

**Ein Entscheidungsunterstützungssystem zur Priorisierung
ungeplanter Stillstände für eine ausbringungsoptimierte
Durchführung reaktiver sowie proaktiver
Instandhaltungsmaßnahmen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

von der KIT-Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

M.Sc. Michael Hegemann

| | |
|-----------------------------|-------------------------|
| Tag der mündlichen Prüfung: | 24.02.2021 |
| Referent: | Prof. Dr. Stefan Nickel |
| Korreferent: | Prof. Dr. Gisela Lanza |

Karlsruhe, 2021

„Es ist nicht gesagt, dass es besser wird, wenn es anders wird,
wenn es aber besser werden soll, muss es anders werden.“

(Georg C. Lichtenberg)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Mercedes-Benz AG in der Abteilung Mercedes-Benz Produktionssystem Powertrain und Training in Zusammenarbeit mit dem Institut für Operations Research, Diskrete Optimierung und Logistik, des Karlsruher Instituts für Technologie.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Stefan Nickel, dem Leiter des Lehrstuhls für Diskrete Optimierung und Logistik, für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und die kompetente fachliche wie konzeptionelle Unterstützung während der Anfertigung dieser Arbeit bedanken. Mein Dank gilt außerdem Frau Prof. Dr. Gisela Lanza für die Übernahme des Korreferats.

Auf Seiten der Mercedes-Benz AG möchte ich mich besonders bei Herrn Dr. Michael Wedel für die fachliche und organisatorische Unterstützung während meiner gesamten Doktorandentätigkeit bedanken, aber auch bei meinen Kolleginnen und Kollegen, durch die ich in vielen Gesprächen einen tiefen Einblick in die tägliche Abteilungsarbeit erhalten habe.

Ich danke zudem Herrn Dr. Sven Spieckermann von der SimPlan AG für die wertvollen fachlichen Diskussionen und Anregungen.

Auch bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Diskrete Optimierung und Logistik, insbesondere bei Herrn Dr. Fabian Dunke, möchte ich mich für die freundschaftlichen Gespräche und die fachliche wie auch organisatorische Unterstützung bedanken.

Nicht zuletzt gilt mein allerherzlichster Dank meinen Eltern, Ulrike und Reinhold Hegemann, die mir nicht nur meine Ausbildung ermöglicht und mich zu jeder Zeit unterstützt haben, sondern auch während meiner Promotionszeit motivierend zur Seite standen.

Stuttgart, im Februar 2021

Michael Hegemann

Abstract

Downtimes during the planned operating period lead to high production losses in production systems operating at high capacity. Complex production systems, such as flow production systems considered in this thesis, usually consist of a large number of different production resources, with the possibility of simultaneous breakdowns involving several resources. Since in practice the number of production workers available for the repair of the resources is often limited, an objective prioritization of current breakdowns according to their respective impact on the production system can reduce the reaction time to the most serious breakdowns and minimize production losses due to avoidable waiting times. The data used for the prioritization often refers to a historical period or to the current status of the flow production system. However, at the decision point, information about future planned downtimes may also be available. These downtimes result not only from preventive maintenance measures, but also from the application of a predictive maintenance strategy.

Therefore, the subject of this thesis is the development of an operative decision support system, which provides production employees an objectively determined sequence of unplanned breakdowns in flow production systems. In addition to the breakdowns to be prioritized at the decision point, information about future planned downtimes is also included in the prioritization decision in form of a lookahead.

In the first part of this thesis, the connection between the prioritization of unplanned breakdowns and the effect of future planned downtimes is derived and it is shown how the effects of planned downtimes can be proactively reduced. The prioritization is formulated as a sequence optimization problem, which is first considered as a pure online optimization problem. For the computation of the target function value, both a simulation-based approach in form of a simulation-based optimization system and an analytical approach are derived. Based on the knowledge gained about the interactions in the prioritization of breakdowns, planned downtimes are considered in the prioritization decision and the sequence optimization problem is understood as an online optimization problem with lookahead. Finally, a simulation-based approach is presented, which enables the determination of the prioritization sequence with lookahead.

In the second part of this thesis, the implementation of the derived approaches as a decision support system in a simulation environment allows to investigate the added value of prioritization with lookahead. The results of two simulation studies show that the occurrence of momentary bottlenecks due to planned downtimes can be reduced, so that the overall performance of the production system can be increased.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Abstract | vii |
| Inhaltsverzeichnis | ix |
| Abbildungsverzeichnis | xii |
| Tabellenverzeichnis | xvi |
| Abkürzungen und Formelzeichen | xvii |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Stand der Wissenschaft und Technik | 3 |
| 2.1 Produktionssystem | 3 |
| 2.1.1 Organisationsformen von Fertigungssystemen | 4 |
| 2.1.2 Komplexe Fließfertigungssysteme..... | 6 |
| 2.1.3 Produktionskennzahlen | 9 |
| 2.2 Instandhaltung..... | 14 |
| 2.2.1 Instandhaltungsstrategien..... | 15 |
| 2.2.2 Stillstände in der Produktion | 19 |
| 2.3 Simulation und Optimierung | 22 |
| 2.3.1 Simulationsanwendung in der Betriebsphase..... | 24 |
| 2.3.2 Simulationsbasierte Optimierung..... | 29 |
| 2.3.3 Online-Optimierung mit Lookahead..... | 32 |
| 2.4 Priorisierung von Maschinenstillständen | 33 |
| 2.4.1 Relevante Forschungsansätze | 33 |
| 2.4.2 Analyse und Bewertung der Forschungsansätze..... | 40 |
| 2.4.3 Fazit und Ableitung des Handlungsbedarfs..... | 44 |
| 3 Zielsetzung und Vorgehensweise..... | 45 |
| 3.1 Zielsetzung und Forschungsfragen | 45 |
| 3.2 Vorgehensweise | 46 |
| 4 Priorisierung von Stillständen in Fließfertigungssystemen..... | 48 |
| 4.1 Problembeschreibung und Ansatz | 48 |
| 4.2 Simulationsbasierte Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge..... | 50 |
| 4.2.1 Grundprinzip und einführendes Beispiel..... | 50 |
| 4.2.2 Vorgehensweise zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge | 53 |
| 4.3 Analytische Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge | 68 |
| 4.3.1 Grundprinzip des Ausbringungsverlustes und einführendes Beispiel..... | 69 |

| | |
|--|------------|
| 4.3.2 Vorgehensweise zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge..... | 72 |
| 4.4 Fazit..... | 95 |
| 5 Lookahead zur Berücksichtigung geplanter Stillstandszeiten..... | 98 |
| 5.1 Problembeschreibung und Ansatz..... | 98 |
| 5.2 Zusammenhang zwischen der Priorisierung ungeplanter Stillstände und der Auswirkung geplanter Stillstandszeiten..... | 99 |
| 5.2.1 Einführendes Beispiel..... | 99 |
| 5.2.2 Grundprinzip des Gesamtausbringungsverlustes..... | 101 |
| 5.3 Vorgehensweise zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge mit Lookahead..... | 106 |
| 5.4 Fazit..... | 109 |
| 6 Implementierung und Untersuchung von Einflussfaktoren..... | 111 |
| 6.1 Implementierung des Entscheidungsunterstützungssystems in eine Simulationsumgebung..... | 111 |
| 6.2 Untersuchungsschwerpunkt 1: Ausgangsversuche..... | 117 |
| 6.2.1 Modell des eindimensionalen Fließfertigungssystems..... | 118 |
| 6.2.2 Modell des mehrdimensionalen Fließfertigungssystems..... | 122 |
| 6.3 Untersuchungsschwerpunkt 2: Grundlegende Einflussfaktoren..... | 125 |
| 6.3.1 Einfluss der Verfügbarkeit der Prozesse..... | 125 |
| 6.3.2 Einfluss der Stillstandsdauer der Prozesse..... | 127 |
| 6.3.3 Einfluss der Pufferkapazität der Verkettungselemente..... | 128 |
| 6.3.4 Einfluss der Annahme der Reparaturdauer von Prozessen..... | 131 |
| 6.4 Untersuchungsschwerpunkt 3: Einflussfaktoren Lookahead..... | 134 |
| 6.4.1 Einfluss des Anteils geplanter Stillstände an der Gesamtanzahl eintretender Stillstände..... | 134 |
| 6.4.2 Einfluss der Lookahead-Größe..... | 136 |
| 6.5 Fazit..... | 138 |
| 7 Anwendung in der industriellen Praxis..... | 140 |
| 7.1 Anwendungsbeispiel Kurbelgehäusefertigungslinie..... | 140 |
| 7.2 Vorgehen zur Bestimmung der Priorisierungsreihenfolge..... | 143 |
| 7.2.1 Ermittlung einer Priorisierungsreihenfolge je Zuständigkeitsbereich des Produktionspersonals..... | 143 |
| 7.2.2 Drei-Stufen-Eskalationsmodell zur Einsparung von Rechenzeit..... | 149 |
| 7.3 Ergebnisse der Simulationsstudie..... | 151 |
| 7.4 Fazit..... | 157 |
| 8 Zusammenfassung und Ausblick..... | 158 |

| | |
|--|-------------|
| Anhang | xxi |
| A.1 Implementierung des Entscheidungsunterstützungssystems in Plant Simulation..... | xxi |
| A.2 Systemdaten des eindimensionalen Fließfertigungssystems | xxv |
| A.3 Systemdaten des mehrdimensionalen Fließfertigungssystems..... | xxv |
| A.4 Systemdaten der Kurbelgehäusefertigungslinie | xxvi |
| Literaturverzeichnis | xxxv |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Einbettung des Produktionssystems in seine Umwelt | 3 |
| Abbildung 2: Organisationsformen von Fertigungssystemen..... | 4 |
| Abbildung 3: Fertigungssysteme mit einheitlichem Materialfluss | 5 |
| Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Prozesskette..... | 7 |
| Abbildung 5: Verkettungsarten in einer Fließfertigung | 8 |
| Abbildung 6: Zeitmodell für die Produktion..... | 9 |
| Abbildung 7: Charakterisierung des Ausfallverhaltens durch <i>MTBF</i> und <i>MDT</i> | 12 |
| Abbildung 8: Mengenmodell..... | 14 |
| Abbildung 9: Unterteilung Instandhaltung | 15 |
| Abbildung 10: Verlauf des Abnutzungsvorrats bei reaktiver Instandhaltungsstrategie | 16 |
| Abbildung 11: Austauschzeitpunkt bei der zustandsorientierten Instandhaltung | 17 |
| Abbildung 12: Schematische Vorgehensweise bei der prädiktiven Instandhaltung | 18 |
| Abbildung 13: Ausprägungen von Stillständen in der Produktion..... | 20 |
| Abbildung 14: Zeitlicher Verlauf eines Primärstillstandes | 21 |
| Abbildung 15: Einteilung von Simulationsmethoden | 23 |
| Abbildung 16: Komponenten eines „Symbiotic Simulation System“ | 25 |
| Abbildung 17: Initialisierungsmöglichkeiten eines Simulationsmodells..... | 28 |
| Abbildung 18: Sequenzielle Verknüpfung von Simulation und Optimierung | 30 |
| Abbildung 19: Hierarchische Verknüpfung von Simulation und Optimierung | 30 |
| Abbildung 20: Simulation zur Bestimmung des Zielfunktionswertes | 31 |
| Abbildung 21: „Active Period Method“ | 35 |
| Abbildung 22: „Shifting Bottleneck Detection Method“ | 35 |
| Abbildung 23: „Arrow Based Method“ | 36 |
| Abbildung 24: „Turning Point Method“ | 37 |
| Abbildung 25: Pufferausnutzung zur Bestimmung der Priorisierungsreihenfolge | 39 |
| Abbildung 26: Engpassvorhersage mittels ARIMA Modell | 40 |
| Abbildung 27: Bewertung bestehender Forschungsansätze | 43 |
| Abbildung 28: Aufbau der Arbeit | 47 |
| Abbildung 29: Schematischer Stillstandsverlauf mit Entscheidungszeitpunkten..... | 48 |
| Abbildung 30: Schnittstellen eines simulationsbasierten Optimierungssystems..... | 50 |
| Abbildung 31: Eindimensionale Prozesskette als 2P-1VK Modell..... | 51 |
| Abbildung 32: Ansatz zur Bestimmung der Priorisierungsreihenfolge | 51 |
| Abbildung 33: Systemverhalten für das eindimensionale 2P-1VK Modell | 52 |
| Abbildung 34: Simulationsbasierte Vorgehensweise zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge | 54 |
| Abbildung 35: Eindimensionale Prozesskette als 5P-4VK Modell..... | 56 |
| Abbildung 36: Verlauf der Ausbringungsmenge in Abhängigkeit der Behebungsreihenfolge..... | 57 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 37: Verlauf der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe in Abhängigkeit der Behebungsreihenfolge..... | 57 |
| Abbildung 38: Auswirkung eines Stillstandes auf die Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe | 60 |
| Abbildung 39: Auswirkung eines Stillstandes auf den Arbeitstakt der Referenzprozessstufe | 61 |
| Abbildung 40: Grundlegende Indexierung einer Prozesskette..... | 61 |
| Abbildung 41: Verlauf der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe in Abhängigkeit der Behebungsreihenfolge (Ausschnitt) | 64 |
| Abbildung 42: Initialisierung des Simulationsmodells zum Entscheidungszeitpunkt | 66 |
| Abbildung 43: Drei Kriterien zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge | 68 |
| Abbildung 44: Analytische Vorgehensweise zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge | 73 |
| Abbildung 45: Zusammenfassung redundanter Prozessstufen mit stillstehenden Prozessen | 74 |
| Abbildung 46: Vorgehen B zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge..... | 76 |
| Abbildung 47: Schritte zur Ermittlung des Ausbringungsverlustes | 79 |
| Abbildung 48: Ersatzmodell zur Berechnung der latenten Phase einer stromaufwärtsgelegenen redundanten Prozessstufe..... | 81 |
| Abbildung 49: Ersatzmodell zur Berechnung der latenten Phase einer stromabwärtsgelegenen redundanten Prozessstufe..... | 85 |
| Abbildung 50: Schematische Darstellung des Ausbringungsverlusts bei einer stromaufwärtsgelegenen redundanten Prozessstufe..... | 91 |
| Abbildung 51: Vorgehen C zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge..... | 94 |
| Abbildung 52: Systemverhalten für das 2P-1VK Modell mit Lookahead..... | 100 |
| Abbildung 53: Wichtige Bausteine der Implementierung | 111 |
| Abbildung 54: Struktur der eindimensionalen Prozesskette..... | 118 |
| Abbildung 55: Durchschnittlich erzielbare Ausbringung des eindimensionalen Fließfertigungssystems in Abhängigkeit der Priorisierungsmethode | 120 |
| Abbildung 56: Mehrwerte der Priorisierungsmethoden für das eindimensionale Fließfertigungssystem im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts) | 121 |
| Abbildung 57: Struktur der mehrdimensionalen Prozesskette | 122 |
| Abbildung 58: Durchschnittlich erzielbare Ausbringung des mehrdimensionalen Fließfertigungssystems in Abhängigkeit der Priorisierungsmethode | 123 |
| Abbildung 59: Mehrwerte der Priorisierungsmethoden für das mehrdimensionale Fließfertigungssystem im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts) | 124 |
| Abbildung 60: Einfluss der Verfügbarkeit auf den Mehrwert einer Priorisierung im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts) | 125 |
| Abbildung 61: Anteil durchgeführter Zuordnungen für die Priorisierung mit Lookahead in Abhängigkeit der Verfügbarkeit | 126 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 62: Einfluss der Stillstandsdauer auf den Mehrwert einer Priorisierung im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts) | 127 |
| Abbildung 63: Anteil durchgeführter Zuordnungen für die Priorisierung mit Lookahead in Abhängigkeit der Stillstandsdauer | 128 |
| Abbildung 64: Einfluss der Pufferkapazität auf den Mehrwert einer Priorisierung im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts) | 129 |
| Abbildung 65: Anzahl und Anteil durchgeführter Zuordnungen mit Priorisierungsentscheidung für die Priorisierung mit Lookahead in Abhängigkeit der Pufferkapazität | 130 |
| Abbildung 66: Durchschnittlich erzielbare Ausbringung des eindimensionalen Fließfertigungssystems bei Verwendung der mittleren Reparaturdauer | 132 |
| Abbildung 67: Mehrwerte der Priorisierungsmethoden für das eindimensionale Fließfertigungssystem bei Verwendung der mittleren Reparaturdauer im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)..... | 132 |
| Abbildung 68: Durchschnittlich erzielbare Ausbringung des mehrdimensionalen Fließfertigungssystems bei Verwendung der mittleren Reparaturdauer | 133 |
| Abbildung 69: Mehrwerte der Priorisierungsmethoden für das mehrdimensionale Fließfertigungssystem bei Verwendung der mittleren Reparaturdauer im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)..... | 134 |
| Abbildung 70: Einfluss des Anteils geplanter Stillstände auf den Mehrwert einer Priorisierung für das eindimensionale Fließfertigungssystem im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)..... | 135 |
| Abbildung 71: Einfluss des Anteils geplanter Stillstände auf den Mehrwert einer Priorisierung für das mehrdimensionale Fließfertigungssystem im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)..... | 135 |
| Abbildung 72: Einfluss der Größe des Time-Lookahead auf den Mehrwert einer Priorisierung im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts) | 136 |
| Abbildung 73: Einfluss der Größe des Request-Lookahead auf den Mehrwert einer Priorisierung im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts) | 137 |
| Abbildung 74: Vorgehen zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge für komplexe Fließfertigungssysteme | 144 |
| Abbildung 75: Durchschnittlich erzielbare Ausbringung der Kurbelgehäusefertigungslinie in Abhängigkeit der Priorisierungsmethode | 152 |
| Abbildung 76: Mehrwerte der Priorisierungsmethoden für die Kurbelgehäusefertigungslinie im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts) | 153 |
| Abbildung 77: Kumulierter Anteil an getroffenen Priorisierungsentscheidungen | 154 |
| Abbildung 78: Einfluss des Anteils geplanter Stillstände auf den Mehrwert einer Priorisierung für die Kurbelgehäusefertigungslinie im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)..... | 156 |

| | |
|--|--------|
| Abbildung 79: Erste Ebene des Entscheidungsunterstützungssystems (Screenshot) | xxi |
| Abbildung 80: Zweite Ebene des Entscheidungsunterstützungssystems (Screenshot) | xxii |
| Abbildung 81: Dritte Ebene des Entscheidungsunterstützungssystems (Screenshot) | xxiii |
| Abbildung 82: Forecast-Modell des Entscheidungsunterstützungssystems (Screenshot) | xxiv |
| Abbildung 83: Prozesskette Teil 1..... | xxxi |
| Abbildung 84: Prozesskette Teil 2..... | xxxii |
| Abbildung 85: Prozesskette Teil 3..... | xxxiii |
| Abbildung 86: Prozesskette Teil 4..... | xxxiv |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|------|
| Tabelle 1: Technische Daten für das eindimensionale 2P-1VK Modell..... | 51 |
| Tabelle 2: Technische Daten zum Entscheidungszeitpunkt für das 5P-4VK Modell..... | 56 |
| Tabelle 3: Technische Daten für das 2P-1VK Modell zur Verdeutlichung der Auswirkung eines Stillstandes | 59 |
| Tabelle 4: Behebungsreihenfolgenabhängiger Ausbringungsverlust für das 2P-1VK Modell..... | 71 |
| Tabelle 5: Ausbringungsverlust und Gesamtausbringungsverlust für das 2P-1VK Modell..... | 103 |
| Tabelle 6: Systemzustand nach 500 s für Sequenz <i>Seq1</i> | 104 |
| Tabelle 7: Systemzustand nach 500 s für Sequenz <i>Seq2</i> | 106 |
| Tabelle 8: Auswahlkriterien der Priorisierungsreihenfolge beim Worst-Case-Szenario | 119 |
| Tabelle 9: Personaleinteilung..... | 141 |
| Tabelle 10: Eingabedaten der Prozesse des eindimensionalen Fließfertigungssystems | xxv |
| Tabelle 11: Eingabedaten der Verkettungselemente des eindimensionalen Fließfertigungssystems | xxv |
| Tabelle 12: Eingabedaten der Prozesse des mehrdimensionalen Fließfertigungssystems | xxv |
| Tabelle 13: Eingabedaten der Verkettungselemente des mehrdimensionalen Fließfertigungssystems | xxvi |
| Tabelle 14: Eingabedaten der Prozesse der Kurbelgehäusefertigungslinie..... | xxvi |
| Tabelle 15: Eingabedaten der Verkettungselemente der Kurbelgehäusefertigungslinie | xxix |
| Tabelle 16: Eingabedaten der Be- und Endladeprozesse der Kurbelgehäusefertigungslinie | xxx |

