaufzeiten $L_{k,t}^1$ werden in einer erneuten Iteration als Eingangsdaten für das Modell AFP_{ρ}^{FDLZ} verwendet und die resultierenden Durchlaufzeiten, nun als $L_{k,t}^2$ bezeichnet, werden berechnet. Die auf Basis dieser zwei Iterationen ermittelten Durchlaufzeiten $L_{k,t}^2$ (vgl. Abbildung 5.3) werden als Durchlaufzeiten für die Experimente verwendet.

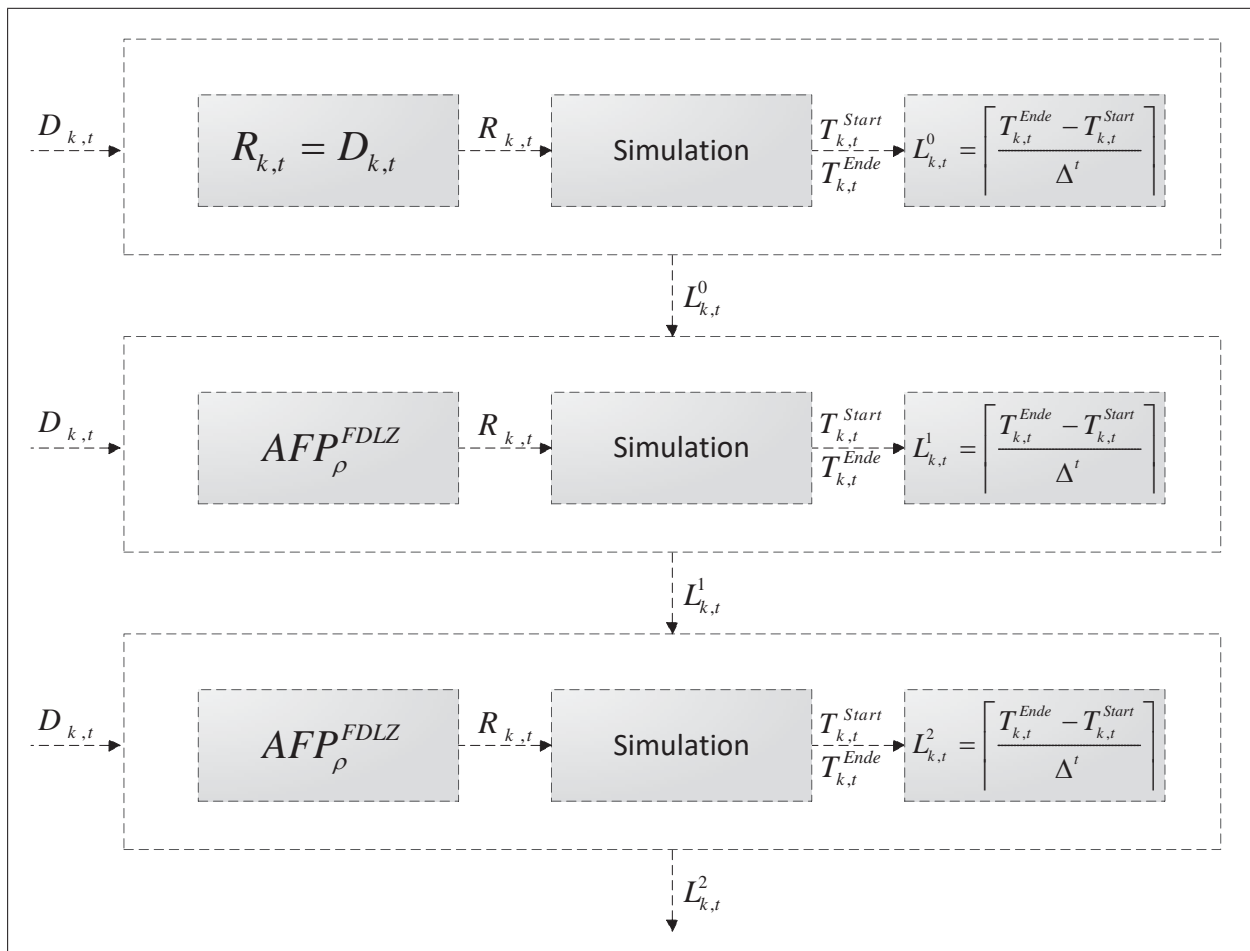


Abbildung 5.3.: Vorgehen zur Ermittlung der Durchlaufzeiten für das Modell AFP_{ρ}^{FDLZ} .

Über eine feste Durchlaufzeit wird bestimmt, wann eine Freigabemenge $R_{k,t}$ zu einer Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ führt. Somit ist die folgende Restriktion zu beachten:¹⁸

$$R_{k,t} = X_{k,t+L_{k,t}} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T - L_{k,t} \quad (5.47)$$

¹⁷Vgl. Kapitel 5.2.4 Abbildung 5.2.

¹⁸Vgl. Kapitel 3.2.2.

Eine direkte Umsetzung einer solchen Restriktion ist nicht ohne Weiteres möglich, da hierbei eine Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ exakt einer Freigabemenge $R_{k,t}$ zugeordnet wird. Aufgrund von produkt- und periodenspezifischen Durchlaufzeiten $L_{k,t}$ können aber Freigabemengen unterschiedlicher Perioden zu einer Ausbringungsmenge in derselben Periode führen. Dies wird anhand eines Beispiels nachfolgend illustriert.

Für ein Produkt A wurden die Durchlaufzeiten $L_{A,1} = 2$ und $L_{A,2} = 1$ gemessen. Somit würden die Freigabemengen in den Perioden 1 und 2 ($R_{A,1} \wedge R_{A,2}$) in Periode 3 zu einer Ausbringungsmenge $X_{A,3}$ führen. Dies ist aber aufgrund der Gleichung (5.47) so nicht möglich, da eine Freigabemenge $R_{k,t}$ einer Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ zugeordnet wird. Somit kann im Entscheidungsmodell nur für eine der beiden Perioden eine Freigabemenge geplant werden, welche in Periode 3 zu einer Ausbringungsmenge $X_{A,3}$ führt. Da im Rahmen der Zielfunktion solcher Entscheidungsmodelle auch die WIP-Bestände minimiert werden, würde bevorzugt in Periode 2 eine Freigabemenge $R_{A,2}$ geplant werden, welche nach einer Durchlaufzeit $L_{A,2}$ von einer Periode in Periode 3 als Ausbringungsmenge $X_{A,3}$ zu einem Lagerzugang führt. Somit ist sicherzustellen, dass unterschiedliche Freigabemengen $R_{k,t}$ entsprechend der definierten Durchlaufzeiten $L_{k,t}$ zu einer Ausbringungsmenge $X_{k,t+L_{k,t}}$ führen können. Analog zur Umsetzung der geschlossenen Produktion wird dies durch einen Vektor $VR_{k,t,\tau}$ und einem binären Vektor $VB_{k,t,\tau}$ realisiert. Die Größe dieser Vektoren ist abhängig von der maximal auftretenden Durchlaufzeit L^{max} , sodass τ wie folgt definiert ist: $0 \leq \tau \leq T + L^{max}$. Die Freigabemengen $R_{k,t}$ werden in den Vektor $VR_{k,t,\tau}$ entsprechend der Durchlaufzeit $L_{k,t}$ eingetragen. Somit gilt:

$$VR_{k,t,t+L_{k,t}} = R_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.48)$$

Da sich aufgrund der rollenden Planungssituation zu Beginn des Planungszeitpunkts Produktionsmengen im Produktionssystem befinden können ($W_{k,0}$), sind diese ebenfalls als zukünftige Ausbringungsmengen zu berücksichtigen. Die Durchlaufzeiten dieser Produktionsmengen sind nicht bekannt, sodass eine Approximation dieser über eine mittlere Durchlaufzeit L_k^{AVG} erfolgt. Es gilt:

$$L_k^{AVG} = \left[\frac{1}{T} \cdot \sum_{t=1}^T L_{k,t} \right] \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.49)$$

Diese werden, wie nachfolgend dargestellt, entsprechend berücksichtigt:

$$VR_{k,0,0+L_k^{AVG}} = W_{k,0} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.50)$$

Weiter ist sicherzustellen, dass alle Freigabemengen sowie die im Produktionssystem befindlichen Produktionsmengen in diesem Vektor eingetragen worden sind. Dies führt zu:

$$\sum_{i=0}^{T+L^{max}} VR_{k,t,i} = R_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.51)$$

$$\sum_{\tau=0}^{T+L^{max}} VR_{k,0,\tau} = W_{k,0} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.52)$$

An der Stelle des Vektors $VR_{k,t,t+L_{k,t}}$, an der eine Freigabemenge $R_{k,t}$ eingetragen ist, muss der binäre Vektor $VB_{k,t,t+L_{k,t}}$ einen Wert 1 erhalten. Unter Verwendung einer großen Zahl M gilt:

$$VB_{k,t,\tau} \cdot M \geq VR_{k,t,\tau} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \wedge 0 \leq \tau \leq T + L^{max} \quad (5.53)$$

Hierbei darf nur ein einziger Wert mit 1 existieren, sodass gilt:

$$\sum_{\tau=1}^{T+L^{max}} VB_{k,t,\tau} = 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \quad (5.54)$$

Die Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ ergibt sich aus der Summe der Freigabemengen, welche in derselben Periode gemäß der definierten Durchlaufzeit $L_{k,t}$ fertiggestellt werden und werden somit anhand des Vektors $VR_{k,t,\tau}$ wie folgt dargestellt.

$$X_{k,t} = \sum_{i=0}^T VR_{k,i,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T + L^{max} \quad (5.55)$$

Das durch diese Anpassungen resultierende Modell wird in dieser Arbeit als AFP_{ρ}^{FDLZ} bezeichnet und ist nachfolgend aufgeführt.

AFP_ρ^{FDLZ}

Parameter:

| | |
|------------------|---|
| C : | Verfügbare Kapazität |
| $D_{k,t}$: | Bedarf von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$) |
| f_k : | Kosten für eine Einheit an Fehlmengen von Produkt k ($1 \leq k \leq K$) |
| h_k : | Lagerkosten für eine Einheit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$) |
| $\gamma_{k,t}$: | Binäre Rüstvariable von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$) |
| $L_{k,t}$: | Durchlaufzeit von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$) |
| L_k^{AVG} : | Mittlere Durchlaufzeit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$) |
| L^{max} : | Maximalwert der Durchlaufzeiten |
| M : | Große Zahl |
| ρ : | Faktor zur Reduktion der verfügbaren Kapazität |
| tb_k : | Kumulierte Stückbearbeitungszeit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$) |
| tr_k : | Kumulierte Rüstzeit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$) |
| w_k : | Kosten für eine Einheit WIP-Bestand von Produkt k ($1 \leq k \leq K$) |



Variablen:

- $F_{k,t}$: Fehlmengen von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);
 initiale Fehlmengen zum Planungsbeginn: $F_{k,0}$
- $I_{k,t}$: Lagerbestand von Produkt k am Ende von Periode t
 ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);
 initialer Lagerbestand zum Planungsbeginn: $I_{k,0}$
- $R_{k,t}$: Freigabemenge von Produkt k zu Beginn von Periode t
 ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
- $VB_{k,t,\tau}$: Binärvektor von Produkt k zur Ermittlung der Fertigstellungsperiode τ
 einer Freigabemenge, welche in Periode t freigegeben
 wurde ($1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \wedge 0 \leq \tau \leq T + L^{max}$)
- $VR_{k,t,\tau}$: Vektor von Produkt k zur Ermittlung der Fertigstellungsperiode τ einer
 Freigabemenge, welche in Periode t freigegeben
 wurde ($1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \wedge 0 \leq \tau \leq T + L^{max}$)
- $W_{k,t}$: WIP-Bestand von Produkt k am Ende von Periode t
 ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);
 initialer WIP-Bestand zum Planungsbeginn: $W_{k,0}$
- $X_{k,t}$: Ausbringungsmenge von Produkt k in Periode t
 ($1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T + L^{max}$)

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (I_{k,t} \cdot h_k + W_{k,t} \cdot w_k + F_{k,t} \cdot f_k) \quad (5.56)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} + X_{k,t} - F_{k,t-1} - D_{k,t} + F_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.57)$$

$$W_{k,t} = W_{k,t-1} + R_{k,t} - X_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.58)$$

$$VR_{k,t,t+L_{k,t}} = R_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.59)$$

$$VR_{k,0,0+L_k^\mu} = W_{k,0} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.60)$$

$$\sum_{i=0}^{T+L^{max}} VR_{k,t,i} = R_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.61)$$



$$\sum_{\tau=0}^{T+L^{max}} VR_{k,0,\tau} = W_{k,0} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.62)$$

$$VB_{k,t,\tau} \cdot M \geq VR_{k,t,\tau} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \wedge 0 \leq \tau \leq T + L^{max} \quad (5.63)$$

$$\sum_{\tau=1}^{T+L^{max}} VB_{k,t,\tau} = 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \quad (5.64)$$

$$X_{k,t} = \sum_{i=0}^T VR_{k,i,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T + L^{max} \quad (5.65)$$

$$R_{k,t} - M \cdot \gamma_{k,t} \leq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.66)$$

$$\sum_{k=1}^K (R_{k,t} \cdot tb_k + tr_k \cdot \gamma_{k,t}) \leq C \cdot \rho \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.67)$$

$$F_{k,t}, I_{k,t}, R_{k,t}, W_{k,t}, X_{k,t} \geq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.68)$$

Das in Kapitel 5.2.3 beschriebene Modell AFP^{CF-DLZ} unterscheidet sich hinsichtlich der in der Literatur beschriebenen Modelle insbesondere in der Umsetzung einer geschlossenen Produktion, wie diese im Rahmen dieser Forschungsarbeit vorliegt. Die Umsetzung der geschlossenen Produktion erhöht die Anzahl der Entscheidungsvariablen deutlich, was die Komplexität und die Dauer zur Lösung des Entscheidungsproblems erhöht. Durch den Einsatz eines alternativen Ansatzes wird untersucht, ob diese Implementierung der geschlossenen Produktion notwendig ist und welche Folgen eine Vernachlässigung dieser mit sich bringt. Somit wird ein Modell mit einer konventionellen Verwendung der Clearing Funktion betrachtet. Hierbei erfolgt weiterhin die Ermittlung einer Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ in Abhängigkeit von Arbeitslast $\widehat{W}_{k,t}$ unter Verwendung der Clearing Funktion $CF_{k,n}$. Diese Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ führt im Entscheidungsmodell aber direkt in der Folgeperiode $t + 1$ zu einem Lagerzugang $LZ_{k,t}$. Somit ist es im Entscheidungsmodell möglich, dass Teilmengen einer Freigabemenge $R_{k,t}$ zu einem Lagerzugang $LZ_{k,t}$ führen. Das resultierende Modell wird in dieser Arbeit als AFP^{CF-KON} bezeichnet und ist nachfolgend aufgeführt.


AFP^{CF-KON}

Parameter:

- f_k : Kosten für eine Einheit an Fehlmengen von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
 $CF_{k,n}$: Vektor zur Clearing Funktion für Produkt k und Wert n
 ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq n \leq N$)
 $D_{k,t}$: Bedarf von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 h_k : Lagerkosten für eine Einheit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
 w_k : Kosten für eine Einheit WIP-Bestand von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)

Variablen:

- $F_{k,t}$: Fehlmengen von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);
 initiale Fehlmengen zum Planungsbeginn: $F_{k,0}$
 $I_{k,t}$: Lagerbestand von Produkt k am Ende von Periode t
 ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);
 initialer Lagerbestand zum Planungsbeginn: $I_{k,0}$
 $LZ_{k,t}$: Lagerzugang von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 $R_{k,t}$: Freigabemenge von Produkt k zu Beginn von Periode t
 ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);
 Produktionsmenge von Produkt k , welche zum Planungszeitpunkt
 im Produktionssystem vorhanden ist: $R_{k,0}$
 $VI_{k,t,n}$: Binärer Vektor zur Transformation der
 Clearing Funktion ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq n \leq N$)
 $W_{k,t}$: WIP-Bestand von Produkt k am Ende von Periode t
 ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);
 initialer WIP-Bestand zu Planungsbeginn: $W_{k,0}$
 $\widehat{W}_{k,t}$: WIP-Bestand von Produkt k in Periode t zur Ermittlung der Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ in Abhängigkeit der Clearing Funktion ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 $X_{k,t}$: Ausbringungsmenge von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);
 Ausbringungsmenge, die für die im Produktionssystem vorhandenen
 Freigabemengen $R_{k,0}$ bereits erbracht wurde: $X_{k,0}$

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (I_{k,t} \cdot h_k + W_{k,t} \cdot w_k + F_{k,t} \cdot f_k) \quad (5.69)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} + LZ_{k,t} - F_{k,t-1} - D_{k,t} + F_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.70)$$

$$W_{k,t} = W_{k,t-1} + R_{k,t} - X_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.71)$$

$$\widehat{W}_{k,t} = W_{k,t-1} + R_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.72)$$

$$\sum_{n=1}^N VI_{k,t,n} \cdot n = \widehat{W}_{k,t} + 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.73)$$

$$\sum_{n=1}^N VI_{k,t,n} = 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.74)$$

$$X_{k,t} = \sum_{n=1}^N (CF_{k,n} \cdot VI_{k,t,n}) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.75)$$

$$X_{k,t} = LZ_{k,t+1} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \quad (5.76)$$

$$F_{k,t}, I_{k,t}, R_{k,t}, W_{k,t}, X_{k,t} \geq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.77)$$

Somit werden als Vergleichsmodelle zum Modell AFP^{CF-DLZ} sowohl ein Modell mit Verwendung einer festen Durchlaufzeit AFP_{ρ}^{FDLZ} als auch ein konventionelles Modell mit Integration der Clearing Funktion (AFP^{CF-KON}) verwendet.

5.2.6. Ergebnisse der Experimente

Für die beschriebenen Entscheidungsmodelle und Bedarfsszenarien werden Simulationsexperimente durchgeführt. Die Dauer zur Lösung der Entscheidungsmodelle AFP_{ρ}^{FDLZ} beträgt im Schnitt bis zu zwei Sekunden. Durch die Integration der Clearing Funktion (AFP^{CF-KON}) werden die Laufzeiten auf ca. vier Sekunden erhöht. Die Integration der geschlossenen Produktion (AFP^{CF-DLZ}) führt nochmals zu einer Erhöhung der Laufzeit auf insgesamt ca. sechs Sekunden. Die Lösung aller Optimierungsprobleme wurde auf einem Rechner mit einem Intel[®] Core[™] i7-4700MQ mit 2.40GHZ, 8GB Arbeitsspeicher und einem Windows 7 64-Bit Betriebssystem sowie dem IBM[®] ILOG[®] CPLEX[®] Optimization Studio Version 12.6 durchgeführt.

Zunächst erfolgt die Betrachtung der Modelle AFP_{ρ}^{FDLZ} und die Reduktion der verfügbaren Kapazität durch den Faktor ρ . Der Wert für ρ wird schrittweise reduziert: $\rho \in \{1; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6\}$. Eine weitere Reduktion von ρ führt dazu, dass die verfügbare Kapazität nicht ausreicht, um die Bedarfe $D_{k,t}$ zu fertigen. Somit treten sehr hohe Fehlmenngen $F_{k,t}$ auf und die Umsetzung der Lösungen der Entscheidungsmodelle ist nicht zielführend. In Abbildung 5.4 sind die Ergebnisse für Bedarfsszenario S-1 aufgeführt.

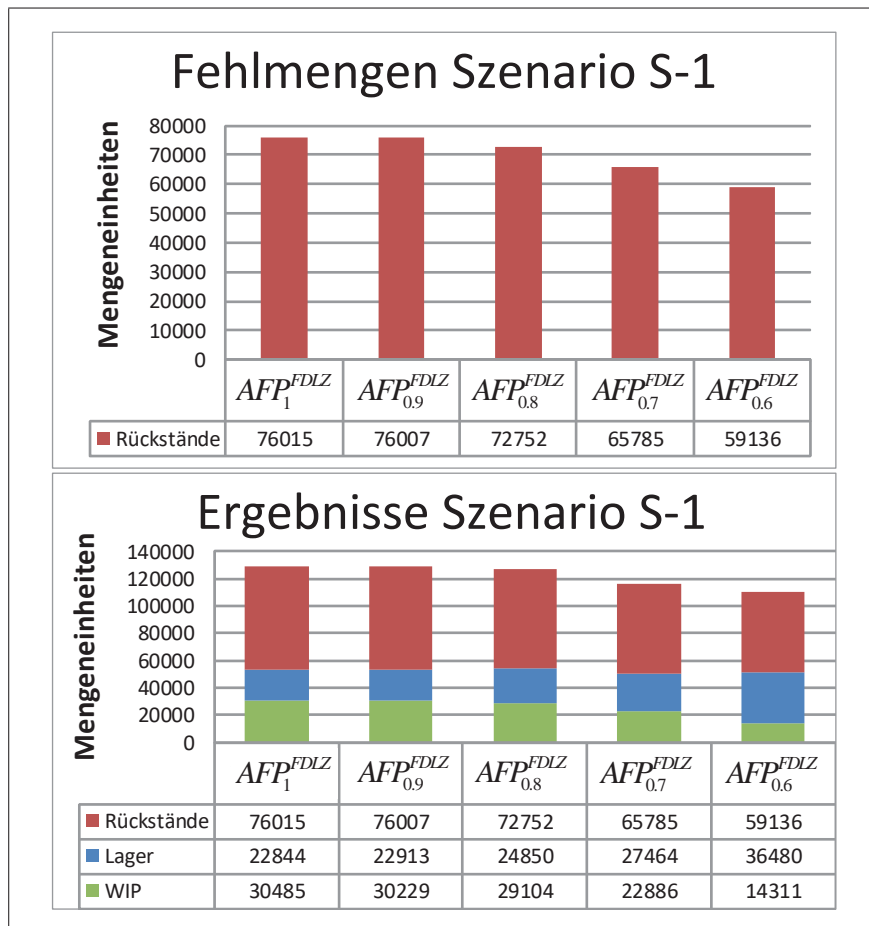


Abbildung 5.4.: Reduktion der verfügbaren Kapazität durch ρ für das Bedarfsszenario S-1.

Die Reduktion der Fehlmengen ist deutlich erkennbar und die besten Resultate können mit einem Wert von ρ gleich 0,6 erzielt werden. Analog dazu konnten auch für die Bedarfsszenarien S-2 und S-3 die besten Ergebnisse mit einer Kapazitätsreduktion ρ von 0,6 erreicht werden (vgl. Abbildung 5.5 und 5.6).

Bei Bedarfsszenario S-4 zeigt sich, dass die Reduktion der Kapazität mit einem Wert von ρ gleich 0,6 dazu führt, dass größere Fehlmengen entstehen. Die Ergebnisse für das Bedarfsszenario S-4 ist in Abbildung 5.7 dargestellt. In diesem Bedarfsszenario liegen ein hoher Mittelwert sowie ein hoher Variationskoeffizient vor, sodass hohe Schwankungen der Bedarfsmengen auftreten und die Last im Produktionssystem höher als bei den anderen Bedarfsszenarien ist. Diese Bedarfe können bei einer so hohen Reduktion der verfügbaren Kapazität nicht sinnvoll geplant und produziert werden, sodass für dieses Bedarfsszenario ein Wert von ρ gleich 0,7 zu verwenden ist.

Durch diese Simulationsexperimente ist es möglich, einen guten Wert für den Parameter ρ zur Reduktion der verfügbaren Kapazität zu ermitteln, sodass hierdurch die Planungsergebnisse verbessert werden. Durch die unterschiedlichen Bedarfsszenarien zeigt sich aber, dass dieser Wert von den zugrundeliegenden Bedarfen und letztlich der Belastungssituation des Produktionssystems abhängt. Da die im Modell zu verwendenden Durchlaufzeiten iterativ bestimmt werden, ist der Simulationsaufwand zur Ermittlung dieser für die jeweiligen

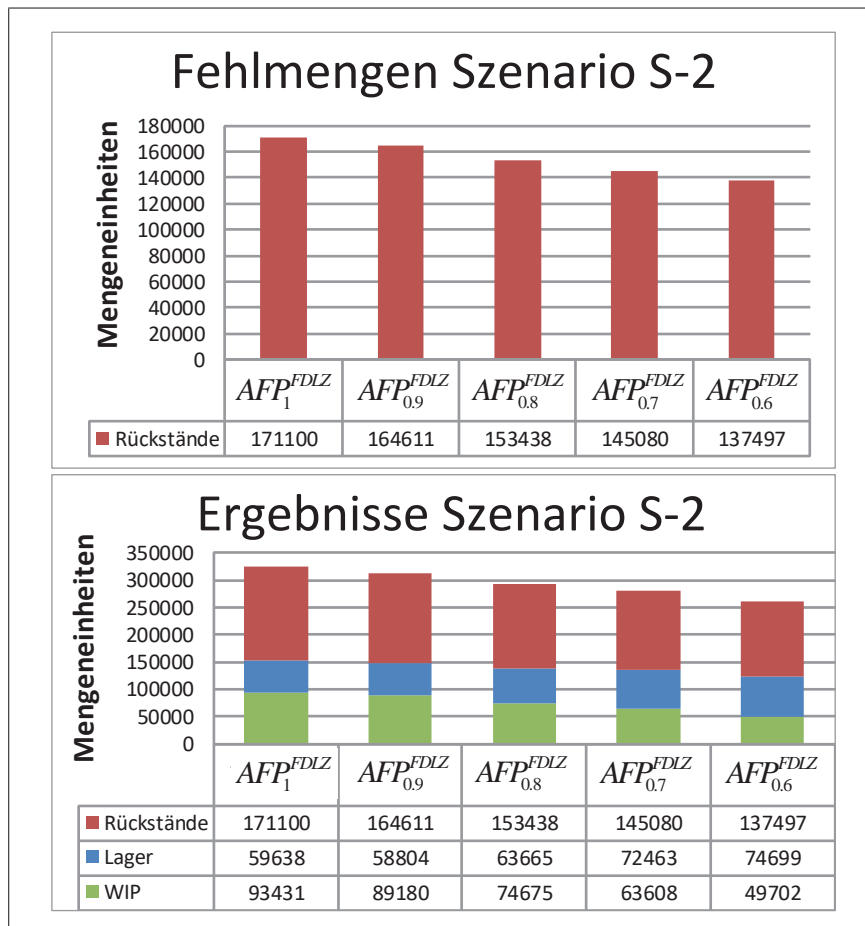


Abbildung 5.5.: Reduktion der verfügbaren Kapazität durch ρ für das Bedarfsszenario S-2.

Werte von ρ zudem aufwendig und rechenintensiv. Da die besten Resultate für die jeweiligen Bedarfsszenarien durch eine Kapazitätsreduktion von ρ gleich 0,7 sowie 0,6 erreicht werden konnten¹⁹, werden diese Parameter angewendet und zum Vergleich zu den anderen Entscheidungsmodellen, welche eine Clearing Funktion verwenden, herangezogen.

Es erfolgt nun die Betrachtung der Simulationsergebnisse der beschriebenen Entscheidungsmodelle. Zunächst werden die Ergebnisse von Bedarfsszenario S-1 analysiert, welche in Abbildung 5.8 dargestellt sind. Die Modelle (AFP^{CF-DLZ} und AFP^{CF-KON}), die durch die Integration einer Clearing Funktion belastungsabhängige Durchlaufzeiten berücksichtigen, können im Vergleich zur Verwendung von festen und belastungsunabhängigen Durchlaufzeiten die entstehenden Fehlmengen deutlich reduzieren. Durch die Berücksichtigung der geschlossenen Produktion im Modell AFP^{CF-DLZ} treten mit Abstand die geringsten Fehlmengen auf. Dies hat allerdings höhere Lagerbestände zur Folge.

Dies hat den Hintergrund, dass Freigabemengen $R_{k,t}$ geplant werden, welche innerhalb einer Periode durch die Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ gedeckt werden können, um eine Durchlaufzeit größer einer Periode zu vermeiden. Um dies gewährleisten zu können, werden die Produktionsmengen teilweise bereits in vorgelagerten Perioden eingeplant und somit

¹⁹Zusätzliche Detailergebnisse zu den durchgeführten Experimenten sind im Anhang in Kapitel A.1.1 aufgeführt.

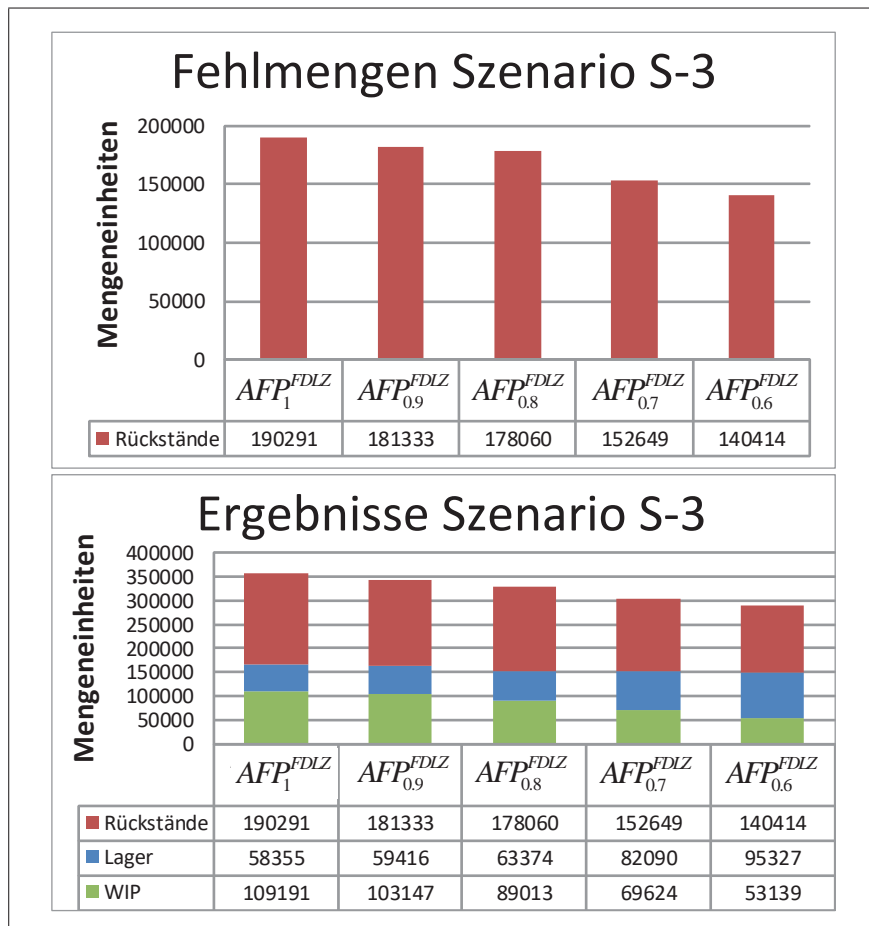


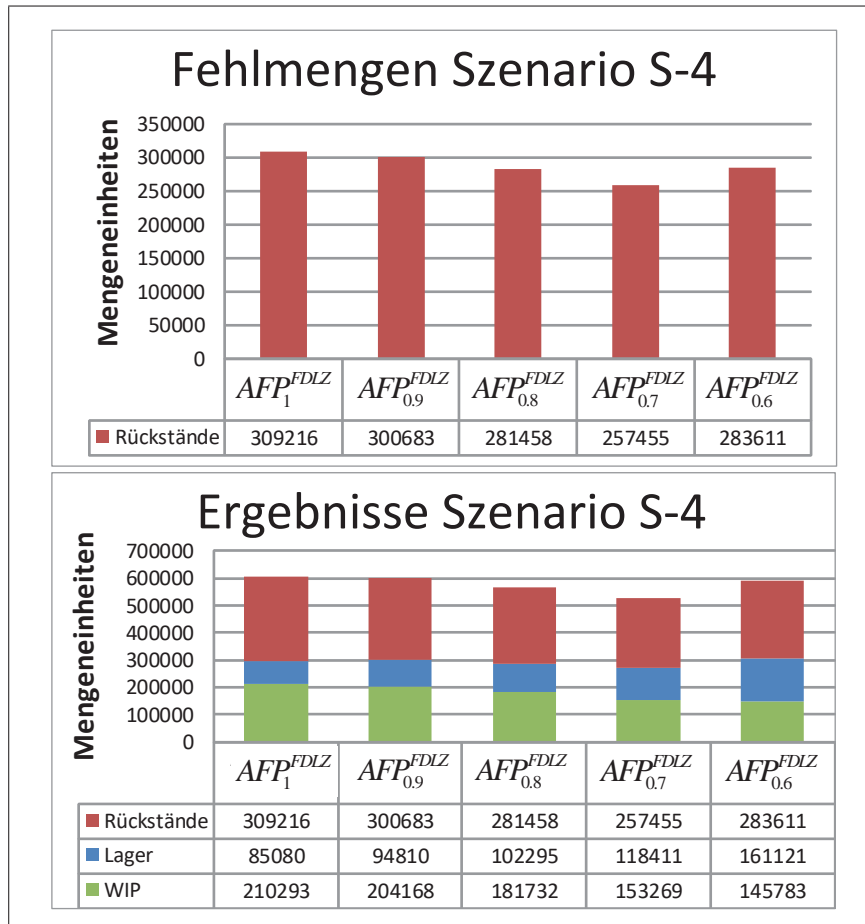
Abbildung 5.6.: Reduktion der verfügbaren Kapazität durch ρ für das Bedarfsszenario S-3.

früher produziert. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der Daten und insbesondere der Kostensätze der Fallstudie²⁰ Lagerbestände den Fehlmengen vorgezogen werden, da es Fehlmengen möglichst zu vermeiden gilt, um eine termingerechte Bedarfsdeckung zu forcieren. Die WIP-Bestände können unter Verwendung der Clearing Funktion ebenfalls deutlich reduziert werden. Durch die Reduktion des Parameters ρ werden die WIP-Bestände verringert, da aufgrund der geringeren verfügbaren Kapazität kleinere Freigabemengen geplant werden.

Wie gut die termingerechte Bedarfsdeckung tatsächlich erfolgen konnte, kann allein anhand der Fehlmengen nicht bewertet werden. Der Anteil der verspätet ausgelieferten Bedarfe (VAB) ist in Tabelle 5.6 aufgeführt. Durch die Verwendung der Clearing Funktion können deutlich mehr Bedarfe termingerecht gedeckt werden. Durch die zusätzliche Berücksichtigung der geschlossenen Produktion steigt der Anteil der termingerecht gedeckten Bedarfe nochmals geringfügig an. Diese Verbesserung ist aber im Hinblick auf die hohen Lagerbestände abzuwägen.²¹

²⁰Vgl. Kapitel 4.

²¹Im Rahmen dieser Arbeit wird in den Entscheidungsmodellen insbesondere die Minimierung der Fehlmengen forciert. Die Berücksichtigung von kapazitiven Restriktionen des Lagers erfolgt nicht und ist somit nicht im Fokus dieser Arbeit.

Abbildung 5.7.: Reduktion der verfügbaren Kapazität durch ρ für das Bedarfsszenario S-4.

| Modell | $AFP_{0.7}^{FDLZ}$ | $AFP_{0.6}^{FDLZ}$ | AFP^{CF-DLZ} | AFP^{CF-KON} |
|--------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| VAB | 8,75% | 7,84% | 3,15% | 4,26% |

Tabelle 5.6.: Anteil der verspätet ausgelieferten Bedarfe von Bedarfsszenario S-1.

Die im Produktionssystem gemessenen mittleren Auslastungen λ der Engpassmaschinen sind in Tabelle 5.7 aufgeführt. Hierbei zeigt sich, dass durch das Bedarfsszenario S-1 eine Auslastung von ca. 70% vorliegt. Dadurch, dass bei einer geringeren verfügbaren Kapazität sowie durch die Integration der Clearing Funktion die zu produzierenden Mengen teilweise in vorgelagerte Perioden eingeplant bzw. produziert werden, resultiert eine geringere Auslastung der Engpassressourcen und eine bessere Verteilung der Arbeitslast.

Die Ergebnisse zu den Simulationsexperimenten für die Bedarfsszenarien S-2 und S-3 zeigen ähnliche Ergebnisse (siehe Abbildung 5.9 und 5.10). Auch hier erzielen die Modelle, in welchen eine Integration der Clearing Funktion erfolgte, die besten Resultate hinsichtlich

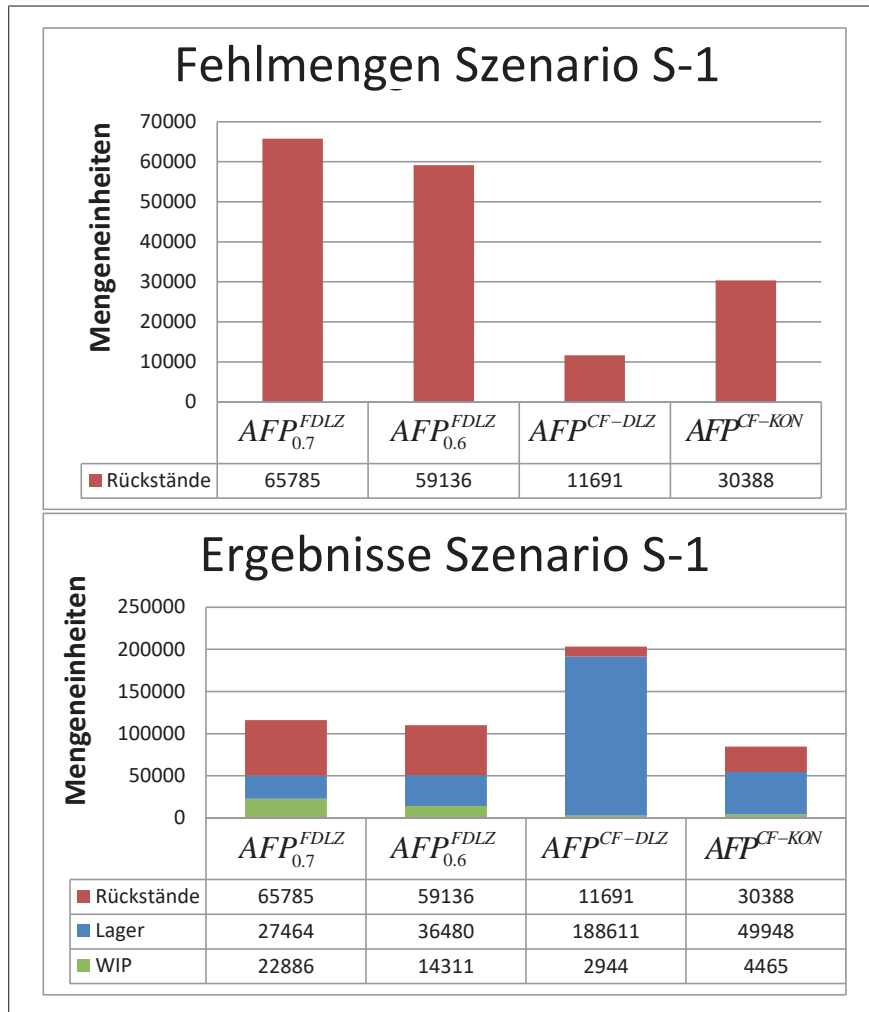


Abbildung 5.8.: Ergebnisse der Simulationsexperimente für das Bedarfsszenario S-1.

| Modell | $AFP_{0.7}^{FDLZ}$ | $AFP_{0.6}^{FDLZ}$ | AFP^{CF-DLZ} | AFP^{CF-KON} |
|-----------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| λ | 73,85% | 72,65% | 69,31% | 70,53% |

Tabelle 5.7.: Mittlere Auslastung des Produktionssystems für Bedarfsszenario S-1.

der auftretenden Fehlmengen. Durch die Berücksichtigung der geschlossenen Produktion können auch für dieses Bedarfsszenario die geringsten Fehlmengen erzielt werden. Zudem lässt sich beobachten, dass die Diskrepanz der Summe an Lagerbeständen, WIP-Beständen sowie Fehlmengen der jeweiligen Modelle deutlich geringer ist als bei Bedarfsszenario S-1.