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

| | |
|------|------------------------------|
| BAZ | Bearbeitungszeit |
| BDE | Betriebsdatenerfassung |
| BLZ | Belegungszeit |
| BZ | Betriebszeit |
| EZ | Erholzeit |
| FCFS | First-Come-First-Serve |
| HNZ | Hauptnutzungszeit |
| LZ | Liegezeit |
| MDE | Maschinendatenerfassung |
| P | Prozess |
| PS | Prozessstufe |
| SD | Stillstandsdauer |
| SZ | Tatsächliche Stillstandszeit |
| TRZ | Tatsächliche Rüstzeit |
| TZ | Transportzeit |
| VK | Verkettungselement |
| WZ | Wartezeit |

Formelzeichen

| | |
|-------------------------|--|
| $A(k)$ | Ausbringungsmenge der Behebungsreihenfolge k in [Stück] |
| $AV(k)$ | Ausbringungsverlust der Behebungsreihenfolge k in [s] |
| $AV_{ges}(k)$ | Gesamtausbringungsverlust der Behebungsreihenfolge k in [s] |
| $AV_{Lookahead P_n}(k)$ | Zukünftiger Ausbringungsverlust aufgrund eines Stillstandes an einem Prozess bei der Behebungsreihenfolge k in [s] |
| $AV_{P_n}(k)$ | Ausbringungsverlust eines stillstehenden Prozesses mit der Behebungsreihenfolge k in [s] |
| $AV_{PS_m}(b)$ | Ausbringungsverlust einer stillstehenden Prozessstufe mit der Behebungsreihenfolge b in [s] |
| $B_{PS_m}(t)$ | Werkstückbelegung einer Prozessstufe in [Stück] |
| $B_{max PS_m}$ | Maximale Werkstückbelegung einer Prozessstufe in [Stück] |
| d | Zeitspanne des Time Lookahead in [s] |

| | |
|-----------------------------------|--|
| $D(k)$ | Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe mit der Behebungsreihenfolge k in [Stück] |
| $DLZ_{P_n \rightarrow PS_{Ref}}$ | Durchlaufzeit von einem Prozess zur Referenzprozessstufe in [s] |
| $DLZ_{PS_m \rightarrow PS_{Ref}}$ | Durchlaufzeit von einer Prozessstufe zur Referenzprozessstufe in [s] |
| F | Menge aller Prozesse mit zukünftig eintretenden geplanten Stillständen [-] |
| L | Anzahl möglicher Behebungsreihenfolgen [-] |
| M | Anzahl aller Prozessstufen in der Prozesskette [-] |
| M_b | Menge der Prozessstufen, die in der Behebungsreihenfolge b vor der betrachteten Prozessstufe angeordnet sind [-] |
| MDT | Mean Down Time in [s] |
| $MTBF$ | Mean Time Between Failure in [s] |
| $MTTR$ | Mean Time To Repair in [s] |
| N | Anzahl aller Prozesse in der Prozesskette [-] |
| p | Anzahl der von der Referenzprozessstufe produzierten Werkstücke innerhalb der manifesten Phase in [Stück] |
| P_n | Prozess n mit $n \in \{1, \dots, N\}$ [-] |
| $P_{VK_m \max}$ | Pufferkapazität eines Verkettungselements in [Stück] |
| $P_{VK_m}(t)$ | Pufferfüllstand eines Verkettungselements zum Zeitpunkt t in [Stück] |
| PBZ | Planbelegungszeit in [s] |
| PS_m | Prozessstufe m mit $m \in \{1, \dots, M\}$ [-] |
| $PS_{m \text{ rep}}$ | Repräsentative Prozessstufe einer redundanten Prozessstufe [-] |
| PS_{Ref} | Referenzprozessstufe [-] |
| PZ_{P_n} | Prozesszeit eines Prozesses in [s] |
| $PZ_{PS_{Ref}}$ | Prozesszeit der repräsentativen Prozessstufe in [s] |
| r | Anzahl Eingabedaten des Request Lookahead [-] |
| R | Menge der Prozesse einer redundanten Prozessstufe [-] |
| $RPZ_{P_n}(t)$ | Restprozesszeit eines Prozesses zum Zeitpunkt t in [s] |
| $RPZ_{PS_m}(t)$ | Restprozesszeit einer Prozessstufe zum Zeitpunkt t in [s] |
| $RPZ_{PS_{Ref}}(t)$ | Restprozesszeit der Referenzprozessstufe zum Zeitpunkt t in [s] |
| $RPZ_{rep \ PS_m}(t)$ | Restprozesszeit einer repräsentativen Prozessstufe zum Zeitpunkt t in [s] |
| $RZZ_{P_n}(t)$ | Restzykluszeit eines Prozesses zum Zeitpunkt t in [s] |

| | |
|--|---|
| $RZZ_{rep\ PS_m}(t)$ | Restzykluszeit einer repräsentativen Prozessstufe zum Zeitpunkt t in [s] |
| s | Länge einer Transportstrecke in [m] |
| S | Menge der Prozesse mit zu priorisierenden Stillständen [-] |
| $S_{Behebung}$ | Menge der Prozesse mit in Behebung befindlicher Stillstände [-] |
| S_{ges} | Menge der Prozesse mit anliegenden Stillständen innerhalb der gesamten Prozesskette [-] |
| $SD_{P_n}(k)$ | Stillstandsdauer eines Prozesses bei der Behebungsreihenfolge k in [s] |
| $SD_{PS_m}(b)$ | Stillstandsdauer einer Prozessstufe bei der Behebungsreihenfolge b in [s] |
| Seq_k | Sequenz der Behebungsreihenfolge k [-] |
| SU | Störungsbedingte Unterbrechungen [-] |
| t_d | Entscheidungszeitpunkt in [s] |
| t_{in} | Zeitpunkt der letzten Einschleusung eines Werkstückes in ein Verkettungselement in [s] |
| $t_{Instandsetzung\ Start\ P_n}$ | Startzeitpunkt einer Instandsetzungsmaßnahme eines Prozesses in [s] |
| $\Delta t_{Instandsetzung\ Rest\ P_n}$ | Verbleibende Instandsetzungszeit eines Prozesses in [s] |
| $\Delta t_{latente\ Phase\ P_n}(k)$ | Dauer der latenten Phase eines Stillstandes an einem Prozess mit der Behebungsreihenfolge k in [s] |
| $\Delta t_{latente\ Phase\ PS_m}$ | Dauer der latenten Phase eines Stillstandes an einer Prozessstufe in [s] |
| $\Delta t_{Nachwirkzeit\ P_n}(k)$ | Nachwirkzeit eines Stillstandes an Prozess mit der Behebungsreihenfolge k in [s] |
| $\Delta t_{Nachwirkzeit\ PS_m}$ | Nachwirkzeit eines Stillstandes an einer Prozessstufe in [s] |
| t_{out} | Zeitpunkt der letzten Ausschleusung eines Werkstückes aus einem Verkettungselement in [s] |
| $\Delta t_{produktiv}$ | Produktive Zeitdauer der Referenzprozessstufe während der manifesten Phase eines Sekundärstillstandes in [s] |
| Δt_{rest} | Restlänge des letzten Arbeitstaktes der Referenzprozessstufe in [s] |
| $\Delta t_{zyklus\ PS_m}$ | Zeitspanne, in der die Referenzprozessstufe entsprechen der Zykluszeit einer redundanten Prozessstufe produziert in [s] |
| t_w | Startzeitpunkt des Wartezustands der Referenzprozessstufe in [s] |
| t_0 | Zeitpunkt, an dem die freie Pufferkapazität erschöpft ist in [s] |

| | |
|-----------------------|---|
| T | Menge aller Prozessstufen mit zu priorisierenden Stillständen [-] |
| $T_{Start P_n}$ | Eintrittszeitpunkt eines geplanten Stillstandes eines Prozesses in [s] |
| T_{Ende} | Simulationsendzeitpunkt in [s] |
| $T_{Ende P_n}$ | Prozessbezogener Simulationsendzeitpunkt in [s] |
| T_0 | Startzeitpunkt des Forecast-Modells in [s] |
| TTR_{P_n} | Reparaturdauer („Time To Repair“) eines Prozesses in [s] |
| TZ_{P_n} | Taktzeit eines Prozesses in [s] |
| $TZ_{PS_{Ref}}$ | Taktzeit der Referenzprozessstufe in [s] |
| $TZ_{rep PS_m}$ | Repräsentative Taktzeit einer redundanten Prozessstufe in [s] |
| U | Menge aller zu priorisierender, selektierter Prozessstufen [-] |
| V | Verfügbarkeit in [%] |
| V_t | Technische Verfügbarkeit in [%] |
| v_T | Transportgeschwindigkeit der Werkstücke in $\left[\frac{m}{s}\right]$ |
| VD_{VK_m} | Verzögerungsdauer eines Verkettungselements in [s] |
| VK_m | Verkettungselement m mit $m \in \{1, \dots, M - 1\}$ [-] |
| VK_{in} | Anzahl in ein Verkettungselement eingetretener Werkstücke zum Zeitpunkt t in [Stück] |
| VK_{Ref} | Verkettungselement nach der Referenzprozessstufe [-] |
| VK_{out} | Anzahl aus einem Verkettungselement ausgetretener Werkstücke zum Zeitpunkt t in [Stück] |
| W | Anzahl der von der Referenzprozessstufe zusätzlich produzierter Werkstücke in [Stück] |
| W_{VD} | Anzahl der Werkstücke, für die die Verweildauerbedingung nicht erfüllt ist in [Stück] |
| $WZ_{Instand P_n}(k)$ | Wartezeit eines Prozesses auf Instandsetzung bei der Behebungsreihenfolge k in [s] |
| Z | Menge noch offener, zu priorisierender Prozessstufen [-] |
| ZZ_{P_n} | Zykluszeit eines Prozesses in [s] |
| $ZZ_{PS_{Ref}}$ | Zykluszeit der Referenzprozessstufe in [s] |
| $ZZ_{rep PS_m}$ | Repräsentative Zykluszeit einer redundanten Prozessstufe in [s] |
| σ | Eingabesequenz [-] |

1 Einleitung

Durch die Globalisierung sind produzierende Unternehmen zunehmend einer erhöhten Wettbewerbsintensität ausgesetzt und somit gezwungen, ihre Produktions- und Logistikprozesse stetig zu optimieren (vgl. Pawellek 2016: 1). Unternehmen müssen ihre Produkte in hoher Qualität, zu möglichst geringen Kosten sowie mit hoher Liefertermintreue produzieren. Auf Produktseite reagieren die Unternehmen auf die gestiegene Wettbewerbsintensität mit einer zunehmenden Individualisierung ihrer Produkte, wodurch die Variantenvielfalt ansteigt und größere Produktportfolios entstehen. Gleichzeitig verkürzen sich die Produktlebenszyklen immer weiter (vgl. Hotz 2007: 1). Infolgedessen nehmen der Komplexitätsgrad von Produktionssystemen und damit auch die Kapitalkosten für Anschaffung und Betrieb stetig zu (vgl. Gopalakrishnan und Skoogh 2018: 654). Moderne, hochautomatisierte Produktionssysteme stellen somit einen hohen Anlagenwert dar, wobei ein wirtschaftlicher Betrieb dieser Systeme nur durch eine hohe Auslastung erreichbar ist (vgl. Strunz 2012: 10).

Allerdings führen bei stark ausgelasteten Produktionssystemen während der geplanten Betriebszeit auftretende Maschinenstillstände, bedingt beispielsweise durch technische Störungen oder vorbeugende Instandhaltungsmaßnahmen, zu hohen Produktionsverlusten (vgl. Kröning und Denkena 2013: 292). Dabei betreffen diese Stillstände nicht nur die jeweiligen Maschinen, sondern können sich auch auf weitere Produktionsressourcen des Produktionssystems auswirken (vgl. Skoogh et al. 2011: 3). Die Umsetzung von Organisationsstrukturen wie „Lean Production“ und „Just-in-Time Production“ führt zudem zu einem geringeren Bestand in Produktionssystemen, wodurch die Auswirkungen von Stillständen zusätzlich verstärkt werden (vgl. Pawellek 2016: 1).

Komplexe Produktionssysteme bestehen meistens aus einer großen Anzahl unterschiedlicher Produktionsressourcen, wie zum Beispiel Bearbeitungsmaschinen und Fördermittel. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass zeitgleich Stillstände an mehreren Produktionsressourcen anliegen (vgl. Wedel 2016: 2). Solange zuständiges Personal im ausreichenden Maße zur Stillstandsbehebung zur Verfügung steht, ist keine Bestimmung einer Priorisierungsreihenfolge notwendig. In der Praxis steht allerdings meist nur eine begrenzte Anzahl an Produktionsmitarbeitern zur Verfügung, sodass eine Priorisierung der anliegenden Stillstände nach ihrer jeweiligen Auswirkung auf das Produktionssystem erforderlich ist. Durch eine solche Priorisierung werden Reaktionszeiten bei den schwerwiegendsten Stillständen reduziert und Produktionsverluste aufgrund vermeidbarer Wartezeiten minimiert.

In der Instandhaltung hat in den letzten Jahren ein Paradigmenwechsel hin zu einer zustandsorientierten, vorausschauenden Instandhaltungsstrategie begonnen. Diese Instandhaltungsstrategie, auch als prädiktive Instandhaltung oder „Predictive Maintenance“ bezeichnet, ermöglicht die Prognose von Maschinenstillständen (vgl. Zhai und Reinhart 2018: 299). Dabei ist es heute bereits möglich,

den aktuellen Zustand von Produktionsmaschinen durch moderne Anlagen- und Messtechnik zu erfassen sowie den Zustandsverlauf zu überwachen (vgl. Pawellek 2016: 161). Auf Grundlage dieser Daten und mit Hilfe von Algorithmen sollen „Predictive Maintenance“ Systeme die Ausfallwahrscheinlichkeit von Komponenten bestimmen (vgl. Schmitz und Krengel 2014: 1230). Folglich wird es möglich sein, den Ausfallzeitpunkt und damit notwendige Instandhaltungsbedarfe vor dem plötzlichen Stillstand einer Produktionsressource zu prognostizieren. Dies hat neben einer effektiveren Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen durch eine bessere Ressourcen- und Personalbedarfsplanung aufgrund der höheren Reaktionszeit auf bevorstehende Maschinenausfälle auch die Folge, dass der Zeitpunkt für die Durchführung dieser Maßnahmen im Voraus geplant und optimiert werden kann (vgl. Mühlnickel et al. 2018: 355). Allerdings können auch geplant durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen gerade bei hoch ausgelasteten Produktionssystemen, die in der Regel in einem Dreischichtbetrieb produzieren, zu Produktionsverlusten führen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein operatives Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt und evaluiert, welches den Produktionsmitarbeitern eine objektiv ermittelte Priorisierungsreihenfolge zum Entscheidungszeitpunkt anliegender Stillstände zur Verfügung stellt. Da bei der Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge auch zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten, die beispielsweise aus einer prädiktiven Instandhaltungsstrategie resultieren, berücksichtigt werden, können die Auswirkungen dieser Stillstände proaktiv vermindert werden. Durch die Abbildung und Berücksichtigung der Dynamik und Komplexität verketteter Produktionssysteme kann zudem die mit dem Blick auf das Gesamtsystem optimale Priorisierungsreihenfolge ermittelt werden. Durch Einbeziehung sowohl zum Entscheidungszeitpunkt anliegender Stillstände als auch geplanter zukünftiger Stillstandszeiten in die Entscheidungsfindung sollen schließlich Produktionsverluste minimiert und Produktionskosten nachhaltig gesenkt werden.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für ein einheitliches Begriffsverständnis geschaffen sowie relevante Erkenntnisse aus bereits bestehenden wissenschaftlichen Arbeiten vorgestellt. Dazu wird zunächst in Kapitel 2.1 das in dieser Arbeit betrachtete Fließfertigungssystem von weiteren Organisationformen eines Fertigungssystems abgegrenzt und seine Eigenschaften sowie wichtige Kennzahlen beschrieben. In Kapitel 2.2 folgt dann eine Übersicht über die unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien und eine Einordnung des Stillstandsbegriffs. Das dritte Unterkapitel widmet sich dem Bereich Simulation und Optimierung als methodische Grundlage für das in dieser Arbeit entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem. Abschließend werden in Kapitel 2.4 bestehende wissenschaftliche Ansätze auf dem Gebiet der Priorisierung von Maschinenstillständen vorgestellt.

2.1 Produktionssystem

Die Produktion kann als wertschöpfender Transformationsprozess verstanden werden. Dabei werden Arbeitsobjekte, wie beispielsweise Rohstoffe oder Zwischenprodukte, unter Einsatz von Produktionsfaktoren, wie Arbeitskräfte und Maschinen, zu wertgesteigerten Produkten umgewandelt (vgl. Günther und Tempelmeier 2012: 7). Die für diesen Wertschöpfungsprozess benötigte Infrastruktur stellt dabei das Produktionssystem zur Verfügung, wobei die kleinsten wertschöpfenden Einheiten innerhalb dieses Systems die Produktiveinheiten sind, die als kleine Quadrate in Abbildung 1 dargestellt sind.