Der Anteil der verspätet ausgelieferten Bedarfe konnte ebenfalls deutlich reduziert werden. Hierbei zeigt sich, dass durch die Berücksichtigung der geschlossenen Produktion nur

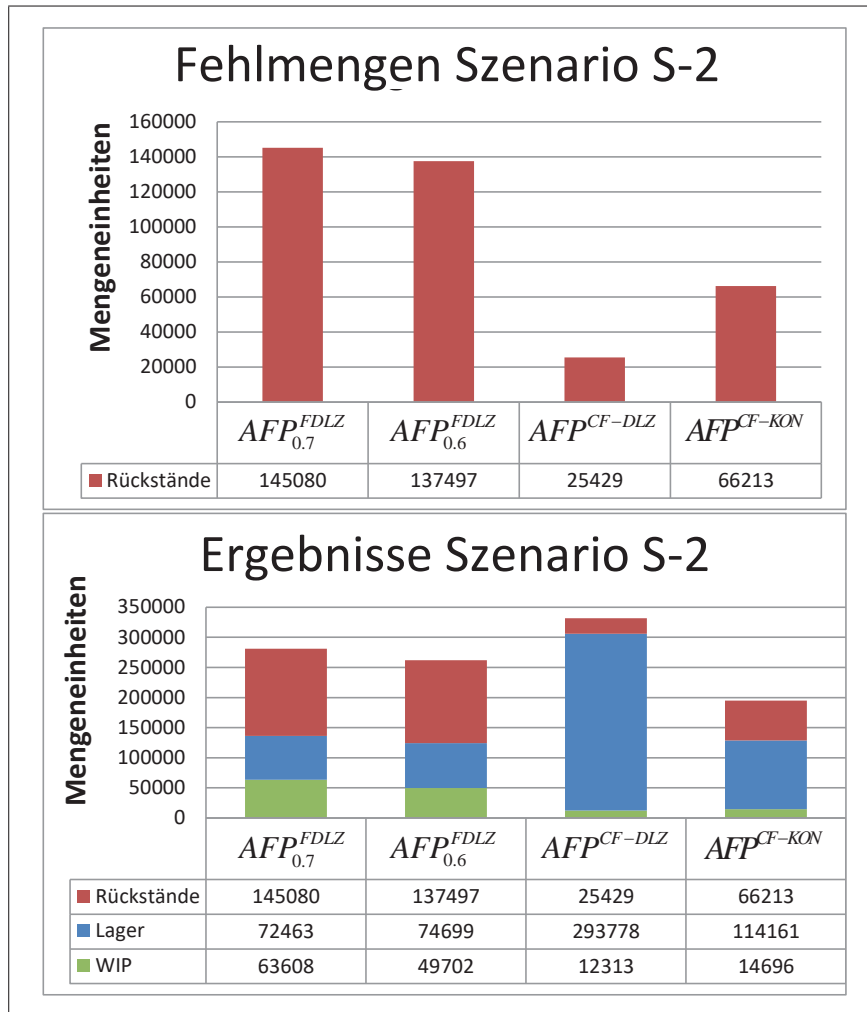


Abbildung 5.9.: Ergebnisse der Simulationsexperimente für das Bedarfsszenario S-2.

knapp halb so viele Aufträge verspätet ausgeliefert werden als wenn diese Berücksichtigung nicht erfolgt (siehe Tabelle 5.8 und 5.9).

| Modell | $AFP_{0.7}^{FDLZ}$ | $AFP_{0.6}^{FDLZ}$ | AFP^{CF-DLZ} | AFP^{CF-KON} |
|--------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| VAB | 17,49% | 17,31% | 5,51% | 10,20% |

Tabelle 5.8.: Anteil der verspätet ausgelieferten Bedarfe von Bedarfsszenario S-2.

Insbesondere die Modelle unter Verwendung von belastungsunabhängigen Durchlaufzeiten führen zu einer deutlich schlechteren Termineinhaltung, wie dies aufgrund der hohen

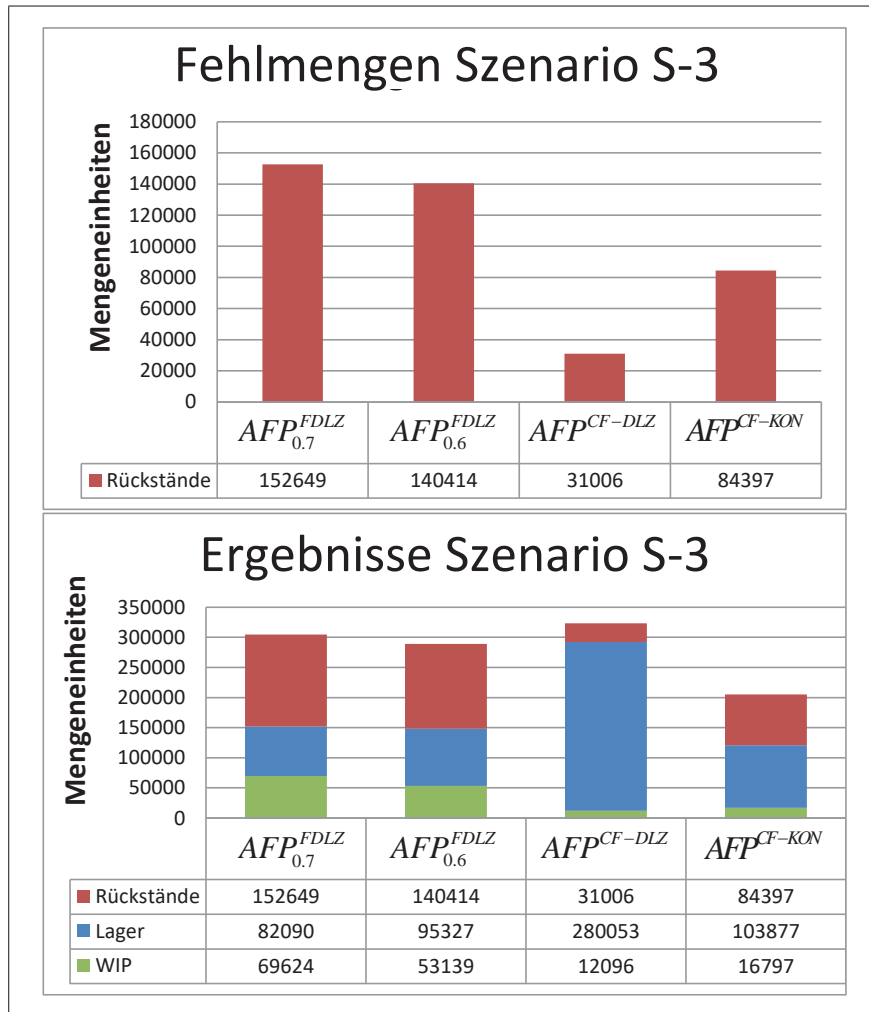


Abbildung 5.10.: Ergebnisse der Simulationsexperimente für das Bedarfsszenario S-3.

| Modell | $AFP^{FDLZ}_{0.7}$ | $AFP^{FDLZ}_{0.6}$ | AFP^{CF-DLZ} | AFP^{CF-KON} |
|--------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| VAB | 18,85% | 17,81% | 6,98% | 12,48% |

Tabelle 5.9.: Anteil der verspätet ausgelieferten Bedarfe von Bedarfsszenario S-3.

Fehlmengen zu erwarten ist. Die Ergebnisse der mittleren Auslastungen (siehe Tabelle 5.10 und 5.11) zeigen, dass durch eine bessere Verteilung von Bedarfsspitzen auf vorgelagerte Perioden die Gesamtauslastung der Engpassmaschinen und somit der Aufbau von Lagerbeständen reduziert werden kann.

Durch das Bedarfsszenario S-4 liegt aufgrund der hohen Bedarfsmengen sowie der hohen Streuung der Bedarfe eine noch höhere Last im Produktionssystem vor. Auch hier kann durch die Verwendung der Clearing Funktion die Höhe der auftretenden Fehlmengen deut-



| Modell | $AFP_{0.7}^{FDLZ}$ | $AFP_{0.6}^{FDLZ}$ | AFP^{CF-DLZ} | AFP^{CF-KON} |
|-----------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| λ | 82,19% | 81,54% | 75,54% | 76,89% |

Tabelle 5.10.: Mittlere Auslastung des Produktionssystems für Bedarfsszenario S-2.

| Modell | $AFP_{0.7}^{FDLZ}$ | $AFP_{0.6}^{FDLZ}$ | AFP^{CF-DLZ} | AFP^{CF-KON} |
|-----------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| λ | 85,19% | 83,72% | 77,84% | 79,25% |

Tabelle 5.11.: Mittlere Auslastung des Produktionssystems für Bedarfsszenario S-3.

lich reduziert werden (siehe Abbildung 5.11). Bei dem Entscheidungsmodell $AFP_{0.6}^{FDLZ}$ zeigt sich, dass durch die Reduktion der verfügbaren Kapazität um den Faktor ρ gleich 0,6 dem Planungsmodell zu wenig Kapazität zur Verfügung gestellt wird, was zur Folge hat, dass die Bedarfsmengen zum Teil nicht eingeplant werden können und die Höhe der Fehlmengen ansteigt. Die Summe der Lagerbestände, WIP-Bestände und Fehlmengen steigt bei den Modellen, die belastungsunabhängige Durchlaufzeiten verwenden, an und ist höher als bei den anderen Modellen. Zudem zeigt sich, dass die Diskrepanz der Modelle, die eine Clearing Funktion verwenden, deutlich geringer ist als bei den anderen Bedarfsszenarien.

Wie in Tabelle 5.12 dargestellt, führt die Reduktion der Fehlmengen zu einer deutlich besseren Termineinhaltung. Auch hier zeigt sich, dass durch die Berücksichtigung der geschlossenen Produktion der Anteil an verspätet ausgelieferten Bedarfen halbiert werden kann und somit eine deutlich bessere Termineinhaltung erzielt wird.

| Modell | $AFP_{0.7}^{FDLZ}$ | $AFP_{0.6}^{FDLZ}$ | AFP^{CF-DLZ} | AFP^{CF-KON} |
|--------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| VAB | 27,53% | 31,86% | 10,74% | 22,63% |

Tabelle 5.12.: Anteil der verspätet ausgelieferten Bedarfe von Bedarfsszenario S-4.

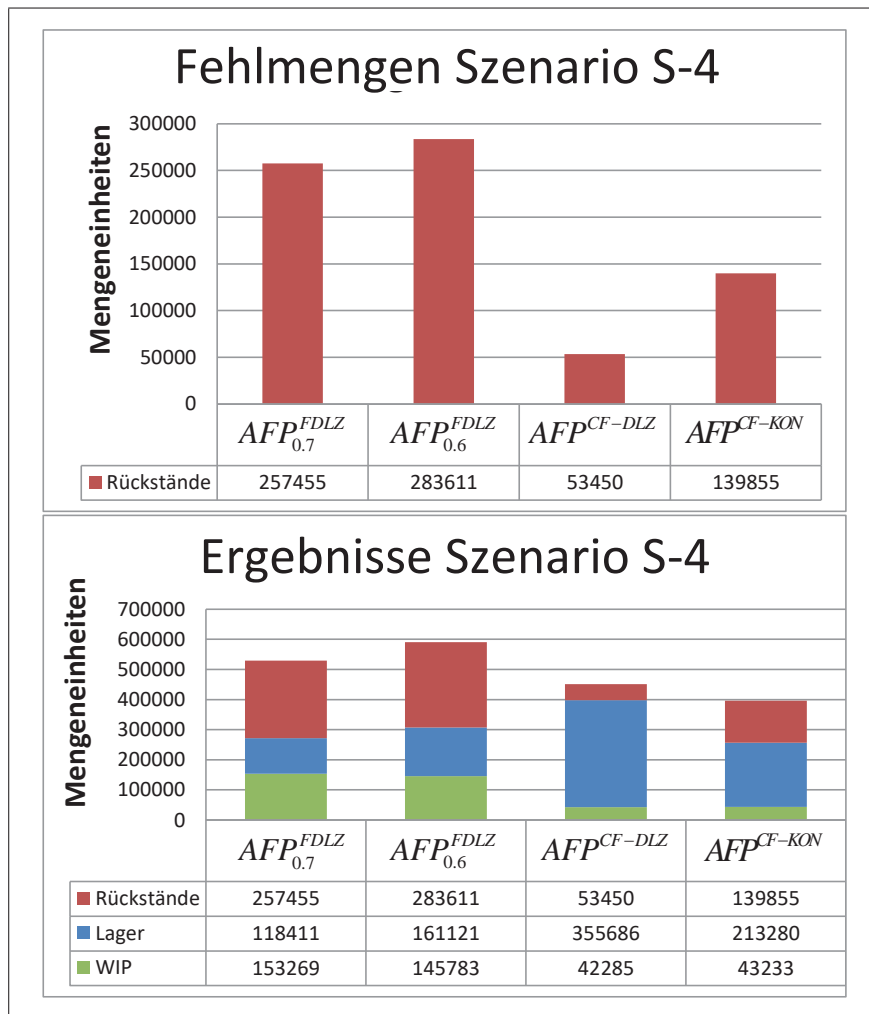


Abbildung 5.11.: Ergebnisse der Simulationsexperimente für das Bedarfsszenario S-4.

Insgesamt ist durch die vorhandenen Bedarfe von Bedarfsszenario S-4 die Last im Produktionssystem sehr hoch. Auch hier stellt sich heraus, dass die Modelle unter Verwendung der Clearing Funktion eine bessere Verteilung dieser Last schaffen und somit die Gesamtlast der Engpassmaschinen effizienter ausnutzen können (siehe Tabelle 5.13).

| Modell | $AFP^{FDLZ}_{0.7}$ | $AFP^{FDLZ}_{0.6}$ | AFP^{CF-DLZ} | AFP^{CF-KON} |
|-----------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| λ | 91,87% | 92,54% | 85,38% | 86,13% |

Tabelle 5.13.: Mittlere Auslastung des Produktionssystems für Bedarfsszenario S-4.

5.2.7. Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch eine Reduktion der verfügbaren Kapazität im Entscheidungsmodell AFP_{ρ}^{FDLZ} durch den Parameter ρ können die auftretenden Fehlmengen reduziert und somit die Planungsergebnisse verbessert werden²². Die hierbei bestehenden Potentiale der Verringerung der Fehlmengen sind in Tabelle 5.14 aufgeführt. Es zeigt sich, dass durch eine Verringerung der verfügbaren Kapazität die Fehlmengen um bis zu 26% verringert werden können.

| Bedarfsszenario | Reduktion der Fehlmengen in Prozent |
|-----------------|-------------------------------------|
| S-1 | 22% |
| S-2 | 20% |
| S-3 | 26% |
| S-4 | 17% |

Tabelle 5.14.: Einfluss des Parameter ρ auf die prozentualen Fehlmengen.

Hierbei ist zu beachten, dass bei einer zu hohen Reduktion der verfügbaren Kapazität die Planungsergebnisse schlechter werden, da die zu produzierenden Bedarfsmengen aufgrund der limitierten Kapazität nicht produziert werden können und somit im Rahmen des Entscheidungsmodells Fehlmengen eingeplant werden müssen. Ein über alle Bedarfsszenarien zu verwendender Wert für ρ konnte hierbei nicht bestimmt werden, da dieser abhängig von der Last im Produktionssystem und somit von den auftretenden Bedarfen ist. So zeigt sich, dass insbesondere bei Bedarfsszenario S-4 eine zu hohe Reduktion der verfügbaren Kapazität die Planungsergebnisse verschlechtert. In diesen Modellen sind zudem die Durchlaufzeiten $L_{k,t}$ als Parameter vorzugeben. Diese Werte wurden, wie in Asmundsson u. a. vorgeschlagen, iterativ bestimmt. Durch dieses iterative Vorgehen erfolgt eine Abschätzung bzw. Approximation der auftretenden Durchlaufzeiten in Abhängigkeit von der Last im Produktionssystem. Trotzdem sind diese Werte als belastungsunabhängige Werte zu interpretieren, da kein direkter Bezug der Durchlaufzeit $L_{k,t}$ und der geplanten Freigabemenge $R_{k,t}$ existiert.

Durch die Integration der Clearing Funktion erfolgt die Integration von belastungsabhängigen Durchlaufzeiten. Hierbei zeigt sich, dass die auftretenden Fehlmengen im Vergleich zu den Modellen AFP_{ρ}^{FDLZ} deutlich reduziert werden können. Erfolgt neben der Integration der Clearing Funktion auch die Berücksichtigung der geschlossenen Produktion, so kann eine noch deutlichere Reduktion der Fehlmengen erzielt werden. Im Vergleich zu dem Modell $AFP_{0,6}^{FDLZ}$ für Bedarfsszenario S-1 bis S-3 und dem Modell $AFP_{0,7}^{FDLZ}$ für Bedarfsszenario S-4 können somit die auftretenden Fehlmengen um bis zu 82% reduziert werden (vgl. Tabelle 5.15).

²²Detailergebnisse zu den durchgeführten Experimenten sind im Anhang in Kapitel A.1.2 aufgeführt.



| Bedarfsszenario | Reduktion der Fehlmengen in Prozent | |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------|
| | AFP ^{CF-DLZ} | AFP ^{CF-KON} |
| S-1 | 80% | 49% |
| S-2 | 82% | 52% |
| S-3 | 78% | 40% |
| S-4 | 80% | 46% |

Tabelle 5.15.: Reduktion der Fehlmengen in Prozent, im Vergleich zur Verwendung von belastungsunabhängigen Durchlaufzeiten.

Aufgrund dieser Reduktionen der Fehlmengen konnte eine verbesserte Termineinhaltung erzielt werden, sodass deutlich mehr Bedarfe termingerecht gedeckt werden konnten. Diese Verbesserungen führen im Gegenzug zu einer Erhöhung der Lagerbestände. Diese Erhöhung ist insbesondere im Modell AFP^{CF-DLZ} ersichtlich. So zeigt sich, dass durch die Berücksichtigung und Integration der geschlossenen Produktion deutlich höhere Lagerbestände resultieren als bei den anderen Modellen. Durch die zusätzliche Restriktion, dass eine Freigabemenge nur nach vollständiger Bearbeitung zu einem Lagerzugang führt, müssen mehr Produktionsmengen vorproduziert werden, um das Auftreten von Fehlmengen so weit wie möglich zu verhindern. Da durch die verwendeten Kostensätze das Auftreten von Fehlmengen den Wert der Zielfunktion maßgeblich erhöht, wird der deutlich günstigere Bestandsaufbau bevorzugt und entsprechend umgesetzt. In der zugrundeliegenden Fallstudie gilt es, die Anzahl der Fehlmengen zu minimieren und eine termingerechte Bedarfsdeckung sicherzustellen. Somit erfolgt in den vorliegenden Modellen keine Berücksichtigung von Restriktionen einer maximal zulässigen Lagermenge²³, sodass eine Minimierung der Fehlmengen forciert wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz der produktspezifischen Clearing Funktionen vielversprechende Ergebnisse erzielt und die Modelle, die belastungsunabhängige Durchlaufzeiten verwenden, deutlich schlechtere Resultate liefern. Die Bestimmung der verfügbaren Kapazitäten durch den Faktor ρ sowie die Festlegung der zu verwendenden Durchlaufzeiten $L_{k,t}$ in den Modellen AFP^{CF-DLZ} setzen umfangreiche Simulationsstudien voraus. Zudem ist hierbei die Kenntnis der Bedarfsmengen notwendig, um eine solche simulationsgestützte Abschätzung durchführen zu können.

Anders ist dies beim Ansatz mit den Clearing Funktionen. Die verwendeten Clearing Funktionen werden, von den Bedarfsmengen unabhängig und systematisch für unterschiedliche Lastsituationen ermittelt. Hierbei ist lediglich ein einmaliger Aufwand bei der Ermittlung

²³Eine solche Limitierung der Lagerbestände kann zum Beispiel aufgrund der Kapazität des Lagers vorliegen und im Rahmen solcher Modelle integriert werden, indem die zulässige Höhe des Lagerbestands $I_{k,t}$ eine definierte Maximalgrenze nicht überschreiten darf. Eine solche Berücksichtigung ist nicht im Fokus dieser Arbeit, sodass die Begrenzung der Lagerbestände rein aufgrund der entstehenden Kosten im Rahmen der Minimierung der Zielfunktion erfolgt.



der Clearing Funktionen vorhanden und diese sind unabhängig von eintretenden Bedarfen, sodass eine allgemeingültige Clearing Funktion je Produkt vorliegt.

5.3. Berücksichtigung von Bedarfsunsicherheiten durch Servicegrade

In den bisher dargestellten Modellen zur Auftragsfreigabe wird davon ausgegangen, dass alle relevanten Planungsparameter zum Entscheidungszeitpunkt mit Sicherheit bekannt sind und somit als deterministische Größen existieren. Oft liegen im Rahmen der Planung allerdings nicht alle relevanten Planungsparameter zum Entscheidungszeitpunkt mit Sicherheit vor, sodass die tatsächlich eintretenden Werte von den Planungswerten abweichen können. Aufgrund dieser Abweichungen kann die Planungsgüte maßgeblich negativ beeinflusst werden.²⁴ Solche Unsicherheiten können unter anderem im Rahmen des Produktionsprozesses sowie der eintretenden Bedarfsmengen existieren.²⁵ Die Unsicherheiten des Produktionsprozesses zeigen sich durch unvorhersehbare Störungen an den Bearbeitungsstationen sowie durch schwankende Durchlaufzeiten. Durch die Integration einer Clearing Funktion können diese Unsicherheiten im Produktionsprozess berücksichtigt werden. Hierdurch ist eine Abschätzung der tatsächlichen Durchlaufzeiten unter Berücksichtigung der Belastungssituation im Produktionssystem möglich und die Planungsergebnisse können verbessert werden. Dies wird durch die Untersuchungen im vorherigen Abschnitt untermauert. Die Unsicherheiten der eintretenden Bedarfsmengen hingegen müssen weiterhin als gegeben hingenommen werden.²⁶ Um die Unsicherheit der Bedarfsmengen zu kompensieren, sind Sicherheitsbestände zu planen. Diese Sicherheitsbestände sorgen für eine termingerechte Bedarfsdeckung, wenn die tatsächlich eintretenden Bedarfsmengen die im Rahmen der Planung verwendeten Bedarfsmengen übersteigen. Reicht der Sicherheitsbestand nicht aus, so kommt es zu Fehlmengen und die Bedarfsmengen können nicht termingerecht gedeckt werden. Diese auftretenden Fehlmengen werden in der Praxis in der Regel über eine Ersatzzielgröße, dem Servicegrad, reguliert.²⁷ Je höher ein Servicegrad definiert wurde, desto höher müssen die geplanten Sicherheitsbestände geplant werden. Aus diesem Grund sind die Zielgrößen einer Minimierung der Lagerbestände bei gleichzeitiger Maximierung des Servicegrades gegensätzlich zueinander: Eine Veränderung des Servicegrades führt zu gegenläufigen Kostenentwicklungen der Fehlmengenkosten und Lagerbestandskosten. Diese gegenläufigen Kostenentwicklungen sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Da die Fehlmengenkosten in der Regel nicht ohne Weiteres quantifiziert werden können, wird in der industriellen Praxis oft ein als günstig erachteter Servicegrad vorgegeben, den es zu erfüllen gilt.²⁸

²⁴Vgl. Gebhard (2009), S. 21.

²⁵Vgl. Tempelmeier (2012), S. 301ff.

²⁶Vgl. Tempelmeier (2012), S. 302.

²⁷Vgl. Tempelmeier (2012), S. 303.

²⁸Vgl. Corsten u. Gössinger (2012), S. 502.

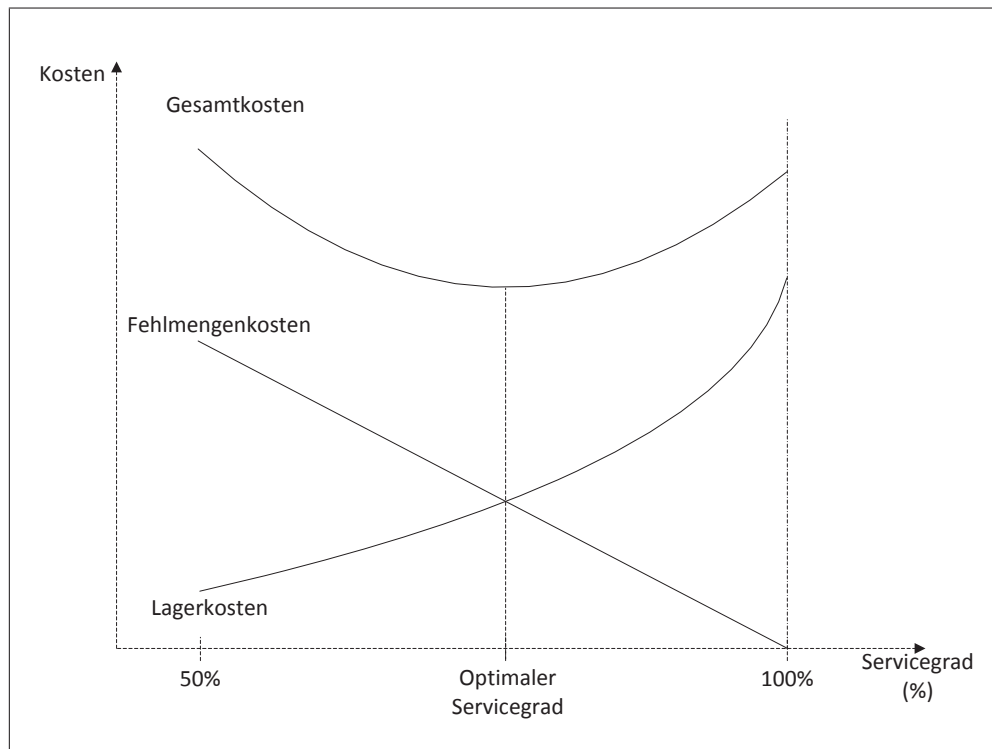


Abbildung 5.12.: Gegenläufige Kostenentwicklung der Fehlmengen- und Lagerbestandskosten (Quelle der Abbildung: Corsten u. Gössinger (2012), S. 503).

5.3.1. Integration von Servicegraden

Um die Unsicherheit der tatsächlich auftretenden Bedarfsmengen zu berücksichtigen, werden in Ravindran u. a. die Integration von Sicherheitsbeständen in ein Modell zur Auftragsfreigabe vorgeschlagen.²⁹ Die Bedarfe folgen einer Normalverteilung und sind stochastisch unabhängig. Die Verteilungsfunktion sowie der Mittelwert und die Streuung der Bedarfe sind bekannt und liegen zum Planungszeitpunkt vor. Die tatsächlich eintretenden Bedarfe werden hingegen erst zum Bedarfszeitpunkt bekannt, sodass im Rahmen der Planung durch die vorliegenden Sicherheitsbestände eine Bedarfsdeckung erfolgen muss. Diese Sicherheitsbestände werden auf Basis von Erwartungswerten der Bedarfe und einem spezifizierten Servicegrad bestimmt.

Ausgangspunkt der Untersuchung von Ravindran u. a. ist ein Basismodell, welches die Planung für ein Produktionssystem, bestehend aus einem Produkt und einer Bearbeitungsstation, durchführt. Auftretende Fehlmengen werden durch einen α -Servicegrad limitiert. In Herrmann wird der (ereignisbezogene) Alpha-Servicegrad als die Realisation der Zufallsgröße fehlbestandsfreie Zeit für den Beobachtungs- bzw. Planungszeitraum dargestellt. Dieser gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass der Gesamtbedarf D_t in einer beliebigen Periode t aus dem vorhandenen physischen Lagerbestand gedeckt werden kann und keine Fehlmengen auftreten.³⁰ Ein periodenbezogener Alpha-Servicegrad α_{per} liegt vor, wenn

²⁹Siehe hierzu die Arbeit von Ravindran u. a. (2011).

³⁰Vgl. Herrmann (2011), S. 133f.

eine Periode als Zeitraum zwischen zwei aufeinander folgenden Nachfrageereignissen betrachtet wird. Somit gilt:³¹

$$\alpha_{Per} = P(\text{Periodennachfragemenge} \leq \text{physischer Bestand zu Beginn einer Periode}) \quad (5.78)$$

Die resultierende Servicegradrestriktion ist wie nachfolgend dargestellt zu formulieren.³²

$$P\left(I_0 + \sum_{i=1}^t X_i - \sum_{i=1}^t D_i \geq 0\right) \Rightarrow P\left(I_0 + \sum_{i=1}^t X_i \geq \sum_{i=1}^t D_i\right) \quad (5.79)$$

Somit muss sichergestellt werden, dass der Bedarf D_t einer Periode t durch den initialen Lagerbestand I_0 sowie der Ausbringungsmengen X_t mit einer Wahrscheinlichkeit von α_{Per} gedeckt werden kann. Das Basismodell, welches in der Arbeit von Ravindran u. a. und Aouam u. Uzsoy als Grundlage dient, ist nachfolgend dargestellt und wird als Basis α_{Per} bezeichnet.³³

Basis α_{Per}

Parameter:

- α_{Per} : Periodenbezogener Alpha-Servicegrad
- C : Verfügbare Kapazität
- μ_t : Mittelwert des normalverteilten Bedarfs in Periode t ($1 \leq t \leq T$)
- D_t : Normalverteilter Bedarf in Periode t mit bekanntem Mittelwert μ_t sowie Standardabweichung σ_t ($1 \leq t \leq T$)
- h : Lagerkosten für eine Einheit des Produkts

Variablen:

- I_t : Lagerbestand am Ende von Periode t ($1 \leq t \leq T$);
initialer Lagerbestand: I_0
- R_t : Freigabemenge zu Beginn von Periode t ($1 \leq t \leq T$)
- X_t : Ausbringungsmenge in Periode t ($1 \leq t \leq T$)

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{t=1}^T (I_t \cdot h) \quad (5.80)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_t = I_{t-1} + X_t - \mu_t \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.81)$$

³¹Vgl. Herrmann (2011), S. 134 sowie Tempelmeier (2012), S. 303.

³²Vgl. Ravindran u. a. (2011), S. 66.

³³Vgl. Ravindran u. a. (2011), S. 67 und Aouam u. Uzsoy (2012), S. 184.



$$P \left(I_0 + \sum_{i=1}^t X_i \geq \sum_{i=1}^t D_i \right) \geq \alpha_{Per} \quad (5.82)$$

$$R_t = X_{t+L_t} \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.83)$$

$$X_t \leq C \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.84)$$

$$I_t, R_t, X_t \geq 0 \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.85)$$

In der Zielfunktion (5.80) erfolgt die Minimierung der Lagerbestandskosten. Die Lagerbilanzgleichung (5.81) ermittelt den Lagerbestand am Ende einer Periode t unter Berücksichtigung des Mittelwerts des Bedarfs in Periode t . Über die Servicegradrestriktion (5.82) wird das Auftreten von Fehlmengen limitiert. Somit muss der Anfangslagerbestand I_0 zusätzlich der im Zeitverlauf kumulierten Ausbringungsmengen X_t mit einer Wahrscheinlichkeit von α_{Per} größer als die im Zeitverlauf kumulierten Bedarfe D_t sein. Somit treten mit einer Wahrscheinlichkeit von $1 - \alpha_{Per}$ Fehlmengen auf. Eine Freigabemenge R_t führt erst nach einer spezifischen Durchlaufzeit L_t zu einer Ausbringungsmenge X_t , wie in Gleichung (5.83) aufgeführt. Die Kapazitätsrestriktion (5.84) stellt sicher, dass die Ausbringungsmengen die verfügbare Kapazität nicht überschreiten. Die Entscheidungsvariablen der Lagerbestände I_t sowie der Ausbringungsmengen X_t dürfen keine negativen Werte annehmen, was durch die Bedingung (5.85) gewährleistet wird.

In diesem Basismodell existiert keine Berücksichtigung von WIP-Beständen sowie von belastungsabhängigen Durchlaufzeiten. Aus diesem Grund erfolgt in dem Modell die Integration der Clearing Funktion sowie einer WIP-Bestandsgleichung. Somit kann über die Clearing Funktion die Ausbringungsmenge in Abhängigkeit von der Belastung im Produktionssystem bestimmt werden. Das Modell ist um die folgende WIP-Bestandsgleichung zu erweitern:

$$W_t = W_{t-1} + R_t - X_t \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.86)$$

Die Kapazitätsrestriktion wird durch die Clearing Funktion ersetzt. Diese wird in N lineare Segmente approximiert, um ein lineares Entscheidungsmodell zu erhalten. Somit gilt:

$$X_t \leq a_n \cdot (W_{t-1} + R_t) + b_n \quad \forall 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq n \leq N \quad (5.87)$$

Um den angestrebten Servicegrad zu erreichen, müssen die Bedarfsmengen D_t durch die Ausbringungsmengen X_t mit einer Wahrscheinlichkeit von α_{Per} gedeckt sein. Ist dies nicht

möglich, so muss eine höhere Freigabemenge R_t bestimmt werden, um dies gewährleisten zu können. Analog zum Bestandsmanagement ist die Freigabe R_t als Bestellentscheidung zu interpretieren, welche nach einer Durchlaufzeit L_t als Lagerzugang den physischen Lagerbestand erhöht. Die Servicegradrestriktion (5.82) ist für den Fall, dass die Durchlaufzeiten nicht größer als eine Periode sind, anzuwenden. Existieren Durchlaufzeiten L_t größer einer Periode, so muss zum Treffen einer Bestellentscheidung bzw. Freigabe einer Produktionsmenge der disponible Lagerbestand I_t^D berücksichtigt werden. Dieser disponible Lagerbestand setzt sich aus dem physischen Bestand zuzüglich offener Bestellungen zusammen. Im Kontext der Auftragsfreigabe ist somit der WIP-Bestand W_t als eine offene Bestellung, welche nach einer definierten Durchlaufzeit L_t zu einem Lagerzugang führt, ebenfalls zu berücksichtigen.³⁴ Der disponible Lagerbestand I_t^D kann wie nachfolgend dargestellt berechnet werden:

$$I_t^D = I_t + W_t = (I_0 + W_0) + \sum_{i=1}^t R_i - \sum_{i=1}^t D_i \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.88)$$

Da nun auch die WIP-Bestände berücksichtigt werden, wird als Bezugszeitpunkt ein Produktionszyklus, also die Wiederbeschaffungszeit, betrachtet. Somit liegt ein wiederbeschaffungszeitbezogener Alpha-Servicegrad α_{WBZ} vor, welcher wie nachfolgend dargestellt definiert ist:³⁵

$$\alpha_{WBZ} = P(\text{Nachfragemenge in der WBZ} \leq \text{physischer Bestand zu Beginn der WBZ}) \quad (5.89)$$

Im Rahmen der Servicegradrestriktion ist nun zu gewährleisten, dass der disponible Lagerbestand I_t^D in einer Periode t die über die Durchlaufzeit L_t kumulierten Bedarfsmengen mit einer Wahrscheinlichkeit von α_{WBZ} nicht unterschreitet. Somit ist die Kapazitätsrestriktion wie nachfolgend dargestellt zu formulieren:³⁶

$$P\left(I_0 + W_0 + \sum_{i=1}^t R_i - \sum_{i=1}^t D_i \geq \sum_{i=t+1}^{t+L_t} D_i\right) = P\left(I_0 + W_0 + \sum_{i=1}^t R_i \geq \sum_{i=1}^{t+L_t} D_i\right) \geq \alpha_{WBZ} \quad (5.90)$$

Wie in der Arbeit von Bookbinder u. Tan aufgezeigt, kann eine solche Servicegradrestriktion über eine kumulierte Verteilungsfunktion $G_{[t,t+L_t]}^{-1}$ der Bedarfe in den Perioden 1 bis $t + L_t$ erfolgen.³⁷ Somit kann eine äquivalente deterministische Formulierung der Servicegradrestriktion wie folgt dargestellt werden:³⁸

$$I_0 + W_0 + \sum_{i=1}^t R_i \geq G_{[1,t+L_t]}^{-1}(\alpha_{WBZ}) \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.91)$$

³⁴Vgl. Ravindran u. a. (2011), S. 67 sowie Aouam u. Uzsoy (2012), S. 184.

³⁵Vgl. Herrmann (2011), S. 134 und Tempelmeier (2012), S. 304.

³⁶Vgl. Ravindran u. a. (2011), S. 70 und Aouam u. Uzsoy (2012), S. 186.

³⁷Vgl. Bookbinder u. Tan (1988), S. 1098.

³⁸Vgl. Ravindran u. a. (2011), S. 70, Aouam u. Uzsoy (2012), S. 186 und Tempelmeier (2012), S. 318.

Durch diese Anpassungen des Basismodells $\text{Basis}_{\alpha_{per}}$ können zum einen belastungsabhängige Durchlaufzeiten durch eine Clearing Funktion berücksichtigt, und zum anderen die WIP-Bestände, welche zu einem Lagerzugang führen, im Rahmen der Servicegradrestriktion integriert werden. Dies führt zum nachfolgend aufgeführten Modell, welches in dieser Arbeit als $\text{Basis}_{\alpha_{WBZ}}^{CF}$ bezeichnet wird.³⁹

Basis $_{\alpha_{WBZ}}^{CF}$

Parameter:

- α_{WBZ} : Wiederbeschaffungszeitbezogener Alpha-Servicegrad
 a_n : Steigung der Clearing Funktion im linearen Segment n ($1 \leq n \leq N$)
 b_n : Achsenabschnitt der Clearing Funktion im linearen Segment n ($1 \leq n \leq N$)
 $G_{[1,t+L_t]}^{-1}$: Kumulierte Verteilungsfunktion der Bedarfe in den Perioden 1 bis $t + L_t$ ($1 \leq t \leq T$)
 w : Kosten für eine Einheit WIP-Bestand

Variablen:

- W_t : WIP-Bestand am Ende von Periode t ($1 \leq t \leq T$)

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{t=1}^T (I_t \cdot h + W_t \cdot w) \quad (5.92)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_t = I_{t-1} + X_t - \mu_t \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.93)$$

$$W_t = W_{t-1} + R_t - X_t \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.94)$$

$$I_0 + W_0 + \sum_{i=1}^t R_i \geq G_{[1,t+L_t]}^{-1}(\alpha_{WBZ}) \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.95)$$

$$X_t \leq a_n \cdot (W_{t-1} + R_t) + b_n \quad \forall 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq n \leq N \quad (5.96)$$

³⁹In den Arbeiten von Ravindran u. a. und Aouam u. Uzsoy wird dieses Modell als *Zero-Order Inventory Position* (ZOIP) - Modell bezeichnet (vgl. Ravindran u. a. (2011), S. 70 und Aouam u. Uzsoy (2012), S. 186).



$$I_t, R_t, W_t, X_t \geq 0 \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.97)$$

Alle Parameter dieses Entscheidungsmodells sind zum Planungszeitpunkt vorzugeben. Als Ergebnis werden Freigabemengen R_t bestimmt, welche freizugeben sind, um die auftretenden Bedarfsmengen D_t zu decken, sodass der definierte Servicegrad erreicht werden kann. Um die zum Bedarfszeitpunkt bekannt werdenden Bedarfsmengen im Rahmen der Freigabeentscheidung berücksichtigen zu können, schlagen Ravindran u. a. vor, eine lineare Entscheidungsregel zu implementieren. Hierdurch kann eine Flexibilität bei der Bestimmung der Freigabemengen R_t erreicht werden. Allerdings ist zu beachten, dass hierdurch keine optimale Lösung erzielt werden kann.⁴⁰ Über eine Hilfsvariable Y_t werden die notwendigen Bestandsänderungen bestimmt, welche zur Erreichung des Servicegrades auf- bzw. abgebaut werden müssen. Die tatsächlich freizugebenden Mengen R_t werden auf Basis dieser notwendigen Bestandsänderung Y_t und dem Bedarf D_t bestimmt. Somit gilt:

$$R_t = Y_t + D_t \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.98)$$

Im Entscheidungsmodell erfolgt die Ermittlung der notwendigen Bestandsänderung Y_t auf Basis der Mittelwerte μ_t der Bedarfe. Unter Berücksichtigung der tatsächlich auftretenden Bedarfe D_t erfolgt die Ermittlung der Freigabemengen R_t . Dieses Konzept ist in Abbildung 5.13 dargestellt.

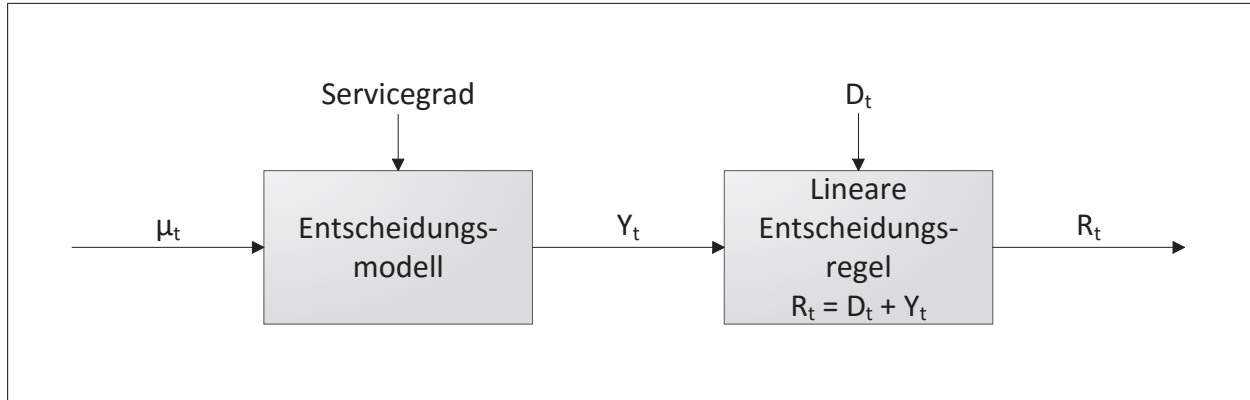


Abbildung 5.13.: Ermittlung der Freigabemengen R_t auf Basis der im Entscheidungsmodell bestimmten Bestandsänderung Y_t und den tatsächlich eintretenden Bedarfsmengen D_t .