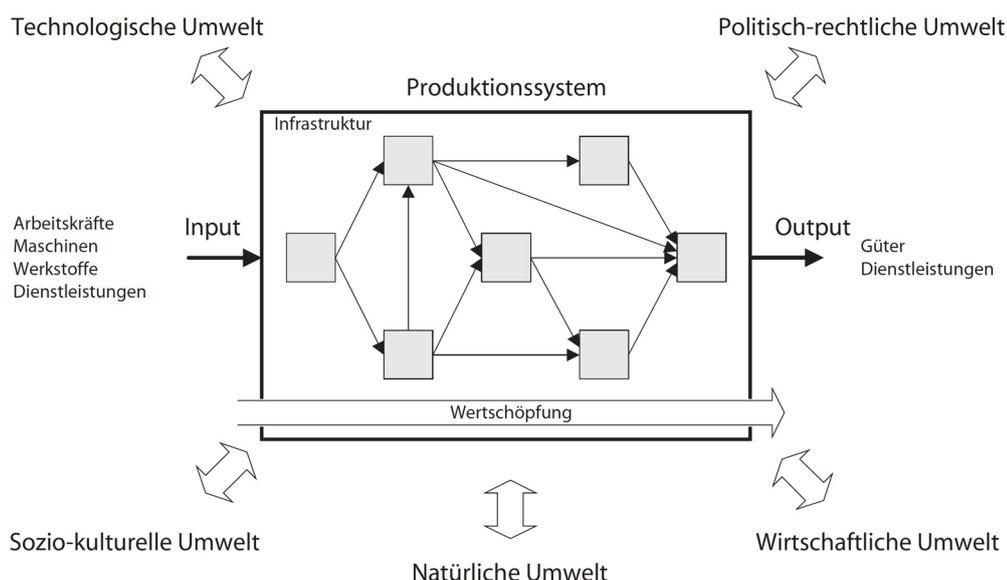


Abbildung 1: Einbettung des Produktionssystems in seine Umwelt
(Günther und Tempelmeier 2012: 2)

Das Produktionssystem lässt sich weiter in die zwei Subsysteme Fertigungssystem und Logistiksystem einteilen (vgl. Khateeb 2014: 14). In Fertigungssystemen können dabei entweder Halbfabrikate wie Bleche, Rohre oder auch Zwischenprodukte wie Kurbelgehäuse hergestellt oder zu funktionsfähigen Einheiten zusammengesetzt werden. Während im letzten Fall von einem Montagesystem gesprochen wird, werden Systeme im ersten Fall als Teilefertigungssystem bezeichnet. Im Fokus dieser Arbeit sollen Fertigungssysteme stehen, bei denen überwiegend Teilefertigungsumfänge durchgeführt werden.

2.1.1 Organisationsformen von Fertigungssystemen

Fertigungssysteme lassen sich nach der organisatorischen Anordnung und den erforderlichen Transportbeziehungen in verschiedene Organisationsformen unterscheiden. Eine entsprechende Einteilung ist in Abbildung 2 dargestellt.

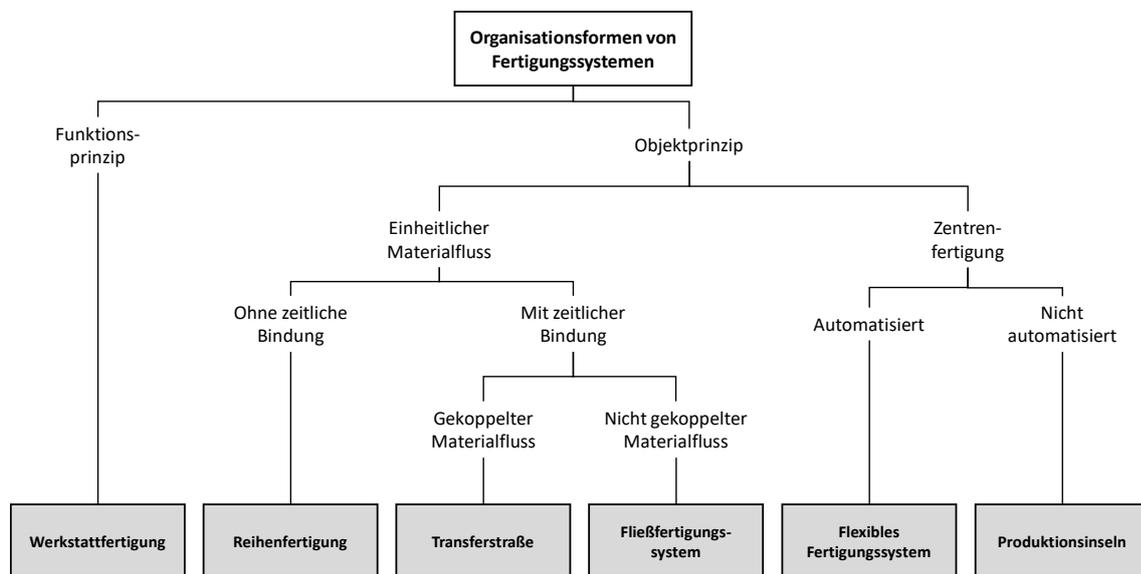
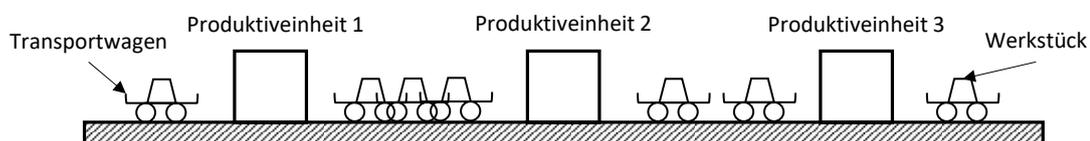


Abbildung 2: Organisationsformen von Fertigungssystemen
(in Anlehnung an Günther und Tempelmeier 2012: 13)

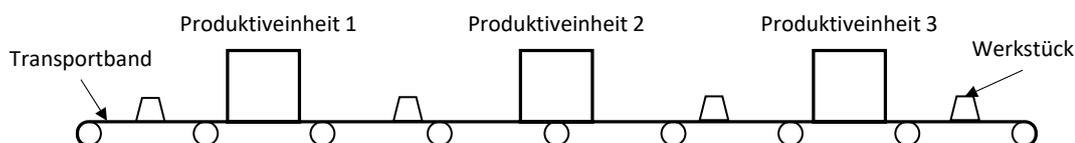
Danach lassen sich Fertigungssysteme grundsätzlich nach dem Funktions- oder nach dem Objektprinzip einteilen. Nach dem Funktionsprinzip sind die Produktiveinheiten so angeordnet, dass gleichartige Maschinen bzw. Arbeitsplätze räumlich zusammengefasst werden. In diesem Fall wird von einer Werkstattfertigung gesprochen. Vorteilhaft bei dieser Organisationsform ist die hohe Flexibilität im Hinblick auf Änderungen im Produktionsprogramm. Allerdings ist hier auch eine auf alle Produktiveinheiten abgestimmte Auftragssteuerung schwierig zu implementieren, sodass sich durch wartende Aufträge hohe Bestände und lange Durchlaufzeiten ergeben (vgl. Günther und Tempelmeier 2012: 14).

Im Gegensatz zum Funktionsprinzip orientiert sich die Anordnung der Produktiveinheiten beim Objektprinzip nach der Reihenfolge der durchzuführenden Arbeitsschritte. Ist der Materialfluss dabei einheitlich, d. h. werden die Produktiveinheiten entsprechend der Reihenfolge der Arbeitsschritte angeordnet, und erfolgt der Arbeitsfortschritt ohne eine zeitliche Bindung der Arbeitsgänge, so wird von einer Reihenfertigung gesprochen. Folgt der Arbeitsfortschritt hingegen einer zeitlichen Bindung, so liegt eine Verkettung der einzelnen Produktiveinheiten zu einem Gesamtsystem vor (vgl. Günther und Tempelmeier 2012: 16). Von einer Transferstraße wird in diesem Zusammenhang gesprochen, wenn die Werkstücke fest mit dem Transportsystem verbunden sind und sich nur simultan fortbewegen können. Der Materialfluss erfolgt somit synchron, d. h. im Takt der Produktiveinheit mit der größten Prozesszeit (vgl. Grundig 2018: 125). Können sich die Werkstücke hingegen aufgrund von selbständigen Transportsystemen bzw. Pufferstrecken zwischen den einzelnen Produktiveinheiten unabhängig voneinander bewegen, sodass ein asynchroner Materialfluss möglich ist, so liegt ein Fließfertigungssystem vor. Durch die Pufferstrecken ist es möglich, eine begrenzte zeitliche Entkopplung der Produktiveinheiten zu erreichen, sodass die Auswirkungen von Stillständen oder Zeitabweichungen an Produktiveinheiten für die benachbarten Einheiten reduziert werden (vgl. Grundig 2018: 125). In Abbildung 3 ist zur Verdeutlichung der Unterschied zwischen Reihenfertigung, Transferstraße und Fließfertigung dargestellt.

Reihenfertigung



Transferstraße



Fließfertigung

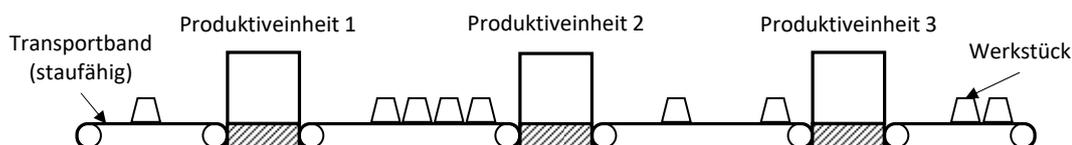


Abbildung 3: Fertigungssysteme mit einheitlichem Materialfluss
(in Anlehnung an Kummer et al. 2009: 135)

Die Vorteile sowohl der Transferstraße als auch des Fließfertigungssystems sind der vergleichsweise übersichtliche Materialfluss, geringe Bestände zwischen den Produktiveinheiten sowie eine einfache Auftragssteuerung. Allerdings erfordert die zeitliche Bindung auch eine gute Abstimmung der Kapazitäten der einzelnen Produktiveinheiten, wodurch die Systeme nur noch bedingt flexibel gegenüber Änderungen des Produktionsprogramms sind. Außerdem erhöht sich durch die Verkettung die Störanfälligkeit des Gesamtsystems (vgl. Grundig 2018: 125).

Ebenfalls nach dem Objektprinzip werden die Produktiveinheiten bei der Zentrenfertigung angeordnet, wobei hier nun auch unterschiedliche Materialflüsse vorkommen können. Nach dem Automatisierungsgrad wird in die Organisationsformen flexible Fertigungssysteme sowie Fertigungsinseln differenziert. Mit der Zentrenfertigung, die als Mischform zwischen der Werkstatt- und der Fließfertigung gilt, wird versucht, einen Kompromiss zwischen hoher Flexibilität sowie kurzen Durchlaufzeiten mit entsprechend geringen Beständen zu erzielen (vgl. Günther und Tempelmeier 2012: 17).

In der Automobilindustrie wird insbesondere im Bereich der Komponentenfertigung eine hohe Ausbringungsleistung gefordert. Die zu produzierenden Produkte, wie Kurbelwellen und Kurbelgehäuse, weisen dabei nur eine begrenzte Anzahl von Varianten auf. Um eine möglichst hohe Produktivität zu erreichen werden deshalb Fließfertigungssysteme eingesetzt. Dadurch ist es möglich, die geforderten hohen Stückzahlen zu produzieren.

2.1.2 Komplexe Fließfertigungssysteme

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf komplexen Fließfertigungssystemen. Die Hauptkomponenten solcher Systeme sind die Produktiveinheiten, auch als Bearbeitungsstationen oder Maschinen bezeichnet, und Puffer.

Produktiveinheiten, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Prozesse bezeichnet werden, bilden jeweils einen Abschnitt des gesamten Fertigungsprozesses (vgl. Günther und Tempelmeier 2012: 7). Der Abschnitt kann dabei aus einem oder mehreren Prozessschritten bestehen. Beispiele für Prozessschritte sind Fräs- oder Bohroperationen sowie Schraub- oder Prüfvorgänge, die abhängig vom Automatisierungsgrad entweder automatisiert, teilautomatisiert oder manuell ausgeführt werden können (vgl. Khateeb 2014: 20). Bei Fließfertigungssystemen ist darauf zu achten, dass die Gesamtdauern zur Durchführung der Prozessschritte je Prozess keine zu großen Unterschiede zwischen den einzelnen Prozessen aufweisen, da sich sonst hohe Bestände und Wartezeiten negativ auf die Durchlaufzeit des Gesamtsystems auswirken. Sollten Prozessschritte nicht weiter zerlegbar sein, so können auch mehrere Prozesse die gleichen Prozessschritte ausführen. Diese Prozesse werden dann zusammengefasst als redundante Prozessstufe oder auch als Parallelstation bezeichnet.

Da in einem Fließfertigungssystem die Prozessstufen entsprechend der durchzuführenden Prozessschritte in Reihe angeordnet werden, kann auch von einer mehrstufigen Prozesskette gesprochen werden (vgl. Kröning 2014: 5). Beinhaltet diese nur einfache Prozessstufen, d. h. keine Prozessstufen, in denen mehrere Prozesse die gleichen Prozessschritte ausführen, so wird von einer seriellen oder auch eindimensionalen Anordnung gesprochen. Im anderen Fall, wenn neben einfachen auch redundante Prozessstufen vorhanden sind, liegt eine mehrdimensionale Anordnung vor (Abbildung 4).

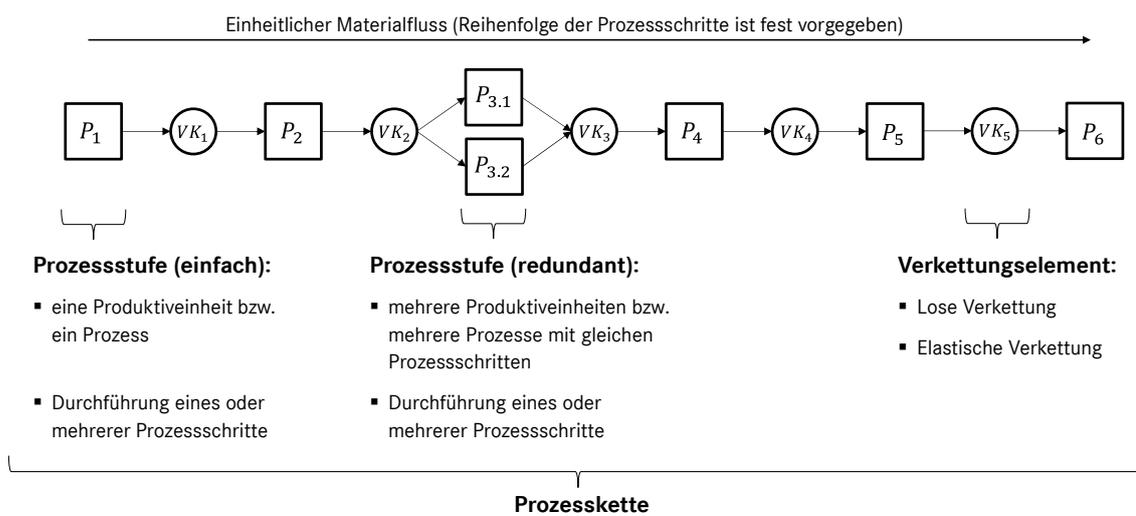


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Prozesskette

Zwischen den Prozessstufen befinden sich bei Fließfertigungssystemen Puffer, wobei diese in der vorliegenden Arbeit als Verkettungen bzw. als Verkettungselemente bezeichnet werden. Verkettungen können grundsätzlich als Speicherressourcen verstanden werden, die neben der räumlichen Verbindung häufig auch dem Ausgleich von Zeit- und Mengendifferenzen zwischen den einzelnen Prozessstufen dienen (vgl. Khateeb 2014: 22). Dabei können Verkettungen zum einen zeitliche Schwankungen bei der Bearbeitung zwischen Prozessstufen ausgleichen (Ausgleichspuffer) und zum anderen die Auswirkung von Störungen abmildern (Störungspuffer). So können Wartezeiten, sogenannte Verkettungsverluste, die an Prozessstufen aufgrund von Störungen anderer Prozessstufen durch einen unterbrochenen Materialfluss entstehen, reduziert werden (vgl. Krüger 2000: 9). Somit sorgen Verkettungen für eine gleichmäßigere Ausbringungslleistung von Fließfertigungssystemen, verursachen allerdings durch höhere Bestände im Gesamtsystem auch eine höhere Kapitalbindung. Nach Krüger (2000: 9) lassen sich drei verschiedenen Verkettungsarten unterscheiden (Abbildung 5).

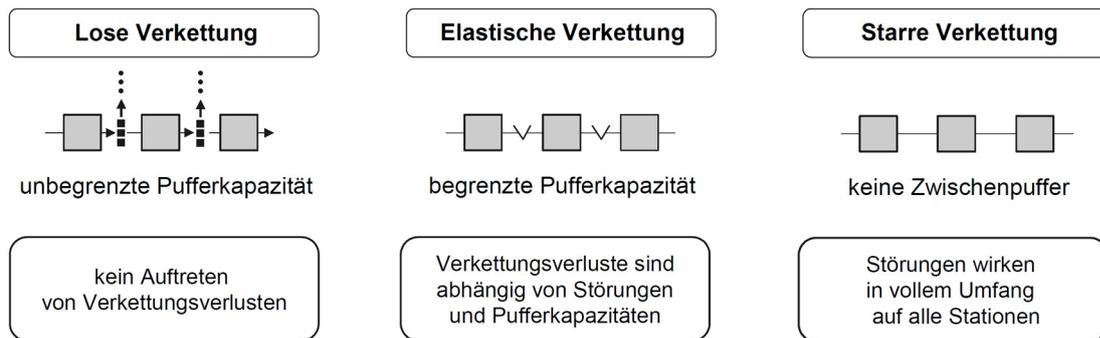


Abbildung 5: Verkettungsarten in einer Fließfertigung (Krüger 2000: 9)

Die lose Verkettung ist charakterisiert durch eine unbegrenzte Pufferkapazität zwischen den Prozessstufen, wodurch Verkettungsverluste vollständig vermieden werden können. So führt zum Beispiel eine Störung nicht zu Wartezeiten aufgrund fehlender Werkstücke am Einlauf nachfolgender, stromabwärts gelegener Prozessstufen, da durch die unbegrenzte Pufferkapazität und den per Definition ausreichenden Pufferfüllstand einer losen Verkettung stets genügend Werkstücke zur Verfügung stehen. Auch an stromaufwärts gelegenen Prozessstufen werden bei der losen Verkettung Verluste vermieden, die bei einer begrenzten Pufferkapazität durch Wartezeiten aufgrund eines blockierten Auslaufs entstünden (vgl. Krüger 2000: 9).

Im Gegensatz dazu können Verkettungsverluste bei den weiteren Verkettungsarten teilweise (elastische Verkettung) oder gar nicht (starre Verkettung) verhindert werden. Bei der elastischen Verkettung können zwar Verluste in Abhängigkeit der Stördauer sowie der freien Pufferkapazität reduziert, aber häufig nicht mehr vollständig kompensiert werden. Eine noch geringere Kompensationswirkung hat die starre Verkettung, bei der die Prozessstufen ohne Zwischenpuffer direkt verbunden werden. Hier führen bereits einzelne Störungen zu einem Stillstand des Gesamtsystems (vgl. Hegenscheidt 2003: 11). Da eine lose Verkettung gerade bei einer großen Anzahl an Prozessstufen aus wirtschaftlichen Gründen nicht realisierbar und eine starre Verkettung im Hinblick auf die fehlende Störungskompensation nicht empfehlenswert ist, werden in Fließfertigungssystemen überwiegend elastische Verkettungen eingesetzt (vgl. Krüger 2000: 9).