Im Falle einer negativen Bestandsänderung ($Y_t < 0$) kann es vorkommen, dass bei einem kleinen auftretenden Bedarf D_t die Freigabemenge R_t einen negativen Wert annimmt. Um

⁴⁰Vgl. Ravindran u. a. (2011), S. 71.



dies zu verhindern, ist, wie in Ravindran u. a. beschrieben, die folgende Restriktion zu ergänzen:

$$Y_t + D_t^{Min} \geq 0 \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.99)$$

Hierbei beschreibt der Parameter D_t^{Min} die untere Grenze der Bedarfsmenge, welche mit einer hohen Wahrscheinlichkeit nicht unterschritten wird.⁴¹

Die Variable der Freigabemenge R_t kann, wie in Formel (5.98) aufgezeigt, ersetzt werden. Da die tatsächlich eintretenden Bedarfsmengen D_t zum Planungszeitpunkt nicht bekannt sind, ist der Mittelwert μ_t der Bedarfsmengen zu verwenden. Somit ist die Bestandsgleichung des WIP-Bestandes wie folgt anzupassen:⁴²

$$W_t = W_{t-1} + Y_t + \mu_t - X_t \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.100)$$

Analog dazu ist auch die Servicegradrestriktion zu modifizieren. Hierbei müssen die geplanten Bestandsänderungen Y_t mindestens so groß sein wie die kumulierten Bedarfe in der Wiederbeschaffungszeit. Somit gilt:

$$W_0 + I_0 + \sum_{i=1}^t Y_i \geq G_{[t+1, t+L_t]}^{-1}(\alpha_{WBZ}) \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.101)$$

Durch diese lineare Entscheidungsregel können die tatsächlich eintretenden Bedarfe, welche zum Bedarfszeitpunkt bekannt werden, bei der Bestimmung der Freigabemengen berücksichtigt werden. Diese Anpassungen bilden das nachfolgende Modell, welches in dieser Arbeit als Basis $_{Y, \alpha_{WBZ}}^{CF}$ bezeichnet wird.⁴³ Dieses Modell ist die Grundlage der nachfolgend aufgeführten Erweiterungen und Untersuchungen.

Basis $_{Y, \alpha_{WBZ}}^{CF}$

Parameter:

D_t^{Min} : Kleinster auftretender Bedarf in Periode t ($1 \leq t \leq T$)

$G_{[t+1, t+L_t]}^{-1}$: Kumulierte Verteilungsfunktion der Bedarfe in der Wiederbeschaffungszeit ($1 \leq t \leq T$)

Variablen:

Y_t : Notwendige Bestandsänderung zur Erreichung des vorgegeben Servicegrades in Periode t ($1 \leq t \leq T$)

⁴¹Vgl. Aouam u. Uzsoy (2012), S. 188.

⁴²Vgl. Ravindran u. a. (2011), S. 72.

⁴³In den Arbeiten von Ravindran u. a. und Aouam u. Uzsoy wird dieses Modell als *Dynamic Inventory Position* (DYNIP) - Modell bezeichnet (vgl. Ravindran u. a. (2011), S. 70 und Aouam u. Uzsoy (2012), S. 186).

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{t=1}^T (I_t \cdot h + W_t \cdot w) \quad (5.102)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_t = I_{t-1} + X_t - \mu_t \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.103)$$

$$W_t = W_{t-1} + Y_t + \mu_t - X_t \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.104)$$

$$I_0 + W_0 + \sum_{i=1}^t Y_i \geq G_{[t+1, t+L_t]}^{-1}(\alpha_{WBZ}) \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.105)$$

$$X_t \leq a_n \cdot (W_{t-1} + R_t) + b_n \quad \forall 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq n \leq N \quad (5.106)$$

$$Y_t + D_t^{Min} \geq 0 \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.107)$$

$$I_t, R_t, W_t, X_t, Y_t \geq 0 \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5.108)$$

In diesem Modell gilt es zu beachten, dass zwei unterschiedliche Durchlaufzeiten berücksichtigt werden.⁴⁴ Über die Clearing Funktion wird die Ausbringungsmenge X_t belastungsabhängig bestimmt, sodass eine belastungsabhängige Durchlaufzeit implizit berücksichtigt wird. Die Durchlaufzeit L_t , welche im Rahmen der Servicegradrestriktion verwendet wird, ist aber weiterhin ein exogener Parameter und ist zum Planungszeitpunkt vorzugeben. Somit erfolgt nur eine Approximation der Bedarfsmengen im Wiederbeschaffungszeitraum. Im Idealfall deckt sich die Durchlaufzeit L_t mit der im Produktionssystem realisierten Durchlaufzeit, was allerdings durch das Entscheidungsmodell so nicht gewährleistet werden kann.

⁴⁴Vgl. Ravindran u. a. (2011), S. 70 und Aouam u. Uzsoy (2012), S. 187.



5.3.2. Entscheidungsmodelle $\text{AFP}_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ und $\text{AFP}_{\beta}^{CF-DLZ}$

Basierend auf dem von Ravindran u. a. vorgestellten Entscheidungsmodell und der in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 beschriebenen Vorgehensweise zur Integration der Clearing Funktion, wird ein neues und erweitertes Entscheidungsmodell formuliert. Zunächst ist hierbei das Modell von Ravindran u. a. um die Berücksichtigung von mehreren Produkten zu erweitern, sodass ein Produktindex k integriert wird. Wie in Kapitel 5.2.2 dargestellt wird durch die Vektoren $VR_{k,t,\tau}$ und $VB_{k,t,\tau}$ eine geschlossene Produktion unter Berücksichtigung der durch die Clearing Funktion bestimmten Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ realisiert. Über den binären Vektor $VB_{k,t,\tau}$ ist es möglich, die tatsächlichen Durchlaufzeiten $L_{k,t}$, welche auftreten bis eine Freigabemenge $R_{k,t}$ zu einem Lagerzugang $LZ_{k,t}$ führt, zu berechnen. Der binäre Vektor $VB_{k,t,\tau}$ gibt an, in welcher Periode eine Freigabemenge $R_{k,t}$ vollständig bearbeitet wurde. Da der tatsächliche Lagerzugang aber in der Folgeperiode erfolgt, ist dies entsprechend zu berücksichtigen und die aus dem binären Vektor $VB_{k,t,\tau}$ ermittelte Durchlaufzeit $L_{k,t}$ um den Wert 1 zu erhöhen. Somit gilt:

$$L_{k,t} = \sum_{\tau=1}^T (VB_{k,t,\tau} \cdot \tau - VB_{k,t,\tau} \cdot t) + 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.109)$$

Es wird das Beispiel aus Kapitel 5.2.2 aufgegriffen, um dies zu verdeutlichen. Durch Formel (5.109) können die jeweiligen Durchlaufzeiten der Freigabemengen $R_{k,t}$ aus dem Vektor $VB_{k,t,\tau}$ berechnet werden, wie dies in Tabelle 5.16 dargestellt ist.

| | | Fertigstellung (τ) | | | | | $L_{k,t}$ |
|--------------|----------------------|---------------------------|---|---|---|---|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Freigabe (t) | 1 ($R_{A,1} = 15$) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| | 2 ($R_{A,2} = 12$) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| | 3 ($R_{A,3} = 5$) | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| | 4 ($R_{A,4} = 8$) | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | 5 ($R_{A,5} = 10$) | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

Tabelle 5.16.: Ermittlung der Durchlaufzeit von Freigabe bis zur Einlagerung durch den binären Vektor $VB_{k,t,\tau}$.

So wird beispielsweise die Freigabemenge $R_{A,1}$, welche für Produkt A in Periode 1 freigegeben wurde, in Periode 2 fertiggestellt, also nach einer Periode. Da der Lagerzugang erst in der Folgeperiode erfolgt, beträgt die Durchlaufzeit $L_{k,t}$ bis zum Lagerzugang zwei Perioden. Somit ist es möglich, eine belastungsabhängige Durchlaufzeit $L_{k,t}$ der Freigabemengen $R_{k,t}$ unter Berücksichtigung der Clearing Funktion für eine geschlossene Produktion zu ermitteln.

Die kumulierte Verteilungsfunktion der Bedarfe $G_{t+1,t+L_{k,t}}^{-1}(\alpha_{WBZ})$ beschreibt die zu erwartenden Bedarfsmengen in der Wiederbeschaffungszeit. Diese gilt es, mit einer Wahrscheinlichkeit von α_{WBZ} zu erfüllen, sodass ein bestimmter Bestand $s_{k,t}$ je Produkt k und Periode t vorhanden ist. Dieser notwendige Bestand $s_{k,t}$ kann bei Vorliegen einer Normalverteilung mit bekanntem Mittelwert $\mu_{k,t}$ und bekannter Standardabweichung $\sigma_{k,t}$ wie nachfolgend dargestellt formuliert werden:⁴⁵

$$s_{k,t} = L_{k,t} \cdot \mu_k + \sigma_{k,t} \cdot \sqrt{L_{k,t}} \cdot \Phi_{\mathcal{N}(0,1)}^{-1}(\alpha_{WBZ}) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.110)$$

Die hierbei verwendeten Durchlaufzeiten $L_{k,t}$ werden im Entscheidungsmodell in Abhängigkeit von den Freigabemengen $R_{k,t}$ sowie der durch die Clearing Funktion bestimmten Ausbringungsmengen $X_{k,t}$ im Sinne einer geschlossenen Produktion berechnet und sind somit Entscheidungsvariablen. Um ein lineares Entscheidungsmodell zu erhalten, kann aus diesen nicht ohne Weiteres die Wurzel berechnet werden. Aus diesem Grund wird die Wurzel der Durchlaufzeit $L_{k,t}$ über einen Vektor V_v^{sqrt} ($1 \leq v \leq V \wedge v \in \mathbb{Z}^+$), welcher zum Planungszeitpunkt vorgegeben ist, bestimmt. Dieser Vektor ist nachfolgend in Tabelle 5.17 aufgeführt.⁴⁶

| | | | | | | | |
|------------|---|------|------|---|------|-----|-----|
| v | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | ... |
| \sqrt{v} | 1 | 1,41 | 1,73 | 2 | 2,24 | 2,4 | ... |

Tabelle 5.17.: Vektor V_v^{sqrt} zur Ermittlung der Wurzel der Durchlaufzeiten.

Um einer Durchlaufzeit $L_{k,t}$ einen entsprechenden Wert der Wurzel dieser Durchlaufzeit zuweisen zu können, ist ein binärer Vektor $VB_{k,t,v}^{sqrt}$ zu verwenden. Analog wie bei der Transformation der Clearing Funktion, wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, sind somit die folgenden Restriktionen für diese Transformation zu verwenden:

$$\sum_{v=1}^V \left(VB_{k,t,v}^{sqrt} \cdot v = L_{k,t} \right) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.111)$$

$$\sum_{v=1}^V VB_{k,t,v}^{sqrt} = 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.112)$$

$$L_{k,t}^{sqrt} = \sum_{v=1}^V \left(V_v^{sqrt} \cdot VB_{k,t,v}^{sqrt} \right) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.113)$$

⁴⁵Vgl. Herrmann (2011), S. 145.

⁴⁶Abhängig davon, welche Durchlaufzeiten $L_{k,t}$ maximal zu erwarten sind, ist v zu definieren, sodass für jede zu erwartende Durchlaufzeit $L_{k,t}$ ein entsprechender Wert vorliegt.

Durch Formel (5.111) wird der binäre Vektor $VB_{k,t,v}^{sqr}$ für ein Produkt k in einer Periode t an der Stelle v mit einem Wert 1 belegt, wenn die Durchlaufzeit $L_{k,t}$ von Produkt k in Periode t dem Wert v entspricht. Hierbei ist sicherzustellen, dass der Vektor $VB_{k,t,v}^{sqr}$ je Produkt k und Periode t nur einmal den Wert 1 erhält (siehe Formel (5.112)). Nun kann durch die Multiplikation der Vektoren $VB_{k,t,v}^{sqr}$ und V_v^{sqr} die Wurzel der Durchlaufzeit $L_{k,t}$ bestimmt und der Variable $L_{k,t}^{sqr}$ zugewiesen werden.

Die im Modell von Ravindran u. a. beschriebene Servicegradrestriktion (5.105) geht davon aus, dass die notwendigen Bestandsänderungen $Y_{k,t}$ erfüllt werden können, sodass der vorliegende Bestand die Bedarfsmengen in der Wiederbeschaffungszeit mit einer Wahrscheinlichkeit von α_{WBZ} deckt. Hierbei kann aber nicht sichergestellt werden, dass diese Bestandsänderungen $Y_{k,t}$ tatsächlich in Periode t erfüllt werden, da die Freigabemengen $R_{k,t}$, welche diese Bestandsänderung bewirken sollen, erst nach einer belastungsabhängigen Durchlaufzeit $L_{k,t}$ fertiggestellt werden können. Somit muss die tatsächliche Bestandsänderung berücksichtigt werden, welche sich aus dem im Produktionssystem befindlichen und fertiggestellten Losen $FL_{k,t}$ abzüglich dem erwarteten Bedarf $\mu_{k,t}$ dieser Periode ergibt. Folglich muss die Servicegradrestriktion wie nachfolgend dargestellt formuliert werden:

$$I_{k,0} + \sum_{i=1}^t (FL_{k,i} - \mu_{k,i}) \geq s_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.114)$$

Aufgrund der rollierenden Planungssituation kann es vorkommen, dass der initiale physische Bestand $I_{k,0}$ zuzüglich des Lagerzugangs $LZ_{k,t}$ nicht ausreicht, um den mittleren Bedarf $\mu_{k,t}$ in Periode t zu decken. In einem solchen Fall gibt es keine zulässige Lösung für das Planungsproblem. Um dennoch eine zulässige Lösung sicherstellen zu können, werden weiterhin Fehlmengen $F_{k,t}$ in der Lagerbilanzgleichung berücksichtigt. Eine Berücksichtigung dieser Fehlmengen $F_{k,t}$ im Rahmen der Zielfunktion ist aufgrund der Verwendung eines Servicegrades nicht notwendig. Analog zum Modell AFP^{CF-DLZ} werden die noch im Produktionssystem befindlichen Produktionsmengen als initiale Freigabemengen $R_{k,0}$ und die bereits für diese Produktionsmengen erbrachte Arbeitsleistung $X_{k,0}$ berücksichtigt sowie die Vektoren $VR_{k,t,\tau}$ und $VB_{k,t,\tau}$ um die Periode 0 erweitert. Diese Anpassungen führen zu dem nachfolgend aufgeführten Entscheidungsmodell, welches in dieser Arbeit als $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ bezeichnet wird.

AFP_{α_{WBZ}}^{CF-DLZ}

Parameter:

- α_{WBZ} : Wiederbeschaffungszeitbezogener Alpha-Servicegrad
 $CF_{k,n}$: Vektor zur Clearing Funktion für Produkt k und Wert n ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq n \leq N$)
 D_k^{Min} : Kleinster auftretender Bedarf von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
 h_k : Lagerkosten für eine Einheit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)



| | |
|--|--|
| $\Phi_{\mathcal{N}(0,1)}^{-1}(\alpha_{WBZ})$: | Wert der Verteilungsfunktion der Normalverteilung für α_{WBZ} |
| M : | Große Zahl mit $M > \sum_{k=1}^K F_{k,0} + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T D_{k,t}$ |
| $\mu_{k,t}$: | Mittelwert der Bedarfsmengen von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$) |
| $\sigma_{k,t}$: | Standardabweichung der Bedarfsmengen von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$) |
| w_k : | Kosten für eine Einheit WIP-Bestand von Produkt k ($1 \leq k \leq K$) |
| Variablen: | |
| $F_{k,t}$: | Fehlmengen von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$); initiale Fehlmengen zum Planungsbeginn: $F_{k,0}$ |
| $FL_{k,t}$: | Vollständig bearbeitete Lose von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$) |
| $I_{k,t}$: | Lagerbestand von Produkt k am Ende von Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$); initialer Lagerbestand zum Planungsbeginn: $I_{k,0}$. |
| $L_{k,t}$: | Durchlaufzeit von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$) |
| $L_{k,t}^{sqr}$: | Wurzel der Durchlaufzeit von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$) |
| $LZ_{k,t}$: | Lagerzugang von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$) |
| $R_{k,t}$: | Freigabemenge von Produkt k zu Beginn von Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$); Produktionsmengen von Produkt k , welche zum Planungszeitpunkt im Produktionssystem vorhanden sind: $R_{k,0}$ |
| $s_{k,t}$: | Notwendiger Bestand zur Erfüllung der Servicegradeanforderungen ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$) |
| $VB_{k,t}^{sqr}$: | Binärvektor zur Ermittlung der Wurzel der Durchlaufzeit ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$) |
| V_v^{sqr} : | Werte der Wurzel der Durchlaufzeit ($1 \leq v \leq V$) |
| $VB_{k,t,\tau}$: | Binärvektor von Produkt k zur Ermittlung der Fertigstellungs- periode τ einer Freigabemenge, welche in Periode t freigegeben wurde ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq 0 \leq T \wedge 0 \leq \tau \leq T$) |
| $VR_{k,t,\tau}$: | Vektor von Produkt k zur Ermittlung der Fertigstellungs- periode τ einer Freigabemenge, welche in Periode t freigegeben wurde ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq 0 \leq T \wedge 0 \leq \tau \leq T$) |
| $VI_{k,t,n}$: | Binärer Vektor zur Transformation der Clearing Funktion |
| $W_{k,t}$: | WIP-Bestand von Produkt k am Ende von Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$); initialer WIP-Bestand zum Planungsbeginn: $W_{k,0}$ |
| $\widehat{W}_{k,t}$: | WIP-Bestand von Produkt k in einer Periode t zur Ermittlung der Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ in Abhängigkeit von der |



Clearing Funktion ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
 $X_{k,t}$: Ausbringungsmenge von Produkt k in Periode t
 ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);
 Ausbringungsmenge, die für die im Produktionssystem vorhandenen
 Freigabemengen $R_{k,0}$ bereits erbracht wurde: $X_{k,0}$
 $Y_{k,t}$: Notwendige Bestandsänderung zur Erreichung des vorgegeben
 Servicegrades für Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (I_{k,t} \cdot h_k + W_{k,t} \cdot w_k) \quad (5.115)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} + LZ_{k,t} - F_{k,t-1} - \mu_{k,t} + F_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.116)$$

$$W_{k,t} = W_{k,t-1} + R_{k,t} - X_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.117)$$

$$R_{k,t} = Y_{k,t} + \mu_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.118)$$

$$Y_{k,t} + D_k^{Min} \geq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.119)$$

$$(I_{k,0} - F_{k,0}) + \sum_{i=1}^t (FL_{k,i} - \mu_{k,i}) \geq s_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.120)$$

$$s_{k,t} = L_{k,t} \cdot \mu_{k,t} + \sigma_{k,t} \cdot L_{k,t}^{sqr} \cdot \Phi_{\mathcal{N}(0,1)}^{-1}(\alpha_{WBZ}) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.121)$$

$$\widehat{W}_{k,t} = W_{k,t-1} + R_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.122)$$

$$\sum_{n=1}^N VI_{k,t,n} \cdot n = \widehat{W}_{k,t} + 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.123)$$



$$\sum_{n=1}^N VI_{k,t,n} = 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.124)$$

$$X_{k,t} = \sum_{n=1}^N (CF_{k,n} \cdot VI_{k,t,n}) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.125)$$

$$\sum_{i=0}^T FL_{k,i} \leq \sum_{i=0}^T X_{k,i} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.126)$$

$$FL_{k,t} = \sum_{i=0}^t VR_{k,i,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.127)$$

$$\sum_{\tau=0}^T VR_{k,t,\tau} = R_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.128)$$

$$VB_{k,t,\tau} \cdot M \geq VR_{k,t,\tau} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T \wedge 0 \leq \tau \leq T \quad (5.129)$$

$$\sum_{\tau=0}^T VB_{k,t,\tau} \leq 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.130)$$

$$\sum_{i=0}^{\tau} VB_{k,t,i} \geq \sum_{i=0}^{\tau} VB_{k,t+1,i} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T-1 \wedge 0 \leq \tau \leq T \quad (5.131)$$

$$FL_{k,t} = LZ_{k,t+1} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 0 \leq t \leq T-1 \quad (5.132)$$

$$L_{k,t} = \sum_{\tau=1}^T (VB_{k,t,\tau} \cdot \tau - VB_{k,t,\tau} \cdot t) + 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.133)$$

$$\sum_{v=1}^V (VB_{k,t,v}^{sqr t} \cdot v) = L_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.134)$$



$$\sum_{v=1}^V VB_{k,t,v}^{sqr} = 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.135)$$

$$L_{k,t}^{sqr} = \sum_{v=1}^V \left(V_v^{sqr} \cdot VB_{k,t,v}^{sqr} \right) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.136)$$

$$F_{k,t}, FL_{k,t}, I_{k,t}, R_{k,t}, W_{k,t}, X_{k,t} \geq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.137)$$

Durch die Zielfunktion (5.115) erfolgt die Minimierung der Kosten der Bestände. In der Lagerbilanzgleichung (5.116) wird nun der Mittelwertes $\mu_{k,t}$ der Bedarfsmengen berücksichtigt. Gleichung (5.118) bestimmt die Freigabemenge $R_{k,t}$, welche durch die notwendigen Bestandsänderungen $Y_{k,t}$ zuzüglich des Mittelwertes der Bedarfsmengen $\mu_{k,t}$ berechnet wird. Die bei Umsetzung der Planungsergebnisse tatsächlich freigegebenen Produktionsmengen dürfen keinen negativen Wert annehmen. Dies wird über die Ungleichung (5.119) sichergestellt. Über die Servicegradrestriktion (5.120) wird gewährleistet, dass der angestrebte Servicegrad erreicht wird. Somit müssen die Initialbestände $I_{k,0}$ zuzüglich der fertiggestellten Produktionsmengen im Produktionssystem $FL_{k,t}$ den Bestand $s_{k,t}$ übersteigen. Dieser notwendige Bestand wird durch die Gleichung (5.121) berechnet. Durch die Formeln (5.122) bis (5.125) erfolgt die Transformation der Clearing Funktion und die Ermittlung der Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ in Abhängigkeit vom WIP-Bestand $\widehat{W}_{k,t}$ zu Beginn der Periode. Die Umsetzung der geschlossenen Produktion erfolgt über die Formeln (5.126) bis (5.132). Die aufgrund der geschlossenen Produktion resultierenden Durchlaufzeiten $L_{k,t}$ werden über die Gleichung (5.133) berechnet. Durch die Formeln (5.134) bis (5.136) wird die Ermittlung der Wurzel der Durchlaufzeit $L_{k,t}^{sqr}$ realisiert. Letztlich ist über die Restriktion (5.137) sicherzustellen, dass die Entscheidungsvariablen keine negativen Werte annehmen.

Neben der Integration eines wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrades α_{WBZ} soll auch die Verwendung eines Beta-Servicegrades β erfolgen und untersucht werden.⁴⁷ Der Beta-Servicegrad ist ein mengenorientierter Servicegrad, welcher die auftretenden Fehlmengen im Bezug zur Nachfragemenge beschreibt.⁴⁸ Dieser gibt, bezogen auf einen konkreten Beobachtungszeitraum, den Anteil der auftretenden Fehlmengen an und ist wie nachfolgend dargestellt definiert:⁴⁹

$$\beta = 1 - \frac{\text{Durchschnittliche Fehlmenge in einer Periode}}{\text{durchschnittliche Periodennachfrage}} \quad (5.138)$$

⁴⁷Vgl. hierzu auch Lange u. a. (2013b).

⁴⁸Vgl. Tempelmeier (2012), S. 304.

⁴⁹Vgl. Herrmann (2011), S. 135.

Entgegen der Berechnung zum wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} wird beim Beta-Servicegrad β die Verlustfunktion erster Ordnung $\Phi^1_{\mathcal{N}(0,1)}(v)$ angewendet. So erfolgt, wie in Herrmann beschrieben, die Berechnung von v unter Berücksichtigung des Beta-Servicegrades β der Bestellmenge $q_{k,t}^*$ sowie der Streuung der Bedarfe $\sigma_{k,t}$ durch:⁵⁰

$$v = \frac{(1 - \beta) \cdot q_{k,t}^*}{\sigma_{k,t}} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.139)$$

Die Bestellmenge $q_{k,t}^*$ entspricht im Modell der Auftragsfreigabe der Freigabemenge $R_{k,t}$. Da diese von den notwendigen Bestandsänderungen $Y_{k,t}$, also einer Entscheidungsvariablen, abhängt, kann diese nicht ohne Weiteres in die Formel bzw. in das Entscheidungsmodell integriert werden. Es erfolgt eine Approximation, sodass nur der Mittelwert der Bedarfsmengen berücksichtigt wird und die Bestandsänderungen $Y_{k,t}$ vernachlässigt werden. Somit gilt:

$$v = \frac{(1 - \beta) \cdot \mu_{k,t}}{\sigma_{k,t}} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.140)$$

Der Wert der Verlustfunktion erster Ordnung für den Wert v kann über Tabellen bestimmt werden. Folglich kann der Wert der Verteilungsfunktion zum Planungszeitpunkt berechnet werden, sodass dieser Wert im Entscheidungsmodell als Parameter vorliegt. Somit muss durch die Integration des Beta-Servicegrades β die Berechnung des notwendigen Bestands $s_{k,t}$ modifiziert werden, sodass die Gleichung (5.121) durch die nachfolgende zu ersetzen ist:

$$s_{k,t} = L_{k,t} \cdot \mu_{k,t} + \sigma_{k,t} \cdot L_{k,t}^{sqr} \cdot \Phi^1_{\mathcal{N}(0,1)}\left(\frac{(1 - \beta) \cdot \mu_{k,t}}{\sigma_{k,t}}\right) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (5.141)$$

Bei dieser Umsetzung erfolgt die Vernachlässigung der unter Umständen vorhandenen Fehlmengen zu Beginn eines Beschaffungszyklus. Dies kann dazu führen, dass der resultierende Beta-Servicegrad β überschätzt wird.⁵¹ Unter der Annahme, dass ein hoher Servicegrad zu erzielen ist, führt diese Approximation in der Regel zu keiner signifikanten Erhöhung des erzielten Servicegrades.⁵²

Durch diese Anpassung der Berechnung des notwendigen Bestandes erfolgt die Berücksichtigung eines Beta-Servicegrades β . Das durch diese Modifikation resultierende Modell wird in dieser Arbeit als AFP_{β}^{CF-DLZ} bezeichnet.

5.3.3. Experimentdesign

Um die soeben vorgestellten Modelle untersuchen zu können, werden Simulationsexperimente durchgeführt. Hierbei gilt es primär zu untersuchen, ob die angestrebten Servicegra-

⁵⁰Vgl. Herrmann (2011), S. 147f.

⁵¹Vgl. Herrmann (2011), S. 149.

⁵²Vgl. Tempelmeier (2012), S. 318.



de erreicht werden können. Die zugrundeliegenden Bedarfsmengen folgen einer Normalverteilung mit bekanntem Mittelwert μ_t und Standardabweichung σ_t . Diese Verteilungsparameter variieren im Zeitverlauf, sodass schwankende Bedarfsmittelwerte vorliegen. Um diese Bedarfsmittelwerte für den gesamten Simulationshorizont T^s zu bestimmen, wird das von Ravindran u. a. beschriebene Verfahren angewendet. Hierbei werden über zwei Steuerungsparameter zum einen der Abstand Δ_m zwischen zwei Änderungen des Bedarfsmittelwertes und zum anderen der neue Wert μ_m des neuen Bedarfsmittelwertes ermittelt. Beide Parameter werden über eine Gleichverteilung U mit den unteren Schranken δ_{min} und φ_{min} sowie den oberen Schranken δ_{max} und φ_{max} bestimmt. Somit gilt:

$$\Delta_m = U(\delta_{min}, \delta_{max}) \quad \wedge \quad \mu_m = U(\varphi_{min}, \varphi_{max}) \quad \forall 1 \leq m \leq M \quad (5.142)$$

Durch den nachfolgend dargestellten Algorithmus erfolgt die Zuweisung der Bedarfsmittelwerte über den gesamten Simulationshorizont T^s :

Initialisiere: $m = 1 \wedge t = 1$

Solange $t < T^s$

Berechne $\Delta_m \wedge \mu_m$ mit Formel (5.142)

Solange $t < \min(t + \Delta_m, T^s)$

Setze $\mu_{k,t} = \mu_m \quad \forall 1 \leq k \leq K$

$t = t + 1$

$m = m + 1$

Als Ergebnis dieser Vorgehensweise erhält man für jede Periode t und jedes Produkt k einen Bedarfsmittelwert $\mu_{k,t}$. Über einen konstanten Variationskoeffizienten $VarK$ wird für den jeweiligen Mittelwert $\mu_{k,t}$ der Wert der Standardabweichung $\sigma_{k,t}$ bestimmt. Mit diesen Verteilungsparametern wird, unter Verwendung einer Normalverteilung, für eine Periode t ein ganzzahliger Bedarf $D_{k,t}$ erzeugt. Sollte hierbei ein negativer Bedarfswert auftreten, so wird ein neuer Bedarf generiert, welcher einen positiven Wert hat. Hierdurch wird sichergestellt, dass in jeder Periode t und für jedes Produkt k ein positiver ganzzahliger Bedarf $D_{k,t}$ existiert. Wie in Abbildung 5.14 exemplarisch aufgezeigt, können somit auf Basis der schwankenden Mittelwerte entsprechende Bedarfe erzeugt werden.

Auf Basis dieser Vorgehensweise werden unterschiedliche Bedarfsszenarien erzeugt, indem verschiedene Werte der unteren ($\delta_{min} \wedge \varphi_{min}$) und oberen ($\delta_{max} \wedge \varphi_{max}$) Grenzen der Abstände zwischen der Änderung des Mittelwerts sowie der neuen Mittelwerte bei der Verwendung der Gleichverteilung angewendet werden. Die konkreten Werte der Bedarfsszenarien zu diesen Parametern sind in Tabelle 5.18 aufgeführt.

Die Bedarfsszenarien unterscheiden sich hinsichtlich der Abstände, bis eine Änderung des Bedarfsmittelwertes eintritt sowie der Streuung der Bedarfe, definiert durch einen Variationskoeffizienten $VarK$.

Die zu erzielenden Servicegrade sind mit 90%, 95% sowie 97,5% gegeben. Durch die Simulationsexperimente gilt es zu prüfen, ob diese Servicegrade jeweils für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} sowie einem Beta-Servicegrad β

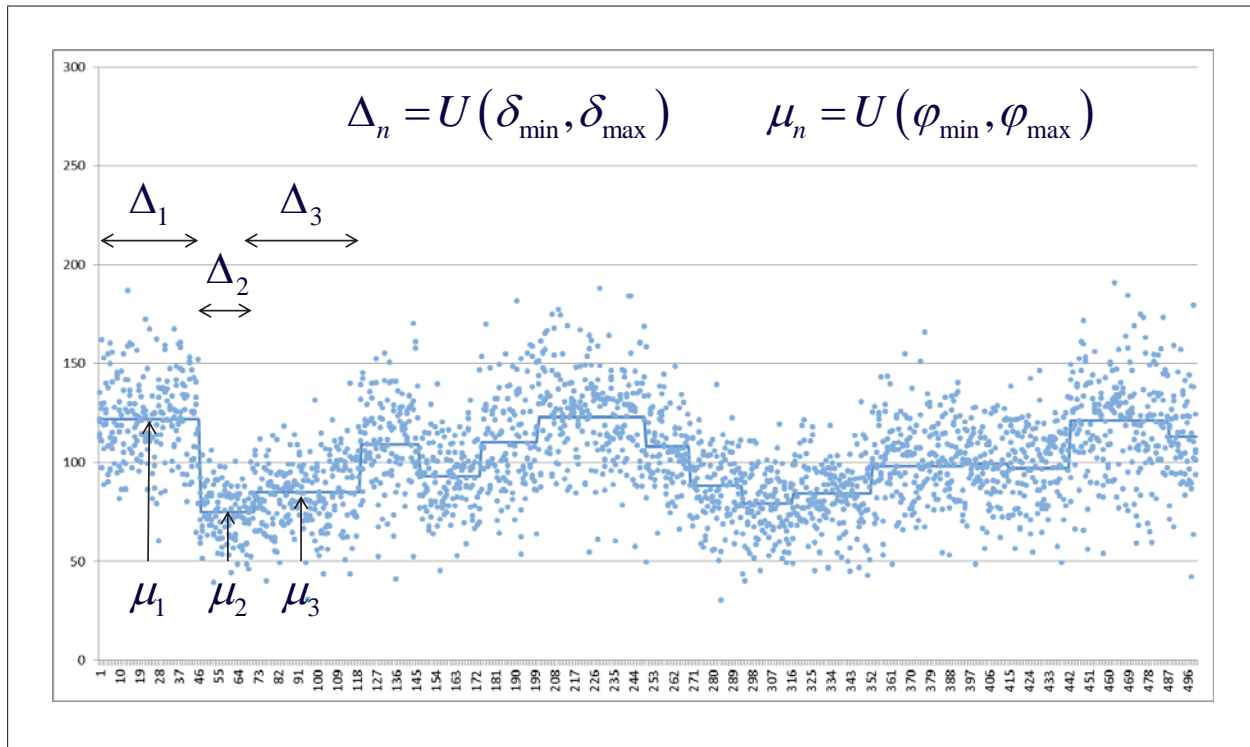


Abbildung 5.14.: Exemplarische Darstellung der schwankenden Bedarfsmittelwerte und resultierenden Bedarfsmengen.

| Bedarfsszenario | δ_{min} | δ_{max} | φ_{min} | φ_{max} | VarK |
|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|------|
| S-1 | 2 | 6 | 50 | 70 | 0,3 |
| S-2 | 2 | 6 | 50 | 70 | 0,5 |
| S-3 | 5 | 10 | 50 | 70 | 0,3 |
| S-4 | 5 | 10 | 50 | 70 | 0,5 |

Tabelle 5.18.: Parameter zur Erzeugung der Bedarfsszenarien für die Simulationsexperimente.

erreicht werden können. Hierbei gelten die jeweiligen Servicegrade für alle Produkte k gleichermaßen. Der bei Durchführung der Simulation erzielte wiederbeschaffungszeitbezogene Alpha-Servicegrad $\alpha_{k,WBZ}$ je Produkt k wird wie nachfolgend dargestellt berechnet:⁵³

$$\alpha_{k,WBZ} = \frac{\text{Anzahl der Wiederbeschaffungszeiträume von Produkt } k \text{ ohne Fehlmenge}}{\text{Gesamtanzahl der Wiederbeschaffungszeiträume von Produkt } k} \quad (5.143)$$

Der erzielte Beta-Servicegrad β_k je Produkt k wird auf Basis der Fehlmengen $F_{k,t}$ von Produkt k in einer Periode t und der Bedarfsmenge $D_{k,t}$ von Produkt k in Periode t ermittelt.

⁵³Vgl. Herrmann (2011), S. 134f.



Somit gilt:⁵⁴

$$\beta_k = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{T^s} F_{k,i}}{\sum_{i=1}^{T^s} D_{k,i}} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.144)$$

Neben den produktspezifisch erzielten Servicegraden $\alpha_{k,WBZ}$ und β_k werden über alle Produkte K die Mittelwerte α_{WBZ}^μ und β^μ sowie die Streuung α_{WBZ}^σ und β^σ dieser Werte berechnet. Diese werden wie nachfolgend dargestellt ermittelt.

$$\alpha_{WBZ}^\mu = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K \alpha_{k,WBZ} \quad \wedge \quad \alpha_{WBZ}^\sigma = \sqrt{\frac{1}{K-1} \cdot \sum_{k=1}^K (\alpha_{k,WBZ} - \alpha_{WBZ}^\mu)^2} \quad (5.145)$$

$$\beta^\mu = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K \beta_k \quad \wedge \quad \beta^\sigma = \sqrt{\frac{1}{K-1} \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_k - \beta^\mu)^2} \quad (5.146)$$

Hierdurch zeigt sich, ob im Mittel über alle Produkte die zu erzielenden Servicegrade erreicht werden konnten und wie hoch die Streuung der erzielten Servicegrade der jeweiligen Produkte ist. Ein gutes Ergebnis liegt vor, wenn im Mittel der erwünschte Servicegrad erreicht und eine geringe Streuung realisiert werden konnte.

Die Simulationsexperimente werden ebenfalls, wie in Kapitel 5.2.4 beschrieben, in einer rollenden und überlappenden Planungsumgebung durchgeführt. Der Planungshorizont T ist mit acht Perioden und der Planungsabstand r mit vier Perioden definiert. Insgesamt werden im Rahmen des Simulationsexperimentes 1000 Perioden ($T^s = 1000$) simuliert, sodass insgesamt 250 Planungsprobleme gelöst werden müssen. Die Bearbeitungsreihenfolge der Freigabemengen an den Bearbeitungsstationen erfolgt nach dem FIFO-Prinzip.

5.3.4. Vergleichsmodelle

Neben der Untersuchung, ob die soeben beschriebenen Modelle die angestrebten Servicegrade erreichen können, werden auch alternative Modelle untersucht. Hierbei erfolgt, wie in der Arbeit von Ravindran u. a. beschrieben, der Einsatz eines Bestellpunktverfahrens ($(s_k, D_{k,t})$ -Bestandspolitik) mit einem statischen Bestellpunkt s_k und einer dynamischen Bestellmenge $D_{k,t}$.⁵⁵ Somit wird, sobald ein Bestand s_k unterschritten wird, eine Freigabemenge $R_{k,t}$ in Höhe des letzten eingetroffenen Bedarfs $D_{k,t}$ (also $R_{k,t} = D_{k,t}$) in das Produktionssystem freigegeben. Hierdurch kann eine ähnliche Situation wie im Entscheidungsmodell erreicht werden, da in der Regel in jeder Periode eine Freigabemenge $R_{k,t}$ freigegeben wird und diese abhängig vom tatsächlich eingetretenen Bedarf $D_{k,t}$ ist.

⁵⁴Vgl. Herrmann (2011), S. 135 und Tempelmeier (2012), S. 305.

⁵⁵Vgl. Ravindran u. a. (2011), S. 76, Lange u. a. (2013a), S. 745 sowie Lange u. a. (2013b), S. 598.

Zur Berechnung des Bestellpunkts s_k werden die Mittelwerte μ_k^s sowie die Standardabweichung σ_k^s , berechnet aus den tatsächlich eintretenden Bedarfen $D_{k,t}$ mit $1 \leq t \leq T^s$, verwendet. Somit werden entgegen dem Vorgehen im Entscheidungsmodell die Informationen der eintretenden Bedarfe über den gesamten Simulationshorizont T^s als bekannt vorausgesetzt. Es gilt:

$$\mu_k^s = \frac{1}{T^s} \cdot \sum_{i=1}^{T^s} D_{k,i} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.147)$$

$$\sigma_k^s = \sqrt{\frac{1}{T^s - 1} \cdot \sum_{i=1}^{T^s} (D_{k,i} - \mu_k^s)^2} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.148)$$

Somit erfolgt die Berechnung des Bestellpunkts s_k^α bei der Verwendung eines wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrades α_{WBZ} durch:

$$s_k^\alpha = L \cdot \mu_k^s + \sqrt{L} \cdot \sigma_k^s \cdot \Phi_{\mathcal{N}(0,1)}^{-1}(\alpha_{WBZ}) \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.149)$$

Bei der Verwendung eines Beta-Servicegrades β wird der Bestellpunkt s_k^β wie nachfolgend dargestellt ermittelt:

$$s_k^\beta = L \cdot \mu_k^s + \sqrt{L} \cdot \sigma_k^s \cdot \Phi_{\mathcal{N}(0,1)}^1(\beta) \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (5.150)$$

Die zur Berechnung dieser Bestellbestände s_k^α und s_k^β benötigte Lieferzeit bzw. Durchlaufzeit L ist zum Planungszeitpunkt vorzugeben. Diese Bestandspolitiken werden in dieser Arbeit als BS_α^L und BS_β^L bezeichnet. Im Rahmen der Untersuchungen erfolgt die Verwendung einer Lieferzeit L von einer Periode.