Zusammenfassend setzt sich ein komplexes Fließfertigungssystem demnach aus vielen Prozessstufen und Verkettungen zusammen, die in einer mehrstufigen Prozesskette angeordnet sind. Ferner sind einige Prozessstufen redundant ausgeführt, wodurch eine mehrdimensionale Struktur vorliegt. Außerdem sind die Logistik-, Produktions- sowie Informationsflüsse von der Zeit abhängig und führen zu einem dynamischen Verhalten des Fließfertigungssystems. Als Ursachen dieser Dynamik können beispielsweise das Auftreten von Störungen, Verkettungsverluste durch die wechselseitigen Beziehungen zwischen den Prozessstufen sowie Taktzeitunterschiede angeführt werden (vgl. Kröning 2014: 5 f.).

2.1.3 Produktionskennzahlen

Um Produktionssysteme im Allgemeinen sowie Fließfertigungssysteme im Speziellen zu beschreiben und ihre Leistung mit anderen Systemen zu vergleichen, werden Kennzahlen verwendet. Im Folgenden werden nun für den weiteren Verlauf der Arbeit wichtige Kennzahlen vorgestellt. Dabei wird zwischen Prozesskennzahlen, Verkettungskennzahlen sowie Systemkennzahlen, die die Leistung des Gesamtsystems beschreiben, unterschieden.

Da einige Kennzahlen einen zeitlichen Bezug aufweisen, wird zunächst ein grundlegendes Zeitmodell für die Produktion nach VDMA 66412-1 vorgestellt (Abbildung 6).

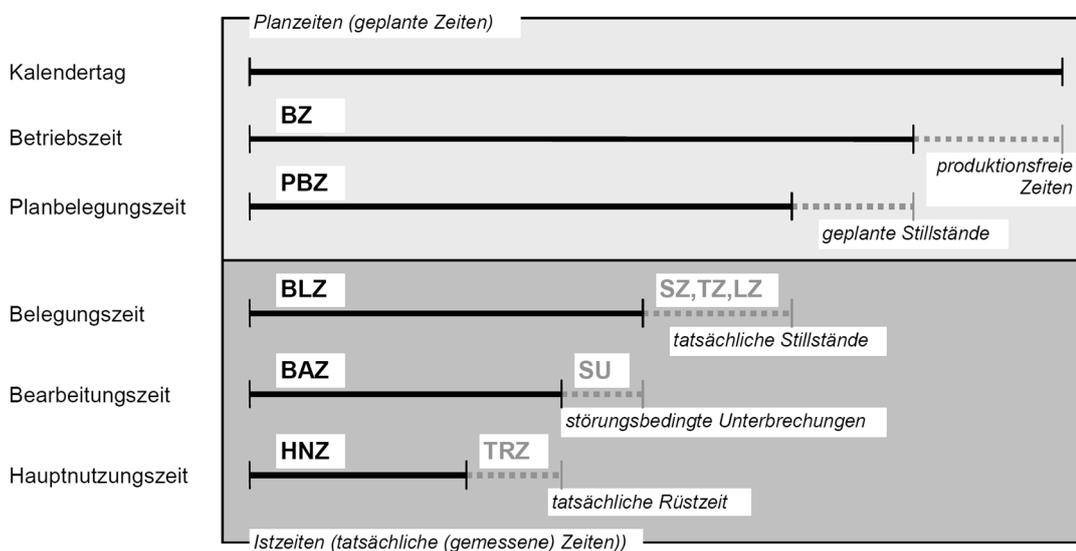


Abbildung 6: Zeitmodell für die Produktion (VDMA 66412-1 2009: 9)

Bei diesem Modell wird zwischen Plan- und Istzeiten unterschieden. Planzeiten sind die Betriebszeit (BZ) und die Planbelegungszeit (PBZ). Ausgehend von dem maximal möglichen täglichen Produktionszeitraum von einem Kalendertag bzw. 24 Stunden ergibt sich die Betriebszeit durch Abzug der produktionsfreien Zeiten, wie ungeplante Produktionsschichten. Die Planbelegungszeit wiederum folgt aus der Betriebszeit durch Abzug der geplanten Stillstandszeiten, die zum Beispiel für geplante Wartungsmaßnahmen vorgesehen werden.

Istzeiten sind im Unterschied zu den Planzeiten die in der Produktion tatsächlich angefallenen Zeiten. Hier wird zwischen der Belegungszeit (BLZ), der Bearbeitungszeit (BAZ) sowie der Hauptnutzungszeit (HNZ) differenziert. Die Belegungszeit ergibt sich aus der Planbelegungszeit, wobei die tatsächlichen Stillstandszeiten aufgrund von fehlenden Fertigungsaufträgen (SZ), Transportzeiten (TZ) und Liegezeiten (LZ) abgezogen werden. Werden weiter noch die Zeiten für

störungsbedingte Unterbrechungen, die durch ungeplant eingetretene Stillstände auftreten, abgezogen, ergibt sich die Bearbeitungszeit (BAZ). Die Hauptnutzungszeit (HNZ) folgt schließlich durch Berücksichtigung der tatsächlichen Rüstzeiten (TRZ) und ist die Zeit, in der ein Prozess produziert, d. h. nur wertschöpfende Prozessschritte durchführt (vgl. VDMA 66412-1 2009: 7 f.).

Im Folgenden werden nun für das einheitliche Verständnis dieser Arbeit wichtige Prozesskennzahlen vorgestellt.

Mit der Prozesszeit *PZ* wird insbesondere bei automatisierten Prozessen angegeben, „wie lange sich Teile im jeweiligen Produktionsprozess befinden“ (Erlach 2010: 61). Dabei wird unterschieden, ob in einem Prozess ein Werkstück oder mehrere Werkstücke in einer Charge bearbeitet werden können. Im Fall eines Werkstücks ergibt sich die Prozesszeit als Zeitdauer zwischen dem Beginn der Bearbeitung und der Fertigstellung des Werkstückes. Bei mehreren Werkstücken, die parallel bearbeitet werden, gilt die Prozesszeit als Zeitdauer zwischen dem Beginn der Produktion des ersten Werkstückes einer Charge und der Fertigstellung des letzten Werkstückes derselben Charge (vgl. Erlach 2010: 62).

Der Arbeitstakt eines Prozesses beschreibt die Phase zwischen der Fertigstellung eines Werkstückes und der Fertigstellung des nächsten Werkstückes (vgl. Habenicht 2017: 27). Die Länge eines Arbeitstaktes wird dabei durch die Taktzeit *TZ* definiert, wenn während des Taktes keine unproduktiven Prozesszustände, wie beispielsweise technische Störungen, auftreten. Treten hingegen unproduktive Zustände auf, so wird der Arbeitstakt durch die Zykluszeit *ZZ* bestimmt. Die Taktzeit, die insbesondere bei Fließfertigungssystemen einen großen Einfluss auf die Leistung des Gesamtsystems hat, wird in Anlehnung an Günter und Tempelmeier (2012: 93 f.) aus der zu produzierenden Werkstückmenge, die pro Periode eines Fließfertigungssystems geplant ist, abgeleitet (vgl. Krüger 2000: 10):

$$TZ = \frac{\text{Planungszeitraum}}{\text{geplante Produktionsmenge}} \quad (2.1)$$

Wird bei einem Prozess immer nur ein Werkstück bearbeitet, so sind Taktzeit und Prozesszeit gleich (vgl. Erlach 2010: 63). Wie in Habenicht (2017: 27) erläutert wird, kann sich der Arbeitstakt durch Störereignisse verlängern und folglich Werte größer als die Taktzeit annehmen. Zur Messung dieser Abweichung wird die Zykluszeit *ZZ* eines Prozesses verwendet, die als „Zeitspanne in Sekunden zwischen der Fertigstellung eines Teils und der Fertigstellung des nächsten Teils“ definiert ist (Syska 2006: 145). Da der Unterschied zwischen Taktzeit und Zykluszeit für das Verständnis dieser Arbeit wichtig ist, werden Taktzeit und Zykluszeit für diese Arbeit wie folgt definiert:

Die Taktzeit TZ ist die Zeitspanne in Sekunden zwischen der Fertigstellung eines Werkstückes und der Fertigstellung des nächsten Werkstückes, wobei unproduktive Prozesszustände, wie beispielsweise Wartezeiten aufgrund fehlender Werkstücke oder Störereignisse, nicht miteinbezogen werden. Wenn keine unproduktiven Prozesszustände während eines Arbeitstaktes auftreten, wird die Länge des Arbeitstaktes durch die Taktzeit beschrieben.

Die Zykluszeit ZZ ist die Zeitspanne in Sekunden zwischen der Fertigstellung eines Werkstückes und der Fertigstellung des nächsten Werkstückes, wobei produktive wie auch unproduktive Prozesszustände miteinbezogen werden. Die Zykluszeit definiert damit die Länge eines Arbeitstaktes, wenn unproduktive Prozesszustände auftreten.

Wie bereits aus Abbildung 6 ersichtlich, stehen Produktionsprozesse nur eine begrenzte Zeit für die Bearbeitung von Werkstücken zur Verfügung. Verfügbarkeitskennzahlen geben deshalb Auskunft darüber, wie stark die Kapazität von Prozessen für die Durchführung von wertschöpfenden Prozessschritten genutzt wird. Dabei wird die Verfügbarkeit als Quotient aus Hauptnutzungszeit und Planbelegungszeit berechnet (vgl. VDMA 66412-1 2009: 21).

Eine weitere Kennzahl in diesem Zusammenhang ist die technische Verfügbarkeit, die sich, angepasst an das in dieser Arbeit verwendete Zeitmodell (vgl. Abbildung 6), nach VDI 3423 (2011: 8) wie folgt berechnen lässt:

$$\text{Technische Verfügbarkeit } V_t = \frac{PBZ - SU}{PBZ} \quad (2.2)$$

Die technische Verfügbarkeit berücksichtigt als Ausfallzeiten nur Ausfälle, die auf Mängel in der Konstruktion oder Ausführung eines Prozesses zurückzuführen sind und gibt somit den Anteil der Planbelegungszeit, den ein Prozess „ohne technischen Mangel zur Produktion zur Verfügung“ steht, wieder (VDI 3423 2011: 8). Eine alternative Berechnung der technischen Verfügbarkeit ergibt sich, wie u. a. Eberlin und Hock (2014: 68) sie angeben, zu:

$$\text{Technische Verfügbarkeit } V_t = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \quad (2.3)$$

Dabei beschreibt die „Mean Time Between Failure“ ($MTBF$) die mittlere Zeitdauer, die zwischen zwei Fehlerzuständen eines Prozesses liegt. Die „Mean Down Time“ (MDT) charakterisiert hingegen die mittlere Zeitdauer zwischen dem Ausfall eines Prozesses und dem Zeitpunkt, an dem das erste Gutteil nach

der vollständigen Wiederinbetriebnahme produziert wird (vgl. Eberlin und Hock 2014: 67). Die Beschreibung des Wechsels zwischen den Systemzuständen „in Betrieb“ und „außer Betrieb“ eines Prozesses durch die *MTBF* und die *MDT* ist in Abbildung 7 verdeutlicht.

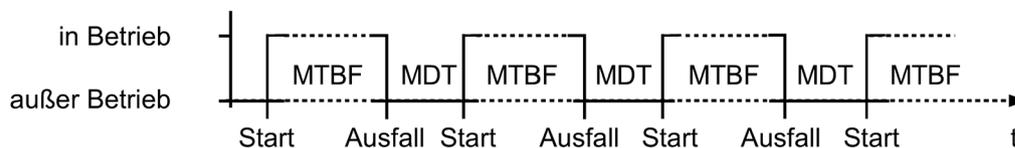


Abbildung 7: Charakterisierung des Ausfallverhaltens durch *MTBF* und *MDT*
(Eberlin und Hock 2014: 68)

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass in der Literatur häufig anstelle der „Mean Down Time“ der Begriff „Mean Time To Repair“ (*MTTR*) verwendet wird (vgl. u.a. Gutenschwager et al. 2017: 137; Lotter und Wiendahl 2012: 382). Da eine Differenzierung in Reparaturdauer und gesamter Stillstandszeit, die neben der eigentlichen Reparaturdauer beispielsweise auch die Zeitdauern für Warten auf Instandhaltungspersonal, Fehlersuche und Ersatzteilbeschaffung beinhaltet, für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wichtig ist, werden die Begriffe *MTTR* für die reine mittlere Reparaturdauer sowie *MDT* für die gesamte mittlere Stillstandszeit weiterverwendet.

Neben Prozessen sind Verkettungselemente weitere Hauptkomponenten eines Fließfertigungssystems. Dabei beruht deren Entkopplungswirkung auf der Fähigkeit, Werkstücke aufzunehmen, zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben, wobei diese Wirkung abhängig von der Pufferkapazität und dem Pufferfüllstand ist (vgl. Grundig 2018: 125). Die Pufferkapazität P_{max} wird als maximale Anzahl an Werkstücken, die ein Verkettungselement aufnehmen kann, definiert, während der Pufferfüllstand $P(t)$ die aktuelle Anzahl an Werkstücken beschreibt (vgl. Lotter und Wiendahl 2012: 344). Daraus folgt:

$$0 \leq P(t) \leq P_{max} \quad (2.4)$$

Je nach technischer Realisierung, zum Beispiel als Förderstrecke, können Verkettungselemente auch räumliche Unterschiede zwischen den Prozessstufen überbrücken. In diesem Fall weisen die Verkettungen zusätzlich eine Transportdauer auf, auch als Verzögerungsdauer VD bezeichnet, die sich aus der Länge der Transportstrecke s und der Geschwindigkeit v_T , mit denen die Werkstücke auf dieser bewegt werden, errechnet (vgl. Habenicht 2017: 60; Krüger 2000: 13):

$$VD = \frac{s}{v_T} \quad (2.5)$$

Dabei ist zu beachten, dass die Verzögerungsdauer als Zeitspanne zwischen dem Eintreten eines Werkstücks und dem Austreten bei einer leeren Verkettung definiert ist (vgl. Krüger 2000: 13). Die tatsächliche Durchlaufzeit eines Werkstücks kann in Abhängigkeit des Pufferfüllstandes durchaus länger sein als die reine Verzögerungsdauer (vgl. Habenicht 2017: 61).

Nachdem nun wichtige Kennzahlen für die Beschreibung von Prozessen und Verkettungselementen erläutert wurden, wird im Folgenden abschließend noch die Ausbringung als Systemkennzahl vorgestellt, die häufig für die Beurteilung der Leistung von Fließfertigungssystemen Verwendung findet. Bei der Beschreibung des Verhaltens des Gesamtsystems müssen insbesondere auch die Wechselwirkungen zwischen den Prozessen berücksichtigt werden, wobei die Leistung des Gesamtsystems durch den Engpass bestimmt wird (vgl. Krüger 2000: 14).

In der Literatur existieren eine Vielzahl von Engpassdefinitionen. Dabei haben die Autoren durch ausführliche Literaturanalysen gezeigt, dass häufig der Prozess mit dem größten Einfluss auf die Produktionsmenge des gesamten Produktionssystems als Engpass definiert wird (vgl. Lemessi et al. 2012: 3093; Wedel 2016: 21). Engpässe sind in der Regel nicht statisch, sondern verändern sich dynamisch und können in diesem Kontext in durchschnittliche sowie momentane Engpässe unterteilt werden (vgl. Roser et al. 2002: 1081). Während durchschnittliche Engpässe aus langfristigen Analysen hervorgehen und damit eher Aussagen über das Langzeitverhalten von Produktionssystemen getroffen werden können, eignen sich momentane Engpässe zur Analyse des Kurzzeitverhaltens (vgl. Lemessi et al. 2012: 3093). So entsteht ein momentaner Engpass aufgrund zufälliger Ereignisse, wie beispielsweise Maschinenstillstände, und beeinflusst die Produktionsmenge des Gesamtsystems solange, bis der Stillstand und seine Auswirkungen vollständig beendet sind (vgl. Sengupta et al. 2008: 1741). Zur Ermittlung von Engpässen kommen analytische wie auch simulationsbasierte Methoden zum Einsatz. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für diese Arbeit relevante Methoden zusammen mit dem aktuellen Forschungsansätzen im Bereich „Priorisierung von Maschinenstillständen“ im Kapitel 2.4 näher vorgestellt werden. Einen ausführlichen Überblick über Engpassermittlungsmethoden bieten Wedel (2016: 23-35) sowie Roser und Nakano (2015).

Treten in einem Fließfertigungssystem keine Stillstände auf, so wird das Systemverhalten durch die Prozessstufe mit der höchsten Taktzeit bestimmt, die damit den Engpass bildet (vgl. Krüger 2000: 14; Sengupta et al. 2008: 1742). Kann dieser

Engpass nun ununterbrochen produzieren, wird die theoretisch maximale Produktionsmenge erreicht, die auch als geplante Produktionsmenge bezeichnet werden kann (vgl. DIN 8743 2014: 8).

In der Realität tritt der Fall, dass im System keine Stillstände auftreten, in der Regel nur selten ein, sodass die tatsächlich erzeugte Produktionsmenge, wie in Abbildung 8 dargestellt, durch Ausbringungsverluste geringer als die geplante Produktionsmenge ausfällt (vgl. DIN 8743 2014: 8).

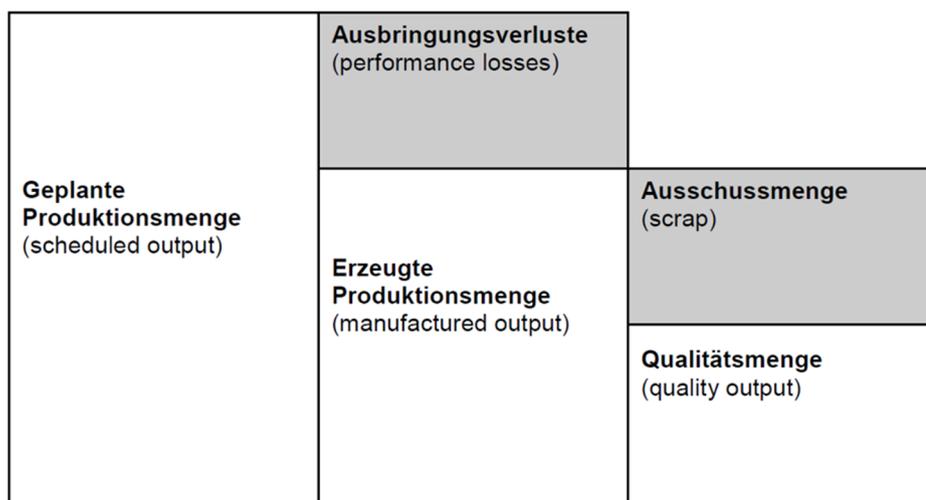


Abbildung 8: Mengenmodell (DIN 8743 2014: 19)

Damit kann abschließend die Ausbringung eines Fließfertigungssystems in Anlehnungen an DIN 8743 (2014: 9) als Quotient aus erzeugter Produktionsmenge und Zeiteinheit definiert werden. Im Gegensatz zum Durchsatz, der auf Prozessebene die produzierte Menge je Zeiteinheit definiert, bezieht sich die Ausbringung dabei auf die Produktionsmenge des Gesamtsystems (vgl. VDMA 66412-1 2009: 16).

2.2 Instandhaltung

Nachdem das Fließfertigungssystem und wichtige Produktionskennzahlen genauer beschrieben wurden, wird nun die Instandhaltung als organisatorische Einheit eines produzierenden Unternehmens, welche u. a. die Instandsetzung von Prozessen verantwortet, vorgestellt. Dabei wird unter Instandhaltung die „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus eines Objekts, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres [sic!] funktionsfähigen Zustands dient, sodass es die geforderte Funktion erfüllen kann“ verstanden (DIN 31051 2019: 4). Instandhaltungsmaßnahmen können in diesem Kontext nach Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung differenziert werden (Abbildung 9).

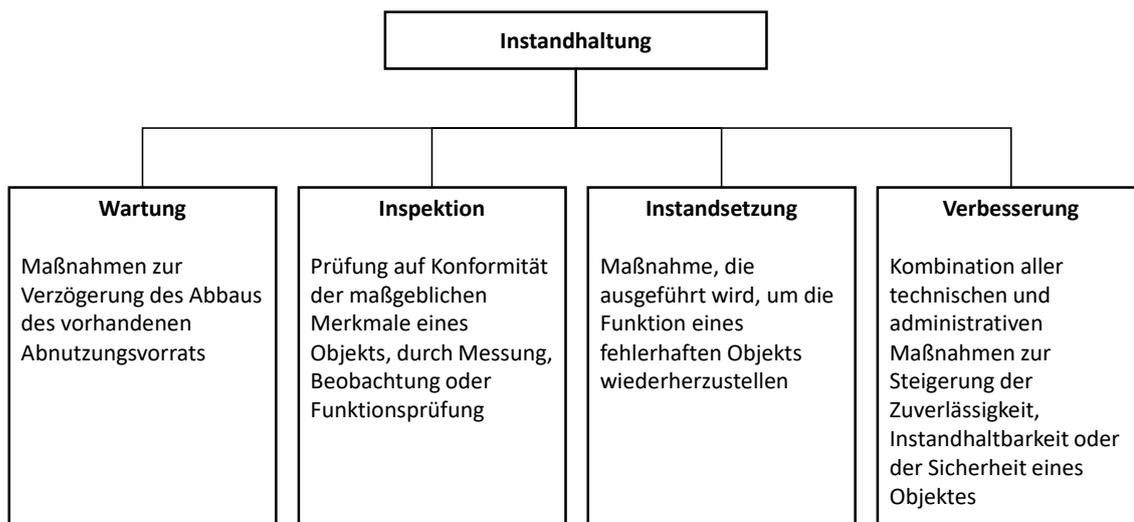


Abbildung 9: Unterteilung Instandhaltung (in Anlehnung an DIN 31051 2019: 12)

Die Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen obliegt heutzutage nicht mehr vollständig den Instandhaltungsmitarbeitern (vgl. Pawellek 2016: 7). So werden routinemäßige Instandhaltungsmaßnahmen zunehmend von den Produktionsmitarbeitern vor Ort übernommen, sodass auch für die Behebung ungeplant eintretender Stillstände an einzelnen Prozessen des Produktionssystems zunächst ein Produktionsmitarbeiter verantwortlich ist (vgl. Anders 1998: 36). Erst wenn die Instandsetzung durch den Mitarbeiter nicht erfolgreich ist, wird zusätzlich die Instandhaltung angefordert.

2.2.1 Instandhaltungsstrategien

Instandhaltungsstrategien dienen der Umsetzung von Instandhaltungszielen, wie zum Beispiel kurze Reaktionszeiten bei Störereignissen oder eine hohe Verfügbarkeit der Systemkomponenten, in konkrete Maßnahmen (vgl. Pawellek 2016: 173). Dabei können vier Grundstrategien unterschieden werden (vgl. DIN EN 13306 2018: 62):

- Reaktive Instandhaltung
- Präventive Instandhaltung
- Zustandsorientierte Instandhaltung
- Zustandsorientierte, vorausschauende Instandhaltung

Bei einer reaktiven Instandhaltungsstrategie, oft auch als störungsbedingte oder ausfallbedingte Strategie bezeichnet, werden Instandsetzungsmaßnahmen ausschließlich nach Auftreten einer Störung durchgeführt (vgl. Pawellek 2016: 174; Schenk 2010: 27). Dies führt dazu, dass der Abnutzungsvorrat vollständig aufgebraucht und damit optimal genutzt wird (Abbildung 10).

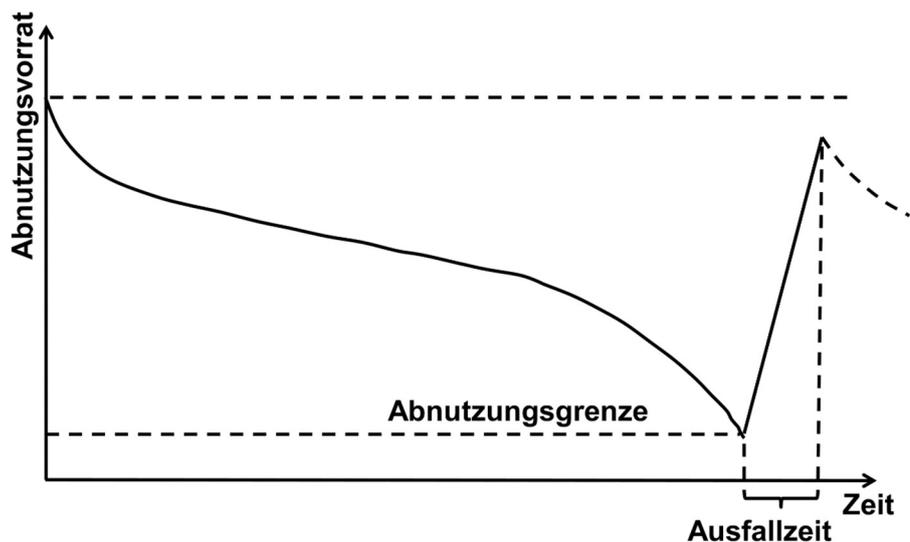


Abbildung 10: Verlauf des Abnutzungsvorrats bei reaktiver Instandhaltungsstrategie
(Pawellek 2016: 174)

Allerdings führt diese Strategie im Vergleich zu den anderen Instandhaltungsstrategien auch zu den höchsten Ausfallzeiten, da Störereignisse plötzlich und somit ungeplant auftreten (vgl. Schenk 2010: 28). Dadurch erfolgt die Instandsetzung unter zeitlichem Druck und Maßnahmen wie Arbeitsvorbereitung, Ersatzteilbeschaffung und Fehlersuche können erst nach Stillstandseintritt ausgeführt werden (vgl. Pawellek 2016: 174). Auch das Risiko von hohen Ausfallfolgekosten steigt, sodass diese Strategie aufgrund des hohen Kostenrisikos und der geringen Planbarkeit nur angewendet werden sollte, wenn Komponenten redundant vorhanden sind, eine schnelle Bereitstellung aller benötigten Instandhaltungsressourcen gegeben ist oder keine technischen Möglichkeiten der Zustandserfassung bestehen (vgl. Schenk 2010: 28; Kröning 2014: 8).

Im Gegensatz zu einer reaktiven Instandhaltungsstrategie sind die weiteren Grundstrategien proaktiver Natur, d. h. die Instandhaltungsmaßnahme wird vor Erreichen der Abnutzungsgrenze durchgeführt (vgl. Pawellek 2016: 173). So werden bei einer präventiven Instandhaltungsstrategie nach fest vorgeschriebenen Nutzungsintervallen Instandhaltungsmaßnahmen ausgeführt, wobei Intervalle zeit- oder ereignisbezogen, beispielsweise nach Produktionsmenge, Betriebsstunden oder Kalenderzeit, festgelegt werden (vgl. Schenk 2010: 28). Die Festlegung des Instandhaltungszeitpunktes basiert dabei auf Erfahrungswerten von Herstellern und Betreibern, d. h. sie ist unabhängig vom aktuellen Abnutzungszustand der Komponente (vgl. Pawellek 2016: 175). Als Vorteil erweist sich, dass Instandhaltungsmaßnahmen geplant und damit alle notwendigen Ressourcen vorbereitet werden können, wodurch die Ausfallzeit verkürzt werden kann. Ferner sinkt das Ausfallrisiko und damit das Auftreten ungeplanter Ereignisse während der Planbelegungszeit (vgl. Kröning 2014: 8; Schenk 2010: 28).

Ein Nachteil entsteht durch die nur bedingte Ausschöpfung des Abnutzungsvorrats beim vorbeugenden Austausch der Komponenten, wodurch der Verbrauch an Ersatzteilen ansteigt (vgl. Reichel et al. 2018: 137). Damit existiert ein Zielkonflikt, da auf der einen Seite durch präventive Instandhaltung die Ausfallkosten gesenkt werden, aber auf der anderen Seite erhöhte Kosten aufgrund des nicht optimal ausgenutzten Abnutzungsvorrats entstehen können.

Dieser Zielkonflikt wird bei der zustandsorientierten Instandhaltung aufgegriffen. Dabei wird der Instandhaltungszeitpunkt nicht anhand einer zeitabhängigen Regelgröße bestimmt, sondern durch den Abnutzungsvorrat, d. h. durch den technischen Zustand einer Komponente (Abbildung 11).

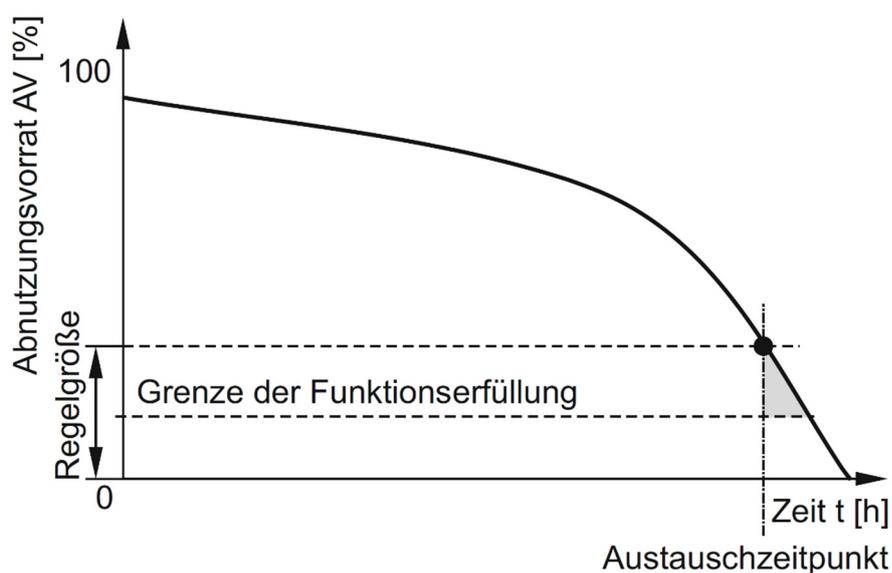


Abbildung 11: Austauschzeitpunkt bei der zustandsorientierten Instandhaltung
(Schenk 2010: 30)

Die dafür benötigte Zustandsüberwachung wird durch moderne Anlagen- und Messtechnik sowie Diagnostik sichergestellt (vgl. Pawellek 2016: 161). Dabei reicht das Spektrum von der einfachsten Form einer regelmäßigen Inspektion durch die Produktionsmitarbeiter bis hin zu technischen Systemen, sogenannten „Condition Monitoring“ Systemen, die die Inspektionsaufgaben mit Hilfe von Sensoren überwiegend selbständig ausführen (vgl. Schenk 2010: 31).

Der Vorteil dieser Strategie im Vergleich zu einer präventiven periodischen Instandhaltungsstrategie ist die bessere Ausnutzung des Abnutzungsvorrats und die damit verbundene Reduzierung der Instandhaltungskosten. Demgegenüber stehen die höheren Kosten für die Zustandserfassung (vgl. Kröning 2014: 9). Aus diesem Grund kommt die zustandsorientierte Instandhaltung zur Anwendung, wenn die Erfassung von Änderungen des Abnutzungsvorrats technisch realisierbar und auch wirtschaftlich vertretbar ist (vgl. Schenk 2010: 31).

Aufbauend auf der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie geht die zustandsorientierte, vorausschauende Instandhaltung, in der Literatur häufig auch als prädiktive Instandhaltung oder „Predictive Maintenance“ bezeichnet, noch einen Schritt weiter. Hier werden im Rahmen der Zustandsüberwachung aufgenommene Messwerte mit Hilfe von statistischen Analyseverfahren oder Simulationen ausgewertet, um Fehlermuster zu erkennen und Ausfälle zu prognostizieren (vgl. Mühlnickel et al. 2018: 355). Eine schematische Vorgehensweise ist in Abbildung 12 dargestellt.

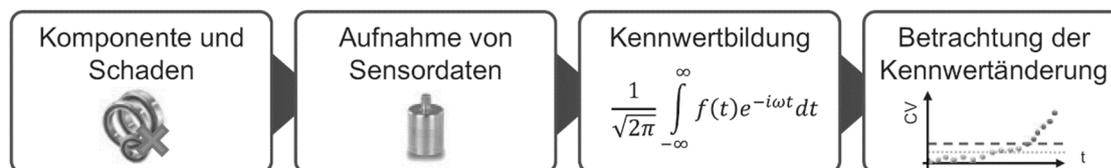


Abbildung 12: Schematische Vorgehensweise bei der prädiktiven Instandhaltung
(Brecher et al. 2017: 365)

Mit Hilfe der zustandsorientierten, vorausschauenden Instandhaltung wird ein optimaler Kompromiss aus kosteneinsparender Ausnutzung des Abnutzungsvorrats sowie ausreichender Reaktionszeit auf bevorstehende Ausfälle angestrebt, wodurch ebenfalls unnötige Stillstandszeiten durch reaktive Instandhaltungsmaßnahmen minimiert und die Intervalle für proaktive Instandhaltungsmaßnahmen optimiert und aufeinander abgestimmt werden können (vgl. Mobley 2002: 16; Kaul et al. 2019: 20).

Wie die Vorstellung der verschiedenen Instandhaltungsstrategien zeigt, ist die allgemeine Einschätzung, dass eine zustandsorientierte Strategie, egal ob mit oder auch ohne prädiktiver Komponente, den größten Nutzen bringt. Dabei können ungeplante Ereignisse, die reaktive Instandhaltungsmaßnahmen erfordern, zwar durch proaktive Instandhaltungsstrategien reduziert werden, trotzdem ist das Auftreten im Kern unvermeidbar (vgl. Lei et al. 2010: 213). Nach Pawellek (2016: 178) zeichnet sich eine moderne Instandhaltung durch folgende Punkte aus:

- Maximierung von zustandsorientierten Instandhaltungsmaßnahmen
- Optimierung von reaktiven Instandhaltungsmaßnahmen
- Minimierung präventiver, periodischer Instandhaltungsmaßnahmen

Somit wird es zukünftig neben reaktiven Instandhaltungsmaßnahmen auch einen zunehmenden Anteil proaktiver und damit geplanter Maßnahmen geben.

2.2.2 Stillstände in der Produktion

Für den Begriff Störung lassen sich in der Literatur unterschiedliche Definitionen finden. So bezeichnet Anders (1998: 16) eine Störung als einen Zustand, der durch jegliche Abweichung von dem normalen Produktionsprozess charakterisiert ist. Grundsätzlich muss dabei zwischen der Störursache und der Störwirkung unterschieden werden (vgl. Stricker und Lanza 2014: 90). Die Störursache lässt sich auf Störgrößen zurückführen, die auf einen Prozess von innen oder auch von außen einwirken. Dabei ist das Auftreten einer Störgröße unabhängig von anderen Größen, tritt dementsprechend zufällig auf und führt zu einer Abweichung vom Gewollten. Diese Abweichung wird dann als Störung bezeichnet (vgl. Schwartz 2004: 68). Obwohl die Störung selbst deterministisch durch die Störgrößen bestimmt wird, so wird das Auftreten von Störungen häufig als zufällig und unvorhersehbar angesehen (vgl. Stricker und Lanza 2014: 90). Für Heil (1995: 32) sind Störungen „zeitlich befristete Zustände der Wertschöpfungskette, in denen durch das Einwirken von Störgrößen auf die Produktionsfaktoren und deren Kombinationsprozess eine unmittelbar festgestellte Abweichung vom optimalen Prozessverlauf und/oder dessen Ergebnis entsteht“. Damit handelt es sich bei Störungen um zeitliche Zustände, die einen Start- sowie Endzeitpunkt besitzen. Häufig hervorgehoben wird zudem der unbeabsichtigte und unerwünschte Charakter von Störungen (vgl. Czaja und Voigt 2009: 3).

Wird hingegen der zufällige Charakter von Störungen vernachlässigt, so können Störungen auch aufgrund vorangekündigter bzw. geplanter Ereignisse auftreten. In Brackel (2009: 27) wird hier zwischen stochastischen und deterministischen Störungen differenziert. Stochastische Störungen, wie beispielsweise Maschinenausfälle, werden dabei als unvorhergesehene Störungen definiert, wobei nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit deren Auftreten bestimmt werden kann. Zu deterministischen Störungen werden Ereignisse gezählt, die „zwar den Produktionsprozess unterbrechen aber geplant sind“ (Brackel 2009: 27). Dazu zählen zum Beispiel Maßnahmen im Rahmen einer proaktiven Instandhaltungsstrategie (vgl. Kapitel 2.2.1).

Störungen können zudem die Ursache für weitere Störungen sein und zu sogenannten Folgestörungen führen. Dabei kann zwischen Primär- und Sekundärstörungen unterschieden werden (vgl. Schwartz 2004: 70). Primärstörungen sind in diesem Zusammenhang Störungen, die nicht durch andere Störungen verursacht werden. Im Gegensatz dazu werden Störungen, deren Ursachen auf den Einfluss anderer Störungen zurückzuführen sind, als Sekundärstörungen bezeichnet.

Anders (1998: 17) definiert zudem den Begriff logistische Stillstände als aus „der Werkstückver- und -entsorgung folgende Unterbrechungen“. Er bezieht sich dabei auf verkettete Produktionssysteme, bei denen es an eigentlich ungestörten Produktionsprozessen aufgrund von einem belegten Auslauf oder Werkstückmangel zu Stillständen kommen kann.

Da in der Literatur teils widersprüchliche Definitionen des Störungsbegriffs existieren, sollen die Begriffe Störung und Stillstand für den Gegenstand dieser Arbeit wie folgt definiert werden:

Als Stillstand bzw. Primärstillstand wird der unproduktive Zustand einer Produktionsressource (Prozess oder Verkettungselement) in einem Produktionssystem bezeichnet, bei dem ein temporär begrenzter Verlust der Funktionsfähigkeit aufgrund eines geplanten oder ungeplanten Ereignisses vorliegt. Ein Stillstand wird durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

- Ein Stillstand ist ein Zustand und zeitlich begrenzt
- Ein Stillstand kann als Ursache sowohl geplante als auch ungeplante Ereignisse haben
- Die vom Stillstand betroffene Produktionsressource erfüllt während der Stillstandsdauer ihre geforderte Funktion nicht mehr
- Stillstände haben in Abhängigkeit möglicher Pufferkompensation eine negative Auswirkung auf die Produktionsleistung des Produktionssystems
- Stillstände können an benachbarten Produktionsressourcen zu logistischen Stillständen (Sekundärstillständen) führen

Dabei werden Stillstände als logistische bzw. Sekundärstillstände bezeichnet, die als Folge von Primärstillständen benachbarter Produktionsressourcen aufgrund verketteter Ressourcen auftreten. Im Gegensatz zu Primärstillständen können die Produktionsressourcen bei Sekundärstillständen ihre geforderte Funktion grundsätzlich erfüllen, allerdings können diese keine Werkstücke mehr abführen (Wartezustand aufgrund eines blockierten Auslaufs) bzw. aufnehmen (Wartezustand aufgrund fehlender Werkstücke am Einlauf) und werden damit in einen unproduktiven Zustand versetzt. In diesem Zusammenhang kann eine Störung als ungeplanter Stillstand angesehen werden (Abbildung 13).