5.3.5. Ergebnisse der Experimente

Basierend auf dem in Kapitel 4 beschriebenen Produktionssystem werden die Untersuchung und Bewertung der Entscheidungsmodelle $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ und AFP_β^{CF-DLZ} sowie der Bestandspolitiken BS_α^L und BS_β^L durch Simulationsexperimente durchgeführt. Analog zu den Experimenten aus Kapitel 5.2.6 erfolgte die Durchführung der Untersuchung auf einem Rechner mit einem Intel[®] Core[™] i7-4700MQ mit 2.40GHZ, 8GB Arbeitsspeicher und einem Windows 7 64-Bit Betriebssystem sowie dem IBM[®] ILOG[®] CPLEX[®] Optimization Studio Version 12.6. Die Lösung eines Optimierungsproblems hat im Schnitt fünf Sekunden benötigt. Für die in Kapitel 5.3.3 in Tabelle 5.18 dargestellten vier unterschiedlichen Bedarfsszenarien werden die zu erreichenden Servicegrade von 90%, 95% sowie 97,5% untersucht. Es erfolgt die Betrachtung der in den Simulationsexperimenten erzielten Servicegrade.⁵⁶ Zunächst werden die Ergebnisse des wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrades α_{WBZ} und anschließend die Ergebnisse der Beta-Servicegrade β analysiert.

⁵⁶Zusätzliche Ergebnisse zu den erzielten mittleren Lagerbeständen I_k^μ sind im Anhang in den Kapiteln A.1.3 bis A.1.8 aufgeführt.

Der zu erreichende Servicegrad α_{WBZ} ist mit 90% definiert. Durch die Verwendung des Entscheidungsmodells $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ kann der Servicegrad von 90% in der Regel knapp erreicht werden. Die Bestandspolitik mit Verwendung einer Lieferzeit L von einer Periode ($BS_{\alpha_{WBZ}}^1$) kann ebenfalls knapp die Servicegrade erfüllen. Es zeigt sich jedoch, dass bei einzelnen Produkten und Bedarfsszenarien der Servicegrad deutlich unterschritten wird und somit höhere Abweichungen vorliegen. Die Ergebnisse zu diesen Experimenten sind in Tabelle 5.19 aufgeführt. Insgesamt kann der zu erzielende Servicegrad von 90% durch das Entscheidungsmodell $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ im Mittel annähernd erreicht werden und auch die Streuung der Servicegrade über alle Produkte ist gering. Durch das Modell $BS_{\alpha_{WBZ}}^1$ werden die Servicegrade tendenziell unterschritten und auch die Streuung der Werte über alle Produkte ist zum Teil deutlich höher. Die erzielten mittleren Servicegrade für die Modelle $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ und $BS_{\alpha_{WBZ}}^1$ sowie der zu erzielende Servicegrad sind in der Abbildung 5.15 dargestellt.

| $\alpha_{WBZ} = 90\%$ | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| Modell | $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ | | | | $BS_{\alpha_{WBZ}}^1$ | | | |
| Szenario | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 |
| Part01 | 90,3% | 89,8% | 90,5% | 89,3% | 89,5% | 86,7% | 83,4% | 88,6% |
| Part02 | 90,9% | 88,6% | 90,2% | 89,2% | 88,0% | 89,1% | 88,7% | 88,5% |
| Part03 | 90,2% | 89,9% | 89,1% | 89,6% | 89,7% | 89,1% | 87,8% | 89,6% |
| Part04 | 92,2% | 89,5% | 91,2% | 89,2% | 89,2% | 89,0% | 86,5% | 89,1% |
| Part05 | 88,3% | 90,7% | 89,8% | 89,6% | 87,7% | 89,8% | 89,7% | 87,9% |
| Part06 | 91,3% | 90,1% | 91,8% | 90,8% | 86,4% | 88,6% | 87,0% | 88,1% |
| Part07 | 89,9% | 89,8% | 91,2% | 91,0% | 90,2% | 89,5% | 88,2% | 90,2% |
| Part08 | 91,2% | 91,2% | 90,8% | 89,6% | 86,3% | 89,5% | 88,3% | 88,2% |
| α_{WBZ}^{μ} | 90,5% | 90,0% | 90,6% | 89,8% | 88,3% | 88,9% | 87,4% | 88,7% |
| α_{WBZ}^{σ} | 1,1% | 0,7% | 0,8% | 0,7% | 1,4% | 0,9% | 1,8% | 0,7% |

Tabelle 5.19.: Simulationsergebnisse für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} von 90%.

Auch bei der Verwendung eines Servicegrades α_{WBZ} in Höhe von 95% erzielt das Modell $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ die besten Resultate (vgl. Tabelle 5.20). Für alle Produkte kann der zu erzielende Servicegrad knapp erreicht werden und wird teilweise übertroffen. Durch Verwendung des Modells $BS_{\alpha_{WBZ}}^1$ wird für jedes Produkt k der Servicegrad tendenziell unterschritten. Dies wird insbesondere bei Betrachtung der Mittelwerte (α_{WBZ}^{μ}) und Standardabweichungen (α_{WBZ}^{σ}) der erzielten Servicegrade über alle Produkte deutlich. Im Mittel können durch das Modell $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ die Servicegrade von 95% annähernd realisiert wer-

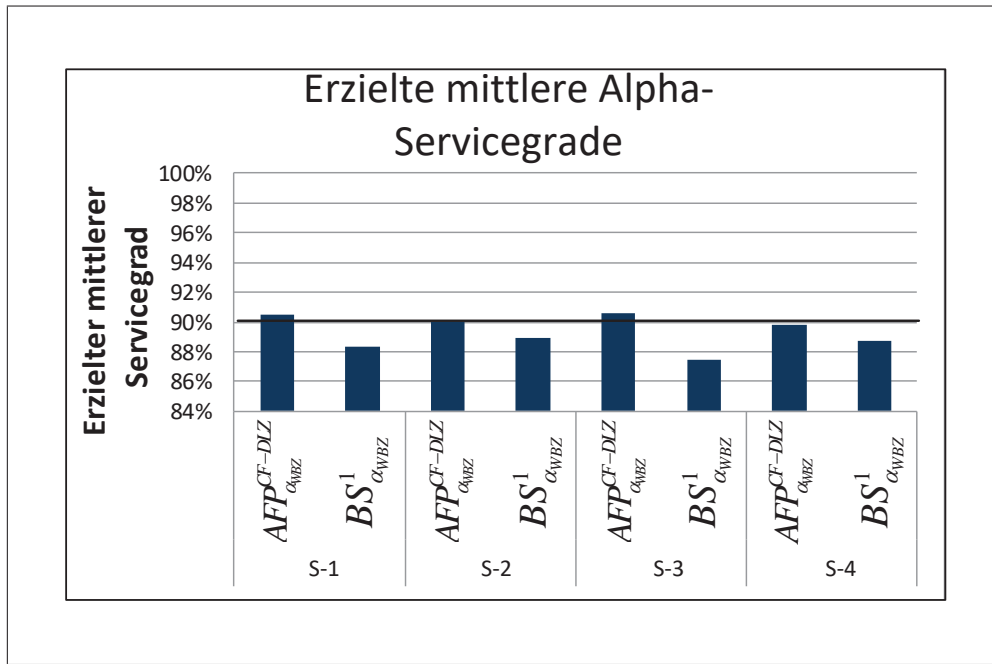


Abbildung 5.15.: Erzielte mittlere Alpha-Servicegrade bei einem definierten Servicegrad von 90%.

den. Durch das Modell $BS^1_{\alpha_{WBZ}}$ werden diese zum Teil deutlich unterschritten (vgl. Abbildung 5.16).

| $\alpha_{WBZ} = 95\%$ | | | | | | | | |
|-----------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| Modell | $AFP^{CF-DLZ}_{\alpha_{WBZ}}$ | | | | $BS^1_{\alpha_{WBZ}}$ | | | |
| Szenario | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 |
| Part01 | 94,7% | 94,4% | 95,6% | 94,8% | 93,1% | 92,5% | 93,3% | 94,1% |
| Part02 | 94,4% | 94,8% | 95,2% | 95,3% | 91,0% | 93,5% | 88,7% | 92,4% |
| Part03 | 95,7% | 95,4% | 94,6% | 95,4% | 94,9% | 93,8% | 92,0% | 94,2% |
| Part04 | 95,9% | 95,0% | 95,1% | 94,7% | 94,1% | 93,7% | 93,1% | 94,6% |
| Part05 | 94,2% | 94,5% | 95,2% | 94,2% | 94,4% | 94,6% | 93,4% | 93,6% |
| Part06 | 95,1% | 93,1% | 96,3% | 94,6% | 93,2% | 93,7% | 93,6% | 93,3% |
| Part07 | 95,2% | 94,5% | 96,7% | 95,7% | 94,9% | 94,3% | 91,0% | 94,5% |
| Part08 | 95,6% | 95,8% | 96,2% | 94,6% | 93,7% | 94,0% | 93,4% | 94,0% |
| α_{WBZ}^H | 95,1% | 94,7% | 95,6% | 94,9% | 93,7% | 93,7% | 92,3% | 93,8% |
| α_{WBZ}^σ | 0,6% | 0,7% | 0,7% | 0,5% | 1,2% | 0,6% | 1,6% | 0,7% |

Tabelle 5.20.: Simulationsergebnisse für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} von 95%.

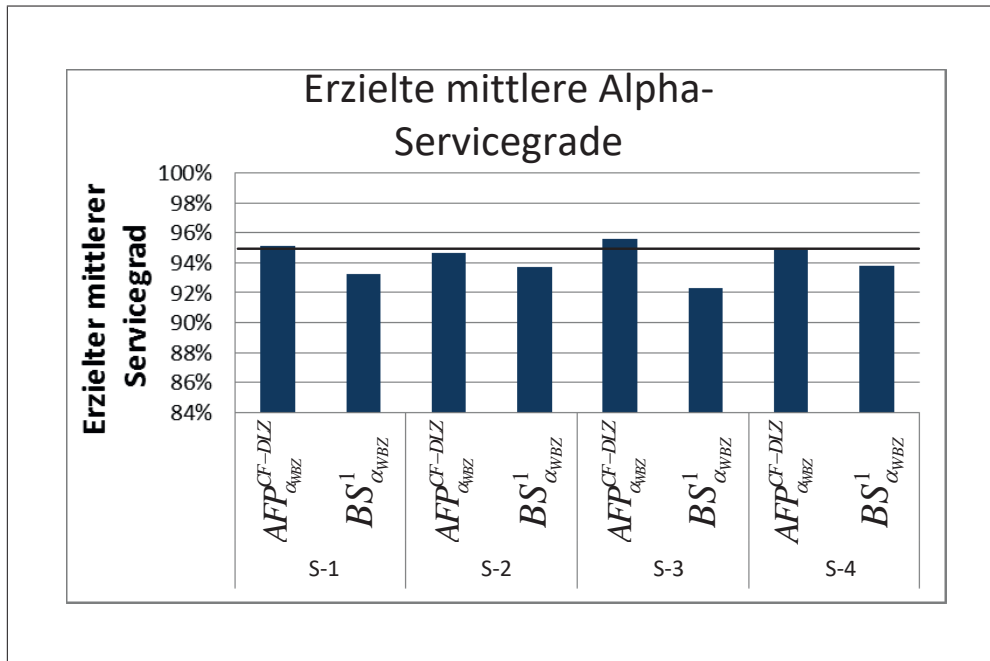


Abbildung 5.16.: Erzielte mittlere Alpha-Servicegrade bei einem definierten Servicegrad von 95%.

Auch bei einer Erhöhung des zu erreichenden Servicegrades α_{WBZ} auf 97,5% zeigt sich, dass das Modell $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ gute Ergebnisse erzielt. Die Ergebnisse dieser Experimente sind in den Tabellen 5.21 aufgeführt.



| $\alpha_{WBZ} = 97,5\%$ | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| Modell | $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ | | | | $BS_{\alpha_{WBZ}}^1$ | | | |
| Szenario | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 |
| Part01 | 97,0% | 96,5% | 97,6% | 97,2% | 97,6% | 96,1% | 96,7% | 96,0% |
| Part02 | 96,1% | 96,9% | 97,4% | 97,2% | 96,0% | 95,8% | 93,9% | 95,6% |
| Part03 | 97,6% | 97,5% | 96,3% | 98,1% | 96,4% | 97,1% | 95,8% | 96,8% |
| Part04 | 97,2% | 97,6% | 97,2% | 97,5% | 96,9% | 96,5% | 96,4% | 97,1% |
| Part05 | 97,3% | 97,1% | 97,7% | 96,8% | 96,2% | 96,3% | 96,9% | 96,3% |
| Part06 | 97,4% | 95,8% | 97,9% | 96,8% | 93,4% | 95,3% | 96,0% | 96,6% |
| Part07 | 97,6% | 96,5% | 98,3% | 97,6% | 97,1% | 97,0% | 97,4% | 96,3% |
| Part08 | 97,8% | 97,8% | 98,4% | 97,7% | 95,0% | 96,9% | 96,3% | 96,9% |
| α_{WBZ}^{μ} | 97,2% | 96,9% | 97,3% | 97,3% | 96,1% | 96,4% | 96,2% | 96,4% |
| α_{WBZ}^{σ} | 0,5% | 0,6% | 0,6% | 0,4% | 1,3% | 0,6% | 1,0% | 0,5% |

Tabelle 5.21.: Simulationsergebnisse für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} von 97,5%.

Die im Mittel erzielten Servicegrade sind in Abbildung 5.17 dargestellt.

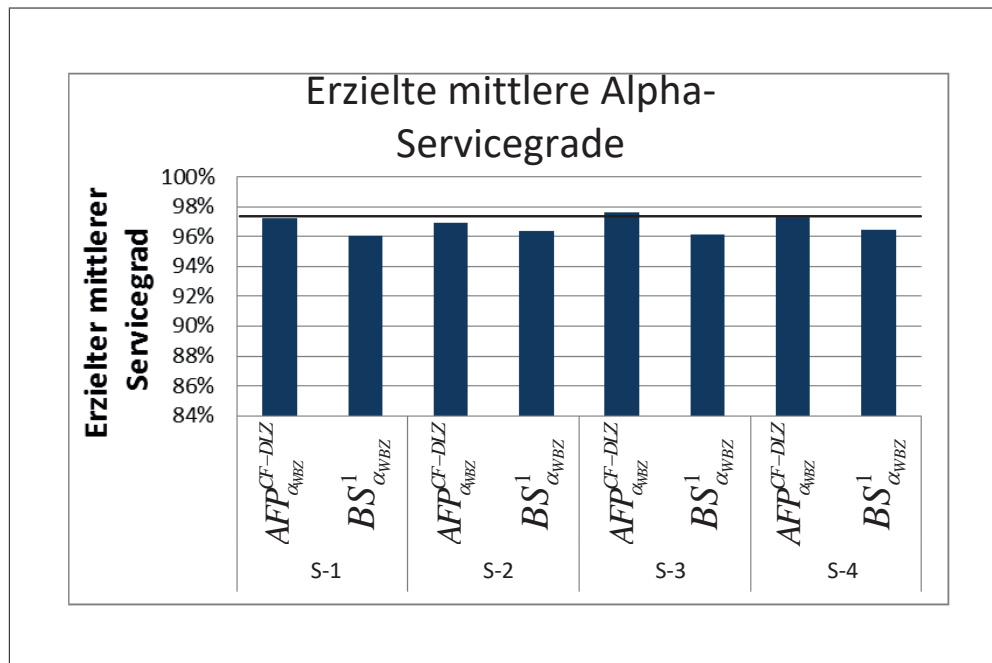


Abbildung 5.17.: Erzielte mittlere Alpha-Servicegrade bei einem definierten Servicegrad von 97,5%.

Es folgt die Betrachtung der Beta-Servicegrade β von 90%, 95% sowie 97,5%. In Tabelle 5.22 sind die Ergebnisse für einen Beta-Servicegrad von 90% aufgeführt. Das Modell AFP_{β}^{CF-DLZ} kann für alle Produkte und Bedarfsszenarien den definierten Beta-Servicegrad nahezu erreichen und übertrifft diesen teilweise. Bei dem Modell BS_{β}^1 zeigt sich, dass der erzielte Beta-Servicegrad unter dem definierten Beta-Servicegrad liegt. Bei einzelnen Produkten wurde der definierte Beta-Servicegrad zum Teil erheblich unterschritten. So erzielte zum Beispiel das Produkt Part07 für das Bedarfsszenario S-3 lediglich einen Servicegrad von knapp 85%.

Diese zum Teil erheblichen Abweichungen der Ergebnisse bei Verwendung des Modells BS_{β}^1 zeigen eine deutlich höhere Streuung β^{σ} der erzielten Beta-Servicegrade über alle Produkte. Der im Mittel über alle Produkte erzielte Servicegrad β^{μ} liegt, zum Teil deutlich, unterhalb des definierten Beta-Servicegrades (vgl. Abbildung 5.18). Durch das Modell AFP_{β}^{CF-DLZ} kann im Mittel der definierte Beta-Servicegrad nahezu erreicht werden und auch die Streuungen sind sehr gering.

Es folgt die Betrachtung des Beta-Servicegrades β von 95%. Auch hier kann das Modell AFP_{β}^{CF-DLZ} in der Regel den Servicegrad gut erzielen. Das Modell BS_{β}^1 führt dazu, dass der Servicegrad zum Teil deutlich unterschritten wird (vgl. Tabelle 5.23).

Der im Mittel über alle Produkte erzielte Servicegrad ist in Abbildung 5.19 aufgeführt.



| $\beta = 90\%$ | | | | | | | | |
|------------------|------------------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| Modell | AFP_{β}^{CF-DLZ} | | | | BS_{β}^1 | | | |
| Szenario | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 |
| Part01 | 90,6% | 90,6% | 90,6% | 89,8% | 89,3% | 88,6% | 88,8% | 89,1% |
| Part02 | 90,1% | 89,7% | 90,6% | 90,1% | 87,1% | 89,2% | 86,5% | 88,7% |
| Part03 | 90,5% | 90,1% | 90,4% | 90,0% | 85,7% | 89,0% | 89,2% | 89,0% |
| Part04 | 90,9% | 90,0% | 90,5% | 89,5% | 90,4% | 88,7% | 87,8% | 89,4% |
| Part05 | 90,1% | 90,6% | 90,1% | 90,4% | 88,2% | 89,4% | 86,1% | 88,6% |
| Part06 | 90,8% | 89,9% | 90,6% | 89,9% | 87,9% | 89,1% | 86,2% | 88,2% |
| Part07 | 91,0% | 89,7% | 90,9% | 90,4% | 89,9% | 89,3% | 84,7% | 89,2% |
| Part08 | 90,7% | 90,4% | 90,5% | 89,9% | 89,8% | 89,7% | 86,5% | 89,3% |
| β^{μ} | 90,6% | 90,1% | 90,5% | 90,0% | 88,5% | 89,1% | 87,0% | 88,9% |
| β^{σ} | 0,3% | 0,3% | 0,2% | 0,3% | 1,5% | 0,3% | 1,4% | 0,4% |

Tabelle 5.22.: Simulationsergebnisse für einen Beta-Servicegrad β von 90%.

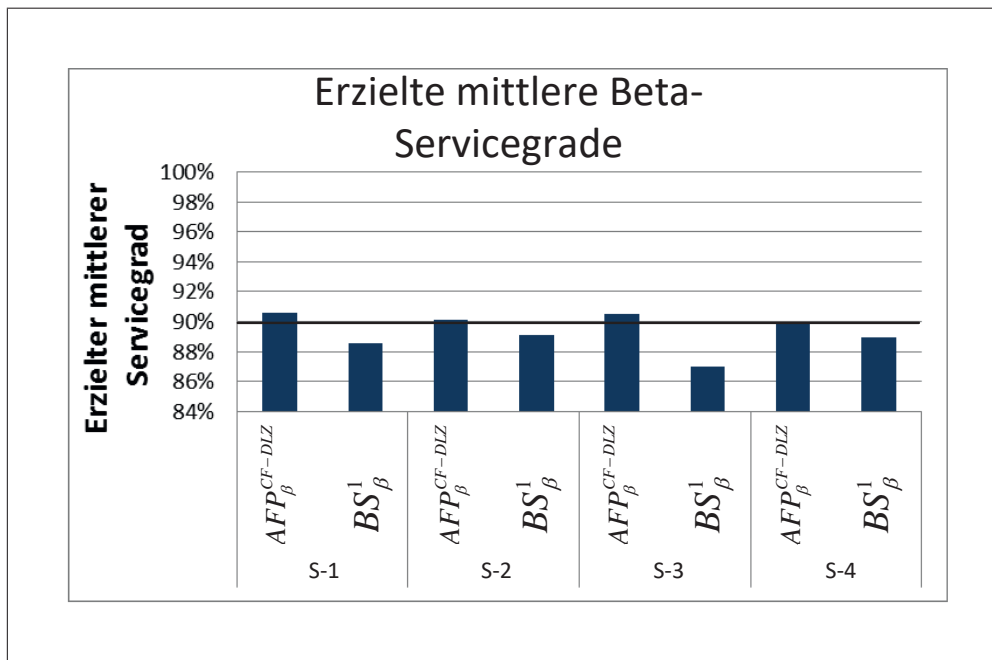


Abbildung 5.18.: Erzielte mittlere Beta-Servicegrade bei einem definierten Servicegrad von 90%.



| $\beta = 95\%$ | | | | | | | | |
|------------------|------------------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| Modell | AFP_{β}^{CF-DLZ} | | | | BS_{β}^1 | | | |
| Szenario | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 |
| Part01 | 95,1% | 94,4% | 95,1% | 94,3% | 93,3% | 93,8% | 91,9% | 94,4% |
| Part02 | 95,0% | 94,5% | 95,2% | 95,0% | 92,6% | 94,0% | 93,5% | 93,9% |
| Part03 | 95,1% | 95,1% | 94,9% | 95,1% | 94,4% | 94,1% | 94,2% | 94,2% |
| Part04 | 95,5% | 94,9% | 95,0% | 94,8% | 94,9% | 94,6% | 92,4% | 94,4% |
| Part05 | 94,9% | 95,3% | 95,0% | 94,5% | 93,6% | 93,9% | 91,9% | 94,0% |
| Part06 | 95,2% | 94,5% | 95,5% | 94,9% | 94,2% | 93,6% | 93,5% | 93,7% |
| Part07 | 95,4% | 94,7% | 95,6% | 95,3% | 94,3% | 94,4% | 92,9% | 94,3% |
| Part08 | 95,3% | 95,3% | 95,4% | 95,0% | 94,7% | 94,5% | 91,4% | 94,2% |
| β^{μ} | 95,2% | 94,8% | 95,2% | 94,8% | 94,0% | 94,1% | 92,7% | 94,1% |
| β^{σ} | 0,2% | 0,3% | 0,2% | 0,3% | 0,7% | 0,3% | 0,9% | 0,2% |

Tabelle 5.23.: Simulationsergebnisse für einen Beta-Servicegrad β von 95%.

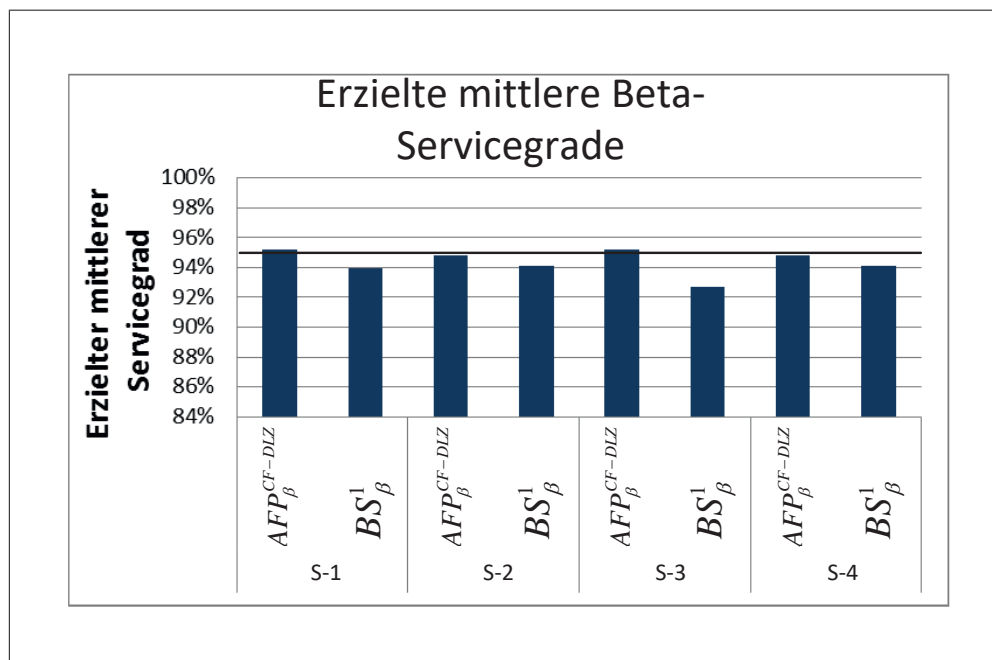


Abbildung 5.19.: Erzielte mittlere Beta-Servicegrade bei einem definierten Servicegrad von 95%.

In Tabelle 5.24 sind die Ergebnisse für einen Beta-Servicegrad β von 97,5% aufgeführt. Analog zu den anderen untersuchten Werten des Beta-Servicegrades zeigt sich, dass durch Verwendung des Modells AFP_{β}^{CF-DLZ} der zu erzielende Beta-Servicegrad nahezu exakt erreicht werden kann.

| $\beta = 97,5\%$ | | | | | | | | |
|------------------|------------------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| Modell | AFP_{β}^{CF-DLZ} | | | | BS_{β}^1 | | | |
| Szenario | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 |
| Part01 | 97,5% | 96,9% | 97,5% | 97,4% | 97,5% | 96,1% | 96,3% | 96,9% |
| Part02 | 97,4% | 96,6% | 97,5% | 97,6% | 96,7% | 96,4% | 96,7% | 96,3% |
| Part03 | 97,5% | 97,6% | 97,1% | 97,5% | 95,8% | 97,0% | 96,8% | 96,9% |
| Part04 | 97,6% | 97,2% | 97,4% | 97,5% | 96,6% | 97,0% | 96,1% | 96,9% |
| Part05 | 97,0% | 97,2% | 97,3% | 97,3% | 96,2% | 96,6% | 95,9% | 96,7% |
| Part06 | 97,5% | 96,8% | 97,7% | 97,5% | 94,6% | 96,1% | 96,8% | 96,4% |
| Part07 | 97,5% | 97,4% | 97,9% | 97,6% | 96,9% | 97,0% | 95,5% | 96,7% |
| Part08 | 97,6% | 97,8% | 97,8% | 97,4% | 96,2% | 96,9% | 96,6% | 96,9% |
| β^{μ} | 97,4% | 97,2% | 97,5% | 97,5% | 96,3% | 96,6% | 96,4% | 96,7% |
| β^{σ} | 0,2% | 0,4% | 0,2% | 0,1% | 0,8% | 0,4% | 0,4% | 0,2% |

Tabelle 5.24.: Simulationsergebnisse für einen Beta-Servicegrad β von 97,5%.

Durch die Verwendung des Modells BS_{β}^1 zeigt sich, dass ein zu geringer Beta-Servicegrad erzielt wird (vgl. Abbildung 5.20).

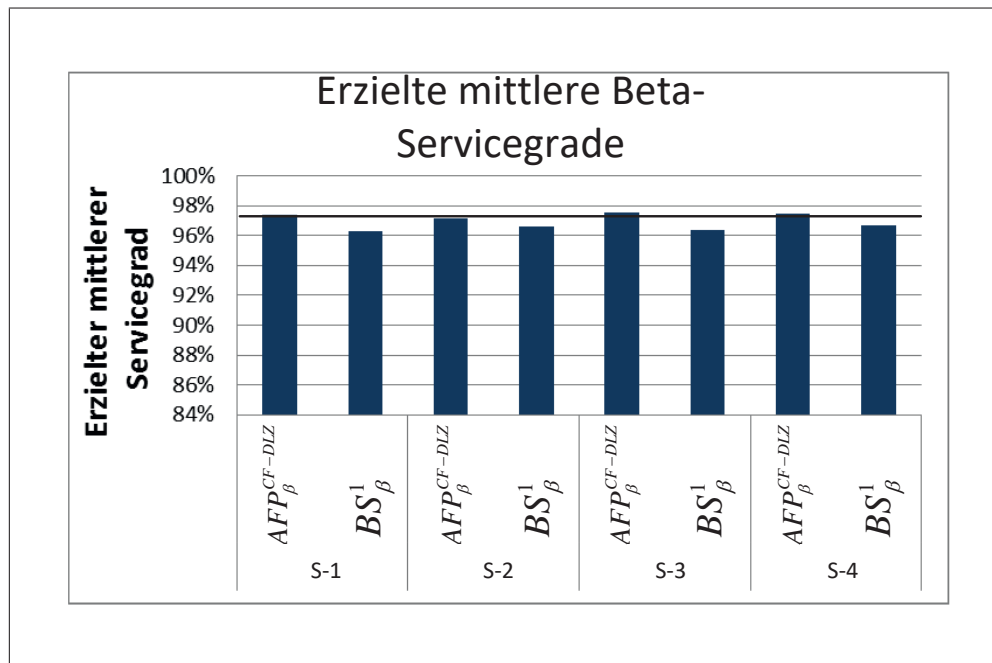


Abbildung 5.20.: Erzielte mittlere Beta-Servicegrade bei einem definierten Servicegrad von 97,5%.

5.3.6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Modelle $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ sowie AFP_{β}^{CF-DLZ} erzielen für alle betrachteten Bedarfsszenarien sowie Servicegrade die besten Resultate. Diese Modelle können direkt auf die Schwankungen der Bedarfsmittelwerte reagieren und die Bestände entsprechend anpassen, sodass kurzfristig die Bestände erhöht oder reduziert werden können. Insbesondere bei einer Erhöhung der Bestände ist eine gute Abschätzung der auftretenden Durchlaufzeiten notwendig, sodass diese Erhöhung zum definierten Zeitpunkt realisiert werden kann. Diese Abschätzung der Durchlaufzeiten erfolgt über die produktspezifischen Clearing Funktionen. Das von Ravindran u. a. vorgestellte Modell nutzt, neben den durch die Clearing Funktion bestimmten Durchlaufzeiten, einen externen Parameter der Lieferzeit zur Festlegung der Bestellbestände $s_{k,t}$. Diese Werte sollten im Idealfall identisch sein⁵⁷, was durch das Entscheidungsmodell so aber nicht sichergestellt werden kann. In den Modellen $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$ sowie AFP_{β}^{CF-DLZ} werden die auftretenden Durchlaufzeiten $L_{k,t}$ unter Verwendung der Clearing Funktion explizit bestimmt und im Rahmen der Berechnung der Bestellbestände $s_{k,t}$ verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Abschätzung der Durchlaufzeiten durch die produktspezifischen Clearing Funktionen hinreichend genau ist, sodass die definierten Servicegrade für alle Produkte und für alle Bedarfsszenarien nahezu realisiert werden können.

Durch Verwendung einer statischen Bestellpolitik ($BS_{\alpha_{WBZ}}^1$ und BS_{β}^1) werden die definierten Servicegrade unterschritten. Diese Modelle können nicht kurzfristig auf die Änderungen der Bedarfsmittelwerte reagieren, sodass in Perioden mit geringen Bedarfen der Ser-

⁵⁷Vgl. Ravindran u. a. (2011), S. 70.



vicegrad überschätzt und in Perioden mit höheren Bedarfen der Servicegrad unterschätzt wird. Im Mittel gleicht sich dies nicht aus, sodass insgesamt der Servicegrad unterschritten wird. Die verwendeten Durchlaufzeiten L_k sind belastungsunabhängig und als externer Parameter gegeben. Hierdurch kann es vorkommen, dass insbesondere bei großen Freigabemengen die tatsächlich auftretenden Durchlaufzeiten unterschätzt werden und somit die erzielten Servicegrade der einzelnen Produkte zum Teil sehr stark schwanken. Wird der Parameter der Durchlaufzeit L_k auf zwei Perioden erhöht, so wird ein deutlich zu hoher Servicegrad erzielt, sodass die Verwendung eines solchen Wertes nicht zielführend ist.

Die durchgeführten Experimente zeigen, dass die Integration der produktspezifischen Clearing Funktionen in einem Modell der Auftragsfreigabe mit Berücksichtigung von Bedarfsunsicherheiten vielversprechende Ergebnisse erzielt. Durch die produktspezifischen Clearing Funktionen können die im Produktionssystem auftretenden belastungsabhängigen Durchlaufzeiten gut abgebildet bzw. approximiert werden, sodass die definierten Servicegrade in der Regel nahezu erreicht wurden.



6. Einstufige Losgrößenplanung unter Verwendung der Clearing Funktion

Basierend auf dem Konzept der hierarchischen Produktionsplanung erfolgt im Anschluss der Losgrößenplanung die Einplanung und Freigabe der Produktionslose in das Produktionssystem.¹ Eine solche sequentielle Betrachtung der Planungsprobleme kann dazu führen, dass ein optimales Ergebnis der Losgrößenplanung in den nachgelagerten, detaillierteren Planungsstufen (wie z. B. der Auftragsfreigabe sowie der Fertigungssteuerung) zu schlechten Ergebnissen sowie unzulässigen Produktionsplänen führt.

In diesem Kapitel wird das Modell CLSP um Informationen der Clearing Funktion erweitert, um die Planungsergebnisse und insbesondere die Ergebnisse bei Umsetzung der Produktionspläne zu verbessern. Hierzu wird zunächst das Modell CLSP dahingehend modifiziert, dass es für den Einsatz in einer rollierenden Planungsumgebung sowie im vorliegenden Produktionssystem eingesetzt werden kann. Anschließend werden Möglichkeiten zur Nutzung der Clearing Funktion aufgezeigt und beschrieben. Durch Simulationsexperimente werden die Leistungsfähigkeit der Ansätze und die Modelle untersucht und verglichen.

6.1. Entscheidungsmodelle zur einstufigen Losgrößenplanung

6.1.1. Entscheidungsmodell $CLSP_{F,\Delta}$

Das klassische CLSP wurde bereits in Kapitel 2.3.2 detailliert beschrieben und bildet die Basis der Untersuchungen. Analog zu den Entscheidungsmodellen zur Auftragsfreigabe² werden die Modelle der Losgrößenplanung um die Berücksichtigung von Fehlmengen $F_{k,t}$ sowie produktspezifischen Kosten für auftretende Fehlmengen f_k erweitert, um diese in einer rollierenden Planungsumgebung einsetzen zu können. Somit ist die Zielfunktion wie nachfolgend dargestellt, um diese Fehlmengenkosten zu vervollständigen.

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (s_k \cdot \gamma_{k,t} + h_k \cdot I_{k,t} + f_k \cdot F_{k,t}) \quad (6.1)$$

¹Vgl. hierzu Abschnitt 2.

²Siehe Kapitel 2.2.2 sowie 5.2.3.



Entsprechend ist die Lagerbilanzgleichung ebenfalls um die Fehlmengen $F_{k,t}$ zu erweitern. Somit gilt:

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} - F_{k,t-1} + q_{k,t} - D_{k,t} + F_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.2)$$

Die in dieser Arbeit erstellten produktspezifischen Clearing Funktionen beschreiben, wie in Kapitel 3.3 detailliert aufgezeigt, die nicht linearen Abhängigkeiten des WIP-Bestands und der Ausbringungsmenge des gesamten Produktionssystems. Somit erfolgt eine über alle Bearbeitungsstationen aggregierte Aussage über die Kapazitäten bzw. Durchlaufzeiten des Produktionssystems. Das CLSP wird so modifiziert, dass eine aggregierte Berücksichtigung der Kapazitäten resultiert und analog der Clearing Funktion die Kapazität des gesamten Produktionssystems betrachtet wird. Hierfür werden die Gesamtkapazität des Produktionssystems sowie die Summe aller Stückbearbeitungs- und Rüstzeiten kumuliert. Somit gilt:

$$tb_k = \sum_{j=1}^J tb_{k,j} \quad \wedge \quad tr_k = \sum_{j=1}^J tr_{k,j} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (6.3)$$

$$C_t = \sum_{j=1}^J C_{j,t} \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (6.4)$$

Grundsätzlich kann es vorkommen, dass bei der Betrachtung von mehreren Bearbeitungsstationen ein Los die geforderten Kapazitätsrestriktionen zwar einhält, allerdings die Bearbeitungszeit in Summe die Größe der Planungsperiode übersteigt.³ In solchen Konstellationen wäre der Einsatz eines mehrstufigen Ansatzes notwendig, in welchem über Vorlaufzeiten eine Entkoppelung erreicht werden kann.⁴ Wie in den Kapiteln 2.1 sowie 2.3 ausgeführt, würde ein mehrstufiger Ansatz, wie dieser zum Beispiel im Modell MLCLSP oder MLPLSP beschrieben ist, die Komplexität des Entscheidungsmodells exponentiell erhöhen, sodass ein Einsatz in der industriellen Praxis nicht möglich ist. Des Weiteren wird ein aggregiertes CLSP verwendet, um zu untersuchen, ob die Verwendung der produktspezifischen Clearing Funktion, welche ebenfalls eine aggregierte Kapazitätsbetrachtung bietet, die Planungsergebnisse entscheidend verbessern kann.

Um zu verhindern, dass Produktionslose geplant werden, die die Periodengröße überschreiten, wird eine zusätzliche Restriktion in das Modell integriert. Durch diese Restriktion wird die maximale Größe eines Produktionsloses wie folgt beschränkt.

³Beispielsweise muss ein Produkt sequentiell an zwei Bearbeitungsstationen bearbeitet werden. Beide Bearbeitungsstationen stehen uneingeschränkt innerhalb der Periode zur Verfügung. Somit entspricht die verfügbare (zeitliche) Kapazität je Bearbeitungsstation der Periodengröße. Aufgrund der losgelösten Kapazitätsbetrachtung ohne Berücksichtigung des Bearbeitungsprozesses kann nun ein Produktionsplan bzw. ein Produktionslos entstehen, welches die Kapazität beider Bearbeitungsstationen vollkommen ausschöpft. Da das Produktionslos aber an beiden Bearbeitungsstationen sequentiell bearbeitet werden muss, übersteigt die Gesamtbearbeitungszeit die Periodengröße.

⁴Vgl. hierzu Herrmann (2009), S. 335f.

$$q_{k,t} \leq q_k^{max} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.5)$$

Hierdurch wird sichergestellt, dass ein geplantes Produktionslos $q_{k,t}$ eine maximal zulässige Losgröße q_k^{max} nicht überschreitet. Diese maximale produktspezifische Losgröße q_k^{max} wird aus dem Quotienten der vorgegebenen Länge einer Planungsperiode Δ^t , welche um die produktionsspezifischen Rüstzeiten tr_k reduziert wird, und der produktspezifischen Stückbearbeitungszeit tb_k gebildet. Somit gilt:

$$q_k^{max} = \frac{\Delta^t - tr_k}{tb_k} \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (6.6)$$

Im Sinne einer rollierenden und überlappenden Planung werden über ein Entscheidungsmodell Produktionspläne ermittelt, die im Rahmen eines Simulationsmodells umgesetzt werden. Hierbei kann es zu Situationen kommen, wo zu Beginn eines Planungslaufs nicht alle Produktionslose eines vorherigen Planungslaufes vollständig abgeschlossen sind. Dieser Umstand wird dadurch hervorgerufen, dass im Rahmen des CLSP die Einflüsse der nachfolgenden Planungsstufen sowie der tatsächlichen Umsetzung der Produktionspläne nicht ausreichend berücksichtigt werden. Somit muss zu Beginn eines Planungslaufes die im Produktionssystem vorliegende Situation hinsichtlich der noch in Bearbeitung befindlichen Produktionslose für den aktuellen Planungslauf mit einbezogen werden.