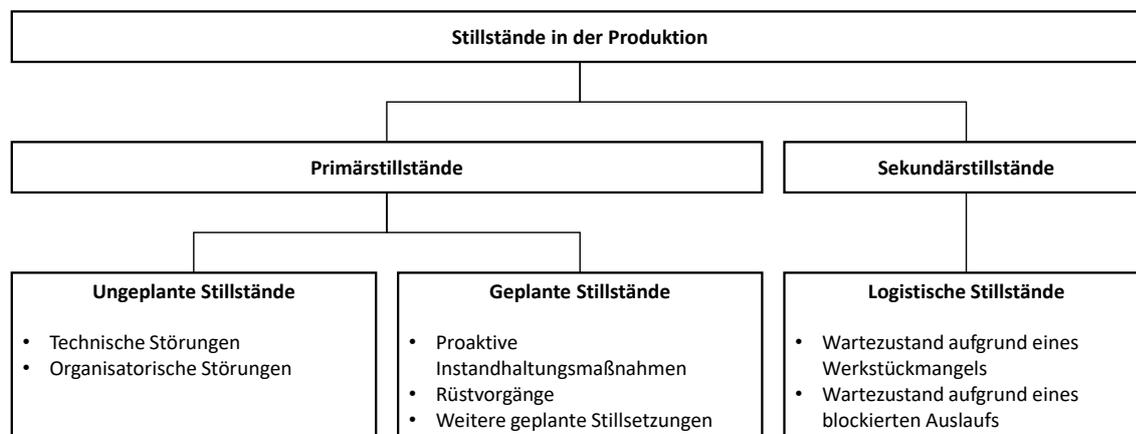


Abbildung 13: Ausprägungen von Stillständen in der Produktion

Eine Störung wird als ein zufällig eintretendes und somit ungeplantes sowie unerwünschtes Ereignis definiert, das zu einem Primärstillstand der betroffenen Produktionsressource führt. Störungen können technischer Natur (z. B. Maschinenausfall infolge Werkzeugbruchs) oder organisatorischer Natur (z. B. krankheitsbedingter Mitarbeiterausfall) sein.

Am Ende dieses Abschnittes soll noch auf den Zusammenhang zwischen der Stillstandszeit eines Primärstillstandes und dessen Stillstandsauswirkung auf benachbarte Produktionsressourcen bzw. das Gesamtsystem bei verketteten Produktionssystemen eingegangen werden. Dazu ist in Abbildung 14 der zeitliche Verlauf eines Primärstillstandes schematisch dargestellt.

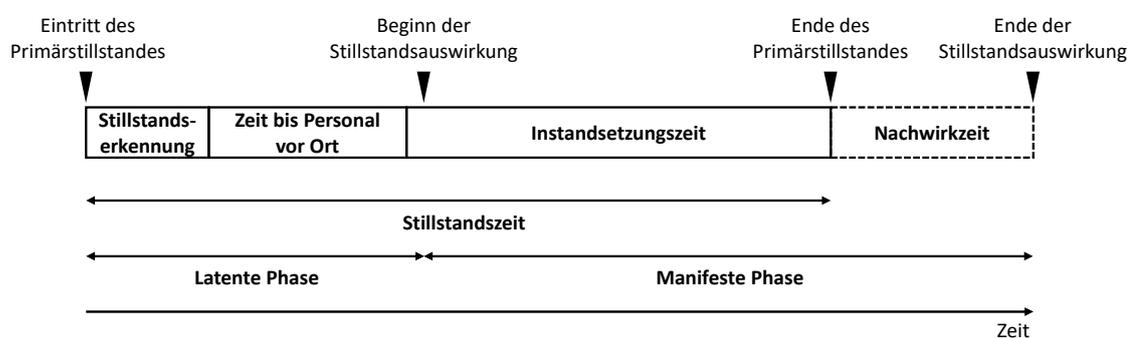


Abbildung 14: Zeitlicher Verlauf eines Primärstillstandes

Der zeitliche Verlauf eines Primärstillstandes lässt sich in eine latente sowie in eine manifeste Phase aufteilen (vgl. Stricker und Lanza 2014: 90; Heil 1995: 70-72). Die latente Phase beginnt mit dem Eintritt des Primärstillstandes, d. h. mit dem Zeitpunkt, an dem die betroffene Produktionsressource ihre geforderte Funktion nicht mehr erfüllt. Diese Phase ist dadurch gekennzeichnet, dass durch vorhandene Pufferkapazitäten die Auswirkung dieses Stillstandes kompensiert wird, sodass keine Abweichung der Produktionsleistung des Produktionssystems feststellbar ist. An dieser Stelle sei angemerkt, dass ein Primärstillstand zwar zu Sekundärstillständen an weiteren Produktionsressourcen führen kann, aber es trotzdem noch zu keiner messbaren Abweichung der Produktionsleistung kommen muss. Ist die Kompensationswirkung erschöpft und der Primärstillstand wirkt sich auf die Produktionsleistung aus, so beginnt die manifeste Phase. Das Ende dieser Phase ist schließlich dadurch gekennzeichnet, dass sowohl der Primärzustand als auch dessen Auswirkung auf die Produktionsleistung beendet ist.

In diesem Kontext wird die Stillstandszeit als Zeitspanne zwischen dem Beginn und dem Ende eines Primärstillstandes definiert. Sie beinhaltet neben der Zeit für die Stillstandserkennung und der Zeit bis das Produktionspersonal an der betroffenen Ressource ist auch die Instandsetzungszeit, d. h. die Zeitspanne, in der die eigentliche Reparatur durchgeführt wird.

An die Stillstandszeit kann sich zudem eine Nachwirkzeit anschließen, je nachdem, ob das Ende der Stillstandsauswirkung mit dem Ende des Primärstillstandes übereinstimmt. Eine Nachwirkzeit tritt auf, wenn zwar der Primärstillstand beendet ist, aber eine Auswirkung auf die Produktionsleistung des Systems noch vorliegt. Ein Beispiel hierfür ist die benötigte Durchlaufzeit der Werkstücke durch Prozesse und Verkettungselemente, wenn sich innerhalb eines Linienabschnitts aufgrund des Primärstillstandes keine Werkstücke befinden.

Die Länge der latenten Phase und somit auch die der manifesten Phase ist von der Kompensationsfähigkeit abhängig. So können Primärstillstände im Extremfall keine latente Phase aufweisen. Ist die Kompensationsfähigkeit hingegen ausreichend hoch, kann die Auswirkung eines Primärstillstandes sogar vollständig kompensiert werden. In diesem Fall wird in der Literatur auch von einem schwachen Stillstand gesprochen (vgl. Schwartz 2004: 70).

2.3 Simulation und Optimierung

Die Analyse und Untersuchung komplexer technischer Systeme, wie sie die hier betrachteten Fließfertigungssysteme darstellen, erfordert geeignete Analysemethoden und -hilfsmittel. Aufgrund von zeit- und zufallsabhängigen Systemgrößen und den Wechselwirkungen einer Vielzahl von Systemkomponenten ist der Einsatz von mathematisch-analytischen Methoden nur begrenzt möglich (vgl. VDI 3633 2014: 5). Neben den mathematisch-analytischen Methoden ist die Simulation ein weiteres anerkanntes Hilfsmittel zur Analyse komplexer technischer Systeme.

Im Kontext von Materialfluss-, Logistik- und Produktionssystemen wird unter Simulation das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“, verstanden (VDI 3633 2014: 3). Wie diese Definition zeigt, ist die Anwendung der Simulation eng mit der Durchführung von Simulationsexperimenten verbunden, die in der Regel im Rahmen einer Simulationsstudie durchgeführt werden (vgl. Gutenschwager et al. 2017: 141). Auf Basis eines Simulationsmodells, welches das geplante oder existierende System für das zu lösende Problem hinreichend nachbildet, und Eingabedaten sowie Experimentdaten werden wiederholt Simulationsläufe durchgeführt und Simulationsergebnisdaten generiert (vgl. VDI 3633 2014: 3). Eingabedaten können statische oder stochastische Größen sein, wie beispielsweise Pufferkapazitäten, Prozesszeiten oder Stillstandsdauern. Im Gegensatz dazu werden Experimentdaten, wie Simulationsdauer oder Modellparameter, für jeden Simulationslauf oder eine Gruppe von Läufen neu bestimmt (vgl. VDI 3633 2014: 15). Ein Simulationslauf stellt in diesem Kontext die einmalige Ausführung des Simulationsmodells mit einer festgelegten Parameter- oder Strukturvariante dar, während eine Replikation die Wiederholung eines Simulationslaufes im Rahmen der statistischen Ab-

sicherung der Ergebnisdaten ist (vgl. Gutenschwager et al. 2017: 23). Die Durchführung von Simulationsexperimenten ist allerdings nur ein Teilabschnitt einer Simulationsstudie. Für eine vollständige Übersicht und eine ausführliche Beschreibung sei an dieser Stelle auf Gutenschwager et al. (2017: 141-218) oder VDI 3633 (2014: 18-39) verwiesen.

Wie in Abbildung 15 dargestellt, lassen sich in Abhängigkeit der verwendeten Simulationsmethode zwei Ausprägungen differenzieren.

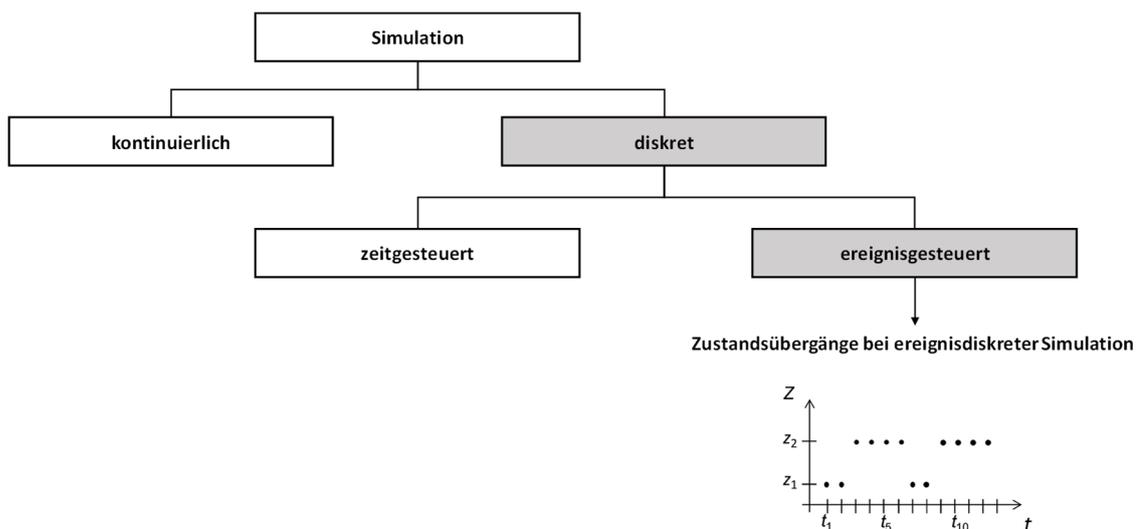


Abbildung 15: Einteilung von Simulationsmethoden
(in Anlehnung an Gutenschwager et al. 2017: 16 und 53)

Bei der kontinuierlichen Simulation verlaufen sowohl der Fortschritt der Simulationszeit wie auch der Zustandsübergang kontinuierlich ab. Findet hingegen der Zustandsübergang auf Basis einer diskreten Zustandsmenge statt, so liegt eine diskrete Simulation vor (vgl. Gutenschwager et al. 2017: 24). Diese lässt sich, je nach verwendeter Zeitfortschreibung, weiter in zeitgesteuert sowie ereignisgesteuert unterscheiden. Bei der diskreten zeitgesteuerten Simulation schreitet die Simulationszeit in konstanten und äquidistanten Zeitintervallen voran, wobei sämtliche Zustandsänderungen, die innerhalb dieses Intervalls auftreten, erst am Ende des jeweiligen Intervalls durchgeführt werden (vgl. Gutenschwager et al. 2017: 52). Im Gegensatz dazu orientiert sich die diskrete ereignisgesteuerte Simulation, vielfach auch als ereignisdiskrete Simulation bezeichnet, bei der Zeitfortschreibung an den auftretenden Zustandsübergängen, d. h. den während der Simulationszeit auftretenden Ereignissen. Die Ereignisse werden dafür chronologisch nach ihrem jeweiligen Zeitstempel in einer Ereignisliste verwaltet und abgearbeitet (vgl. Gutenschwager et al. 2017: 55). Die diskrete und hier insbesondere die ereignisdiskrete Simulation hat sich bei der Untersuchung des Materialflusses von Produktions- und Logistiksystemen bewährt und bildet auch die Grundlage für die Simulationsanwendung in dieser Arbeit.

Mit Hilfe der ereignisdiskreten Simulation lässt sich somit das dynamische Verhalten komplexer Produktionssysteme realitätsnah abbilden (vgl. Kröning 2014: 32). Ferner ermöglicht die Simulation neben der Berücksichtigung deterministischer Eingangsdaten auch die Abbildung real existierender Zufallseinflüsse, wie sie bei schwankenden Prozesszeiten, bei variierenden Auftragsmengen oder auch beim Störverhalten auftreten (vgl. März und Krug 2011: 41). Folglich wird die Simulation eingesetzt, wenn „die Abhängigkeiten zwischen Einfluss- und Zielgrößen sehr komplex sind“ (Kapp 2011: 22). Durch die virtuelle Abbildung ergibt sich somit die Möglichkeit der Untersuchung real noch nicht existierender Produktionssysteme oder, bei bereits existierenden Systemen, die Möglichkeit einer Untersuchung ohne einen direkten Eingriff in das Betriebsverhalten (vgl. VDI 3633 2014: 5). Schließlich schaffen vielfältige Visualisierungsmöglichkeiten, wie beispielsweise die Animation von Zustandsänderungen oder Ortsveränderungen beweglicher Objekte während eines Simulationslaufs, Transparenz und können so zu einem verbesserten Systemverständnis führen (vgl. Gutenschwager 2017: 25; VDI 3633 2014: 17).

Nachteilig erweist sich der oft hohe zeitliche Aufwand zur Erstellung und Pflege eines Simulationsmodells, wobei ein großer Teil des Aufwandes in der Regel bereits für die Datenbeschaffung und -aufbereitung aufgewendet werden muss (vgl. Wenzel und Bernhard 2008: 491). Gerade bei aufwändigen Experimentdesigns muss zudem der hohe Aufwand für die Durchführung der Simulationsläufe inklusive aller Replikationen berücksichtigt werden. Schließlich erfordert der Einsatz der Simulation vom Anwender ein hohes Qualifikationsniveau, damit das Risiko von Irrtümern und Fehlentscheidungen in allen Phasen einer Simulationsstudie minimiert werden kann (vgl. Page 1991: 24).

In den folgenden Unterkapiteln wird nun ein Einblick in für diese Arbeit wichtige Teilbereiche des Themenfeldes Simulation und Optimierung gegeben. Dazu wird zunächst auf die Anwendung der Simulation in der Betriebsphase eines Produktionssystems eingegangen. Weiter werden die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten von Simulation und Optimierung vorgestellt. Abschließend wird die Online-Optimierung und im Speziellen die Online-Optimierung mit Lookahead beschrieben.

2.3.1 Simulationsanwendung in der Betriebsphase

Die Simulation, als ein anerkanntes Werkzeug für die Analyse und Bewertung komplexer Systeme, wird nicht nur in der Planungsphase, sondern zunehmend auch in der Betriebsphase von Produktionssystemen eingesetzt (vgl. Bergmann und Strassburger 2010: 545; VDI 3633 2014: 4). Die Simulation ermöglicht dabei nicht nur die vorausschauende Untersuchung verschiedener Handlungsalternativen, sondern auch die Überwachung des laufenden Betriebs im Sinne eines Monitoring Systems (vgl. VDI 3633 2014: 8). Dadurch wird eine proaktive Produkti-

onssteuerung möglich, bei der Entscheidungen basierend auf Prognosen des zukünftigen Verhaltes eines Produktionssystems getroffen werden (vgl. Zhuang et al. 2018: 1151). Somit unterstützt die Simulation das Produktionspersonal bei der operativen Entscheidungsfindung und ermöglicht so die Verbesserung des laufenden Betriebs (vgl. Richter et al. 2017: 483).

In der Literatur existieren durchaus unterschiedliche Begriffe und Definitionen für eine Anwendung der Simulation in der Betriebsphase, von denen die Geläufigsten nachfolgend vorgestellt werden:

Neben dem Begriff Betriebssimulation (vgl. Richter et al. 2017: 482) wird häufig der Begriff Online Simulation (vgl. u. a. Hotz 2007: 35 f.; Cardin und Castagna 2011: 178) verwendet. In Hotz (2007: 36) wird die Online Simulation als „Simulation eines real existierenden Systems, wobei das Simulationsmodell sowohl beim Start als auch während des Simulationslaufes online mit Daten über dieses System zur Initialisierung oder Aktualisierung versorgt wird“, definiert.

Eng verwandt mit der Online Simulation ist zudem der Begriff „Symbiotic Simulation“ (vgl. Taylor et al. 2012: 4). Darunter wird ein System verstanden, welches auf Basis von Echtzeitdaten eines physischen Systems zu bestimmten Zeitpunkten automatisiert verschiedene Handlungsalternativen mittels Simulationstechnik durchtestet und so zu einer operativen Entscheidungsfindung beiträgt (vgl. Aydt et al. 2009: 1213 f.). Insbesondere die enge Verknüpfung zwischen Realsystem und Simulation ermöglicht so eine gegenseitige Kommunikation in Echtzeit bzw. Fast-Echtzeit (vgl. Onggo 2019: 154). In Abbildung 16 ist ein entsprechendes System schematisch dargestellt, wobei die Machine-Learning Komponente einen Lernprozess der Datenaufbereitungs-, Optimierungs- und Simulationskomponente andeuten soll, der zu einem effizienteren Ablauf des Gesamtsystems führen kann (vgl. Onggo 2019: 160).

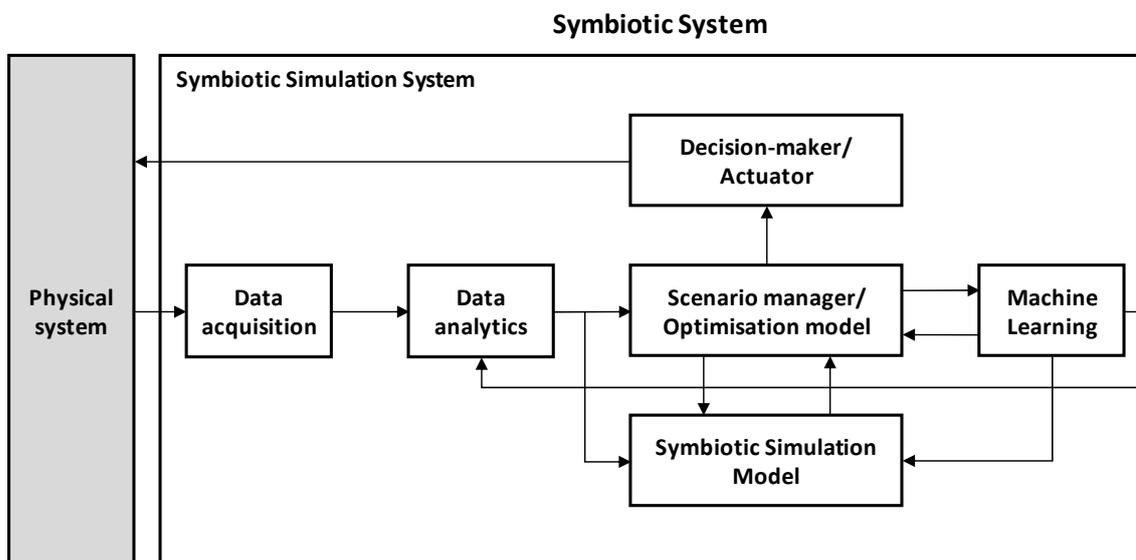


Abbildung 16: Komponenten eines „Symbiotic Simulation System“ (Onggo 2019: 157)

Somit greift der Begriff „Symbiotic Simulation“ die Eigenschaften einer Online Simulation auf, erweitert diese aber um die Dimension Datenbeschaffung in Echtzeit und konkretisiert den Entscheidungsfindungsprozess als automatisierte Durchführung von What-if-Analysen.

Von der Online Simulation wie auch von der „Symbiotic Simulation“ abzugrenzen, ist schließlich noch der Begriff Echtzeitsimulation bzw. „Real-Time-Simulation“. Hier erfolgt der Zeitfortschritt des Simulationsmodells in Echtzeit bzw. echtzeitproportional, sodass das Simulationsmodell synchron mit dem realen System abläuft (vgl. Hotz und Schulze 2006: 66). Damit ist es möglich, beispielsweise das Verhalten von einzelnen Prozessen oder ganzen Produktionssystemen zu überwachen und bei Abweichungen zwischen Realität und Simulation Gegenmaßnahmen einzuleiten (vgl. Saez et al. 2018: 1737).

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf einem Einsatz der Simulation in der Betriebsphase in Anlehnung an ein „Symbiotic Simulation System“, wobei sich die Begriffe Echtzeit bzw. Fast Echtzeit hier auf die Bereitstellung der benötigten Daten des Fließfertigungssystems beziehen. Eine Entscheidungsfindung mittels Simulation in Echtzeit wird dabei nicht angestrebt, da dies u. a. aufgrund der Reaktionszeit des Produktionspersonals auf Aufträge zur Störbeseitigung nicht erforderlich ist.

Bei der Anwendung von Simulation in der Betriebsphase ergeben sich besondere Anforderungen an die Simulationstechnik. So ist bei der Prognose der zukünftigen Entwicklung aufgrund des dynamischen Charakters eines Produktionssystems meistens nur ein relativ kurzfristiger Prognosehorizont möglich, wodurch sich eine Anwendung in der Regel auf eher kurzfristig zu treffende Entscheidungen beschränkt (vgl. Cardin und Castagna 2011: 178).

Gerade dafür ist es aber notwendig, dass der Entscheidungsfindungsprozess in kurzer Zeit abläuft, um so beispielsweise die Auswirkung von Stillständen zu reduzieren (vgl. Galaske und Anderl 2016: 442). Um dieses Ziel zu erreichen, können neben einer Kombination mit einem Optimierungsmodell (vgl. Kapitel 2.3.2) verschiedene weitere Maßnahmen angewendet werden. So kann lediglich eine deterministische Betrachtung des Systemverhaltens durchgeführt werden, damit die benötigte Simulationszeit durch Einsparung der für eine stochastische Betrachtung notwendigen Replikationen reduziert wird (vgl. Rabe 1998: 8). Ist eine reine deterministische Betrachtung für die Problemstellung nicht ausreichend, so kann u. a. eine iterative Anwendung eines t-Tests die für die statistische Absicherung benötigte Anzahl an Replikationen begrenzen (vgl. Uhlig und Rose 2015: 42). Auch die Komplexität eines Modells, die zugrundeliegende Simulationemethode sowie das verwendete Simulationswerkzeug beeinflussen die Rechenzeit (vgl. Fowler und Rose 2004: 471; Cardin und Castagna 2011: 178). Darüber hinaus kann die Ausführung als parallele oder verteilte Simulation helfen,

Rechenzeit zu sparen, indem Simulationsläufe nicht sequentiell, sondern gleichzeitig ausgeführt werden (vgl. Gutenschwager et al. 2017: 238). Dabei werden die Läufe bei der parallelen Simulation auf mehreren Prozessoren eines Computers ausgeführt, während bei der verteilten Simulation ein komplexes Simulationsmodell in eigenständige Modelle aufgeteilt wird. Diese Teilmodelle können schließlich auf mehreren Computern selbständig ausgeführt werden.

Ferner ist es üblich, dass die Simulationsmodelle bei einer Anwendung in der Betriebsphase nicht leer starten (vgl. Hanisch und Schulze 2005: 1796). Sollen beispielsweise verschiedene Handlungsalternativen bewertet werden, so bietet es sich an, den aktuellen Zustand des Produktionssystems als Startbedingung des Simulationsmodells zu verwenden. Somit wird das Modell immer, wenn eine neue Simulation durchgeführt werden soll, mit dem aktuellen Zustand des realen Systems initialisiert bzw. vorbelegt (vgl. Cardin und Castagna 2011: 178). Damit entfällt auch die sonst übliche Einschwingphase, in der die Ergebniswerte noch nicht repräsentative Werte annehmen können (vgl. Gutenschwager et al. 2017: 184).

Nach Hanisch und Schulze (2005: 1797) sowie Bergmann et al. (2011: 2224) können grundlegend zwei verschiedene Methoden zur Initialisierung eines Simulationsmodells verwendet werden:

- Synchronisation eines Eltern-Modells und Ableitung von Kind-Modellen
- Modellvorbelegung auf Basis aktueller Daten

Bei der ersten Methode läuft ein als Eltern-Modell bezeichnetes Simulationsmodell synchron zum realen System und spiegelt somit stets den aktuellen Zustand wider (Abbildung 17 oben). Soll nun eine Handlungsalternative mittels Simulation bewertet werden, so wird auf Abruf ein Kind-Modell von dem Eltern-Modell abgeleitet (vgl. Hanisch und Schulze 2005: 1797 f.). Damit das Kind-Modell dem aktuellen Zustand des realen Systems entspricht, muss das Eltern-Modell regelmäßig durch Daten des realen Systems aktualisiert werden. Nachteilig ist dabei, dass zwischen den Aktualisierungen das Eltern-Modell vom realen Verhalten abweichen kann, sodass folglich nicht ausgeschlossen werden kann, dass auch bei der Initialisierung das Kind-Modell nicht vollständig dem aktuellen Zustand entspricht (vgl. Bergmann et al. 2011: 2224).

Bei der zweiten Möglichkeit wird auf ein permanent aktuell zu haltendes Eltern-Modell verzichtet (Abbildung 17 unten). Bei diesem Ansatz wird das für die Entscheidungsfindung benötigte Simulationsmodell durch Einlesen der aktuellen Daten des realen Systems für jeden Entscheidungszeitpunkt neu initialisiert. Dies setzt allerdings die vollständige Verfügbarkeit aller für die Initialisierung benötigten Daten voraus (vgl. Hanisch und Schulze 2005: 1798). Im Unterschied zu einer Eltern-Kind-Initialisierung, bieten die meisten kommerziellen Simulationswerkzeuge vielfältige Datenschnittstellen an, um eine datenbasierte Vorbelegung zu implementieren (vgl. Bergmann et al. 2011: 2224).

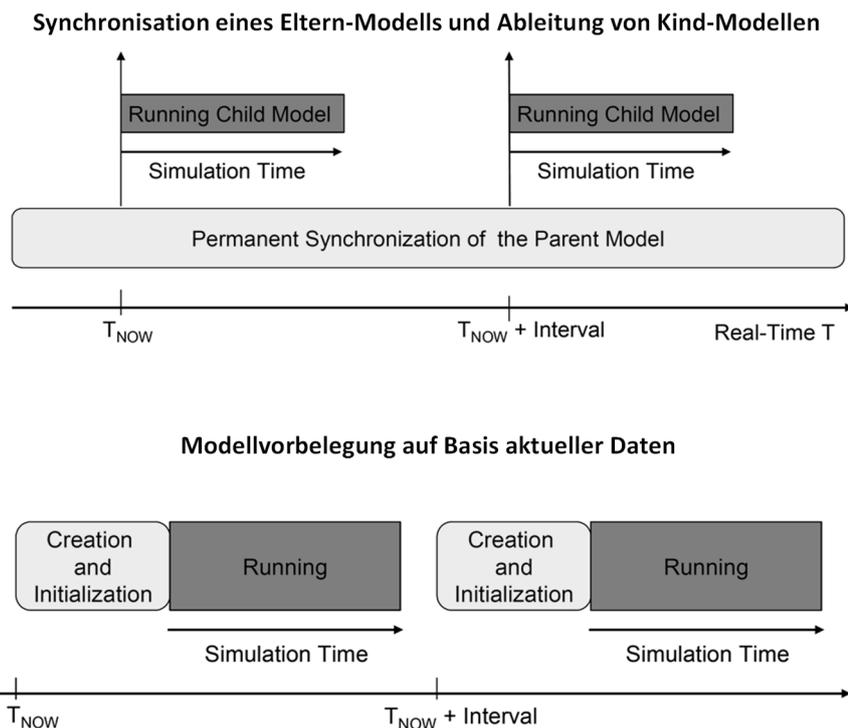


Abbildung 17: Initialisierungsmöglichkeiten eines Simulationsmodells
(Hanisch und Schulze 2005: 1797 f.)

Die für eine Simulation und damit auch für eine Vorbelegung notwendigen Simulationsdaten lassen sich nach VDI 3633 (2014: 33 f.) in folgende Kategorien einteilen:

- Systemlastdaten (z. B. Produktionsaufträge, Arbeitspläne und Stücklisten)
- Organisationsdaten (z. B. Schichtmodelle und Ablaufstrategien)
- Technische Daten (z. B. Anlagendaten und -topologie, Verfügbarkeiten)

Der Umfang der benötigten Daten hängt im Wesentlichen von dem Untersuchungsziel und der Komplexität des Produktionssystems ab (vgl. VDI 3633 2014: 33). Dabei gilt grundsätzlich, dass die Aussagekraft der durchgeführten Simulationsläufe maßgeblich auf der Qualität des Simulationsmodells und folglich auch auf der Qualität der für die Erstellung dieses Modells verwendeten Simulationsdaten beruht (vgl. Bergmann und Strassburger 2010: 545). Für eine hohe Datenqualität müssen die Daten nicht nur vollständig, konsistent und korrekt vorliegen, sondern auch aktuell sein, d. h. die Aufnahmefrequenz sollte so gewählt werden, dass die Daten stets den aktuellen Zustand des realen Systems repräsentieren (vgl. Hazen et al. 2014: 74).

Insbesondere um die zuletzt genannte Aktualität zu gewährleisten, bieten sich elektronische Systeme zur digitalen Datenerfassung und -aufbereitung an. In der Praxis und speziell in der Automobilindustrie kommen vermehrt eigenständige

Systeme, sogenannte Betriebsdatenerfassungssysteme (BDE-Systeme), zum Einsatz (vgl. Fuchs 2010: 608). Dabei erfolgt die Dateneingabe entweder manuell an einem Terminal oder automatisch, wie beispielsweise bei der Maschinendatenerfassung (MDE) direkt an der Produktionsmaschine (vgl. Mertens 2013: 229). Durch den Wandel hin zu einer digitalisierten Produktion im Sinne der vierten industriellen Revolution (Industrie 4.0) werden vermehrt Produktionsressourcen, Werkstücke sowie Werkzeuge mit Informations- und Kommunikationstechnologie, zum Beispiel in Form von Sensoren oder Mikrochips, ausgestattet und können somit ihren aktuellen Zustand jederzeit kommunizieren (vgl. Sturrock 2019: 194). Durch die Echtzeitfähigkeit dieser Systeme ist zudem eine permanente Überwachung der Produktionsprozesse möglich, wobei die Produktionsdaten nicht nur erfasst, sondern auch aufbereitet und auf Plausibilität geprüft werden (vgl. Kletti und Schumacher 2014: 91 f.). Folglich wird auch die Verfügbarkeit und die Qualität von Simulationsdaten ansteigen, wodurch der Einsatz der Simulationstechnik im laufenden Betrieb profitieren wird.

2.3.2 Simulationsbasierte Optimierung

Die Simulation ist im eigentlichen Sinne nur eine Bewertungsmethode, mit Hilfe derer Stichproben für Zielgrößen bei einer definierten Parameterkombination ermittelt werden können (vgl. Spieckermann 2005: 5). Im Gegensatz dazu ermöglicht die Optimierung durch Anwendung mathematischer bzw. algorithmischer Verfahren die Bestimmung der bestmöglichen Parameterkombination aus einer Menge von Alternativen (vgl. VDI 3633 2016: 2). Dazu wird eine Zielfunktion formuliert, die den Zusammenhang zwischen den Entscheidungsvariablen, die als Parameter eines Optimierungsproblems gelten, und den Zielgrößen beschreibt. Zudem führen aus der Problemstellung abgeleitete Randbedingungen zu einer Einschränkung der zulässigen Parameter, was bei der Formulierung von Optimierungsproblemen durch Aufstellen von Nebenbedingungen berücksichtigt wird (vgl. Domschke et al. 2015: 5; Grimme und Bossek 2018: 3).

Es liegt somit nahe, die Vorteile der Simulation, allen voran die Möglichkeit der Beschreibung und Prognose des Verhaltens komplexer Systeme, mit der Eigenschaft der Optimierung, aus einer Menge von Entscheidungsvariablen die optimale Lösung zu ermitteln, zu kombinieren. Diese Kombination von Simulation und Optimierung zur Lösung eines Problems wird in der Literatur häufig als simulationsbasierte Optimierung bezeichnet (vgl. Völker und Schmidt 2010: 94; Kröning 2014: 33; Donhauser et al. 2018: 221). Nach VDI 3633 (2016: 3) kann dabei die Verknüpfung von Simulation und Optimierung nach sequenzieller oder hierarchischer Weise erfolgen.

Werden Simulation und Optimierung auf sequenzielle Weise verknüpft, so wird sowohl die Simulation als auch die Optimierung vollständig, d. h. ohne eine Unterbrechung und somit hintereinander, ausgeführt (vgl. VDI 3633 2016: 3). Je

nach Reihenfolge dienen dann die Ergebnisse der Optimierung als Eingangsgrößen der Simulation und umgekehrt (Abbildung 18).

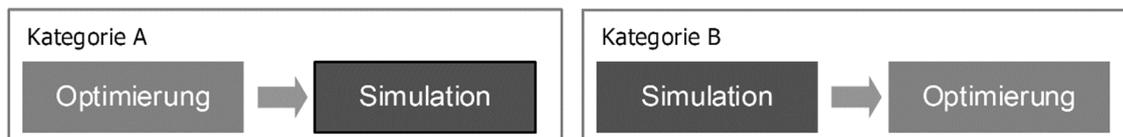


Abbildung 18: Sequenzielle Verknüpfung von Simulation und Optimierung
(VDI 3633 2016: 3)

Schließt sich die Simulation an die Optimierung an (Kategorie A), so wird zunächst mit Hilfe eines Optimierungsmodells die optimale Lösung für ein Problem bestimmt. Ist dabei durch das verwendete Modell nur eine vereinfachte Beschreibung des Realsystems möglich, d. h. kann die Dynamik des komplexen Realsystems für die Problemstellung nicht hinreichend wiedergespiegelt werden, so kann die gefundene und folglich noch nicht optimale Lösung in einem zweiten Schritt als Ausgangslösung für ein detailliertes Simulationsmodell benutzt werden (vgl. VDI 3633 2016: 5). Dabei wird angenommen, dass diese Lösung bereits nah an der optimalen Lösung des Simulationsmodells ist, sodass die Anzahl an Simulationsläufen wesentlich geringer ist als ohne die Verwendung einer Optimierung (vgl. VDI 3633 2016: 3).

Folgt hingegen die Optimierung auf eine Simulation (Kategorie B), so steht zwar ein hinreichend genaues Optimierungsmodell zur Verfügung, allerdings ist es in der Praxis häufig schwierig, bestimmte benötigte Parameter zu ermitteln (vgl. VDI 3633 2016: 6). In diesem Fall kann die Simulation genutzt werden, um diese Parameter und deren Randbedingungen zu bestimmen (vgl. VDI 3633 2016: 3).

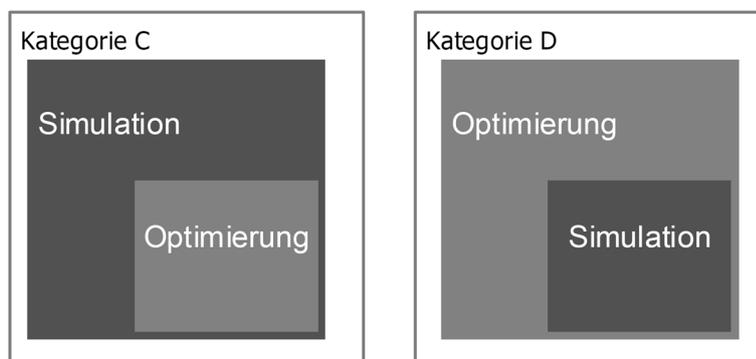


Abbildung 19: Hierarchische Verknüpfung von Simulation und Optimierung
(VDI 3633 2016: 4)

Im Gegensatz zur sequentiellen wird bei der hierarchischen Verknüpfung die Simulation bzw. die Optimierung wiederholt unterbrochen und deren weiterer Verlauf durch das Ergebnis der zwischenzeitlich ausgeführten Simulation bzw. Optimierung beeinflusst (vgl. VDI 3633 2016: 4). Auch bei einer hierarchischen Verknüpfung von Simulation und Optimierung lassen sich grundsätzlich zwei Kategorien unterscheiden (Abbildung 19).

Ist die Optimierung in die Simulation eingebettet (Kategorie C), so wird die Optimierung genutzt, um während eines Simulationslaufs an bestimmten Zeitpunkten Entscheidungen zu treffen (vgl. VDI 3633 2016: 4). Dabei dient der Istzustand des Simulationsmodells zum Entscheidungspunkt als Datenquelle für die Eingangsdaten der Optimierung, die wiederum aus den verfügbaren Entscheidungsalternativen eine Lösung ermittelt und diese, zu diesem Zeitpunkt geeignete Entscheidungsalternative an die Simulation zurückliefert (vgl. VDI 3633 2016: 7).

Bei der letzten Verknüpfungsmöglichkeit ist die Simulation in die Optimierung integriert (Kategorie D). Diese Konstellation findet Anwendung, wenn die Zielfunktion sich nicht in geschlossener Form darstellen lässt und somit nur die Simulation zur Ermittlung der Zielfunktionswerte zur Verfügung steht (vgl. VDI 3633 2016: 4). Dabei wird die Simulation, ausgehend von initialen Startwerten, immer wieder mit neuen veränderten Systemparametern ausgeführt, bis keine wesentliche Verbesserung der Zielfunktionswerte mehr feststellbar ist, wobei auch eine Verschlechterung der Werte möglich ist (vgl. VDI 3633 2016: 9). Diese grundlegende Vorgehensweise ist in Abbildung 20 dargestellt.