Die benötigte Kapazität zur vollständigen Bearbeitung der noch im Produktionssystem befindlichen Produktionslose wird über die Summe aller Restbearbeitungszeiten $RBZ_{q_n^k}$ über alle n ($1 \leq n \leq N$) Produktionslose q_n^k berechnet. Somit wird die in einer Periode t noch benötigte zusätzliche Kapazität ε_t ermittelt durch:

$$\text{Initialisiere } t = 1 \wedge RBZ = \sum_{i=1}^n RBZ_{q_i^k}$$

if $RBZ \leq C_t$

$$\varepsilon_t = RBZ$$

else:

while $RBZ > 0 \wedge t < T$

$$\varepsilon_t = \text{Min}(C_t, RBZ)$$

$$RBZ = RBZ - \varepsilon_t$$

$$t = t + 1$$

$$\varepsilon_T = RBZ$$

Analog ist anhand dieser zusätzlichen Kapazitätsbedarfe ε_t zu ermitteln, wann ein noch im Produktionssystem befindliches Produktionslos q_n^k vollständig bearbeitet wird und somit zu einem zusätzlichen Lagerzugang $q_{k,t}^+$ führt.⁵ Hierfür erfolgt ein Abgleich, welche Produktionslose q_n^k einer zusätzlichen Kapazität ε_t zugeordnet werden können. Es gilt:

⁵Da die exakte Reihenfolge der tatsächlichen Bearbeitung nicht ohne Weiteres bestimmt werden kann, erfolgt eine Approximation dahingehend, dass die Produktionslose q_n^k in der Reihenfolge der ursprünglich geplanten Periode sortiert betrachtet werden.



```

Initialisiere  $t = 1 \wedge n = 1$ 
while  $t < T$ 
   $\varepsilon_t^* = \varepsilon_t$ 
  while  $\varepsilon_t^* > RBZ_{q_n^k} \wedge n \leq N$ 
     $q_{k,t}^+ = q_{k,t}^+ + q_n^k$ 
     $\varepsilon_t^* = \varepsilon_t^* - RBZ_{q_n^k}$ 
     $n = n + 1$ 
   $RBZ_{q_n^k} = RBZ_{q_n^k} - \varepsilon_t^*$ 
   $t = t + 1$ 

```

Die zusätzliche Kapazität ε_t wird in der Kapazitätsrestriktion berücksichtigt, sodass gilt:

$$\sum_{k=1}^K (tb_k \cdot q_{k,t} + tr_k \cdot \gamma_{k,t}) + \varepsilon_t \leq C_t \quad \forall 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq k \leq K \quad (6.7)$$

Zudem sind in der Lagerbilanzgleichung die zusätzlichen Lagerzugänge $q_{k,t}^+$ ebenfalls zu berücksichtigen:

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} - F_{k,t-1} + q_{k,t} + q_{k,t}^+ - D_{k,t} + F_{k,t} \quad \forall 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq k \leq K \quad (6.8)$$

Diese beschriebenen Erweiterungen des CLSP führen zu dem in dieser Forschungsarbeit als $CLSP_{F,\Delta}$ bezeichneten Entscheidungsmodell, welches nachfolgend aufgeführt ist.

CLSP_{F,Δ}

Parameter:

- Δ^t : Länge einer Planungsperiode t ($1 \leq t \leq T$)
- ε_t : Zusätzlicher Kapazitätsbedarf in Periode t zur Fertigstellung offener Lose aus vorherigen Planungsläufen ($1 \leq t \leq T$)
- f_k : Kosten für eine Einheit an Fehlmengen von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
- C_t : Verfügbare Kapazität der Ressource je Periode t ($1 \leq t \leq T$)
- $D_{k,t}$: Bedarf von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
- h_k : Lagerkostensatz einer Einheit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
- M : Große Zahl
- $q_{k,t}^+$: Lagerzugang von Produkt k in Periode t von noch offenen Losen aus vorherigen Planungsläufen ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
- q_k^{max} : Maximal erlaubte Losgröße von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
- s_k : Rüstkostensatz je Produkt k ($1 \leq k \leq K$)



tb_k : Stückbearbeitungszeit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)

tr_k : Rüstzeit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)

Variablen:

$\gamma_{k,t}$: Binäre Rüstvariable von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)

$F_{k,t}$: Fehlmenge von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);

initiale Fehlmengen zum Planungsbeginn: $F_{k,0}$

$I_{k,t}$: Lagerbestand von Produkt k am Ende von Periode t

($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);

initialer Lagerbestand: $I_{k,0}$

$q_{k,t}$: Los von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (I_{k,t} \cdot h_k + \gamma_{k,t} \cdot s_k + F_{k,t} \cdot f_k) \quad (6.9)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} - F_{k,t-1} + q_{k,t} + q_{k,t}^+ - D_{k,t} + F_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.10)$$

$$\sum_{k=1}^K (tb_k \cdot q_{k,t} + tr_k \cdot \gamma_{k,t}) + \varepsilon_t \leq C_t \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (6.11)$$

$$q_{k,t} - M \cdot \gamma_{k,t} \leq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.12)$$

$$q_{k,t} \leq q_k^{\max} \text{ mit } q_k^{\max} = \frac{\Delta^t - tr_k}{tb_k} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.13)$$

$$F_{k,t}, I_{k,t}, q_{k,t} \geq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.14)$$

$$\gamma_{k,t} \in \{0, 1\} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.15)$$

Dieses Modell $CLSP_{F,\Delta}$ bildet die Grundlage der nachfolgend beschriebenen Erweiterungen hinsichtlich der Verwendung der Clearing Funktion.



6.1.2. Entscheidungsmodell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$

Basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ erfolgt die Integration der Clearing Funktionen zur Berücksichtigung der nicht linearen Abhängigkeiten. Ausgehend von der zugrundeliegenden Annahme der Losgrößenplanung, dass ein für eine Periode t ermitteltes Produktionslos $q_{k,t}$ innerhalb der Periode t vollständig gefertigt wird, ist der WIP-Bestand $\widehat{W}_{k,t}$ zu Beginn einer Periode t durch das Produktionslos $q_{k,t}$ bestimmt. Da auch im Rahmen der Losgrößenplanung⁶ in einer Periode t maximal ein Produktionslos $q_{k,t}$ existiert, kann der produktspezifische WIP-Bestand $\widehat{W}_{k,t}$ grundsätzlich wie folgt abgeleitet werden:

$$W_{k,t} = q_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.16)$$

Abhängig vom WIP-Bestand $\widehat{W}_{k,t}$ kann über die Clearing Funktion eine Ausbringungsmenge $X_{k,t}$ bestimmt werden. Somit gilt:

$$X_{k,t} = CF_k(\widehat{W}_{k,t}) \text{ und somit } X_{k,t} = CF_k(q_{k,t}) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.17)$$

Liegt eine geringe Arbeitslast im Produktionssystem vor, so besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem WIP-Bestand $\widehat{W}_{k,t}$ und der Ausbringungsmenge $X_{k,t}$.⁷ Steigt die Last im Produktionssystem an, so ist es nicht mehr möglich, den gesamten WIP-Bestand $\widehat{W}_{k,t}$ und somit das Produktionslos $q_{k,t}$ vollständig innerhalb dieser Periode t zu bearbeiten. Es kann eine Differenz $\delta_{k,t}$ abgeleitet werden durch:

$$\delta_{k,t} = q_{k,t} - CF_k(q_{k,t}) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.18)$$

Somit beschreibt die Differenz $\delta_{k,t}$ die Mengen, welche vom Produktionslos $q_{k,t}$ nicht vollständig bearbeitet werden konnten, da nicht ausreichend Kapazität zur Verfügung stand. Diese Differenzmenge $\delta_{k,t}$ wird in der Kapazitätsrestriktion berücksichtigt, um die verfügbare Kapazität C_t in Abhängigkeit der Arbeitslast im Produktionssystem und somit in Abhängigkeit der Clearing Funktion zu verringern.⁸ Für die Kapazitätsrestriktion gilt somit:

$$\sum_{k=1}^K (tb_k \cdot q_{k,t} + tr_k \cdot \gamma_{k,t}) + \varepsilon_t \leq C_t - \sum_{k=1}^K (\delta_{k,t} \cdot tb_k) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.19)$$

⁶Diese Annahme gilt für die in dieser Untersuchung verwendeten *big-bucket-Modelle*.

⁷Die Clearing Funktion steigt, wie in Kapitel 4.3 beschrieben und aufgezeigt, zunächst linear an. Erst bei weiter steigendem WIP-Bestand $\widehat{W}_{k,t}$ zeigen sich die nicht linearen Abhängigkeiten und die Clearing Funktion hat den charakteristischen konkaven Verlauf.

⁸Diese Differenzmenge $\delta_{k,t}$ muss mit den produktspezifischen Stückbearbeitungszeiten tb_k multipliziert werden, um analog zu der verfügbaren Kapazität C_t einen Wert in Zeiteinheiten zu erhalten.

Analog wird diese Differenz $\delta_{k,t}$ auch bei der Berechnung der maximal erlaubten Losgröße $q_{k,t}^{max}$ verwendet, sodass gilt:

$$q_{k,t}^{max} = \frac{\Delta^t - tr_k - \delta_{k,t} \cdot tb_k}{tb_k} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.20)$$

Die Werte der gemessenen Clearing Funktionen sollen direkt im Entscheidungsmodell verwendet werden.⁹ Um weiterhin ein lineares Entscheidungsmodell zu gewährleisten, erfolgt die Integration analog dem in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Vorgehen.¹⁰

Hieraus ergibt sich das nachfolgend dargestellte Entscheidungsmodell, welches im Rahmen dieser Forschungsarbeit als $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ bezeichnet wird.

CLSP_{F,Δ}^{CF-I}

Parameter:

- $CF_{k,n}$: Vektor zur Clearing Funktion für Produkt k und Wert n
($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq n \leq N$)
- Δ^t : Länge einer Planungsperiode t ($1 \leq t \leq T$)
- ε_t : Zusätzlicher Kapazitätsbedarf in Periode t zur Fertigstellung offener Lose aus vorherigen Planungsläufen ($1 \leq t \leq T$)
- f_k : Kosten für eine Einheit an Fehlmengen von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
- C_t : Verfügbare Kapazität der Ressource je Periode t ($1 \leq t \leq T$)
- $D_{k,t}$: Bedarf von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
- h_k : Lagerkostensatz einer Einheit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
- M : Große Zahl
- $q_{k,t}^+$: Lagerzugang von Produkt k in Periode t von noch offenen Losen aus vorherigen Planungsläufen ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
- $q_{k,t}^{max}$: Maximal erlaubte Losgröße von Produkt k in Periode t
($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
- s_k : Rüstkostensatz je Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
- tb_k : Stückbearbeitungszeit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)
- tr_k : Rüstzeit von Produkt k ($1 \leq k \leq K$)

Variablen:

- $\delta_{k,t}$: Mengeneinheiten von Produkt k in Periode t , die nicht vollständig bearbeitet werden können ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
- $\gamma_{k,t}$: Binäre Rüstvariable von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
- $F_{k,t}$: Fehlmenge von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);

⁹Analog zum Entscheidungsmodell AFP^{CF-DLZ} in Kapitel 5.2.3.

¹⁰Die Clearing Funktion wird als Vektor $CF_{k,n}$ beschrieben, sodass durch einen binären Vektor $VI_{k,t,n}$ eine lineare Transformation erfolgen kann. Dies ist im Detail in Kapitel 5.2.1 beschrieben.



- initiale Fehlmengen zum Planungsbeginn: $F_{k,0}$
- $q_{k,t}$: Los von Produkt k in Periode t ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)
- $I_{k,t}$: Lagerbestand von Produkt k am Ende von Periode t
($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$);
initialer Lagerbestand: $I_{k,0}$
- $VI_{k,t,n}$: Binärer Vektor zur Transformation der Clearing Funktion zur Ermittlung
einer Ausbringungsmenge zu einem WIP-Bestand
($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \wedge 1 \leq n \leq N$)
- $X_{k,t}$: Ausbringungsmenge von Produkt k in Periode t , die in Abhängigkeit zur
Clearing Funktion $CF_{k,n}$ realisiert werden kann ($1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T$)

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (I_{k,t} \cdot h_k + \gamma_{k,t} \cdot s_k + F_{k,t} \cdot f_k) \quad (6.21)$$

Unter Beachtung der Restriktionen:

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} - F_{k,t-1} + q_{k,t} + q_{k,t}^+ - D_{k,t} + F_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.22)$$

$$\sum_{n=1}^N VI_{k,t,n} \cdot n = q_{k,t} + 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.23)$$

$$\sum_{n=1}^N VI_{k,t,n} = 1 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.24)$$

$$X_{k,t} = \sum_{n=1}^N (CF_{k,n} \cdot VI_{k,t,n}) \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.25)$$

$$\delta_{k,t} = q_{k,t} - X_{k,t} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.26)$$

$$\sum_{k=1}^K (tb_k \cdot q_{k,t} + tr_k \cdot \gamma_{k,t}) + \varepsilon_t \leq C_t - \sum_{k=1}^K (\delta_{k,t} \cdot tb_k) \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (6.27)$$

$$q_{k,t} - M \cdot \gamma_{k,t} \leq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.28)$$



$$q_{k,t} \leq q_{k,t}^{max} \text{ mit } q_{k,t}^{max} = \frac{\Delta^t - tr_k - \delta_{k,t} \cdot tb_k}{tb_k} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.29)$$

$$\delta_{k,t}, F_{k,t}, I_{k,t}, q_{k,t} \geq 0 \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.30)$$

$$\gamma_{k,t} \in \{0, 1\} \quad \forall 1 \leq k \leq K \wedge 1 \leq t \leq T \quad (6.31)$$

6.1.3. Entscheidungsmodell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$

In einem weiteren Ansatz wird die Clearing Funktion dazu verwendet, eine realistische Abschätzung der tatsächlich verfügbaren Kapazitäten zu erhalten und diese im Modell $CLSP_{F,\Delta}$ zu verwenden. Hierbei werden zwei charakteristische Informationen der produktspezifischen Clearing Funktionen verwendet: die maximale Ausbringungsmenge mit $\max(CF_k(\widehat{W}_k))$ sowie der lineare Bereich κ_k , wie in Abbildung 6.1 dargestellt.

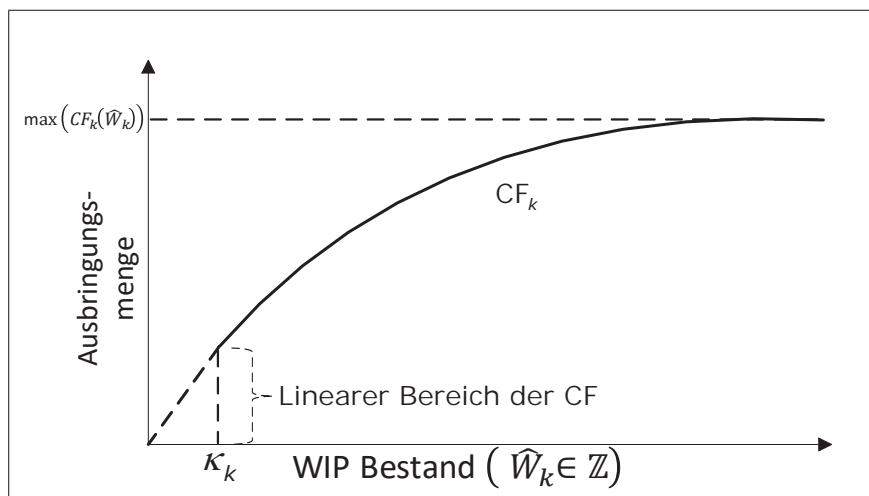


Abbildung 6.1.: Relevante Werte der Clearing Funktion zur Abschätzung der verfügbaren Kapazitäten.

Die Clearing Funktion beschreibt eine maximale Ausbringungsmenge, die trotz weiter steigendem WIP-Bestand nicht überschritten wird. Durch die produktspezifischen Clearing Funktionen können maximale Ausbringungsmengen je Produkt k abgeleitet werden, welche im Modell $CLSP_{F,\Delta}$ als maximal erlaubte Losgröße q_k^{max} verwendet werden. Somit gilt:



$$q_k^{max} = \max_{\widehat{W}_k \in \mathbb{Z}} (CF_k(\widehat{W}_k)) \quad \forall 1 \leq k \leq K \quad (6.32)$$

Anhand des linearen Bereichs κ_k der produktspezifischen Clearing Funktionen kann die produktspezifische Menge bestimmt werden, die innerhalb einer Periode vollständig bearbeitet werden kann. Basierend auf diesen Mengen wird die maximal verfügbare Kapazität des Produktionssystems unter Verwendung der produktspezifischen Stückbearbeitungszeiten tb_k sowie der Rüstzeiten tr_k wie nachfolgend dargestellt berechnet.

$$C_t = \sum_{k=1}^K tb_k \cdot \kappa_k + tr_k \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (6.33)$$

Somit werden durch die Clearing Funktion die Parameter der Kapazität berechnet. Das Modell, welches diese Parameter verwendet, wird in den nachfolgenden Untersuchungen als $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ bezeichnet.

6.1.4. Entscheidungsmodell $CLSP_{F,\Delta}^*$

Als zusätzliche Modellvariante werden in dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$, anstelle der aus den Arbeitsplänen vorgegebenen Stückbearbeitungszeiten, gemessene mittlere produktspezifische Durchlaufzeiten verwendet. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass aufgrund der bestehenden Ressourcenkonkurrenzen Wartezeiten vorliegen. Diese Wartezeiten beeinflussen und erhöhen die gemessenen mittleren Durchlaufzeiten, sodass hierdurch eine realistische Abschätzung der Bearbeitungsdauer der Produktionslose vorliegt. Zur Bestimmung der Durchlaufzeiten wird das Planungsproblem zunächst mit dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ gelöst. Die Realisierung des Produktionsplanes erfolgt durch ein Simulationsmodell und die tatsächlichen Durchlaufzeiten je Produktionslos $q_{k,t}$ werden bestimmt. Je Produkt k wird anhand der gemessenen Durchlaufzeiten eine mittlere Durchlaufzeit berechnet, die anstelle der Stückbearbeitungszeiten tb_k verwendet werden. Diese Variante des Entscheidungsmodells wird nachfolgend als $CLSP_{F,\Delta}^*$ bezeichnet.

6.2. Experimentdesign

Basierend auf dem in Kapitel 4 beschriebenen Produktionssystem wird die Planungsgüte der beschriebenen Modelle anhand von Simulationsexperimenten untersucht. Die Bedarfe folgen einer Normalverteilung mit einem konstanten Mittelwert sowie einer konstanten Streuung. Insgesamt werden vier unterschiedliche Bedarfsszenarien untersucht, sodass unterschiedlich hohe Auslastungen vorliegen. Die verwendeten Parameter der Normalverteilung zur Erzeugung der Bedarfe sind in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Analog zu den Untersuchungen in Kapitel 4 wird ein Simulationshorizont T^s von 1000 Perioden verwendet, um statistisch signifikante Kennzahlen zu erhalten. Zudem wird auch



| Bedarfsszenario | Mittelwert | Standardabweichung |
|-----------------|------------|--------------------|
| S-1 | 50 | 15 |
| S-2 | 60 | 18 |
| S-3 | 70 | 21 |
| S-4 | 80 | 24 |

Tabelle 6.1.: Parameter der Normalverteilung der jeweiligen Bedarfsszenarien.

für diese Untersuchungen sichergestellt, dass in jeder Periode ein positiver Bedarf existiert. Die Planung erfolgt über einen Planungshorizont T von acht Perioden und nach einem Planungsabstand r von vier Perioden wird eine Neuplanung im Sinne einer rollierenden und überlappenden Planung angestoßen.¹¹ Die Bearbeitungsreihenfolge der Produktionslose an den Bearbeitungsstationen wird in diesen Untersuchungen ebenfalls nach dem *First In First Out*-Prinzip ausgeführt.

Um die Güte der Planungsergebnisse messen zu können, erfolgt über den gesamten Simulationszeitraum die Erhebung der Anzahl der verspäteten Aufträge sowie der Kosten, bestehend aus durchschnittlichen Rüst- und Lagerkosten je Periode.¹² Zudem wird analog zu den Untersuchungen zur Auftragsfreigabe in Kapitel 5 die maximale Auslastung λ über alle Bearbeitungsstationen bestimmt.¹³

Neben den in Kapitel 6.1 beschriebenen Entscheidungsmodellen wird die Planung der Produktionslose zusätzlich mit dem Groff-Verfahren durchgeführt. Obwohl das Groff-Verfahren keine Kapazitäten berücksichtigt, wird es in der industriellen Praxis häufig eingesetzt, sodass in den Untersuchungen zudem der Einfluss der grundsätzlichen Berücksichtigung von Kapazitäten aufgezeigt werden soll.

6.3. Ergebnisse der Experimente

Für die beschriebenen Entscheidungsmodelle und Bedarfsszenarien werden Simulationsexperimente durchgeführt. Alle Entscheidungsmodelle wurden auf einem Rechner mit einem Intel[®] Core[™] i7-4700MQ mit 2.40GHZ, 8GB Arbeitsspeicher und einem Windows 7 64-Bit Betriebssystem sowie dem IBM[®] ILOG[®] CPLEX[®] Optimization Studio Version 12.6 durchgeführt. Alle Entscheidungsmodelle, mit Ausnahme des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$, konnten je Probleminstanz innerhalb von zwei Sekunden gelöst werden. Das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ hat aufgrund der direkten Integration der Clearing Funktion deutlich

¹¹Diese rollierende Planung erfolgt analog zu dem in den Kapiteln 5.2.4 und 5.3.3 beschriebenen Vorgehen. Siehe hierzu auch Abbildung 5.2.

¹²Analog zu den Untersuchungen zur Auftragsfreigabe in Kapitel 4 ist es das Hauptziel, die Verspätungen zu reduzieren.

¹³Die Auslastung je Bearbeitungsstation wird in jeder Periode t gemessen. Die maximale Auslastung über alle Bearbeitungsstationen j einer Periode t wird in λ_t vermerkt. Über den gesamten Simulationshorizont T^s wird eine mittlere maximale Auslastung bestimmt (siehe hierzu Kapitel 5.2.4 sowie Formel 5.39 sowie Formel 5.40).



mehr Entscheidungsvariablen, sodass zur Lösung je Problem Instanz bis zu zehn Sekunden notwendig waren.

Für jedes der in Tabelle 6.1 definierten Bedarfsszenarien S liegen für jedes Produkt k und jede Periode t ($1 \leq t \leq T^S$) ganzzahlige positive Bedarfe vor. Basierend auf diesen Bedarfen wird das Modell $CLSP_{F,\Delta}$ gelöst und die ermittelten Produktionspläne werden durch das Simulationsmodell umgesetzt. Die Durchlaufzeit je Produktionslos¹⁴ wird gemessen und durch die Stückzahl des Loses geteilt, um eine stückbezogene Durchlaufzeit zu erhalten. Über den gesamten Simulationshorizont T^S wird auf Basis dieser Messwerte ein Mittelwert je Produkt k bestimmt. Diese errechneten Mittelwerte $\mu_{k,S}$ sowie Standardabweichungen $\sigma_{k,S}$ in der Zeiteinheit Sekunden sind in Tabelle 6.2 aufgeführt. Wie zu erwarten war, steigen die mittleren Durchlaufzeiten pro Stück bei den unterschiedlichen Bedarfsszenarien an, da aufgrund der höheren Bedarfsmengen eine höhere Auslastung im Produktionssystem vorliegt. Grundsätzlich zeigt sich zudem, dass eine hohe Standardabweichung der Messwerte vorliegt.

| Produkt k | Szenario S-1 | | Szenario S-2 | | Szenario S-3 | | Szenario S-4 | |
|-------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| | $\mu_{k,1}$ | $\sigma_{k,1}$ | $\mu_{k,2}$ | $\sigma_{k,2}$ | $\mu_{k,3}$ | $\sigma_{k,3}$ | $\mu_{k,4}$ | $\sigma_{k,4}$ |
| Part01 | 435 | 128 | 461 | 138 | 492 | 160 | 500 | 176 |
| Part02 | 509 | 128 | 535 | 137 | 568 | 174 | 587 | 196 |
| Part03 | 437 | 121 | 448 | 140 | 469 | 143 | 489 | 158 |
| Part04 | 373 | 191 | 395 | 208 | 435 | 214 | 447 | 216 |
| Part05 | 457 | 134 | 486 | 142 | 525 | 185 | 551 | 197 |
| Part06 | 547 | 167 | 547 | 172 | 586 | 197 | 602 | 211 |
| part07 | 443 | 122 | 447 | 135 | 451 | 128 | 451 | 134 |
| Part08 | 330 | 128 | 358 | 137 | 361 | 141 | 378 | 166 |

Tabelle 6.2.: Mittelwerte und Standardabweichungen der stückbezogenen Durchlaufzeiten je Produkt k und Bedarfsszenario S in Sekunden.

Bei den Simulationsexperimenten zu Bedarfsszenario S-1 zeigt sich, dass eine relativ geringe Belastung im Produktionssystem vorliegt. Die je Entscheidungsmodell resultierenden mittleren maximalen Auslastungen λ sind in Tabelle 6.3 dargestellt.¹⁵

Die durch die Simulationsexperimente ermittelte Anzahl an Verspätungen ist in Abbildung 6.2 aufgeführt. Hierbei zeigt sich, dass bei der Verwendung des Modells $CLSP_{F,\Delta}$ die höchste Anzahl an verspäteten Aufträgen auftritt. Durch die aggregierte Betrachtung der Kapazitäten werden in diesem Modell die verfügbaren Kapazitäten überschätzt, sodass zu große Produktionslose gebildet werden. Auch das Modell $CLSP_{F,\Delta}^*$ kann trotz der

¹⁴Die Durchlaufzeit je Produktionslos umfasst den Zeitbedarf der Freigabe (also den Beginn einer Periode) bis zur vollständigen Bearbeitung am letzten Bearbeitungsschritt.

¹⁵Grundsätzlich sind alle numerischen Ergebnisse zu den durchgeführten Experimenten im Anhang in dem Kapitel A.2.1 im Detail nochmals aufgeführt.

| Modell | $CLSP_{F,\Delta}$ | GROFF | $CLSP_{F,\Delta}^*$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ |
|-----------|-------------------|-------|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| λ | 49% | 49% | 49% | 49% | 48% |

Tabelle 6.3.: Mittlere Auslastung des Produktionssystems bei Bedarfsszenario S-1.

Verwendung von gemessenen mittleren Durchlaufzeiten die Anzahl der Verspätungen nur geringfügig reduzieren. Trotz der Vernachlässigung der vorliegenden Kapazitätsrestriktionen können bei Verwendung des Groff-Verfahrens deutlich geringere Verspätungen erzielt werden als bei den Modellen $CLSP_{F,\Delta}$ und $CLSP_{F,\Delta}^*$. Die Integration der Clearing Funktion im Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ kann die Anzahl der verspäteten Aufträge etwas verringern. Trotzdem zeigt sich, dass weiterhin die verfügbaren Kapazitäten überschätzt werden und tendenziell zu große Produktionslose gebildet werden. Durch das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ kann die Anzahl der verspäteten Aufträge deutlich reduziert werden. Hier zeigt sich, dass durch die Abschätzung der verfügbaren Kapazitäten durch die Clearing Funktionen eine realistische Abschätzung der im Produktionssystem verfügbaren Kapazitäten möglich ist.

Neben der Anzahl der verspäteten Aufträge ist auch die Entwicklung der Gesamtkosten, bestehend aus Rüst- und Lagerkosten, relevant. Die erzielten Ergebnisse je Modell sind in Abbildung 6.3 aufgeführt. Grundsätzlich zeigt sich, dass die Modelle, die die geringsten Verspätungen erzielen, die höchsten Gesamtkosten haben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die Bildung kleinerer Produktionslose zwar die Wahrscheinlichkeit einer verspäteten Fertigstellung der Aufträge reduziert wird, im Gegenzug aber die Einsparung der Rüstkosten geringer ausfallen.¹⁶

In Tabelle 6.4 sind basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ die jeweiligen prozentualen Abweichungen der Zielgrößen aufgeführt. Diese zeigen, dass durch das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$, verglichen mit dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$, die Verspätungen um über 80% reduziert werden konnten und hierdurch die Gesamtkosten lediglich um knapp 2,9% gestiegen sind.

Mit Bedarfsszenario S-2 wird eine etwas höhere Last im Produktionssystem untersucht. Die mittlere maximale Auslastung des Produktionssystems je verwendetem Planungsmodell ist in Tabelle 6.5 aufgeführt. Es zeigt sich, dass nun eine Auslastung um ca. 60% im Produktionssystem durch das Bedarfsszenario S-2 realisiert werden kann.

Die erzielten Ergebnisse zu den verspäteten Aufträgen sowie die der Kosten sind in den Abbildungen 6.4 und 6.5 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Verwendung des Groff-Verfahrens sehr hohe Verspätungen auftreten und die Vernachlässigung der Kapazitäten bei höherer Auslastung des Produktionssystems nicht zielführend ist. Das Modell $CLSP_{F,\Delta}$ führt ebenfalls zu hohen Verspätungen, da die verfügbaren Kapazitäten überschätzt und zu große Produktionslose gebildet werden. Das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ kann die

¹⁶Grundsätzlich sei darauf hingewiesen, dass aufgrund von Verspätungen ebenfalls Kosten (wie zum Beispiel Vertragsstrafen oder entgangene Gewinne im Sinne von Opportunitätskosten) resultieren können. Diese sind im Rahmen der Experimente nicht explizit ausgewiesen.

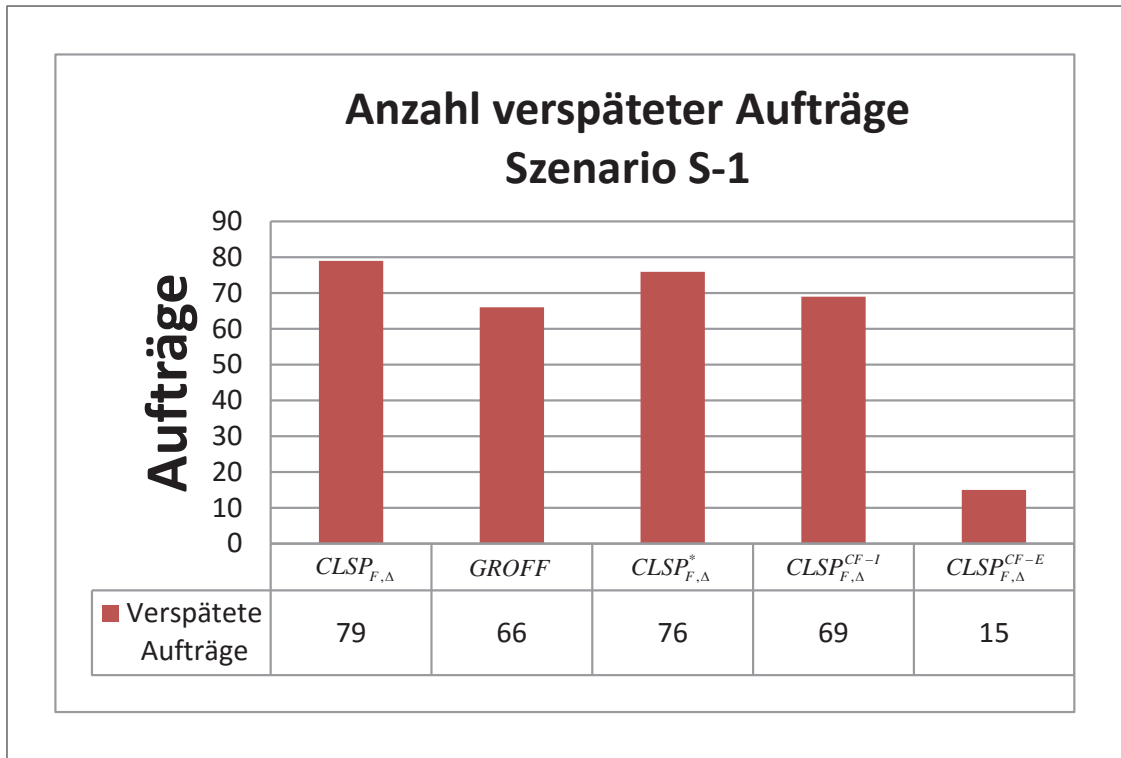


Abbildung 6.2.: Anzahl der verspäteten Aufträge je Modell für das Bedarfsszenario S-1.

Verspätungen nicht reduzieren. Die Integration der Clearing Funktion kann in dieser Form die Planungsergebnisse im Bedarfsszenario S-2 nicht verbessern. Erfolgt die Verwendung der gemessenen mittleren Durchlaufzeiten, so können im Modell $CLSP^*_{F,\Delta}$ die verspäteten Aufträge deutlich reduziert werden. Die besten Ergebnisse hinsichtlich der resultierenden Verspätungen können auch in diesem Bedarfsszenario mit dem Modell $CLSP^{CF-E}_{F,\Delta}$ realisiert werden. Gleichzeitig zeigt sich, dass durch die Verbesserung der Anzahl von verspäteten Aufträgen die Lagerkosten sinken und die Rüstkosten ansteigen, was zu einer Erhöhung der Gesamtkosten führt. Die prozentualen Abweichungen zum Modell $CLSP_{F,\Delta}$ der verspäteten Aufträge sowie der Kosten sind in Tabelle 6.6 aufgeführt.

Eine weitere Erhöhung der Last im Produktionssystem wird durch Bedarfsszenario S-3 realisiert. Wie in Tabelle 6.7 dargestellt, liegt eine mittlere Auslastung von bis zu 70% vor. Zudem zeigt sich, dass durch das Modell $CLSP^{CF-E}_{F,\Delta}$, durch welches kleinere Produktionslose gebildet werden, die mittlere maximale Auslastung im Produktionssystem deutlich geringer ist.¹⁷

Die je Modell erzielte Anzahl an verspäteten Aufträgen sowie die Rüst- und Lagerkosten je Periode sind bei Verwendung von Bedarfsszenario S-3 in den Abbildungen 6.6 und 6.7 aufgeführt. Auch hier bestätigt sich, dass durch die Vernachlässigung der Kapazitäten beim Groff-Verfahren eine sehr hohe Anzahl von verspäteten Aufträgen resultiert. Auch das Modell $CLSP_{F,\Delta}$ kann aufgrund der Überschätzung der verfügbaren Kapazitäten den Anteil an verspäteten Aufträgen nur teilweise senken. Durch das Modell $CLSP^{CF-I}_{F,\Delta}$ kann eine wei-

¹⁷Grundsätzlich lässt sich dies über alle Bedarfsszenarien beobachten, allerdings fällt dieser Effekt bei höherer Auslastung deutlich stärker aus.

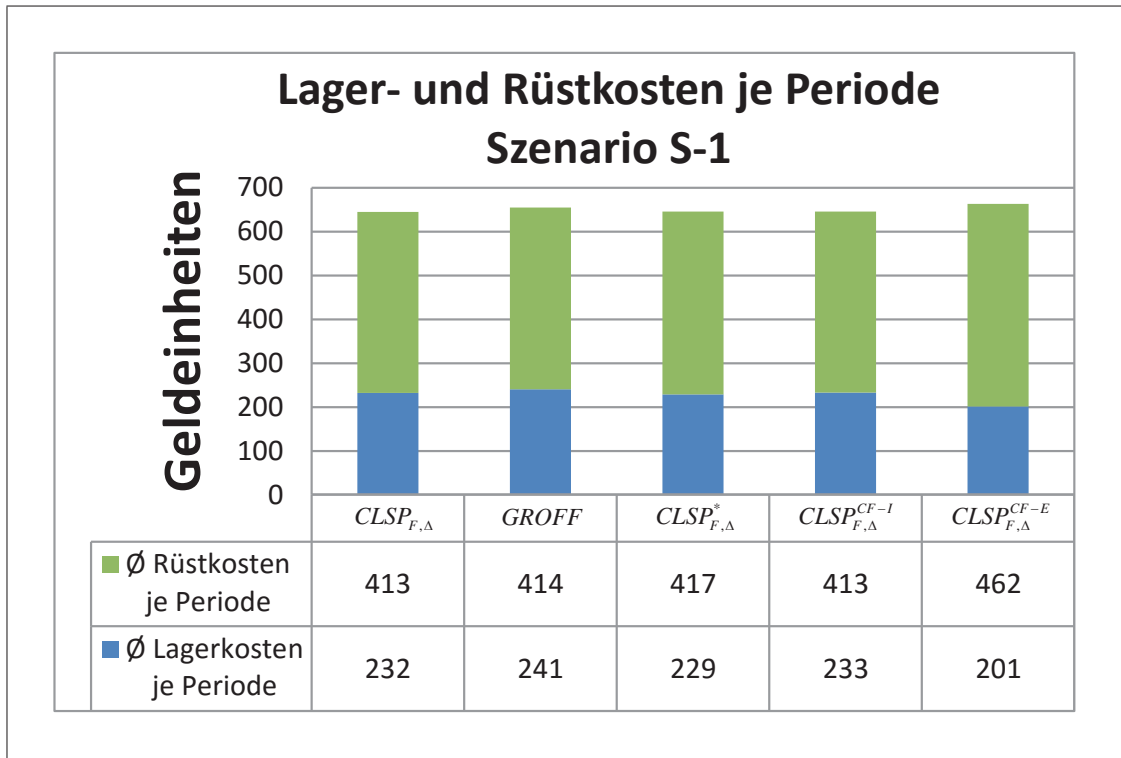


Abbildung 6.3.: Erzielte Rüst- und Lagerkosten je Modell für das Bedarfsszenario S-1.

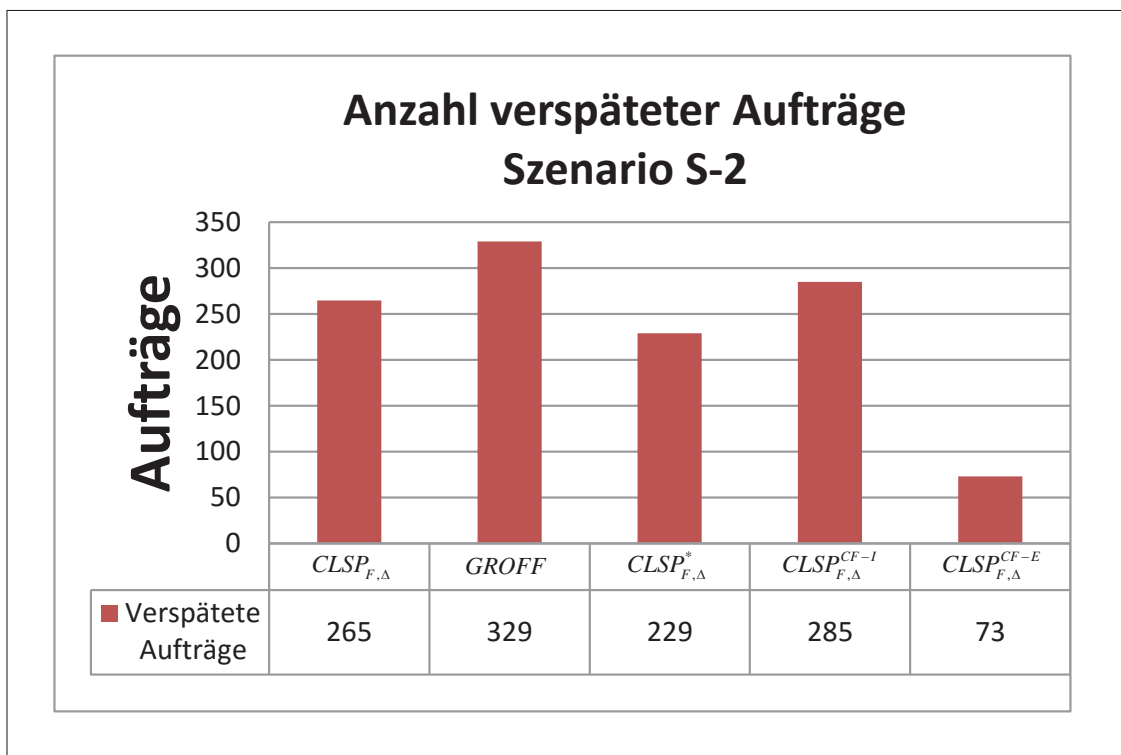


Abbildung 6.4.: Anzahl der verspäteten Aufträge je Modell für das Bedarfsszenario S-2.



| Modell | Verspätete Aufträge | Lagerkosten | Rüstkosten | Gesamtkosten (Rüstkosten + Lagerkosten) |
|-------------------------------------|---------------------|-------------|------------|--|
| CLSP _{F,Δ} | ±0% | ±0% | ±0% | ±0% |
| GROFF | -16,46% | 3,88% | 0,17% | 1,50% |
| CLSP* _{F,Δ} | -3,80% | -1,32% | 0,98% | 0,15% |
| CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | -12,66% | 0,43% | -0,02% | 0,14% |
| CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | -81,01% | -13,18% | 11,90% | 2,89% |

Tabelle 6.4.: Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen basierend auf dem Modell CLSP_{F,Δ} für Bedarfsszenario S-1.

| Modell | CLSP _{F,Δ} | GROFF | CLSP* _{F,Δ} | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} |
|--------|---------------------|-------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| λ | 59% | 60% | 59% | 59% | 57% |

Tabelle 6.5.: Mittlere Auslastung des Produktionssystems bei Bedarfsszenario S-2.

tere Reduktion der verspäteten Aufträge realisiert werden. Es zeigt sich, dass bei einer höheren Auslastung im Produktionssystem die direkte Integration der Clearing Funktion in das CLSP eine Verbesserung erzielt. Durch die Verwendung der gemessenen mittleren Durchlaufzeiten im Modell CLSP*_{F,Δ} können die Planungsergebnisse hinsichtlich der Anzahl von verspäteten Aufträgen weiter deutlich gesenkt werden. Nach wie vor zeigt sich allerdings, dass mit Abstand die geringsten Verspätungen durch das Modell CLSP^{CF-E}_{F,Δ} realisiert werden können. Analog steigen die Gesamtkosten bei einer Verringerung der Anzahl der verspäteten Aufträge an. Die durch das Modell CLSP^{CF-E}_{F,Δ} hohe Reduktion der Verspätungen von über 80% hat eine Steigerung der Gesamtkosten von knapp über 13% zur Folge (vgl. Tabelle 6.8).

Eine mittlere Auslastung des Produktionssystems von bis zu 79% liegt bei Bedarfsszenario S-4 vor (vgl. Tabelle 6.9). Durch das Modell CLSP^{CF-E}_{F,Δ} kann ein Reduktion der Auslastung auf 70% erzielt werden. Insgesamt kann festgestellt werden, dass sich die bisher erzielten Ergebnisse auch bei diesem Bedarfsszenario und der nun deutlich höheren Auslastung im Produktionssystem bestätigen. Die Vernachlässigung der Kapazitäten beim Groff-Verfahren führt zu einer sehr hohen Anzahl von verspäteten Aufträgen. Das Modell CLSP_{F,Δ} überschätzt die Kapazitäten, was ebenfalls zu einer schlechten Termintreue führt. Das Modell CLSP^{CF-I}_{F,Δ} kann analog zu Bedarfsszenario S-3 die Anzahl der verspäteten Aufträge reduzieren, allerdings fällt die Reduktion nicht so deutlich wie bei Modell CLSP*_{F,Δ} aus. Weiterhin schafft es das Modell CLSP^{CF-E}_{F,Δ} mit Abstand die besten Resultate

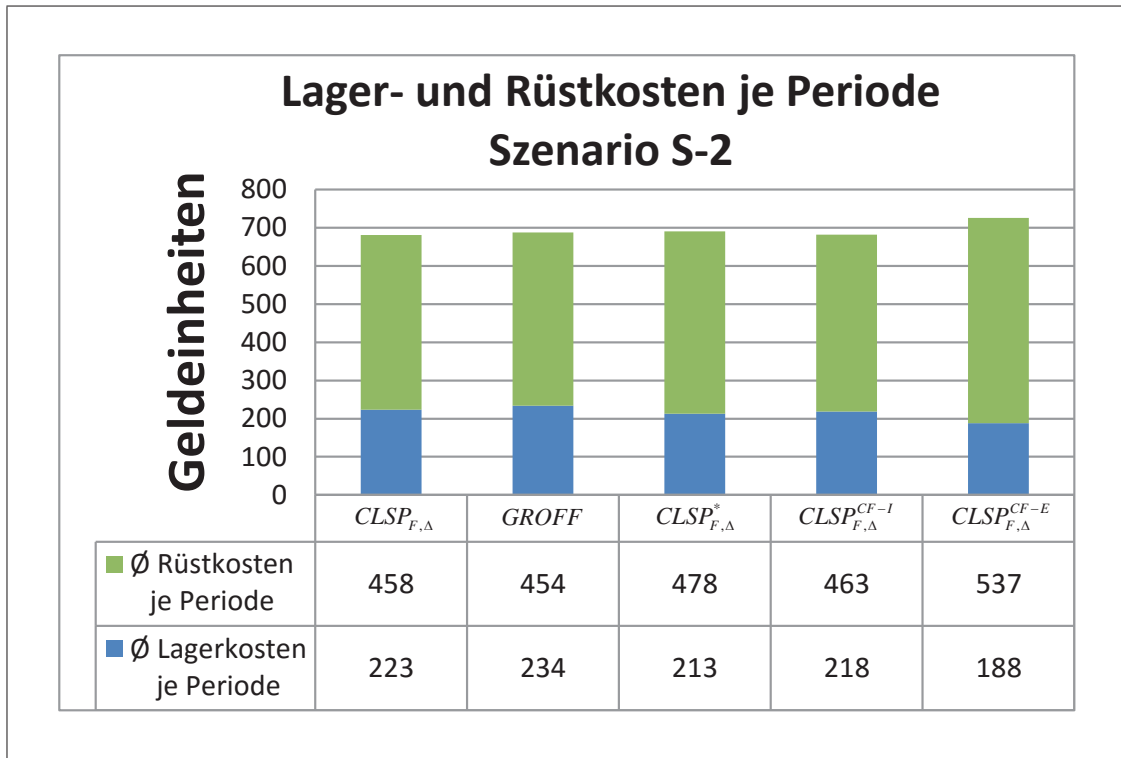


Abbildung 6.5.: Erzielte Rüst- und Lagerkosten je Modell für das Bedarfsszenario S-2.

hinsichtlich der Anzahl der verspäteten Aufträge zu erzielen. Wie erwartet zeigt sich eine Erhöhung der Gesamtkosten bei einer Verbesserung der Termintreue (vgl. Abbildungen 6.8 und 6.9). Wie in Tabelle 6.10 aufgezeigt, führt die sehr hohe Reduktion der verspäteten Aufträge durch das Modell $CLSP^{CF-E}_{F,\Delta}$ von knapp 74% zu einer Erhöhung der Gesamtkosten um beinahe 19%.



| Modell | Verspätete Aufträge | Lagerkosten | Rüstkosten | Gesamtkosten (Rüstkosten + Lagerkosten) |
|-------------------------------------|---------------------|-------------|------------|--|
| CLSP _{F,Δ} | ±0% | ±0% | ±0% | ±0% |
| GROFF | 24,15% | 4,80% | -0,75% | 1,07% |
| CLSP* _{F,Δ} | -13,58% | -4,57% | 4,45% | 1,49% |
| CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 7,55% | -2,10% | 1,22% | 0,13% |
| CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | -72,45% | -15,74% | 17,38% | 6,62% |

Tabelle 6.6.: Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen basierend auf dem Modell CLSP_{F,Δ} für Bedarfsszenario S-2.

| Modell | CLSP _{F,Δ} | GROFF | CLSP* _{F,Δ} | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} |
|--------|---------------------|-------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| λ | 69% | 70% | 68% | 68% | 64% |

Tabelle 6.7.: Mittlere Auslastung des Produktionssystems bei Bedarfsszenario S-3.

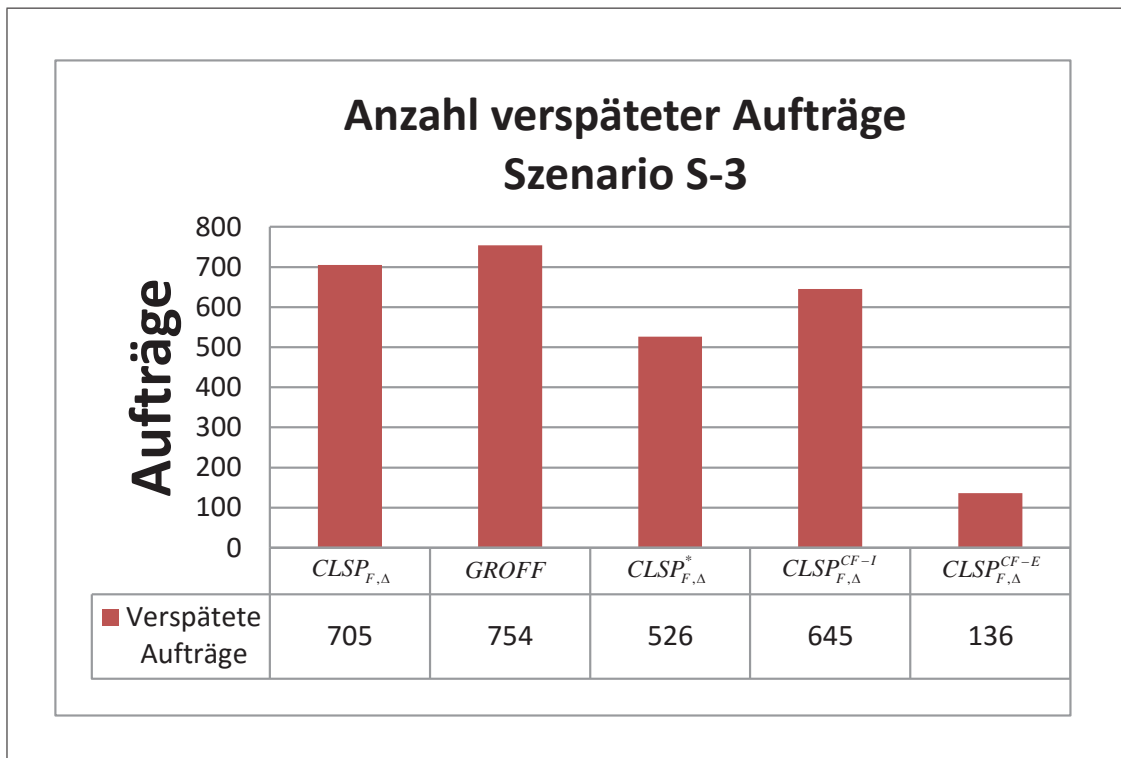


Abbildung 6.6.: Anzahl der verspäteten Aufträge je Modell für das Bedarfsszenario S-3.

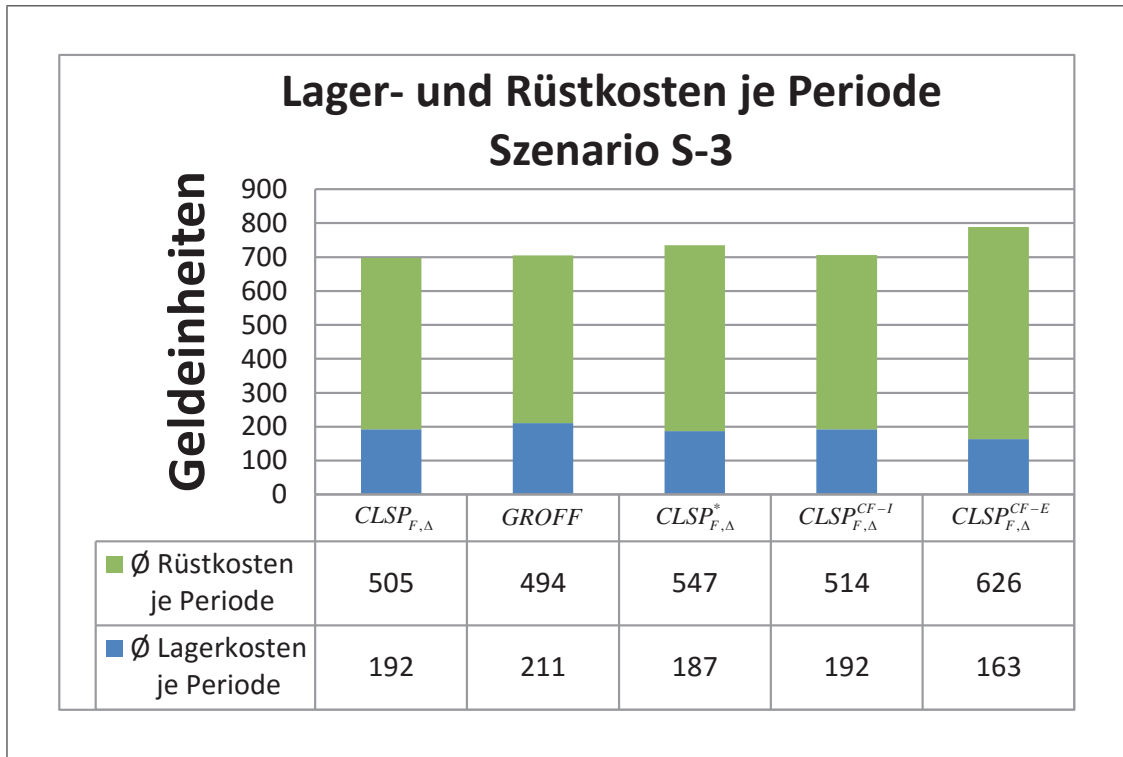


Abbildung 6.7.: Erzielte Rüst- und Lagerkosten je Modell für das Bedarfsszenario S-3.

| Modell | Verspätete Aufträge | Lagerkosten | Rüstkosten | Gesamtkosten |
|--------------------------|---------------------|-------------|------------|----------------------------|
| | | | | (Rüstkosten + Lagerkosten) |
| $CLSP_{F,\Delta}$ | ±0% | ±0% | ±0% | ±0% |
| GROFF | 6,95% | 9,85% | -2,20% | 1,12% |
| $CLSP^*_{F,\Delta}$ | -25,39% | -2,44% | 8,27% | 5,32% |
| $CLSP^{CF-I}_{F,\Delta}$ | -8,51% | 0,02% | 1,66% | 1,21% |
| $CLSP^{CF-E}_{F,\Delta}$ | -80,71% | -14,95% | 23,79% | 13,12% |

Tabelle 6.8.: Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ für Bedarfsszenario S-3.

| Modell | $CLSP_{F,\Delta}$ | GROFF | $CLSP^*_{F,\Delta}$ | $CLSP^{CF-I}_{F,\Delta}$ | $CLSP^{CF-E}_{F,\Delta}$ |
|-----------|-------------------|-------|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| λ | 78% | 79% | 75% | 77% | 70% |

Tabelle 6.9.: Mittlere Auslastung des Produktionssystems bei Bedarfsszenario S-4.

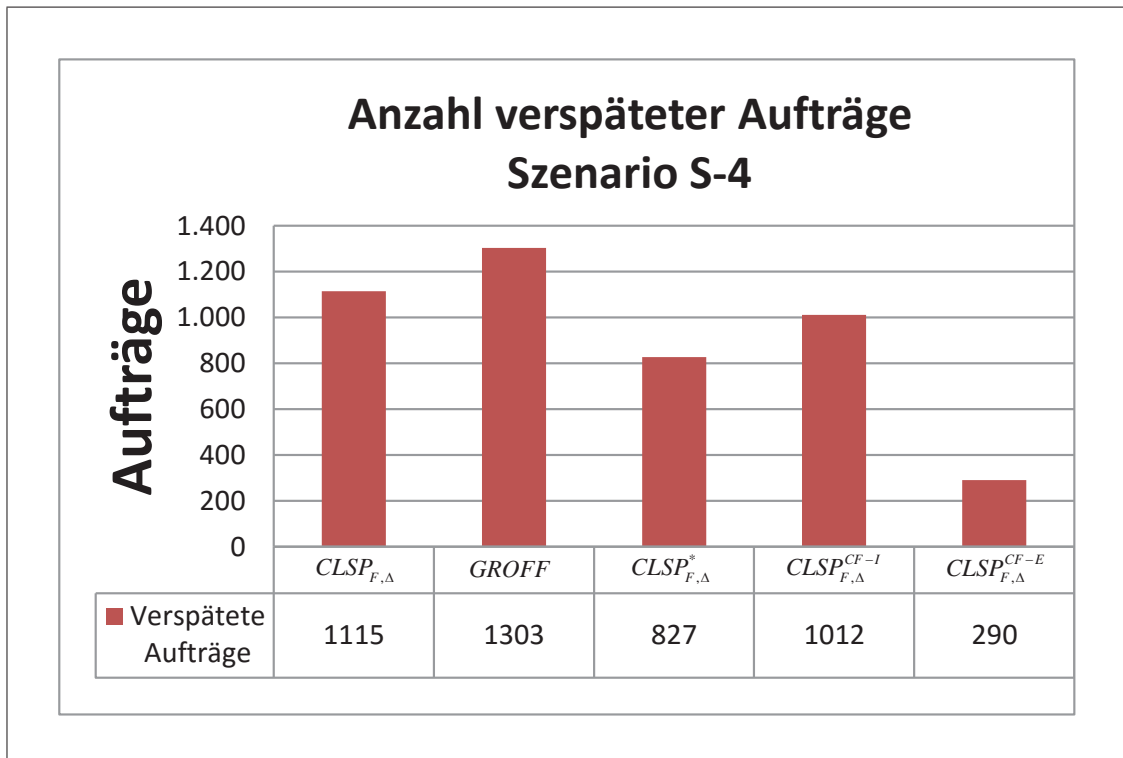


Abbildung 6.8.: Anzahl der verspäteten Aufträge je Modell für das Bedarfsszenario S-4.

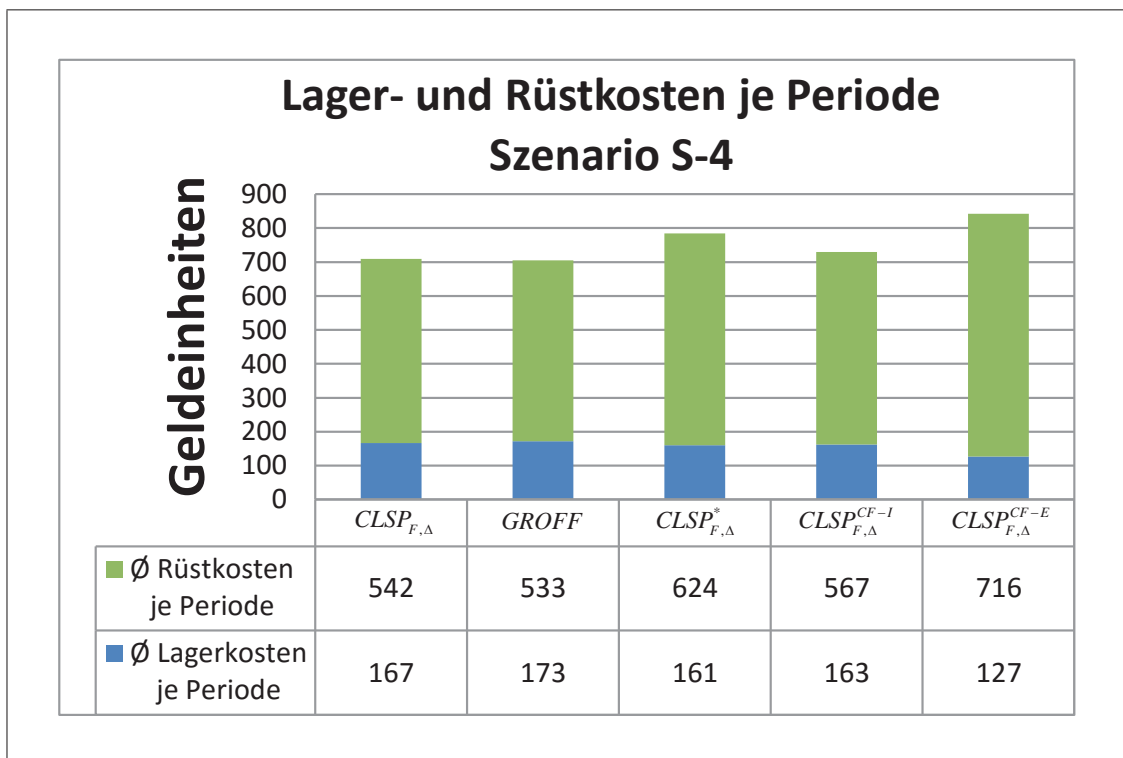


Abbildung 6.9.: Erzielte Rüst- und Lagerkosten je Modell für das Bedarfsszenario S-4.



| Modell | Verspätete Aufträge | Lagerkosten | Rüstkosten | Gesamtkosten (Rüstkosten + Lagerkosten) |
|--------------------------|---------------------|-------------|------------|--|
| $CLSP_{F,\Delta}$ | $\pm 0\%$ | $\pm 0\%$ | $\pm 0\%$ | $\pm 0\%$ |
| GROFF | 16,86% | 3,48% | -1,73% | -0,51% |
| $CLSP_{F,\Delta}^*$ | -25,83% | -3,63% | 15,06% | 10,67% |
| $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ | -9,24% | -2,49% | 4,52% | 2,87% |
| $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ | -73,99% | -23,87% | 32,01% | 18,87% |

Tabelle 6.10.: Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ für Bedarfsszenario S-4.



6.4. Untersuchungen zum Einfluss von Prioritätsregeln

Bei den *bug-bucket-Modellen* zur Losgrößenplanung wird keine Reihenfolge der Bearbeitung der Produktionslose festgelegt. Wie letztlich die Produktionslose bearbeitet werden, wird in der nachfolgenden Planungsstufe, der Fertigungssteuerung bzw. der Ressourceneinsatzplanung, bestimmt. In den in Kapitel 6.3 aufgeführten Ergebnisse wurde die Einplanung durch das FIFO-Prinzip durchgeführt. In der industriellen Praxis werden allerdings häufig einfache Prioritätsregeln verwendet, die die Bearbeitungsreihenfolge determinieren und insgesamt eine verbesserte Abarbeitung gewährleisten sollen.

Die Verwendung der Clearing Funktion im Rahmen der Losgrößenplanung soll die Abhängigkeiten im Produktionssystem hinsichtlich der Ressourcenkonkurrenz und der damit verbundenen nicht linearen Abhängigkeiten der Ausbringungsmenge und dem WIP-Bestand antizipieren. In den nun durchgeführten weiterführenden Untersuchungen wird der Einfluss von unterschiedlichen Prioritätsregeln auf diesen Ansatz untersucht. Im Detail werden die folgenden gängigsten Prioritätsregeln angewendet:¹⁸

- *Operational Due Date (ODD)*
- *Shortest Processing Time (SPT)*
- *Earliest Due Date (EDD)*

Die Messung der Durchlaufzeiten für das Modell $CLSP_{F,\Delta}^*$ erfolgt nun auf Basis der tatsächlich verwendeten Prioritätsregeln.¹⁹ Hierdurch sollen realistische Abschätzungen der Durchlaufzeiten unter Berücksichtigung der nachgelagerten Reihenfolgeplanung aufgrund der angewendeten Prioritätsregel ermöglicht werden. In der Tabelle 6.11 sind die produktspezifischen Durchlaufzeiten je Stück für die jeweiligen Bedarfsszenarien und Prioritätsregeln aufgeführt. Abhängig von der verwendeten Prioritätsregel zeigen sich zum Teil deutliche Unterschiede hinsichtlich der gemessenen stückbezogenen Durchlaufzeiten. Bei der Verwendung der Prioritätsregel *SPT* konnten die geringsten mittleren stückbezogenen Durchlaufzeiten gemessen werden. Auch sind bei dieser Prioritätsregel die Standardabweichung der gemessenen Werte mit Abstand am geringsten. Die höchsten Werte wurden mit der Prioritätsregel *EDD* ermittelt.

¹⁸Eine detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen Prioritätsregeln ist in Herrmann aufgeführt (vgl. Herrmann (2011), S. 321f.).

¹⁹In der Modellbezeichnung wird in den nachfolgenden Ausführungen zudem die Information der angewendeten Prioritätsregel *PR* mit angegeben, sodass das Modell als $CLSP_{F,\Delta}^{*,PR}$ bezeichnet wird (hierbei fungiert *PR* als Platzhalter für die tatsächlich verwendete Prioritätsregel).

| Produkt k | Prioritätsregel | Szenario S-1 | | Szenario S-2 | | Szenario S-3 | | Szenario S-4 | |
|-------------|-----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| | | $\mu_{k,1}$ | $\sigma_{k,1}$ | $\mu_{k,2}$ | $\sigma_{k,2}$ | $\mu_{k,3}$ | $\sigma_{k,3}$ | $\mu_{k,4}$ | $\sigma_{k,4}$ |
| Part01 | ODD | 424 | 117 | 447 | 126 | 467 | 147 | 484 | 176 |
| | SPT | 366 | 78 | 382 | 78 | 393 | 83 | 396 | 86 |
| | EDD | 422 | 127 | 437 | 133 | 457 | 146 | 454 | 149 |
| Part02 | ODD | 490 | 107 | 506 | 105 | 532 | 135 | 552 | 156 |
| | SPT | 532 | 121 | 554 | 118 | 579 | 145 | 600 | 142 |
| | EDD | 512 | 137 | 549 | 162 | 567 | 167 | 604 | 205 |
| Part03 | ODD | 440 | 122 | 439 | 129 | 459 | 150 | 467 | 150 |
| | SPT | 430 | 92 | 429 | 94 | 444 | 103 | 452 | 108 |
| | EDD | 445 | 134 | 456 | 148 | 468 | 155 | 491 | 184 |
| Part04 | ODD | 294 | 126 | 312 | 144 | 325 | 147 | 343 | 174 |
| | SPT | 254 | 48 | 259 | 54 | 259 | 54 | 271 | 69 |
| | EDD | 389 | 201 | 435 | 255 | 453 | 260 | 478 | 258 |
| Part05 | ODD | 443 | 128 | 463 | 135 | 498 | 164 | 524 | 198 |
| | SPT | 373 | 80 | 383 | 79 | 403 | 93 | 406 | 91 |
| | EDD | 425 | 125 | 455 | 136 | 482 | 172 | 491 | 163 |
| Part06 | ODD | 521 | 148 | 519 | 143 | 533 | 133 | 559 | 158 |
| | SPT | 538 | 131 | 548 | 137 | 581 | 157 | 592 | 145 |
| | EDD | 549 | 178 | 538 | 168 | 585 | 212 | 605 | 221 |
| Part07 | ODD | 431 | 122 | 436 | 117 | 449 | 134 | 450 | 136 |
| | SPT | 427 | 90 | 434 | 94 | 444 | 96 | 452 | 106 |
| | EDD | 441 | 138 | 438 | 137 | 459 | 151 | 475 | 167 |
| Part08 | ODD | 275 | 79 | 284 | 86 | 286 | 83 | 301 | 95 |
| | SPT | 276 | 59 | 287 | 63 | 300 | 71 | 308 | 78 |
| | EDD | 357 | 163 | 397 | 184 | 391 | 188 | 416 | 223 |

Tabelle 6.11.: Prioritätsregelabhängige gemessene stückbezogene Durchlaufzeiten je Bedarfsszenario S und Produkt k .

6.4.1. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel ODD

Bei der Umsetzung der Produktionspläne, welche durch die jeweiligen Modelle ermittelt wurden, wird bei der Reihenfolgeplanung an den Bearbeitungsstationen die Prioritätsregel ODD angewendet. Einzig das Entscheidungsmodell $CLSP_{F,\Delta}^*$ berücksichtigt diese Prioritätsregel hinsichtlich der verwendeten Durchlaufzeiten. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 6.12 und 6.13 aufgeführt.²⁰

Bei einer geringen Arbeitslast im Produktionssystem kann das Groff-Verfahren bei Bedarfsszenario S-1 bessere Ergebnisse als die anderen Modelle, mit Ausnahme des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$, erzielen. Bei steigender Last zeigt sich jedoch, dass die Vernachlässigung der beschränkten Kapazitäten deutlich schlechtere Ergebnisse zur Folge hat, sodass mit Ausnahme von Szenario S-1 das Groff Verfahren die meisten Verspätungen verursacht und so-

²⁰Zusätzliche numerische Ergebnisse zu diesem Experiment sind im Anhang in Kapitel A.2.2 aufgeführt.



mit die schlechtesten Ergebnisse liefert. Das Modell $CLSP_{F,\Delta}$ überschätzt die verfügbaren Kapazitäten und durch die Verwendung der gemessenen Durchlaufzeiten kann im Modell $CLSP_{F,\Delta}^{*,ODD}$, insbesondere bei höherer Last im Produktionssystem, eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse erzielt werden. Das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ kann erst bei einer hohen Auslastung bessere Ergebnisse erzielen. Allerdings kann es die Ergebnisse des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{*,ODD}$ nicht erreichen. Die mit deutlichem Abstand geringsten Verspätungen werden durch das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ realisiert. Die Verbesserung der Verspätung führt zu einer Reduktion der Lagerkosten und Erhöhung der Rüstkosten, was letztlich die Gesamtkosten steigen lässt. Die prozentualen Abweichungen der Zielgrößen des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ zum Modell $CLSP_{F,\Delta}$ sind in Tabelle 6.14 aufgeführt. Bei Verwendung der Prioritätsregel ODD kann das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ die Anzahl der verspäteten Aufträge im Schnitt um über 90% reduzieren. Abhängig vom Bedarfsszenario und der dadurch vorliegenden Auslastung des Produktionssystems führt dies zu einer Erhöhung der Gesamtkosten von 2,8% bis 17,5%.

| Bedarfsszenario | $CLSP_{F,\Delta}$ | GROFF | $CLSP_{F,\Delta}^{*,ODD}$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ |
|-----------------|-------------------|-------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| S-1 | 59 | 45 | 56 | 59 | 3 |
| S-2 | 196 | 248 | 182 | 190 | 20 |
| S-3 | 501 | 570 | 371 | 474 | 43 |
| S-4 | 902 | 974 | 602 | 752 | 75 |

Tabelle 6.12.: Ermittelte Anzahl verspäteter Aufträge je Modell bei Verwendung der Prioritätsregel ODD.

6.4.2. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel SPT

Bei Verwendung der Prioritätsregel SPT zeigen sich strukturell ähnliche Ergebnisse. Bei Bedarfsszenario S-1 kann das Groff-Verfahren bessere Resultate als die Modelle $CLSP_{F,\Delta}$ und $CLSP_{F,\Delta}^{*,SPT}$ erzielen. Steigt die Auslastung im Produktionssystem an, so erhöht sich die Anzahl der Verspätungen deutlich. Das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{*,SPT}$ führt bei allen Bedarfsszenarien zu besseren Ergebnissen als das Modell $CLSP_{F,\Delta}$. Insbesondere bei steigender Last im Produktionssystem können erkennbar geringere Verspätungen realisiert werden. Durch das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ kann bei geringer Last im Produktionssystem die Anzahl der Verspätungen nicht verbessert werden. Bei steigender Last kann eine geringfügige Verbesserung gegenüber dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ erreicht werden. Das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ erzielt auch in diesen Experimenten mit Abstand die besten Ergebnisse hinsichtlich der Anzahl der verspäteten Aufträge. Die Ergebnisse zu den verspäteten Aufträgen sowie der durchschnitt-



| Bedarfsszenario | | $CLSP_{F,\Delta}$ | GROFF | $CLSP_{F,\Delta}^{*,ODD}$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ |
|-----------------|-------------|-------------------|-------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| S-1 | Rüstkosten | 413 | 413 | 415 | 413 | 462 |
| | Lagerkosten | 233 | 242 | 231 | 233 | 202 |
| S-2 | Rüstkosten | 457 | 453 | 471 | 462 | 536 |
| | Lagerkosten | 227 | 239 | 219 | 224 | 191 |
| S-3 | Rüstkosten | 502 | 492 | 533 | 511 | 624 |
| | Lagerkosten | 205 | 224 | 199 | 202 | 167 |
| S-4 | Rüstkosten | 539 | 528 | 606 | 562 | 711 |
| | Lagerkosten | 180 | 195 | 171 | 177 | 133 |

Tabelle 6.13.: Ermittelte Kosten je Modell bei Verwendung der Prioritätsregel ODD.

| Bedarfs- szenario | Verspätete Aufträge | Lagerkosten | Rüstkosten | Gesamtkosten |
|----------------------|---------------------|-------------|------------|----------------------------|
| | | | | (Rüstkosten + Lagerkosten) |
| S-1 | -94,92% | -13,44% | 11,94% | 2,78% |
| S-2 | -89,80% | -15,91% | 17,37% | 6,30% |
| S-3 | -91,42% | -18,41% | 24,18% | 11,85% |
| S-4 | -91,69% | -26,00% | 31,96% | 17,47% |

Tabelle 6.14.: Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ bei Verwendung der Prioritätsregel ODD.

lichen Rüst- und Lagerkosten sind in den Tabellen 6.15 und 6.16 aufgeführt.²¹ Da eine Verbesserung der Verspätungen gleichzeitig eine Erhöhung der Gesamtkosten zur Folge hat, werden in Tabelle 6.17 die prozentualen Abweichungen des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ zum Modell $CLSP_{F,\Delta}$ beschrieben. Im Mittel können die Verspätungen um über 60% reduziert werden. Hierbei steigen die Gesamtkosten um bis zu 17,4% an. Insgesamt zeigt sich, dass durch die Verwendung der Prioritätsregel SPT grundsätzlich das Potential der Reduktion der verspäteten Aufträge geringer ausfällt. Im Vergleich zu den Prioritätsregeln FIFO und ODD konnte das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ eine durchschnittliche Reduktion zwischen 70% und 90% erzielen. Bei Verwendung der Prioritätsregel SPT fällt diese Reduktion mit ca. 60% geringer aus.

²¹Weitere numerische Ergebnisse zu diesem Simulationsexperiment sind im Anhang in Kapitel A.2.3 aufgeführt.



| Bedarfsszenario | $CLSP_{F,\Delta}$ | GROFF | $CLSP_{F,\Delta}^{*,SPT}$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ |
|-----------------|-------------------|-------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| S-1 | 108 | 93 | 95 | 108 | 39 |
| S-2 | 257 | 299 | 249 | 262 | 107 |
| S-3 | 546 | 576 | 476 | 526 | 189 |
| S-4 | 848 | 902 | 692 | 782 | 301 |

Tabelle 6.15.: Ermittelte Anzahl verspäteter Aufträge je Modell bei Verwendung der Prioritätsregel SPT.

| Bedarfsszenario | | $CLSP_{F,\Delta}$ | GROFF | $CLSP_{F,\Delta}^{*,SPT}$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ |
|-----------------|-------------|-------------------|-------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| S-1 | Rüstkosten | 414 | 415 | 416 | 414 | 463 |
| | Lagerkosten | 229 | 238 | 229 | 230 | 200 |
| S-2 | Rüstkosten | 458 | 454 | 469 | 463 | 538 |
| | Lagerkosten | 223 | 235 | 217 | 220 | 187 |
| S-3 | Rüstkosten | 503 | 491 | 530 | 512 | 628 |
| | Lagerkosten | 201 | 223 | 196 | 199 | 160 |
| S-4 | Rüstkosten | 537 | 525 | 590 | 563 | 718 |
| | Lagerkosten | 181 | 198 | 172 | 174 | 125 |

Tabelle 6.16.: Ermittelte Kosten je Modell bei Verwendung der Prioritätsregel SPT.

6.4.3. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel EDD

In einem weiteren Experiment wird die Prioritätsregel EDD angewendet. Die ermittelte Anzahl der verspäteten Aufträge sowie die Rüst- und Lagerkosten je Bedarfsszenario und Modell sind in den Tabellen 6.18 und 6.19 aufgeführt.²² Bei Verwendung dieser Prioritätsregel zeigt sich, dass das Groff-Verfahren die höchste Anzahl an verspäteten Aufträgen erzielt. Wie bei den anderen Experimenten, kann das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{*,EDD}$ mit der Verwendung gemessener mittlerer Durchlaufzeiten die Planungsergebnisse grundsätzlich verbessern. Auch das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ kann bei einer höheren Last im Produktionssystem eine Verbesserung gegenüber dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ erzielen, es kann aber nicht die zum Teil deutlich besseren Ergebnisse des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{*,EDD}$ erreichen. Durch das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ können die Planungsergebnisse nochmal deutlich verbessert werden. Insgesamt fällt die Reduktion der Anzahl von verspäteten Aufträgen, wie bei Verwendung der anderen Prioritätsregeln, eher geringer aus. So kann, wie in Tabelle 6.20 dargestellt, bei Bedarfsszenario S-1 lediglich eine Reduktion von etwas über 37% erzielt werden. Bei den Bedarfsszenarien S-2 bis S-4 konnte eine Reduktion der Anzahl von verspäteten Aufträgen

²²Zusätzliche numerische Ergebnisse zu diesem Simulationsexperiment sind im Anhang in Kapitel A.2.4 aufgeführt.



| Bedarfs- szenario | Verspätete Aufträge | Lagerkosten | Rüstkosten | Gesamtkosten |
|----------------------|---------------------|-------------|------------|----------------------------|
| | | | | (Rüstkosten + Lagerkosten) |
| S-1 | -63,89% | -12,92% | 11,87% | 3,03% |
| S-2 | -58,37% | -16,42% | 17,55% | 6,42% |
| S-3 | -65,38% | -20,48% | 24,79% | 11,87% |
| S-4 | -64,50% | -30,99% | 33,66% | 17,35% |

Tabelle 6.17.: Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ bei Verwendung der Prioritätsregel SPT.

gen von über 60% erreicht werden. Hierbei war im Gegensatz ein Kostenanstieg von bis zu 18,6% zu vermerken.

| Bedarfsszenario | $CLSP_{F,\Delta}$ | GROFF | $CLSP_{F,\Delta}^{*,EDD}$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ |
|-----------------|-------------------|-------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| S-1 | 108 | 112 | 92 | 111 | 68 |
| S-2 | 340 | 364 | 299 | 333 | 124 |
| S-3 | 713 | 783 | 556 | 710 | 263 |
| S-4 | 1130 | 1232 | 907 | 1046 | 447 |

Tabelle 6.18.: Ermittelte Anzahl verspäteter Aufträge je Modell bei Verwendung der Prioritätsregel EDD.



| Bedarfsszenario | | $CLSP_{F,\Delta}$ | GROFF | $CLSP_{F,\Delta}^{*,EDD}$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ | $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ |
|-----------------|-------------|-------------------|-------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| S-1 | Rüstkosten | 414 | 415 | 417 | 414 | 464 |
| | Lagerkosten | 230 | 238 | 227 | 230 | 198 |
| S-2 | Rüstkosten | 460 | 455 | 475 | 464 | 538 |
| | Lagerkosten | 219 | 232 | 212 | 217 | 187 |
| S-3 | Rüstkosten | 506 | 495 | 542 | 515 | 629 |
| | Lagerkosten | 194 | 211 | 189 | 190 | 159 |
| S-4 | Rüstkosten | 541 | 531 | 616 | 566 | 720 |
| | Lagerkosten | 169 | 179 | 159 | 166 | 124 |

Tabelle 6.19.: Ermittelte Kosten je Modell bei Verwendung der Prioritätsregel EDD.

| Bedarfs-szenario | Verspätete Aufträge | Lagerkosten | Rüstkosten | Gesamtkosten |
|------------------|---------------------|-------------|------------|----------------------------|
| | | | | (Rüstkosten + Lagerkosten) |
| S-1 | -37,04% | -13,80% | 12,01% | 2,79% |
| S-2 | -63,53% | -14,88% | 17,15% | 6,81% |
| S-3 | -63,11% | -18,03% | 24,38% | 12,62% |
| S-4 | -60,44% | -27,09% | 32,91% | 18,61% |

Tabelle 6.20.: Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ basierend auf dem Modell $CLSP_{F,\Delta}$ bei Verwendung der Prioritätsregel EDD.

6.5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei der Verwendung von sogenannten *big-bucket-Modellen* zur Losgrößenplanung können die Abhängigkeiten und Einflüsse der nachgelagerten Planungsstufen sowie der tatsächlichen Durchführung der Bearbeitung nicht ausreichend berücksichtigt werden. Um diese Abhängigkeiten zumindest teilweise in die Planungsentscheidung mit einfließen zu lassen, wurden unterschiedliche Ansätze beschrieben und im Rahmen von Simulationsexperimenten bewertet. Zusätzlich wurde die Losgrößenplanung durch das heuristische Verfahren von Groff durchgeführt, da dieses Verfahren trotz der fehlenden Berücksichtigung von Kapazitäten in der industriellen Praxis oft angewendet wird. Durch diesen Vergleich wurde aufgezeigt, welche Auswirkungen eine grundsätzliche Vernachlässigung von beschränkten Kapazitäten hat. So zeigt sich, dass durch das Verfahren von Groff in der Regel die höchste Anzahl von verspäteten Aufträgen auftrat und somit dieses Verfahren die schlechtesten Planungsergebnisse liefert.

Das Modell $CLSP_{F,\Delta}$ verwendet aggregierte Kapazitäten sowie aggregierte Rüst- und Stückbearbeitungszeiten. Trotz der zusätzlichen Restriktion, dass ein Produktionslos die Länge

der Planungsperiode nicht überschreiten darf, wird konsequent die verfügbare Kapazität überschätzt, sodass eine hohe Anzahl von verspäteten Aufträgen resultiert. Dies war zu erwarten, da grundsätzlich in diesem Modell der mehrstufige Produktionsprozess nicht abgebildet ist und hierdurch die bestehenden Abhängigkeiten bei der Umsetzung der Produktionspläne nicht berücksichtigt werden. Diese nachgelagerten Abhängigkeiten sollen über die beschriebenen Modellerweiterungen antizipiert werden. Grundsätzlich folgen diese Modellerweiterungen zwei unterschiedlichen methodischen Ansätzen. Zum einen wurden im Modell $CLSP_{F,\Delta}^*$ gemessene Durchlaufzeiten verwendet, sodass hierdurch die Abhängigkeiten der nachgelagerten Produktion berücksichtigt werden können. Diese ermittelten Durchlaufzeiten waren unter Berücksichtigung des Bedarfsszenarios sowie der verwendeten Prioritätsregel gemessen worden. Zum anderen nutzen die Modelle $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ und $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ die Informationen der Clearing Funktionen um den nachgelagerten Bearbeitungsprozess zu antizipieren. Grundsätzlich ist hierbei die Clearing Funktion ohne Abhängigkeiten von Bedarfen sowie Prioritätsregeln ermittelt worden und hat somit einen allgemeinen Charakter.²³ In Abbildung 6.10 sind diese grundsätzlichen Vorgehensweisen nochmals zusammengefasst.

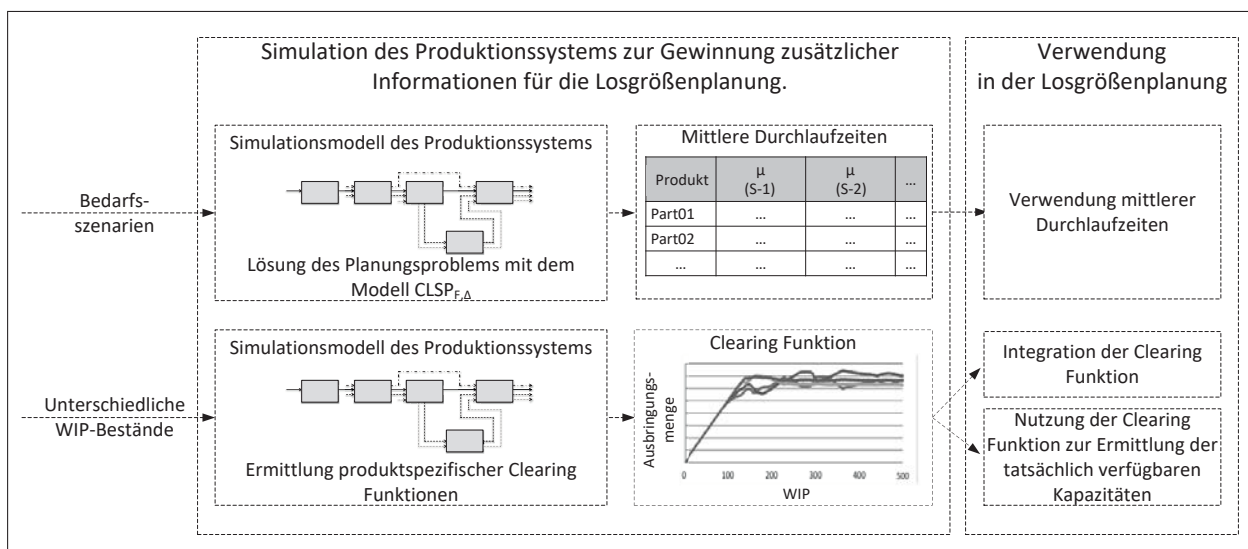


Abbildung 6.10.: Übersicht der in dieser Forschungsarbeit verwendeten unterschiedlichen Ansätze der Losgrößenplanung.

Durch die Verwendung von gemessenen Durchlaufzeiten kann das Modell $CLSP_{F,\Delta}^*$ die Planungsergebnisse verbessern. Insbesondere bei einer hohen Auslastung im Produktionssystem kann eine höhere Reduktion der Verspätungen erreicht werden. Die gemessenen mittleren Durchlaufzeiten (vgl. Tabellen 6.2 und 6.11) unterliegen einer zum Teil

²³Die Clearing Funktion wird unter Berücksichtigung unterschiedlicher WIP-Bestände ermittelt. Hierbei wird kein spezifischer Bedarfsverlauf zugrunde gelegt.

sehr hohen Streuung, was die Qualität dieser für die Verwendung im Entscheidungsmodell vermindert.²⁴ Trotzdem kann das Modell $CLSP_{F,\Delta}^*$ bessere Ergebnisse als das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ erzielen. Durch das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ können insgesamt die Planungsergebnisse nicht signifikant verbessert werden. Zudem zeigt sich, dass sich eine Verbesserung grundsätzlich nur bei einer hohen Auslastung realisieren lässt. Die direkte Integration der Clearing Funktion in das Entscheidungsmodell führt zusätzlich zu einer deutlichen Erhöhung der Entscheidungsvariablen, was sich negativ auf die Laufzeit zur Ermittlung einer Lösung auswirkt. Im Gegensatz dazu kann das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ in allen durchgeführten Experimenten die Anzahl an verspäteten Aufträgen deutlich reduzieren. Durch die Clearing Funktion ist es möglich, eine gute Abschätzung der verfügbaren Kapazitäten zu erhalten, sodass hierdurch die Planungsergebnisse deutlich verbessert werden können. Grundsätzlich führt eine Verbesserung der Kapazitätsabschätzung und somit eine Reduktion der verfügbaren Kapazität dazu, dass tendenziell kleinere Produktionslose gebildet werden. Dies führt zu geringeren Lagerkosten, steigert im Gegenzug aber die Rüstkosten. So zeigt sich, dass die Reduktion der Verspätungen gleichzeitig einen Anstieg der Gesamtkosten zur Folge hat. Im Vergleich zur prozentualen Reduktion der Verspätungen fällt die prozentuale Erhöhung der Gesamtkosten vergleichsweise gering aus. Zudem ist zu beachten, dass keinerlei Opportunitätskosten für verspätete Aufträge berücksichtigt wurden, sodass die Kosteneinsparungen aufgrund einer besseren Termineinhaltung im Einzelfall ebenfalls gesondert zu bewerten ist.

In der industriellen Praxis wird die Abarbeitung der Produktionsaufträge oft durch einfache Prioritätsregeln gesteuert. In einer erweiterten Betrachtung wurde der Einfluss unterschiedlicher Prioritätsregeln untersucht. Hierbei wurden die Prioritätsregeln ODD, SPT und EDD verwendet (vgl. Kapitel 6.4). Die Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass sich die Ergebnisse der einzelnen Modelle im Vergleich zueinander grundsätzlich nicht ändern. Weiterhin können durch das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ die deutlichsten Verbesserungen erzielt werden. Trotzdem zeigt sich, dass, abhängig von der Prioritätsregel, die Höhe der Reduktion der Verspätung unterschiedlich hoch ausfällt und somit das Potential einer Verbesserung der Lösung von der Prioritätsregel abhängt (vgl. Tabelle 6.21).

²⁴Durch diese hohen Streuungen werden die tatsächlichen Durchlaufzeiten unter- bzw. überschätzt. Insbesondere dann, wenn die tatsächlichen Durchlaufzeiten höher sind als die durch die Messungen angenommenen, vermindert sich die Qualität der Planungsergebnisse.



| Bedarfs- szenario | Prioritäts- regel | Verspätete Aufträge | Lagerkosten | Rüstkosten | Gesamtkosten (Rüstkosten + Lagerkosten) |
|----------------------|----------------------|------------------------|-------------|------------|--|
| S-1 | FIFO | -81,01% | -13,18% | 11,90% | 2,89% |
| | ODD | -94,92% | -13,44% | 11,94% | 2,78% |
| | SPT | -63,89% | -12,92% | 11,87% | 3,03% |
| | EDD | -37,04% | -13,80% | 12,01% | 2,79% |
| S-2 | FIFO | -72,45% | -15,47% | 17,38% | 6,62% |
| | ODD | -89,80% | -15,91% | 17,37% | 6,30% |
| | SPT | -58,37% | -16,42% | 17,55% | 6,42% |
| | EDD | -63,53% | -14,88% | 17,15% | 6,81% |
| S-3 | FIFO | -80,71% | -14,95% | 23,79% | 13,12% |
| | ODD | -91,42% | -18,41% | 24,18% | 11,85% |
| | SPT | -65,38% | -20,48% | 24,79% | 11,87% |
| | EDD | -63,11% | -18,03% | 24,38% | 12,62% |
| S-4 | FIFO | -73,99% | -23,87% | 32,01% | 18,87% |
| | ODD | -91,69% | -26,00% | 31,96% | 17,47% |
| | SPT | -64,50% | -30,99% | 33,66% | 17,35% |
| | EDD | -60,44% | -27,09% | 32,91% | 18,61% |

Tabelle 6.21.: Prozentuale Abweichungen der Zielgrößen des Modells $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ im Vergleich zum Modell $CLSP_{F,\Delta}$ je Bedarfsszenario und Prioritätsregel.



7. Fazit und Ausblick

In Produktionssystemen mit knappen Ressourcen und Kapazitäten führt eine Erhöhung der Last im Sinne einer Erhöhung der *work in process (WIP)*-Bestände zu einer nicht linearen Erhöhung der Durchlaufzeiten. Die führt zu einer nicht linearen Abhängigkeit der WIP-Bestände und der Ausbringungsmengen, welche durch sogenannte Clearing Funktionen beschrieben werden können. In der Literatur werden solche Clearing Funktionen formal auf Basis von Modellen, bekannt aus der Warteschlangentheorie, abgeleitet. Bei komplexeren Produktionssystemen können solche Clearing Funktionen anhand von Simulationen ermittelt werden.

In dieser Forschungsarbeit wurde das Konzept der Clearing Funktion detailliert beschrieben und die in der Literatur bestehenden unterschiedlichen Ansätze zur Ermittlung von Clearing Funktionen aufgezeigt. Durch Langzeitsimulationen erfolgt in dieser Forschungsarbeit eine Ermittlung von produktspezifischen Clearing Funktionen. Durch dieses Vorgehen werden zu unterschiedlichen WIP-Beständen die jeweiligen Ausbringungsmengen gemessen. Die Messung über einen langen Simulationshorizont stellt signifikante Kennzahlen sicher und es erfolgt keine Regression der Daten(punkte) auf eine vorgegebene funktionale Form. Mit dieser Methodik wird, auf Basis eines Produktionssystems mit Vorliegen einer geschlossenen Produktion, die Ermittlung von produktspezifischen Clearing Funktionen durchgeführt. Die Kurven zeigen bei höheren WIP-Beständen und somit höheren Auslastungen im Produktionssystem eine ausgeprägte Dynamik, sodass die Effekte der vorliegenden Ressourcenkonkurrenzen der jeweiligen Produkte berücksichtigt werden können.

Die aus der Literatur bekannten Ansätze zur Verwendung einer Clearing Funktion in Entscheidungsmodellen zur Auftragsfreigabe wurden aufgezeigt. Basierend auf diesen Überlegungen erfolgte die Integration der Clearing Funktion in ein Modell zur Auftragsfreigabe. Hierbei wurden die Clearing Funktionen direkt in das Entscheidungsmodell integriert, sodass die ausgeprägte Dynamik der Ausbringungsmengen erhalten bleibt. Zur Berücksichtigung der geschlossenen Produktion und der damit verbundenen losweisen Bearbeitung wurde das Modell erweitert. Durch diese Erweiterung können die Durchlaufzeiten der einzelnen Freigabemengen in Abhängigkeit der Clearing Funktion bestimmt werden (Modell AFP^{CF-DLZ}). Die Simulationsexperimente zu diesen Modellen zeigen, dass durch die Integration der Clearing Funktionen und der Ermittlung der Durchlaufzeiten je Los die Planungsergebnisse signifikant verbessert werden konnten und hierdurch die Fehlmengen deutlich reduziert wurden.

Oft ist eine exakte Vorhersage der tatsächlichen Bedarfe nur schwer möglich, sodass in der Regel Bedarfsunsicherheiten vorliegen. Durch die Verwendung von Servicegraden kann eine Planung trotz Bedarfsunsicherheiten effektiv erfolgen. Basierend auf den in der Li-



teratur vorgeschlagenen Erweiterungen der Modelle zur Auftragsfreigabe um einen Servicegrad wird auch das in dieser Forschungsarbeit entwickelte Modell in diesem Sinne erweitert. Hierbei wurde neben einem wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad (Modell $AFP_{\alpha_{WBZ}}^{CF-DLZ}$) auch ein Beta-Servicegrad untersucht (Modell AFP_{β}^{CF-DLZ}). In beiden Modellvarianten wurde durch Simulationsexperimente aufgezeigt, dass unter Berücksichtigung von Bedarfsunsicherheiten mit diesem Ansatz eine effektive Planung erfolgen kann und die angestrebten Servicegrade erreicht werden können.

Die Clearing Funktion beschreibt die Abhängigkeiten der Arbeitslast und der Ausbringungsmenge im Produktionssystem. Hierbei werden die durch die Produktion bedingten dynamischen Abhängigkeiten einer Bearbeitung antizipiert. Bei der Losgrößenplanung werden im Rahmen einer Werkstattfertigung in der Regel sogenannte *big-bucket-Modelle* verwendet. Durch diese Planungsmodelle wird keine Bearbeitungsreihenfolge der Produktionslose vorgegeben, was in den nachgelagerten detaillierteren Planungsstufen zu unzulässigen Plänen führen kann. Im Rahmen der Losgrößenplanung wurde der Einsatz der Clearing Funktion untersucht. Hierzu erfolgte eine direkte Integration der Clearing Funktion in das Entscheidungsmodell, um eine dynamische, planungsabhängige Reduktion der verfügbaren Kapazitäten zu erzielen (Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$). In einem weiteren Ansatz wurde die Clearing Funktion zur Abschätzung der effektiv verfügbaren Kapazitäten genutzt (Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$). In einem Vergleichsmodell wurde eine Losgrößenplanung unter Verwendung von gemessenen mittleren Durchlaufzeiten verwendet (Modell $CLSP_{F,\Delta}^*$). Die Simulationsergebnisse zeigen, dass grundsätzlich eine Verbesserung durch das Modell $CLSP_{F,\Delta}^*$ erzielt werden kann. Das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-I}$ kann die Ergebnisse in der Regel zwar verbessern, allerdings zeigt sich, dass bei diesem Ansatz die erwünschte dynamische Reduktion der verfügbaren Kapazitäten zu gering ausfällt und aus diesem Grund die Ergebnisse des Modells $CLSP_{F,\Delta}^*$ nicht erreicht werden können. Eine signifikante Verbesserung der Planungsergebnisse in allen Simulationsexperimenten konnte durch das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ realisiert werden. Mit diesem Modell konnten mit Abstand die besten Ergebnisse hinsichtlich der Reduktion der Anzahl von verspäteten Aufträgen erreicht werden. In einer erweiterten Betrachtung wurde die Verwendung von unterschiedlichen Prioritätsregeln untersucht. Auch bei diesen Experimenten zeigt sich, dass das Modell $CLSP_{F,\Delta}^{CF-E}$ mit Abstand die besten Resultate erzielt. Diese Untersuchungen belegen, dass der Ansatz zur Verwendung der Clearing Funktion als Abschätzung der tatsächlich verfügbaren Kapazitäten auch bei unterschiedlichen Prioritätsregeln uneingeschränkt eingesetzt werden kann und eine Verbesserung der Ergebnisse ermöglicht.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zeigen, dass durch die Verwendung von Clearing Funktionen in unterschiedlichen Planungsmodellen, die Planungsergebnisse verbessert werden können. In weiteren Forschungsbemühungen und weiterführenden Arbeiten bietet sich eine Betrachtung der Clearing Funktionen auf alternative Fertigungstypen wie zum Beispiel einer Fließfertigung an. Zudem können die Ansätze zur Auftragsfreigabe analog zu den Untersuchungen zur Losgrößenplanung hinsichtlich der Abhängigkeiten der nachgelagerten Reihenfolgeplanung ausgedehnt werden. Auch der Einsatz einer optimalen



Reihenfolgeplanung kann hierbei Gegenstand von weiterführenden Forschungsbemühungen sein.

Grundsätzlich ist die Verwendung der Clearing Funktion im Sinne der Planungshierarchie auch in höheren Planungsebenen denkbar. So ist zum Beispiel bereits bei einer Produktionsprogrammplanung durch die Verwendung der Clearing Funktion eine verbesserte Abschätzung der verfügbaren Kapazitäten möglich, was eine verbesserte Produktionsplanung in der gesamten Planungshierarchie begünstigt.

Ein weiteres Forschungsfeld besteht in der Verwendung der Clearing Funktion im Rahmen der mehrstufigen Losgrößenplanung. Eine Clearing Funktion kann so entweder über mehrere oder für jede einzelne Fertigungs- bzw. Dispositionsstufe ermittelt und im Rahmen einer mehrstufigen Planung verwendet werden. Die dynamischen Einflüsse einer mehrstufigen Produktion können hierdurch besser berücksichtigt und antizipiert werden.





A. Anhang



A.1. Detailergebnisse zu Kapitel 5

A.1.1. Ergebnisse des Modells AFP_{ρ}^{FDLZ}

| Szenario | ρ | Anteil verspätete Aufträge | Mittelwert Verspätung | Streuung Verspätung | WIP- Bestand | Lager- bestand | Fehlmenge | Auslastung | Anteil Fehlmenge zum Gesamtbedarf |
|----------|--------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|-------------------|-----------|------------|--------------------------------------|
| S-1 | 1,0 | 9,80% | 0,10 | 0,31 | 30485 | 22844 | 76015 | 74,39% | 13,14% |
| | 0,9 | 9,99% | 0,10 | 0,31 | 30229 | 22913 | 76007 | 74,32% | 13,14% |
| | 0,8 | 9,45% | 0,10 | 0,30 | 29104 | 24850 | 72752 | 74,05% | 12,58% |
| | 0,7 | 8,75% | 0,09 | 0,29 | 22886 | 27464 | 65785 | 73,85% | 11,37% |
| | 0,6 | 7,84% | 0,08 | 0,27 | 14311 | 36480 | 59136 | 72,65% | 10,22% |
| S-2 | 1,0 | 20,35% | 0,22 | 0,45 | 93431 | 59638 | 171100 | 83,36% | 27,48% |
| | 0,9 | 19,63% | 0,21 | 0,43 | 89180 | 58804 | 164611 | 83,39% | 26,44% |
| | 0,8 | 18,66% | 0,20 | 0,42 | 74675 | 63665 | 153438 | 82,82% | 24,65% |
| | 0,7 | 17,49% | 0,18 | 0,41 | 63608 | 72463 | 145080 | 82,19% | 23,30% |
| | 0,6 | 17,31% | 0,18 | 0,39 | 49702 | 74699 | 137497 | 81,54% | 22,08% |
| S-3 | 1,0 | 22,04% | 0,24 | 0,47 | 109191 | 58355 | 190291 | 86,16% | 32,90% |
| | 0,9 | 21,18% | 0,23 | 0,46 | 103147 | 59416 | 181333 | 86,22% | 31,35% |
| | 0,8 | 20,99% | 0,22 | 0,45 | 89013 | 63374 | 178060 | 85,86% | 30,78% |
| | 0,7 | 18,85% | 0,19 | 0,41 | 69624 | 82090 | 152649 | 85,19% | 26,39% |
| | 0,6 | 17,81% | 0,19 | 0,41 | 53139 | 95327 | 140414 | 83,72% | 24,27% |
| S-4 | 1,0 | 31,39% | 0,36 | 0,56 | 210293 | 85080 | 309216 | 92,61% | 49,67% |
| | 0,9 | 30,63% | 0,35 | 0,56 | 204168 | 84810 | 300683 | 92,49% | 48,30% |
| | 0,8 | 29,43% | 0,33 | 0,53 | 181732 | 102295 | 281458 | 92,65% | 45,21% |
| | 0,7 | 27,53% | 0,30 | 0,52 | 153269 | 118411 | 257455 | 91,87% | 41,35% |
| | 0,6 | 31,86% | 0,37 | 0,59 | 145783 | 161121 | 283611 | 92,54% | 45,55% |

Tabelle A.1.: Detailergebnisse des Modells AFP_{ρ}^{FDLZ} bei der Reduktion des Parameters ρ .



A.1.2. Ergebnisse der Modelle $AFP_{0,7}^{FDLZ}$, $AFP_{0,6}^{FDLZ}$, $AFP_{0,6}^{CF-DLZ}$ sowie AFP_{CF-KON}

| Szenario | Modell | Anteil verspätete Aufträge | | Mittelwert | | Streuung | | WIP- | | Lager- | | Fehlmenge | | Auslastung | | Anteil Fehlmenge zum Gesamtbedarf | |
|----------|--------------------|----------------------------|--------|------------|------------|------------|------------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|------------|------------|-----------------------------------|------------------|
| | | Anteil | Anteil | Verspätung | Verspätung | Verspätung | Verspätung | Bestand | Bestand | bestand | bestand | Fehlmenge | Fehlmenge | Auslastung | Auslastung | zum Gesamtbedarf | zum Gesamtbedarf |
| S-1 | $AFP_{0,7}^{FDLZ}$ | 8,75% | 0,09 | 0,29 | 22886 | 27464 | 65785 | 73,85% | 11,37% | | | | | | | | |
| | $AFP_{0,6}^{FDLZ}$ | 7,84% | 0,08 | 0,27 | 14311 | 36480 | 59136 | 72,65% | 10,22% | | | | | | | | |
| | AFP_{CF-DLZ} | 3,15% | 0,03 | 0,18 | 2944 | 188611 | 11691 | 69,31% | 2,02% | | | | | | | | |
| | AFP_{CF-KON} | 4,26% | 0,04 | 0,20 | 4465 | 49948 | 39388 | 70,53% | 5,25% | | | | | | | | |
| S-2 | $AFP_{0,7}^{FDLZ}$ | 17,49% | 0,18 | 0,41 | 63608 | 72463 | 145080 | 82,19% | 23,30% | | | | | | | | |
| | $AFP_{0,6}^{FDLZ}$ | 17,31% | 0,18 | 0,39 | 49702 | 74699 | 137497 | 81,54% | 22,08% | | | | | | | | |
| | AFP_{CF-DLZ} | 5,51% | 0,06 | 0,24 | 12313 | 293778 | 25429 | 75,54% | 4,08% | | | | | | | | |
| | AFP_{CF-KON} | 10,20% | 0,10 | 0,30 | 14696 | 114161 | 66213 | 76,89% | 10,64% | | | | | | | | |
| S-3 | $AFP_{0,7}^{FDLZ}$ | 18,85% | 0,19 | 0,41 | 69624 | 82090 | 152649 | 85,19% | 26,39% | | | | | | | | |
| | $AFP_{0,6}^{FDLZ}$ | 17,81% | 0,19 | 0,41 | 53139 | 95327 | 140401 | 83,72% | 24,27% | | | | | | | | |
| | AFP_{CF-DLZ} | 6,98% | 0,07 | 0,27 | 12096 | 280053 | 31006 | 77,84% | 5,36% | | | | | | | | |
| | AFP_{CF-KON} | 12,48% | 0,13 | 0,33 | 16797 | 103877 | 84397 | 79,25% | 14,59% | | | | | | | | |
| S-4 | $AFP_{0,7}^{FDLZ}$ | 27,53% | 0,30 | 0,52 | 153269 | 118411 | 257455 | 91,87% | 41,35% | | | | | | | | |
| | $AFP_{0,6}^{FDLZ}$ | 31,86% | 0,37 | 0,59 | 145783 | 161121 | 283611 | 92,54% | 45,55% | | | | | | | | |
| | AFP_{CF-DLZ} | 10,74% | 0,11 | 0,34 | 42285 | 355686 | 53450 | 85,38% | 8,59% | | | | | | | | |
| | AFP_{CF-KON} | 22,63% | 0,23 | 0,43 | 43233 | 213280 | 139855 | 86,13% | 22,46% | | | | | | | | |

Tabelle A.2.: Detailergebnisse der Modelle $AFP_{0,7}^{FDLZ}$, $AFP_{0,6}^{FDLZ}$ sowie AFP_{CF-DLZ} und AFP_{CF-KON} .



A.1.3. Ergebnisse Alpha-Servicegrad 90%

Der Wert I_k^μ beschreibt den mittleren Bestand je Produkt k über den gesamten Simulationshorizont T^s .

| Szenario | Modell | Kennzahl | Part01 | Part02 | Part03 | Part04 | Part05 | Part06 | Part07 | Part08 |
|----------|--|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S-1 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 90,3% | 90,9% | 90,2% | 92,2% | 88,3% | 91,3% | 89,9% | 91,2% |
| | BS ¹ _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 33,6 | 31,9 | 33,5 | 32,0 | 34,3 | 32,7 | 34,3 | 32,2 |
| S-2 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 89,5% | 88,0% | 89,7% | 89,2% | 87,7% | 86,4% | 90,2% | 86,3% |
| | BS ¹ _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 32,8 | 33,8 | 33,2 | 33,1 | 33,4 | 33,5 | 33,1 | 33,5 |
| S-3 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 89,8% | 88,6% | 89,9% | 89,5% | 90,7% | 90,1% | 89,8% | 91,2% |
| | BS ¹ _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 50,0 | 49,6 | 48,9 | 50,0 | 48,6 | 48,9 | 48,6 | 49,1 |
| S-4 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 86,7% | 89,1% | 89,1% | 89,0% | 89,8% | 88,6% | 89,5% | 89,5% |
| | BS ¹ _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 47,8 | 50,1 | 49,2 | 50,0 | 47,5 | 48,5 | 48,9 | 49,1 |
| S-5 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 90,5% | 90,2% | 89,1% | 91,2% | 89,8% | 91,8% | 91,2% | 90,8% |
| | BS ¹ _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 33,8 | 33,9 | 35,1 | 33,0 | 34,1 | 32,8 | 32,6 | 33,0 |
| S-6 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 83,4% | 88,7% | 87,8% | 86,5% | 89,7% | 87,0% | 88,2% | 88,3% |
| | BS ¹ _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 33,5 | 34,7 | 34,4 | 33,9 | 34,7 | 34,2 | 32,7 | 33,2 |
| S-7 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 89,3% | 89,2% | 89,6% | 89,2% | 89,6% | 90,8% | 91,0% | 89,6% |
| | BS ¹ _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 48,4 | 48,4 | 49,7 | 48,1 | 49,7 | 47,6 | 48,2 | 49,4 |
| S-8 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 88,6% | 88,5% | 89,6% | 89,1% | 87,9% | 88,1% | 90,2% | 88,2% |
| | BS ¹ _{α_{WBZ}} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 48,6 | 48,4 | 48,7 | 49,4 | 49,1 | 47,6 | 48,3 | 49,7 |

Tabelle A.3.: Simulationsergebnisse für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} von 90%.



A.1.4. Ergebnisse Alpha-Servicegrad 95%

| Szenario | Modell | Kennzahl | Part01 | Part02 | Part03 | Part04 | Part05 | Part06 | Part07 | Part08 |
|----------|--|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S-1 | AFP _{α_{WBZ}} ^{CF-DLZ} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 94,7% | 94,4% | 95,7% | 95,9% | 94,2% | 95,1% | 95,2% | 95,6% |
| | BS _{α_{WBZ}} ^I | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 36,3 | 35,3 | 35,4 | 35,5 | 35,8 | 35,6 | 36,5 | 35,1 |
| S-2 | AFP _{α_{WBZ}} ^{CF-DLZ} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 93,1% | 91,0% | 94,9% | 94,1% | 94,4% | 93,2% | 94,9% | 93,7% |
| | BS _{α_{WBZ}} ^I | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 33,7 | 34,0 | 37,0 | 35,2 | 36,3 | 35,4 | 36,8 | 35,7 |
| S-3 | AFP _{α_{WBZ}} ^{CF-DLZ} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 94,4% | 94,8% | 95,4% | 95,0% | 94,5% | 93,1% | 94,5% | 95,8% |
| | BS _{α_{WBZ}} ^I | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 55,4 | 54,1 | 54,2 | 55,2 | 55,3 | 55,8 | 54,6 | 55,2 |
| S-4 | AFP _{α_{WBZ}} ^{CF-DLZ} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 92,5% | 93,5% | 93,8% | 93,7% | 94,6% | 93,7% | 94,3% | 94,0% |
| | BS _{α_{WBZ}} ^I | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 52,9 | 56,2 | 53,4 | 55,9 | 52,8 | 55,0 | 54,8 | 55,5 |
| S-5 | AFP _{α_{WBZ}} ^{CF-DLZ} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 95,6% | 95,2% | 94,6% | 95,1% | 95,2% | 96,3% | 96,7% | 96,2% |
| | BS _{α_{WBZ}} ^I | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 36,2 | 36,3 | 37,0 | 36,2 | 36,1 | 35,2 | 34,5 | 35,1 |
| S-6 | AFP _{α_{WBZ}} ^{CF-DLZ} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 93,3% | 88,7% | 92,0% | 93,1% | 93,4% | 93,6% | 91,0% | 93,4% |
| | BS _{α_{WBZ}} ^I | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 37,3 | 34,7 | 36,3 | 35,9 | 37,1 | 36,5 | 34,0 | 35,3 |
| S-7 | AFP _{α_{WBZ}} ^{CF-DLZ} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 94,8% | 95,3% | 95,4% | 94,7% | 94,2% | 94,6% | 95,7% | 94,6% |
| | BS _{α_{WBZ}} ^I | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 53,9 | 53,5 | 54,4 | 53,3 | 55,4 | 53,8 | 54,0 | 55,1 |
| S-8 | AFP _{α_{WBZ}} ^{CF-DLZ} | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 94,1% | 92,4% | 94,2% | 94,6% | 93,6% | 93,3% | 94,5% | 94,0% |
| | BS _{α_{WBZ}} ^I | $\alpha_{k,WBZ}$ I_k^μ | 53,9 | 53,9 | 54,1 | 54,3 | 54,2 | 52,6 | 53,8 | 54,8 |

Tabelle A.4.: Simulationsergebnisse für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} von 95%.



A.1.5. Ergebnisse Alpha-Servicegrad 97,5%

| Szenario | Modell | Kennzahl | Part01 | Part02 | Part03 | Part04 | Part05 | Part06 | Part07 | Part08 |
|----------|--|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S-1 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 97,0% | 96,1% | 97,6% | 97,2% | 97,3% | 97,4% | 97,6% | 97,8% |
| | BS ^I _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 40,0 | 39,1 | 39,1 | 39,8 | 38,5 | 39,0 | 39,7 | 38,5 |
| S-2 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 97,6% | 96,0% | 96,4% | 96,9% | 96,2% | 93,4% | 97,1% | 95,0% |
| | BS ^I _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 37,6 | 39,0 | 39,7 | 40,0 | 38,3 | 36,3 | 40,2 | 38,9 |
| S-3 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 96,5% | 96,9% | 97,5% | 97,6% | 97,1% | 95,8% | 96,5% | 97,8% |
| | BS ^I _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 62,2 | 60,9 | 60,9 | 61,4 | 62,1 | 62,7 | 61,0 | 62,1 |
| S-4 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 96,1% | 95,8% | 97,1% | 96,5% | 96,3% | 95,3% | 97,0% | 96,9% |
| | BS ^I _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 58,6 | 62,1 | 59,6 | 61,6 | 59,7 | 61,6 | 61,0 | 61,4 |
| S-5 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 97,6% | 97,4% | 96,3% | 97,2% | 97,7% | 97,9% | 98,3% | 98,4% |
| | BS ^I _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 39,9 | 39,8 | 40,9 | 39,9 | 39,2 | 39,2 | 38,5 | 38,6 |
| S-6 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 96,7% | 93,9% | 95,8% | 96,4% | 96,9% | 96,0% | 97,4% | 96,3% |
| | BS ^I _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 42,1 | 38,2 | 41,8 | 40,7 | 42,3 | 38,4 | 38,7 | 38,8 |
| S-7 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 97,2% | 97,2% | 98,1% | 97,5% | 96,8% | 96,8% | 97,6% | 97,7% |
| | BS ^I _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 60,9 | 60,1 | 60,5 | 59,3 | 62,0 | 60,8 | 61,2 | 60,6 |
| S-8 | AFP ^{CF-DLZ} _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 96,0% | 95,6% | 96,8% | 97,1% | 96,3% | 96,6% | 96,3% | 96,9% |
| | BS ^I _{α_{WBZ}} | α _{k,WBZ} I _k ^μ | 60,7 | 58,7 | 59,5 | 60,9 | 60,8 | 57,8 | 60,6 | 60,5 |

Tabelle A.5.: Simulationsergebnisse für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad α_{WBZ} von 97,5%.



A.1.6. Ergebnisse Beta-Servicegrad 90%

| Szenario | Modell | Kennzahl | Part01 | Part02 | Part03 | Part04 | Part05 | Part06 | Part07 | Part08 |
|----------|------------------------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S-1 | AFP ^{CF-DLZ} _β | β _k | 90,6% | 90,1% | 90,5% | 90,9% | 90,1% | 90,8% | 91,0% | 90,7% |
| | | I ^μ _k | 37,0 | 36,1 | 35,5 | 36,1 | 36,3 | 35,6 | 34,6 | 35,4 |
| | BS ¹ _β | β _k | 89,3% | 87,1% | 85,7% | 90,4% | 88,2% | 87,9% | 89,9% | 89,8% |
| | | I ^μ _k | 35,4 | 36,6 | 36,1 | 35,3 | 36,3 | 35,7 | 34,7 | 34,5 |
| S-2 | AFP ^{CF-DLZ} _β | β _k | 90,6% | 89,7% | 90,1% | 90,0% | 90,6% | 89,9% | 89,7% | 90,4% |
| | | I ^μ _k | 42,0 | 43,7 | 42,3 | 43,3 | 42,8 | 42,8 | 42,7 | 42,7 |
| | BS ¹ _β | β _k | 88,6% | 89,2% | 89,0% | 88,7% | 89,4% | 89,1% | 89,3% | 89,7% |
| | | I ^μ _k | 40,2 | 44,1 | 42,8 | 43,2 | 42,5 | 42,7 | 43,7 | 42,6 |
| S-3 | AFP ^{CF-DLZ} _β | β _k | 90,6% | 90,6% | 90,4% | 90,5% | 90,1% | 90,6% | 90,9% | 90,5% |
| | | I ^μ _k | 35,2 | 35,2 | 34,7 | 34,6 | 36,1 | 36,6 | 35,8 | 36,4 |
| | BS ¹ _β | β _k | 88,8% | 86,5% | 89,2% | 87,8% | 86,1% | 86,2% | 84,7% | 86,5% |
| | | I ^μ _k | 35,5 | 35,3 | 34,2 | 35,1 | 36,4 | 36,4 | 36,5 | 36,9 |
| S-4 | AFP ^{CF-DLZ} _β | β _k | 89,8% | 90,1% | 90,0% | 89,5% | 90,4% | 89,9% | 90,4% | 89,9% |
| | | I ^μ _k | 43,0 | 42,4 | 43,9 | 44,2 | 43,0 | 41,1 | 41,8 | 43,5 |
| | BS ¹ _β | β _k | 89,1% | 88,7% | 89,0% | 89,4% | 88,6% | 88,2% | 89,2% | 89,3% |
| | | I ^μ _k | 42,9 | 42,3 | 42,7 | 43,8 | 42,1 | 41,5 | 40,3 | 42,4 |

Tabelle A.6.: Simulationsergebnisse für einen Beta-Servicegrad β von 90%.



A.1.7. Ergebnisse Beta-Servicegrad 95%

| Szenario | Modell | Kennzahl | Part01 | Part02 | Part03 | Part04 | Part05 | Part06 | Part07 | Part08 |
|----------|------------------------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S-1 | AFP ^{CF-DLZ} _β | β _k | 95,1% | 95,0% | 95,1% | 95,5% | 94,9% | 95,2% | 95,4% | 95,3% |
| | | I ^μ _k | 33,4 | 34,0 | 32,5 | 31,7 | 33,0 | 32,0 | 31,4 | 32,5 |
| | BS ¹ _β | β _k | 93,3% | 92,6% | 94,4% | 94,9% | 93,6% | 94,2% | 94,3% | 94,7% |
| | | I ^μ _k | 34,6 | 34,8 | 33,2 | 33,2 | 34,8 | 33,3 | 33,1 | 33,5 |
| S-2 | AFP ^{CF-DLZ} _β | β _k | 94,4% | 94,5% | 95,1% | 94,9% | 95,3% | 94,5% | 94,7% | 95,3% |
| | | I ^μ _k | 45,2 | 46,3 | 45,6 | 44,4 | 44,3 | 44,5 | 45,4 | 45,9 |
| | BS ¹ _β | β _k | 93,8% | 94,0% | 94,1% | 94,6% | 93,9% | 93,6% | 94,4% | 94,5% |
| | | I ^μ _k | 43,2 | 46,7 | 44,7 | 46,3 | 44,2 | 44,9 | 44,8 | 45,4 |
| S-3 | AFP ^{CF-DLZ} _β | β _k | 95,1% | 95,2% | 94,9% | 95,0% | 95,0% | 95,5% | 95,6% | 95,4% |
| | | I ^μ _k | 33,6 | 32,9 | 32,1 | 33,2 | 33,8 | 33,5 | 32,6 | 34,6 |
| | BS ¹ _β | β _k | 91,9% | 93,5% | 94,2% | 92,4% | 91,9% | 93,5% | 92,9% | 91,4% |
| | | I ^μ _k | 35,1 | 33,6 | 33,2 | 34,0 | 35,6 | 32,6 | 34,2 | 35,4 |
| S-4 | AFP ^{CF-DLZ} _β | β _k | 94,3% | 95,0% | 95,1% | 94,8% | 94,5% | 94,9% | 95,3% | 95,0% |
| | | I ^μ _k | 45,4 | 44,7 | 45,8 | 45,4 | 45,6 | 44,6 | 44,5 | 43,9 |
| | BS ¹ _β | β _k | 94,4% | 93,9% | 94,2% | 94,4% | 94,0% | 93,7% | 94,3% | 94,2% |
| | | I ^μ _k | 46,2 | 43,4 | 44,8 | 45,4 | 44,6 | 43,5 | 43,9 | 45,5 |

Tabelle A.7.: Simulationsergebnisse für einen Beta-Servicegrad β von 95%.



A.1.8. Ergebnisse Beta-Servicegrad 97,5%

| Szenario | Modell | Kennzahl | Part01 | Part02 | Part03 | Part04 | Part05 | Part06 | Part07 | Part08 |
|----------|------------------------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S-1 | AFP ^{CF-DLZ} _β | β _k | 97,5% | 97,4% | 97,5% | 97,6% | 97,0% | 97,5% | 97,5% | 97,6% |
| | | I ^μ _k | 32,5 | 31,9 | 32,1 | 31,9 | 32,4 | 31,3 | 32,0 | 31,9 |
| | BS ¹ _β | β _k | 97,5% | 96,7% | 95,8% | 96,6% | 96,2% | 94,6% | 96,9% | 96,2% |
| | | I ^μ _k | 32,2 | 33,2 | 33,1 | 32,6 | 34,3 | 32,9 | 32,8 | 33,2 |
| S-2 | AFP ^{CF-DLZ} _β | β _k | 96,9% | 96,6% | 97,6% | 97,2% | 97,2% | 96,8% | 97,4% | 97,8% |
| | | I ^μ _k | 49,4 | 49,2 | 48,5 | 49,5 | 48,1 | 48,6 | 48,3 | 49,4 |
| | BS ¹ _β | β _k | 96,1% | 96,4% | 97,0% | 97,0% | 96,6% | 96,1% | 97,0% | 96,9% |
| | | I ^μ _k | 47,0 | 49,8 | 48,3 | 49,3 | 46,7 | 48,5 | 47,7 | 48,5 |
| S-3 | AFP ^{CF-DLZ} _β | β _k | 97,5% | 97,5% | 97,1% | 97,4% | 97,3% | 97,7% | 97,9% | 97,8% |
| | | I ^μ _k | 33,0 | 33,0 | 33,0 | 32,9 | 33,0 | 32,4 | 32,2 | 32,4 |
| | BS ¹ _β | β _k | 96,3% | 96,7% | 96,8% | 96,1% | 95,9% | 96,8% | 95,5% | 96,6% |
| | | I ^μ _k | 33,2 | 33,4 | 33,2 | 33,4 | 34,8 | 32,5 | 33,6 | 33,6 |
| S-4 | AFP ^{CF-DLZ} _β | β _k | 97,4% | 97,6% | 97,5% | 97,5% | 97,3% | 97,5% | 97,6% | 97,4% |
| | | I ^μ _k | 48,2 | 48,8 | 49,6 | 48,0 | 49,5 | 47,5 | 47,9 | 49,3 |
| | BS ¹ _β | β _k | 96,9% | 96,3% | 96,9% | 96,9% | 96,7% | 96,4% | 96,7% | 96,9% |
| | | I ^μ _k | 48,6 | 47,7 | 47,9 | 48,5 | 48,6 | 47,2 | 47,4 | 49,3 |

Tabelle A.8.: Simulationsergebnisse für einen Beta-Servicegrad β von 97,5%.

A.2. Detailergebnisse zu Kapitel 6

A.2.1. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel FIFO

| Szenario | Modell | Auslastung | Anzahl verspätete Aufträge | Lagerkosten | | Anzahl Lose | Anzahl Rüstvorgänge | Rüstkosten gesamt | Gesamtkosten |
|----------|-------------------------------------|------------|----------------------------|-------------|--------|-------------|---------------------|-------------------|--------------|
| | | | | gesamt | gesamt | | | | |
| S-1 | CLSP _{F,Δ} | 49% | 79 | 231780 | 3500 | 11148 | 413186 | 644966 | |
| | GROFF | 49% | 66 | 240779 | 3495 | 11171 | 413870 | 654649 | |
| | CLSP* _{F,Δ} | 49% | 76 | 228719 | 3530 | 11267 | 417207 | 645926 | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 49% | 69 | 232766 | 3500 | 11148 | 413088 | 645854 | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 48% | 15 | 201224 | 3882 | 12424 | 462364 | 663588 | |
| S-2 | CLSP _{F,Δ} | 59% | 265 | 222949 | 3834 | 12324 | 457558 | 680507 | |
| | GROFF | 60% | 329 | 233653 | 3764 | 12225 | 454135 | 687788 | |
| | CLSP* _{F,Δ} | 59% | 229 | 212758 | 3980 | 12869 | 477913 | 690671 | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 59% | 285 | 218267 | 3879 | 12495 | 463130 | 681397 | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 57% | 73 | 188464 | 4493 | 14428 | 537061 | 725525 | |
| S-3 | CLSP _{F,Δ} | 69% | 705 | 192061 | 4153 | 13612 | 505355 | 697416 | |
| | GROFF | 70% | 754 | 210972 | 4019 | 13291 | 494225 | 705197 | |
| | CLSP* _{F,Δ} | 68% | 526 | 187384 | 4480 | 14758 | 547152 | 734536 | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 68% | 645 | 192097 | 4229 | 13868 | 513745 | 705842 | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 64% | 136 | 163345 | 4239 | 16806 | 625574 | 788919 | |
| S-4 | CLSP _{F,Δ} | 78% | 1115 | 166730 | 4375 | 14629 | 542097 | 708827 | |
| | GROFF | 79% | 1303 | 172526 | 4251 | 14364 | 532708 | 705234 | |
| | CLSP* _{F,Δ} | 75% | 827 | 160684 | 5044 | 16891 | 623754 | 784438 | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 77% | 1012 | 162575 | 4594 | 15357 | 566578 | 729153 | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 70% | 290 | 126925 | 5968 | 19263 | 715628 | 842553 | |

Tabelle A.9.: Detailergebnisse der Untersuchungen zur Losgrößenplanung bei Verwendung der Prioritätsregel FIFO.

A.2.2. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel ODD

| Szenario | Modell | Auslastung | | Anzahl verspätete Aufträge | | Lagerkosten | | Anzahl Lose | | Anzahl Rüstvorgänge | | Rüstkosten | | Gesamtkosten | |
|----------|--------------------------------------|------------|--|----------------------------|--------|-------------|-------|-------------|--------|---------------------|--|------------|--|--------------|--|
| | | % | | | | gesamt | | gesamt | | gesamt | | gesamt | | | |
| S-1 | CLSP _{F,Δ} | 49% | | 59 | 233242 | 3500 | 11138 | 412836 | 646078 | | | | | | |
| | GROFF | 49% | | 45 | 242292 | 3495 | 11154 | 413159 | 655451 | | | | | | |
| | CLSP ^{*,ODD} _{F,Δ} | 49% | | 56 | 231351 | 3516 | 11204 | 415126 | 646477 | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 49% | | 59 | 233001 | 3503 | 11154 | 413322 | 646323 | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 48% | | 3 | 201889 | 3882 | 12417 | 462128 | 664017 | | | | | | |
| S-2 | CLSP _{F,Δ} | 59% | | 196 | 227339 | 3834 | 12298 | 456508 | 683847 | | | | | | |
| | GROFF | 60% | | 248 | 239160 | 3764 | 12200 | 453168 | 692328 | | | | | | |
| | CLSP ^{*,ODD} _{F,Δ} | 59% | | 182 | 219141 | 3936 | 12687 | 470773 | 689914 | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 59% | | 190 | 223915 | 3875 | 12452 | 461513 | 685428 | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 57% | | 20 | 191168 | 4493 | 14394 | 535790 | 726958 | | | | | | |
| S-3 | CLSP _{F,Δ} | 68% | | 501 | 204624 | 4153 | 13532 | 502203 | 706827 | | | | | | |
| | GROFF | 70% | | 570 | 224169 | 4019 | 13230 | 491579 | 715748 | | | | | | |
| | CLSP ^{*,ODD} _{F,Δ} | 68% | | 371 | 198838 | 4393 | 14356 | 532790 | 731628 | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 68% | | 474 | 201839 | 4231 | 13814 | 511393 | 713232 | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 64% | | 43 | 166948 | 5239 | 16755 | 623620 | 790568 | | | | | | |
| S-4 | CLSP _{F,Δ} | 78% | | 902 | 179630 | 4375 | 14560 | 538948 | 718578 | | | | | | |
| | GROFF | 79% | | 974 | 194859 | 4251 | 14242 | 527809 | 722668 | | | | | | |
| | CLSP ^{*,ODD} _{F,Δ} | 75% | | 602 | 171281 | 4922 | 16395 | 606305 | 777586 | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 77% | | 752 | 176734 | 4591 | 15239 | 562072 | 738806 | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 69% | | 75 | 132925 | 5968 | 19144 | 711185 | 844110 | | | | | | |

Tabelle A.10.: Detailergebnisse der Untersuchungen zur Losgrößenplanung bei Verwendung der Prioritätsregel ODD.



A.2.3. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel SPT

| Szenario | Modell | Auslastung | Anzahl verspätete Aufträge | Lagerkosten | | Anzahl Lose | Anzahl Rüstvorgänge | Rüstkosten | | Gesamtkosten |
|----------|--------------------------------------|------------|----------------------------|-------------|--------|-------------|---------------------|------------|--------|--------------|
| | | | | gesamt | gesamt | | | gesamt | gesamt | |
| S-1 | CLSP _{F,Δ} | 49% | 108 | 229372 | 3500 | 11187 | 414063 | 643435 | | |
| | GROFF | 49% | 93 | 238148 | 3495 | 11207 | 414621 | 652769 | | |
| | CLSP ^{*,SPT} _{F,Δ} | 49% | 95 | 229311 | 3519 | 11251 | 416038 | 645349 | | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 49% | 108 | 229664 | 3500 | 11191 | 414130 | 643794 | | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 48% | 39 | 199744 | 3882 | 12453 | 463191 | 662935 | | |
| S-2 | CLSP _{F,Δ} | 59% | 257 | 223196 | 3833 | 12368 | 457950 | 681146 | | |
| | GROFF | 60% | 299 | 234929 | 3764 | 12271 | 454443 | 689372 | | |
| | CLSP ^{*,SPT} _{F,Δ} | 59% | 249 | 217247 | 3921 | 12713 | 469173 | 686420 | | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 59% | 262 | 219678 | 3878 | 12542 | 463494 | 683172 | | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 57% | 107 | 186547 | 4493 | 14481 | 538321 | 724868 | | |
| S-3 | CLSP _{F,Δ} | 68% | 546 | 201115 | 4154 | 13604 | 503128 | 704243 | | |
| | GROFF | 70% | 576 | 222783 | 4019 | 13264 | 490715 | 713498 | | |
| | CLSP ^{*,SPT} _{F,Δ} | 68% | 476 | 195610 | 4373 | 14408 | 529668 | 725278 | | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 68% | 526 | 199042 | 4230 | 13883 | 512235 | 711277 | | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 64% | 189 | 159935 | 5240 | 16904 | 627869 | 787804 | | |
| S-4 | CLSP _{F,Δ} | 77% | 848 | 181196 | 4375 | 14566 | 537073 | 718269 | | |
| | GROFF | 78% | 902 | 197626 | 4251 | 14231 | 525107 | 722733 | | |
| | CLSP ^{*,SPT} _{F,Δ} | 76% | 692 | 191578 | 4818 | 16124 | 589791 | 761369 | | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 76% | 782 | 174127 | 4593 | 15334 | 562967 | 737094 | | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 70% | 301 | 125040 | 5968 | 19373 | 717840 | 842880 | | |

Tabelle A.11.: Detaillierergebnisse der Untersuchungen zur Losgrößenplanung bei Verwendung der Prioritätsregel SPT.

A.2.4. Ergebnisse bei Verwendung der Prioritätsregel EDD

| Szenario | Modell | Auslastung | | Anzahl verspätete Aufträge | | Lagerkosten | | Anzahl Lose | | Anzahl Rüstvorgänge | | Rüstkosten | | Gesamtkosten | |
|----------|--------------------------------------|------------|------|----------------------------|------|-------------|--------|-------------|--|---------------------|--|------------|--|--------------|--|
| | | % | | | | gesamt | | gesamt | | gesamt | | gesamt | | gesamt | |
| S-1 | CLSP _{F,Δ} | 49% | 108 | 229989 | 3500 | 11173 | 414061 | 644050 | | | | | | | |
| | GROFF | 49% | 112 | 237797 | 3495 | 11200 | 414852 | 652649 | | | | | | | |
| | CLSP ^{*,EDD} _{F,Δ} | 50% | 92 | 226993 | 3523 | 11278 | 417349 | 644342 | | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 49% | 111 | 230006 | 3503 | 11189 | 414428 | 644434 | | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 48% | 68 | 198245 | 3882 | 12463 | 463800 | 662045 | | | | | | | |
| S-2 | CLSP _{F,Δ} | 59% | 340 | 219174 | 3834 | 12378 | 459552 | 678726 | | | | | | | |
| | GROFF | 60% | 364 | 232148 | 3764 | 12266 | 455259 | 687407 | | | | | | | |
| | CLSP ^{*,EDD} _{F,Δ} | 59% | 299 | 212344 | 3953 | 12818 | 475155 | 687499 | | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 59% | 333 | 216830 | 3874 | 12529 | 464032 | 680862 | | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 57% | 124 | 186553 | 4493 | 14465 | 538381 | 724934 | | | | | | | |
| S-3 | CLSP _{F,Δ} | 69% | 713 | 194065 | 4154 | 13633 | 505846 | 699911 | | | | | | | |
| | GROFF | 71% | 783 | 211066 | 4019 | 13316 | 494728 | 705794 | | | | | | | |
| | CLSP ^{*,EDD} _{F,Δ} | 68% | 556 | 188913 | 4447 | 14655 | 542006 | 730919 | | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 69% | 710 | 189873 | 4230 | 13923 | 515333 | 705206 | | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 64% | 263 | 159084 | 5240 | 16907 | 629158 | 788242 | | | | | | | |
| S-4 | CLSP _{F,Δ} | 78% | 1130 | 169478 | 4375 | 14622 | 541374 | 710852 | | | | | | | |
| | GROFF | 80% | 1232 | 179404 | 4251 | 14316 | 530550 | 709954 | | | | | | | |
| | CLSP ^{*,EDD} _{F,Δ} | 75% | 907 | 159340 | 5000 | 16756 | 616484 | 775824 | | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-I} _{F,Δ} | 77% | 1046 | 165828 | 4590 | 15359 | 566406 | 732234 | | | | | | | |
| | CLSP ^{CF-E} _{F,Δ} | 70% | 447 | 123571 | 5968 | 19372 | 719555 | 843126 | | | | | | | |

Tabelle A.12.: Detailergebnisse der Untersuchungen zur Losgrößenplanung bei Verwendung der Prioritätsregel EDD.



Literaturverzeichnis

- [Adam 1987] ADAM, Dietrich: *Retrograde Terminierung, ein Ansatz zu verbesserter Fertigungssteuerung bei Werkstattfertigung: Institut für Industrie- und Krankenhausbetriebslehre der westfälischen Wilhelms-Universität*. Münster, 1987. – Institut für Industrie- und Krankenhausbetriebslehre der westfälischen Wilhelms-Universität
- [Albey u. a. 2014] ALBEY, Erinċ ; BILGE, Ümit ; UZSOY, Reha: An exploratory study of disaggregated clearing functions for production systems with multiple products. In: *International Journal of Production Research* (2014), S. 1–22
- [Alexopoulos 2007] ALEXOPOULOS, Christos: Statistical Analysis of Simulation Output: State of the Art. In: *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference* (2007), S. 150–161
- [Alexopoulos u. a. 2011] ALEXOPOULOS, Christos ; GOLDSMAN, David ; WILSON, James: Overlapping Batch Means: Something More For Nothing? In: *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference* (2011), S. 401–411
- [Almeder u. Traxler 2015] ALMEDER, Christian ; TRAXLER, Renate: Das mehrstufige kapazitierte Losgrößenproblem. In: CLAUS, Thorsten (Hrsg.) ; HERRMANN, Frank (Hrsg.) ; MANITZ, Michael (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin : Gabler, 2015, S. 89–108
- [Altiȯk u. Melamed 2007] ALTIOK, Tayfur ; MELAMED, Benjamin: *Simulation modeling and analysis with Arena*. Amsterdam and Boston : Academic Press, 2007
- [Aouam u. Uzsoy 2012] AOUAM, Tarik ; UZSOY, Reha: Chance-Constraint-Based Heuristics for Production Planning in the Face of Stochastic Demand and Workload-Dependent Lead Times. In: ARMBRUSTER, Dieter (Hrsg.) ; KEMPF, Karl G. (Hrsg.): *Decision Policies for Production Networks*. London : Springer London, 2012, S. 173–208
- [Arnold 2008] ARNOLD, Dieter: *Handbuch Logistik*. 3., neu bearbeitete Aufl. Berlin : Springer, 2008
- [Asmundsson u. a. 2009] ASMUNDSSON, Jakob ; RARDIN, Ronald L. ; TURKSEVEN, Can H. ; UZSOY, Reha: Production planning with resources subject to congestion. In: *Naval Research Logistics* 56 (2009), Nr. 2, S. 142–157



- [Asmundsson u. a. 2002] ASMUNDSSON, Jakob ; RARDIN, Ronald L. ; UZSOY, Reha: Tractable nonlinear capacity models for production planning: Part I: Modeling and formulations: Reserach report. In: *Laboratory Extended Enterprises, Purdue Iniversity West Lafayette* (2002)
- [Asmundsson u. a. 2006] ASMUNDSSON, Jakob ; RARDIN, Ronald L. ; UZSOY, Reha: Tractable Nonlinear Production Planning Models for Semiconductor Wafer Fabrication Facilities. In: *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 19 (2006), Nr. 1, S. 95–111
- [Bang u. Kim 2010] BANG, June-Young ; KIM, Yeong-Dae: Hierarchical Production Planning for Semiconductor Wafer Fabrication Based on Linear Programming and Discrete-Event Simulation. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 7 (2010), Nr. 2, S. 326–336
- [Bechte 1984] BECHTE, Wolfgang: *Fortschritts-Berichte der VDI-Zeitschriften. Reihe 2, Betriebstechnik*. Bd. no. 70: *Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1984
- [Belt 1978] BELT, R.: Input/output illustrated. In: *Production and Inventory Management Journal* (1978), Nr. 1
- [Billington u. a. 1983] BILLINGTON, Peter ; MCCLAIN, John ; THOMAS, Joseph: Mathematical Programming Approaches to Capacity-Constrained MRP Systems: Review, Formulation and Problem Reduction. In: *Management Science* 29 (1983), Nr. 10, S. 1126–1141
- [Bookbinder u. Tan 1988] BOOKBINDER, James ; TAN, Jin-Yan: Strategies for the probabilistic lot-sizing problem with service-level constraints. In: *Management Science* 34 (1988), Nr. 9, S. 1096–1108
- [Bouleimen u. Lecocq 2003] BOULEIMEN, K. ; LECOCQ, H.: A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem and its multiple mode version. In: *European Journal of Operational Research* 149 (2003), Nr. 2, S. 268–281
- [Brucker u. a. 1999] BRUCKER, Peter ; DREXL, Andreas ; MÖHRING, Rolf ; NEUMANN, Klaus ; PESCH, Erwin: Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. In: *European Journal of Operational Research* 112 (1999), Nr. 1, S. 3–41
- [Brucker u. Knust 2006] BRUCKER, Peter ; KNUST, Sigrid: *Complex scheduling*. Berlin : Springer, 2006
- [Buschkühl u. a. 2010] BUSCHKÜHL, Lisbeth ; SAHLING, Florian ; HELBER, Stefan ; TEMPELMEIER, Horst: Dynamic capacitated lot-sizing problems: a classification and review of solution approaches. In: *OR Spectrum* 32 (2010), Nr. 2, S. 231–261



- [Byrne u. Bakir 1999] BYRNE, Mike ; BAKIR, Mehmet: Production planning using a hybrid simulation – analytical approach. In: *International Journal of Production Economics* 59 (1999), Nr. 1–3, S. 305–311
- [Byrne u. Hossain 2005] BYRNE, Mike ; HOSSAIN, Mosharraf: Production planning: An improved hybrid approach. In: *International Journal of Production Economics* 93-94 (2005), S. 225–229
- [Claus u. a. 2015] CLAUS, Thorsten ; HERRMANN, Frank ; MANITZ, Michael: Knappe Kapazitäten und Unsicherheit - Analytische Ansätze und Simulation in der Produktionsplanung und -steuerung. In: CLAUS, Thorsten (Hrsg.) ; HERRMANN, Frank (Hrsg.) ; MANITZ, Michael (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin : Gabler, 2015, S. 3–6
- [Corsten u. Gössinger 2012] CORSTEN, Hans ; GÖSSINGER, Ralf: *Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*. 13., vollst. überarb. und erw. Aufl. München : Oldenbourg, 2012
- [Damak u. a. 2009] DAMAK, N. ; JARBOUI, Bassem ; SIARRY, Partrick ; LOUKIL, Taicir: Differential evolution for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problems. In: *Computers & Operations Research* 36 (2009), Nr. 9, S. 2653–2659
- [Diederich 1989] DIEDERICH, Helmut: *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 6. Stuttgart : Kohlhammer, 1989
- [Dittrich 2003] DITTRICH, Jörg: *Dispositionsparameter von SAP R 3 PP: Einstellhinweise, Wirkungen, Nebenwirkungen ; [mit Online-Service zum Buch]*. 3., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2003
- [Domschke u. Drexl 2011] DOMSCHKE, Wolfgang ; DREXL, Andreas: *Einführung in Operations Research*. 8. Aufl. Berlin and Heidelberg [u.a.] : Springer, 2011
- [Donald Erlenkotter 1990] DONALD ERLENKOTTER: Ford Whitman Harris and the Economic Order Quantity Model. In: *Operations Research* (1990), Nr. 38, S. 937–946
- [Drexel u. a. 1994] DREXL, Andreas ; FLEISCHMANN, Bernhard ; GÜNTHER, Hans-Otto ; TEMPELMEIER, Horst: Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme. In: *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung* (1994), Nr. 46 (12), S. 1022–1045
- [Drexel u. Haase 1995] DREXL, Andreas ; HAASE, Knut: Proportional lot sizing and scheduling. In: *International Journal of Production Economics* (1995), Nr. 40, S. 73–87
- [Drexel u. Kimms 1997] DREXL, Andreas ; KIMMS, Alf: Lot sizing and scheduling — Survey and extensions. In: *European Journal of Operational Research* 99 (1997), Nr. 2, S. 221–235



- [Eckey u. a. 2000] ECKEY, Hans-Friedrich ; DREGER, Christian ; ECKEY-KOSFELD-DREGER ; KOSFELD, Reinhold: *Statistik: Grundlagen - Methoden - Beispiele*. 2., überarb. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 2000
- [Eley 2012] ELEY, Michael: *Simulation in der Logistik: Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation"*. Berlin and Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012
- [Fleischmann 1990] FLEISCHMANN, Bernhard: The discrete lot-sizing and scheduling problem. In: *European Journal of Operational Research* 44 (1990), Nr. 3, S. 337–348
- [Fleischmann 1994] FLEISCHMANN, Bernhard: The discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs. In: *European Journal of Operational Research* 75 (1994), Nr. 2, S. 395–404
- [Fleischmann u. Meyr 1997] FLEISCHMANN, Bernhard ; MEYR, Herbert: The general lotsizing and scheduling problem. In: *OR Spektrum* 19 (1997), Nr. 1, S. 11–21
- [Fleischmann u. Popp 1989] FLEISCHMANN, Bernhard ; POPP, Thomas: Das Dynamische Losgrößenproblem mit Reihenfolgeabhängigen Rüstkosten. In: PRESSMAR, Dieter (Hrsg.) ; JÄGER, Kurt E. (Hrsg.) ; KRALLMANN, Hermann (Hrsg.) ; SCHELLHAAS, Helmut (Hrsg.) ; STREITFERDT, Lothar (Hrsg.): *Operations Research Proceedings 1988* Bd. 1988. Berlin and Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1989, S. 510–515
- [Gebhard 2009] GEBHARD, Marina: *Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit*. 1. Aufl. Wiesbaden : Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009
- [Gonçalves u. a. 2008] GONÇALVES, José F. ; MENDES, Jorge J. ; RESENDE, Mauricio: A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem. In: *European Journal of Operational Research* 189 (2008), Nr. 3, S. 1171–1190
- [Graves 1986] GRAVES, Stephen: A Tactical Planning Model for a Job Shop. In: *Operations Research* 34 (1986), Nr. 4, S. 522–533
- [Günther u. Tempelmeier 2012] GÜNTHER, Hans-Otto ; TEMPELMEIER, Horst: *Produktion und Logistik*. 9. Berlin : Springer, 2012
- [Gupta u. Magnusson 2005] GUPTA, Diwakar ; MAGNUSSON, Thorkell: The capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs and setup times. In: *Computers & Operations Research* 32 (2005), Nr. 4, S. 727–747
- [Gutenberg 1983] GUTENBERG, Erich: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Die Produktion*. 24. Berlin : Springer, 1983
- [Haase 1994] HAASE, Knut: *Lotsizing and Scheduling for Production Planning*. Bd. 408. Berlin and Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1994



- [Hackman u. Leachman 1989] HACKMAN, Steven ; LEACHMAN, Robert: A General Framework for Modeling Production. In: *Management Science* 35 (1989), Nr. 4, S. 478–495
- [Hansmann 2006] HANSMANN, Karl-Werner: *Industrielles Management*. 8. München : Oldenbourg, 2006
- [Harris 1913] HARRIS, Ford: How Many Parts To Make At Once. In: *Factory, The Magazine for Management* (1913), Nr. 10 (2), S. 947–950
- [Haskose u. a. 2002] HASKOSE, Ahmet ; KINGSMAN, Brian ; WORTHINGTON, David: Modelling flow and jobbing shops as a queueing network for workload control. In: *International Journal of Production Economics* 78 (2002), Nr. 3, S. 271–285
- [Hax u. Meal 1973] HAX, Arnold ; MEAL, Harlan: *Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling*. Sloan School of Management Working paper 656-73, 1973
- [Helberg 1987] HELBERG, Peter: *Betriebliche Informations- und Kommunikationssysteme*. Bd. Bd. 8: *PPS als CIM-Baustein: Gestaltung d. Produktionsplanung u.-steuerung für d. computerintegrierte Produktion*. Berlin : Erich Schmidt, 1987
- [Herrmann 2009] HERRMANN, Frank: *Logik der Produktionslogistik*. München : Oldenbourg, 2009
- [Herrmann 2011] HERRMANN, Frank: *Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung: Wirkung, Auswahl und Einstellhinweise von Verfahren und Parametern*. 1. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2011
- [Herrmann u. Manitz 2015] HERRMANN, Frank ; MANITZ, Michael: Ein hierarchisches Planungskonzept zur operativen Produktionplanung und -steuerung. In: CLAUS, Thorsten (Hrsg.) ; HERRMANN, Frank (Hrsg.) ; MANITZ, Michael (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin : Gabler, 2015, S. 7–22
- [Hillier u. Lieberman 2010] HILLIER, Frederick S. ; LIEBERMAN, Gerald J.: *Introduction to operations research*. 9th ed. New York : McGraw-Hill Higher Education, 2010
- [Hoad u. a. 2008] HOAD, Kathryn ; ROBINSON STEWART ; DAVIS, Ruth: AUTOMATING WARM-UP LENGTH ESTIMATION. In: *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference* (2008), S. 532–540
- [Hopp u. Spearman 2008] HOPP, Wallace J. ; SPEARMAN, Mark L.: *Factory physics*. 3. Boston : McGraw-Hill Irwin, 2008
- [Hung u. Leachman 1996] HUNG, Yi-Feng ; LEACHMAN, Robert: A production planning methodology for semiconductor manufacturing based on iterative simulation and linear programming calculations. In: *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 9 (1996), Nr. 2, S. 257–269

- [Irastorza u. Deane 1974] IRASTORZA, Joseph C. ; DEANE, Richard H.: A Loading and Balancing Methodology for Job Shop Control. In: *A I I E Transactions* 6 (1974), Nr. 4, S. 302–307
- [Irdem 2009] IRDEM, Fatih: *Evaluation of Clearing Functions' Fitting Methodology and Performance for Production Planning Models: Masterarbeit an der NC Stat University.* 2009
- [Irdem u. a. 2008] IRDEM, Fatih ; KACAR, Baris ; UZSOY, Reha: An Experimental Study of an Iterative Simulation-Optimization Algorithm for Production Planning. In: *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference* (2008), S. 2176–2184
- [Irdem u. a. 2010] IRDEM, Fatih ; KACAR, Necip B. ; UZSOY, Reha: An Exploratory Analysis of Two Iterative Linear Programming—Simulation Approaches for Production Planning. In: *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 23 (2010), Nr. 3, S. 442–455
- [Johnson u. Montgomery 1974] JOHNSON, Lynwood A. ; MONTGOMERY, Douglas C.: *Operations research in production planning, scheduling, and inventory control.* New York : Wiley, 1974
- [Kacar u. a. 2013a] KACAR, Baris ; MÖNCH, Lars ; UZSOY, Reha: A Comparison of Production Planning Formulations with Exogenous Cycle Time Estimates using a Large-Scale Wafer Fab Model. In: *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference* (2013), S. 3731–3744
- [Kacar u. Uzsoy 2010] KACAR, Baris ; UZSOY, Reha: *Estimation Clearing Functions form Simulation Data: Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference: December 5-8, 2010, Baltimore, Maryland, U.S.A.* New York and N.Y : Association for Computing Machinery, 2010
- [Kacar 2012] KACAR, N.B: *Fitting Clearing Functions to Empirical Data: Simulation Optimization and Heuristic Algorithms.* Dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University, 2012
- [Kacar u. a. 2012] KACAR, Necip B. ; IRDEM, Fatih ; UZSOY, Reha: An Experimental Comparison of Production Planning Using Clearing Functions and Iterative Linear Programming-Simulation Algorithms. In: *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 25 (2012), Nr. 1, S. 104–117
- [Kacar u. a. 2013b] KACAR, Necip B. ; MONCH, Lars ; UZSOY, Reha: Planning Wafer Starts Using Nonlinear Clearing Functions: A Large-Scale Experiment. In: *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 26 (2013), Nr. 4, S. 602–612
- [Kacar u. Uzsoy 2014] KACAR, Necip B. ; UZSOY, Reha: Estimating Clearing Functions for Production Resources Using Simulation Optimization. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* (2014), S. 1–14



- [Karmarkar 1989] KARMARKAR, Uday: Capacity Loading and Release Planning with Work-In-Progress (WIP) and Leadtimes. In: *Journal of manufacturing and operations management* (1989), Nr. 2, S. 105–123
- [Kayton u. a. 1997] KAYTON, David ; TEYNER, Tim ; SCHWARTZ, Christopher ; UZSOY, Reha: Focusing maintenance improvement efforts in a wafer fabrication facility operating under the theory of constraints. In: *Production and Inventory Management Journal* 38 (4) (1997), S. 51–57
- [Kettner u. Bechte 1981] KETTNER, H. ; BECHTE, Wolfgang: Neue Wege der Fertigungssteuerung durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe. In: *VDI Zeitung* (1981), Nr. 123, S. 459–466
- [Kiener 2012] KIENER, Stefan (Hrsg.): *Produktions-Management: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung*. 10. München : Oldenbourg, 2012
- [Kim u. Kim 2001] KIM, Bokang ; KIM, Sooyoung: Extended model for a hybrid production planning approach. In: *International Journal of Production Economics* 73 (2001), Nr. 2, S. 165–173
- [Kingsman 2000] KINGSMAN, Brian G.: Modelling input–output workload control for dynamic capacity planning in production planning systems. In: *International Journal of Production Economics* 68 (2000), Nr. 1, S. 73–93
- [Knolmayer 1991] KNOLMAYER, Gerhard: A Widely Acclaimed Method of Load-Oriented Job Release and its Conceptual Deficiencies. In: FANDEL, Günter (Hrsg.) ; ZÄPFEL, Günther (Hrsg.): *Modern Production Concepts*. Springer Berlin Heidelberg, 1991, S. 219–236
- [Kummer u. a. 2009] KUMMER, Sebastian ; GRÜN, Oskar ; JAMMERNEGG, Werner: *Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik*. 2., aktualisierte Aufl. München [u.a.] : Pearson Studium, 2009
- [Küpper u. Helber 2004] KÜPPER, Hans-Ulrich ; HELBER, Stefan: *Ablauforganisation in Produktion und Logistik*. 3., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 2004
- [Lange u. a. 2013a] LANGE, Frederick ; HERRMANN, Frank ; CLAUS, Thorsten: Simulation Based Clearing Functions for a Model of Order Release Planning. In: REKDALSBAKKEN, Webjørn (Hrsg.) ; BYE, Robin T. (Hrsg.) ; ZHANG, Houxiang (Hrsg.): *Proceedings 27th European Conference on Modelling and Simulation*, 2013, S. 741–747
- [Lange u. a. 2013b] LANGE, Frederick ; HERRMANN, Frank ; CLAUS, Thorsten: Simulationsbasierte Kapazitätsbedarfsabschätzung in einem Modell der Auftragsfreigabe mit Berücksichtigung von Servicegraden. In: DANGELMAIER, Wilhelm (Hrsg.) ; LAROQUE, Christoph (Hrsg.) ; KLAAS, Alexander (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2013* Bd. 147. Paderborn : Heinz-Nixdorf-Inst. Univ. Paderborn, 2013, S. 591–600

- [Leachman u. Carmon 1992] LEACHMAN, Robert ; CARMON, Tali: On Capacity Modeling For Production Planning With Alternative Machine Types. In: *IIE Transactions* 24 (1992), Nr. 4, S. 62–72
- [Lödding 2008] LÖDDING, Hermann: Ein Modell der Fertigungssteuerung - Logistische Zielgrößen erreichen. In: NYHUIS, Peter (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin : Springer, 2008, S. 219–233
- [Lödding 2010] LÖDDING, Hermann: *Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. 2. Berlin : Springer, 2010
- [Loukmidis 2006] LOUKMIDIS, Georgis: Unternehmensübergreifendes Bestandsmanagement. In: SCHUH, Günther (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin : Springer, 2006, S. 833–860
- [Maes u. a. 1991] MAES, Johan ; MCCLAIN, John O. ; VAN WASSENHOVE, LUK N.: Multilevel capacitated lotsizing complexity and LP-based heuristics. In: *European Journal of Operational Research* 53 (1991), Nr. 2, S. 131–148
- [Medhi 2003] MEDHI, Jyotiprasad (Hrsg.): *Stochastic models in queueing theory*. 2. Amsterdam and Boston : Academic Press, 2003
- [Meketon u. Schmeiser 1984] MEKETON, Marc S. ; SCHMEISER, Bruce: Overlapping Batch Means: Something for Nothing? In: *Proceedings of the 16th Conference on Winter Simulation*. Piscataway and NJ and USA : IEEE Press, 1984, 226–230
- [Melzer-Ridinger 1994] MELZER-RIDINGER, Ruth: *PPS: Systemgestützte Produktionsplanung: Konzeption und Anwendung*. München : Oldenbourg, 1994
- [Mendes u. a. 2009] MENDES, Jorge J. ; GONÇALVES, José F. ; RESENDE, Mauricio: A random key based genetic algorithm for the resource constrained project scheduling problem. In: *Computers & Operations Research* 36 (2009), Nr. 1, S. 92–109
- [Missbauer 2002] MISSBAUER, Hubert: Aggregate order release planning for time-varying demand. In: *International Journal of Production Research* 40 (2002), Nr. 3, S. 699–718
- [Missbauer 2009] MISSBAUER, Hubert: Models of the transient behaviour of production units to optimize the aggregate material flow. In: *International Journal of Production Economics* 118 (2009), Nr. 2, S. 387–397
- [Missbauer 2011] MISSBAUER, Hubert: Order release planning with clearing functions: A queueing-theoretical analysis of the clearing function concept. In: *International Journal of Production Economics* 131 (2011), Nr. 1, S. 399–406
- [Missbauer u. Uzsoy 2011] MISSBAUER, Hubert ; UZSOY, Reha: Optimization Models of Production Planning Problems. In: KEMPF, Karl G. (Hrsg.) ; KESKINOCAK, Pinar (Hrsg.) ; UZSOY, Reha (Hrsg.): *International Series in Operations Research & Management Science*. Boston and MA : Springer US, 2011, S. 437–507



- [Mönch u. a. 2013] MÖNCH, Lars ; FOWLER, John ; MASON, Scott: *Operations research/Computer science interfaces series*. Bd. v.52: *Production planning and control for semiconductor wafer fabrication facilities: Modeling, analysis, and systems*. New York and NY : Springer, 2013
- [Neumann u. Morlock 2004] NEUMANN, Klaus ; MORLOCK, Martin: *Operations Research*. 2. München : Hanser, 2004
- [Nyhuis u. Wiendahl 2012] NYHUIS, Peter ; WIENDAHL, Hans-Peter: *Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. 3. Heidelberg : Springer Vieweg, 2012
- [Orlicky 1975] ORLICKY, Joseph: *Material requirements planning: The new way of life in production and inventory management*. New York : McGraw-Hill, 1975
- [Pahl u. a. 2007] PAHL, Julia ; VOSS, Stefan ; WOODRUFF, David L.: Production planning with load dependent lead times: an update of research. In: *Annals of Operations Research* 153 (2007), Nr. 1, S. 297–345
- [Paraskevopoulos u. a. 2012] PARASKEVOPOULOS, Dimitris ; TARANTILIS, Christos ; IOANNOU, George: Solving project scheduling problems with resource constraints via an event list-based evolutionary algorithm. In: *Expert Systems with Applications* 39 (2012), Nr. 4, S. 3983–3994
- [Plossl u. Wight 1973] PLOSSL, George ; WIGHT, Oliver: Capacity planning and control. In: *Production and Inventory Management Journal* 14 (1973), Nr. 3
- [Pohl 2002] POHL, Klaus: *Produktionsmanagement mit SAP R/3: Mit 19 Tabellen*. Berlin [u.a.] : Springer, 2002
- [Pürgstaller u. Missbauer 2012] PÜRGSTALLER, Peter ; MISSBAUER, Hubert: Rule-based vs. optimisation-based order release in workload control: A simulation study of a MTO manufacturer. In: *International Journal of Production Economics* 140 (2012), Nr. 2, S. 670–680
- [Ravindran u. a. 2011] RAVINDRAN, Ashwin ; KEMPF, Karl G. ; UZSOY, Reha: Production planning with load-dependent lead times and safety stocks for a single product. In: *International Journal of Planning and Scheduling* 1 (2011), Nr. 1/2, S. 58–89
- [Sahling u. Helber 2010] SAHLING, Florian ; HELBER, Stefan: *Mehrstufige Losgrößenplanung bei Kapazitätsrestriktionen*. 1. Wiesbaden : Gabler, 2010
- [Salomon 1991] SALOMON, Marc: *Lecture notes in economics and mathematical systems*. Bd. 355: *Deterministic lot sizing models for production planning*. Berlin and New York : Springer-Verlag, 1991



- [Salomon u. a. 1991] SALOMON, Marc ; KROON, Leo G. ; KUIK, Roelof ; VAN WASSENHOVE, LUK N.: Some Extensions of the Discrete Lotsizing and Scheduling Problem. In: *Management Science* 37 (1991), Nr. 7, S. 801–812
- [Salomon u. a. 1997] SALOMON, Marc ; SOLOMON, Marius M. ; VAN WASSENHOVE, LUK N. ; DUMAS, Yvan ; DAUZÈRE-PÉRÈS, Stéphane: Solving the discrete lotsizing and scheduling problem with sequence dependent set-up costs and set-up times using the Travelling Salesman Problem with time windows. In: *European Journal of Operational Research* 100 (1997), Nr. 3, S. 494–513
- [Schneider 2005] SCHNEIDER, Herfried: *Operative Produktionsplanung und -steuerung: Konzepte und Modelle des Informations- und Materialflusses in komplexen Fertigungssystemen*. 1. Aufl. München : Oldenbourg, 2005
- [Schröder 1989] SCHRÖDER, Hans-Horst: *Entwicklungsstand und -tendenzen bei PPS-Systemen: Arbeitsbericht Nr. 26*. Universität Köln, 1989
- [Schuh 2006] SCHUH, Günther (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 3. Berlin : Springer, 2006
- [Schwarz 2008] SCHWARZ, Leroy: The Economic Order-Quantity (EOQ) Model. In: HILLIER, Frederick S. (Hrsg.) ; CHHAJED, Dilip (Hrsg.) ; LOWE, Timothy J. (Hrsg.): *Building Intuition* Bd. 115. Boston and MA : Springer US, 2008, S. 135–154
- [Schweitzer 1994] SCHWEITZER, Marcell: Industrielle Fertigungswirtschaft. In: SCHWEITZER, Marcell (Hrsg.): *Industriebetriebslehre*. München : Vahlen, 1994 (Vahle's Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften), S. 573–748
- [Seeanner u. Meyr 2013] SEEANNER, Florian ; MEYR, Herbert: Multi-stage simultaneous lot-sizing and scheduling for flow line production. In: *OR Spectrum* 35 (2013), Nr. 1, S. 33–73
- [Song 1996] SONG, Wheyming T.: On the estimation of optimal batch sizes in the analysis of simulation output. In: *European Journal of Operational Research* 88 (1996), Nr. 2, S. 304–319
- [Srinivasan u. a. 1988] SRINIVASAN, Ashok ; CAREY, M. ; MORTON, T. E.: *Resource pricing and aggregate scheduling in manufacturing systems*. 1988
- [Steven 1994] STEVEN, Marion: *Hierarchische Produktionsplanung*. 2. Heidelberg : Physica-Verl, 1994
- [Stommel 1976] STOMMEL, Heinz J.: *Betriebliche Terminplanung*. Berlin and New York : De Gruyter, 1976
- [Tardif u. Spearman 1997] TARDIF, Valerie ; SPEARMAN, Mark L.: Diagnostic scheduling in finite-capacity production environments. In: *Computers & Industrial Engineering* 32 (1997), Nr. 4, S. 867–878



- [Tempelmeier 2008] TEMPELMEIER, Horst: *Material-Logistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced-Planning-Systemen*. 7. Berlin : Springer, 2008
- [Tempelmeier 2012] TEMPELMEIER, Horst: *Dynamische Losgrößenplanung in Supply Chains*. Norderstedt : Books on Demand, 2012
- [Valls u. a. 2008] VALLS, Vicente ; BALLESTÍN, Francisco ; QUINTANILLA, Sacramento: A hybrid genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. In: *European Journal of Operational Research* 185 (2008), Nr. 2, S. 495–508
- [Verein Deutscher Ingenieure 2013] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*. Berlin, 2013
- [Vollmann 2010] VOLLMANN, Thomas E.: *Manufacturing planning and control systems for supply chain management*. 6th ed. New York and London : McGraw-Hill Higher Education and McGraw-Hill [distributor], 2010
- [Wagner u. Whitin 1958] WAGNER, Harvey M. ; WHITIN, Thomson M.: Dynamic Version of the Economic Lot Size Model. In: *Management Science* 5 (1958), Nr. 1, S. 89–96
- [White 1997] WHITE, Preston: An Effective Truncation Heuristic for Bias Reduction in Simulation Output. In: *Simulation* 69 (1997), Nr. 6, S. 323–334
- [White u. a. 2000] WHITE, Preston ; COBB, Michael ; SPRATT, Stephen: A Comparison of five steady-state truncation heuristics for simulation. In: *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference* (2000), S. 755–760
- [Wiendahl 1987] WIENDAHL, Hans-Peter: *Belastungsorientierte Fertigungssteuerung: Grundlagen, Verfahrensaufbau, Realisierung ; 36 Tabellen*. München : Hanser, 1987
- [Wiendahl 1991] WIENDAHL, Hans-Peter: *Anwendung der Belastungsorientierten Auftragsfreigabe*. München : Carl Hanser Verlag, 1991
- [Wight 1970] WIGHT, Oliver: Input/output control: a real handle on lead time. In: *Production and Inventory Management Journal* 11 (1970), Nr. 3, S. 9–31
- [Zäpfel 2001] ZÄPFEL, Günther: *Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagement*. 2. München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2001
- [Zäpfel u. Missbauer 1988] ZÄPFEL, Günther ; MISSBAUER, Hubert: Neuere Konzepte der Produktionsplanung und -steuerung in der Fertigungsindustrie. In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 17 (1988), Nr. 3, S. 127–131
- [Zimmermann 1987] ZIMMERMANN, Gero: *PPS-Methoden auf dem Prüfstand: Was leisten sie, wann versagen sie?* Landsberg/Lech : Verl. Moderne Industrie, 1987



[Zimmermann 2008] ZIMMERMANN, Hans-Jürgen: Operations research: Methoden und Modelle ; für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte, Informatiker. In: *Operations Research* (2008)