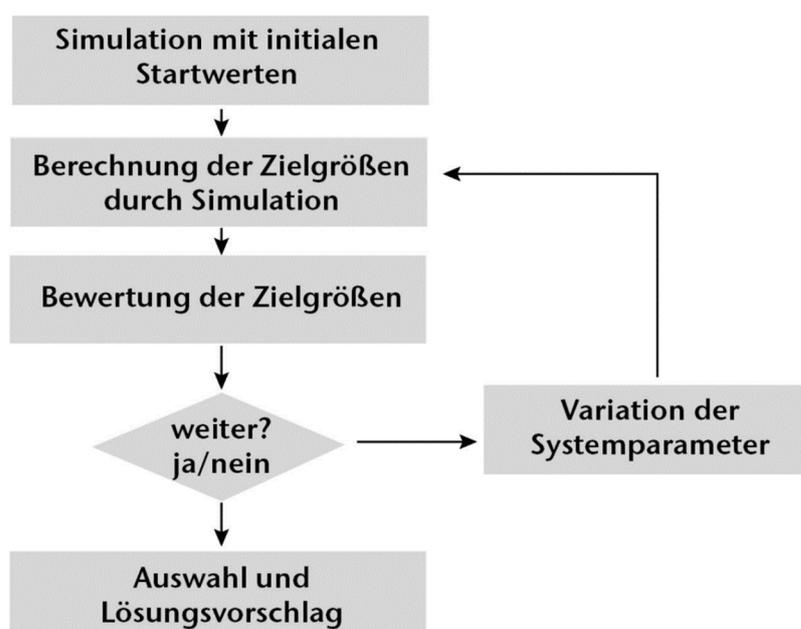


Abbildung 20: Simulation zur Bestimmung des Zielfunktionswertes
(VDI 3633 2016: 10)

2.3.3 Online-Optimierung mit Lookahead

Optimierungsprobleme lassen sich hinsichtlich der Informationsverfügbarkeit in Offline- und Online-Optimierung unterscheiden (vgl. Gutenschwager 2002: 50). Bei einer Offline-Optimierung stehen dabei sämtliche Eingabedaten und damit alle zukünftig möglichen Ereignisse zum Entscheidungszeitpunkt zur Verfügung (vgl. Dunke et al. 2014: 33; Heib und Nickel 2011: 206). Formal ausgedrückt ist bei einer Offline-Optimierung somit die Eingabesequenz

$$\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n) \text{ für } n \in \mathbb{N} \quad (2.5)$$

mit allen Eingabedaten σ_n im Voraus bekannt (vgl. Dunke und Nickel 2015: 70). In der industriellen Praxis sind allerdings zukünftige Ereignisse häufig unbekannt, wodurch Optimierungsprobleme mittels Online-Optimierung gelöst werden müssen (vgl. Heib und Nickel 2011: 206).

Bei einer reinen Online-Optimierung werden Entscheidungen wiederholt ohne Kenntnis über zukünftige Ereignisse getroffen (vgl. Dunke und Nickel 2016: 134). Dabei erfolgt die Bekanntgabe der Eingabedaten dynamisch und in sequentieller Form, sodass Teillösungen unter unvollständigen Informationen bestimmt werden müssen (vgl. Gutenschwager 2002: 51; Dunke et al. 2014: 33 f.). Formal stehen der Optimierung somit nur die jeweils zum Entscheidungszeitpunkt bekanntgegebenen Eingabedaten σ_i für alle $i < n$ sowie die Eingabedaten und Entscheidungen der bisherigen Eingabesequenz

$$\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_i) \quad (2.6)$$

zur Verfügung (vgl. Dunke und Nickel 2015: 70).

Durch den stetig zunehmenden Einsatz von Datenerfassungs- und Datenanalyzesystemen ist es möglich, Informationen über zukünftige Ereignisse bereits vor deren Eintritt vorliegen zu haben (vgl. Dunke und Nickel 2016: 134). Dadurch können Entscheidungen nicht nur auf Basis der bisherigen Eingabesequenz getroffen werden, sondern es kann auch auf eine Teilmenge von Daten erst zukünftig eintretender Ereignisse zurückgegriffen werden. Diese Art von Optimierungsproblemen wird als Online-Optimierung mit Lookahead bezeichnet (vgl. Dunke 2014: 21-24). Formal gesehen stehen der Optimierung durch den Lookahead zusätzlich die Eingabedaten σ_{i+1} bis σ_j mit $i < j < n$ und somit die Eingabesequenz

$$\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_i, \sigma_{i+1}, \dots, \sigma_j) \quad (2.7)$$

zur Verfügung (vgl. Dunke und Nickel 2015: 70). Die Eingabedaten im Rahmen des Lookahead werden dabei in der Regel als deterministisch angesehen, d. h. die Informationen über zukünftige Ereignisse sind korrekt und treten wie bekannt ein (vgl. Dunke und Nickel 2016: 136).

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten von Lookahead differenzieren, je nachdem ob der Lookahead durch eine fest definierte Anzahl an Eingabedaten oder durch einen fest definierten Zeitraum charakterisiert wird (vgl. Dunke und Nickel 2016: 140). Beim Request-Lookahead ist eine fest definierte Anzahl $r \in \mathbb{N}$ an aktuell bekanntgegebenen Eingabedaten (aktuell eingetretene Ereignisse) sowie zukünftigen Eingabedaten (zukünftig eintretende Ereignisse) bekannt. Dabei sind die ersten Eingabedaten bereits beim reinen Online-Fall vorhanden, sodass die verbleibenden $r - 1$ Eingabedaten die Information über zukünftige Ereignisse beschreiben (vgl. Dunke 2014: 80). Bei der zweiten Lookahead Art, dem Time-Lookahead, sind die Eingabedaten immer um eine feste Zeitspanne $d \in \mathbb{R}^{>0}$ früher bekannt als im reinen Online-Fall. Somit erfolgt die Bekanntgabe der Lookahead-Informationen unabhängig, im Gegensatz zum Request-Lookahead, bei dem die Lookahead-Informationen abhängig vom Zeitpunkt der Entscheidungsfindung und damit vom Aufruf der Optimierung sind (vgl. Dunke 2014: 81).

2.4 Priorisierung von Maschinenstillständen

Nachdem für das Verständnis dieser Arbeit wichtige Grundlagen vorgestellt und relevante Begriffe geklärt wurden, wird nun näher auf bereits bestehende wissenschaftliche Ansätze im Forschungsbereich „Priorisierung von Maschinenstillständen“ eingegangen. Dabei werden Ansätze berücksichtigt, die auf eine Bestimmung der Behebungsreihenfolge zum Entscheidungszeitpunkt anliegender Stillstände in einem Produktionssystem im Sinne einer Priorisierung abzielen, wobei sowohl ungeplante wie auch geplante Stillstände in die Priorisierungsentcheidung einfließen können.

2.4.1 Relevante Forschungsansätze

Um den Überblick über den aktuellen Forschungsstand übersichtlicher zu gestalten, werden die relevanten Forschungsansätze im Folgenden in statische und dynamische Priorisierungsmethoden differenziert. Dabei sind unter statischen Methoden alle Ansätze zusammengefasst, bei denen eine Priorisierung anhand einer bereits vor dem Entscheidungszeitpunkt feststehenden Reihenfolge angewendet wird. Im Gegensatz dazu wird bei den dynamischen Priorisierungsmethoden die Bestimmung der Priorisierungsreihenfolge jeweils zum Entscheidungszeitpunkt neu durchgeführt.

Statische Priorisierungsmethoden

Bengtsson (2011) hat ein statisches Bewertungsschema zur Bestimmung der Kritikalität von Produktionsmaschinen entwickelt. Dazu werden alle Maschinen durch das verantwortliche Produktions- sowie Instandhaltungspersonal nach

den vier Kategorien Funktionsredundanz, Auslastung, Qualitätsauswirkung sowie Maschinenalter bewertet und schließlich entsprechend in die Klassen AAA, AA, A, B, und C einsortiert, wobei die Maschinen der Klasse AAA die höchste Kritikalität für das Produktionssystem aufweisen. Damit ist es möglich, nicht nur die Reparaturreihenfolge zu bestimmen, sondern auch langfristig angelegte Verbesserungsmaßnahmen auf die besonders kritischen Maschinen zu fokussieren.

Gupta et al. (2013) schlagen vor, bei der Kritikalitätsanalyse nicht nur die Auswirkung auf das Gesamtsystem zu berücksichtigen, sondern auch den mit der Instandsetzung verbundenen Aufwand. Sie haben dazu eine Berechnungsformel hergeleitet, in die sowohl die Wichtigkeit der Maschine für die Verfügbarkeit des gesamten Produktionssystems wie auch die entstehenden Kosten für eine Instandsetzung, wie beispielsweise Kosten für Instandhaltungspersonal, Ersatzteile oder Produktionsverluste, einfließen. Damit erhalten die Maschinen die höchste Kritikalität und damit Priorität, die das beste Verhältnis aus Verbesserung der Systemleistung bezogen auf die aufzubringenden Kosten für eine Instandsetzung aufweisen.

In Silvestri et al. (2014) werden Instandhaltungsmaßnahmen mit Hilfe eines „Maintenance Priority Index“ priorisiert. In diesen Index fließen neben Instandhaltungskosten auch Informationen über die Verwendungshäufigkeit und die Zykluszeit einer Maschine sowie die Anzahl und Vielfältigkeit auftretender Fehler ein.

Stadnicka et al. (2014) haben basierend auf bereits in Unternehmen angewendeten Klassifizierungsschemata ein generalisiertes Schema abgeleitet, welches Produktionsmaschinen entsprechend ihrer Kritikalität in drei Klassen einteilt. Zur Klassifizierung werden dabei Kriterien verwendet, die neben der direkten Auswirkung auf die Produktionsleistung auch die Auswirkung auf die Sicherheit der Produktionsmitarbeiter sowie die Auswirkung auf die Umwelt berücksichtigen.

Eine weitere Möglichkeit zur Priorisierung von Maschinenstillständen ist die Bestimmung eines Engpassrankings, welches durch verschiedene Engpassermittlungsmethoden aufgestellt werden kann. So konnte in Gopalakrishnan et al. (2013) anhand einer Simulationsstudie gezeigt werden, dass bereits eine engpassbasierte Priorisierungsreihenfolge zu einem deutlichen Mehrwert im Vergleich zum Ausgangszustand mit einer „First-Come-First-Serve“ (FCFS) Strategie führen kann. Zur Engpassermittlung wurde auf die von Roser et al. (2001) entwickelte „Active Period Method“ zurückgegriffen. Bei dieser Methode werden die verschiedenen Betriebszustände der Produktionsmaschinen in aktive sowie inaktive Zustände eingeteilt, wobei zu aktiven Zuständen alle Betriebszustände mit Ausnahme des Wartezustandes zählen (Abbildung 21).

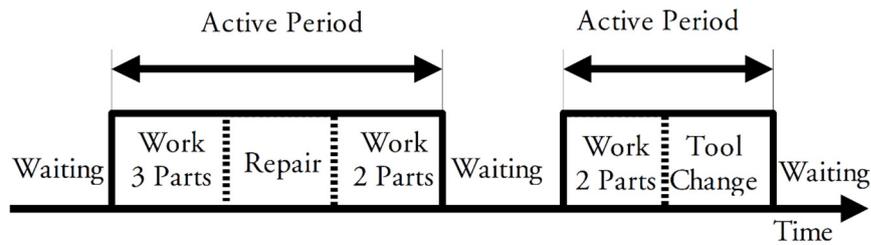


Abbildung 21: „Active Period Method“ (Roser et al. 2001: 950)

Schließlich bildet die Summe aller Zeitperioden, in der eine Maschine in einem aktiven Zustand war, die Aktivzeit dieser Maschine, wobei folglich die Maschine mit der höchsten Aktivzeit der Engpass eines Produktionssystems ist (vgl. Roser et al. 2001: 951). Bei Gopalakrishnan et al. (2013) wurde das auf diese Weise bestimmte Engpassranking in einem gesonderten Simulationsexperiment ermittelt und während der nachfolgenden Untersuchung statisch angewendet, d. h. die Engpassreihenfolge blieb über die gesamte Simulationszeit unverändert. Die auftretenden Stillstände wurden schließlich entsprechend der Position der betreffenden Maschine im Engpassranking priorisiert.

Darauf aufbauend wurde in Gopalakrishnan et al. (2014) eine Simulationsstudie vorgestellt, bei der die Priorisierung von ungeplanten Stillständen basierend auf einem statischen wie auch auf einem dynamischen Engpassranking beruht. Für die Bestimmung des statischen Rankings wurden die Langzeit-Engpässe entsprechend der bereits vorgestellten „Active Period Method“ bestimmt. Für das dynamische Engpassranking hingegen wurde die von Roser et al. (2002) entwickelte Engpassmethode „Shifting Bottleneck Detection Method“ verwendet, die Engpässe in momentane und durchschnittliche Engpässe unterteilt. Der momentane Engpass ist die Maschine, die die längste ununterbrochene Aktivzeit hat, wobei die Bestimmung zu jedem beliebigen Zeitpunkt erfolgen kann. Dieser Engpass wird dann als „Sole Bottleneck“ bezeichnet. Überlappen sich die Aktivzeitperioden wie in Abbildung 22 dargestellt und wechselt der „Sole Bottleneck“ von einer Maschine auf eine andere Maschine, so werden die Maschinen in dieser Übergangsphase als „Shifting Bottleneck“ bezeichnet (vgl. Roser et al. 2002: 1081).

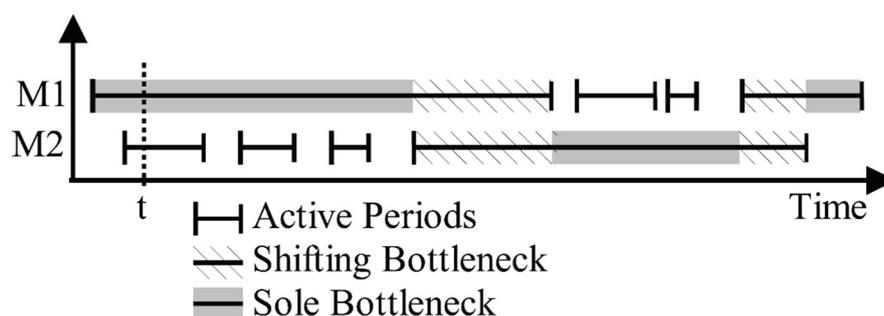


Abbildung 22: „Shifting Bottleneck Detection Method“ (Roser et al. 2002: 1081)

Die Maschine, die in einem definierten Zeitraum die meiste Zeit einen „Sole Bottleneck“ oder einen „Shifting Bottleneck“ darstellte, ist folglich der durchschnittliche Engpass eines Produktionssystems (vgl. Roser et al. 2002: 1081 f.). In Gopalakrishnan et al. (2014) wurde für das dynamische Ranking der momentane Engpass verwendet, wobei die Aktivzeiten in einem Intervall von einer Minute bestimmt wurden. Für das untersuchte Produktionssystem zeigte sich schließlich, dass eine Priorisierung mit einem statischen Engpassranking zu einem besseren Ergebnis führt, als mit dem ebenfalls angewendeten dynamischen Ranking.

Langer et al. (2010) haben die Auswirkung einer engpassbasierten Priorisierungsreihenfolge für reaktiv wie auch proaktiv durchzuführende Instandhaltungsmaßnahmen anhand einer seriellen Produktionslinie ebenfalls untersucht. Dabei haben sie zunächst, wie Gopalakrishnan et al. (2013), analysiert, inwiefern sich eine statische Priorisierungsreihenfolge, basierend auf einem Engpassranking, auf die Ausbringung der Linie auswirkt. Für die Bestimmung des Engpassrankings wurde die Engpassmethode „Arrow Based Method“ nach Kuo et al. (1996) angewendet, die die Engpässe eines Produktionssystems mittels den Wartezustandsinformationen über Hilfspfeile bestimmt (Abbildung 23).

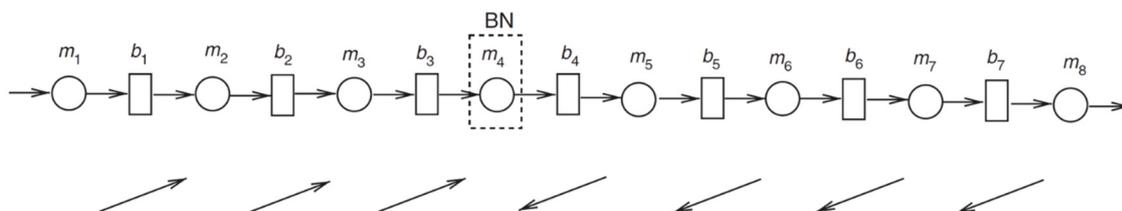


Abbildung 23: „Arrow Based Method“ (Langer et al. 2010: 1752)

Ist eine Maschine häufiger in einem Wartezustand aufgrund eines blockierten Auslaufs, so liegt der Engpass stromabwärts, was durch einen Pfeil in die entsprechende Richtung angedeutet wird. Ist eine Maschine hingegen häufiger in einem Wartezustand aufgrund eines Werkstückmangels am Einlauf, liegt der Engpass stromaufwärts und der Pfeil zeigt ebenfalls in diese Richtung. Deuten schließlich zwei Pfeile auf eine Maschine, so ist diese ein Engpass (vgl. Kuo et al. 1996: 239). Neben einer statisch angewendeten Priorisierung nach dieser Engpassmethode haben Langer et al. (2010) auch untersucht, inwiefern eine regelmäßige Aktualisierung des Engpassrankings eine Auswirkung auf die Priorisierung hat. Dazu wurde das Engpassranking nach bestimmten Zeitintervallen erneut ermittelt. Dabei haben sie herausgefunden, dass eine Engpassbestimmung nach der „Arrow Based Method“ alle ein bis zwei Tage basierend auf den Daten der vergangenen ein bis zwei Tage zu den besten Ergebnissen führt.

Li et al. (2009a) haben ebenfalls untersucht, wie sich eine engpassbasierte Priorisierung auf die Ausbringung eines seriellen Produktionssystems auswirkt. Die

Engpassermittlung wurde hier mittels der in Li et al. (2009b) vorgestellten „Turning Point Method“ durchgeführt. Bei dieser Methode werden die Engpassmaschinen auf Basis von Wartezustandsinformationen bestimmt, indem für jede Maschine der Anteil an Wartezuständen aufgrund Werkstückmangels sowie Wartezuständen aufgrund eines blockierten Auslaufs ermittelt wird (Abbildung 24). Die Maschinen, bei denen ein Wechsel von einem höheren Warteanteil aufgrund eines blockierten Auslaufs zu einem höheren Warteanteil aufgrund Werkstückmangels stattfindet, werden als „Turning Point“ bezeichnet und stellen einen Engpass dar (vgl. Li et al. 2009b: 5025). Die so ermittelten Engpassmaschinen wurden schließlich bei Auftreten von ungeplanten Stillständen bevorzugt instandgesetzt, was zu einer deutlichen Ausbringungssteigerung im Vergleich zu einer FCFS-Basisstrategie führte.

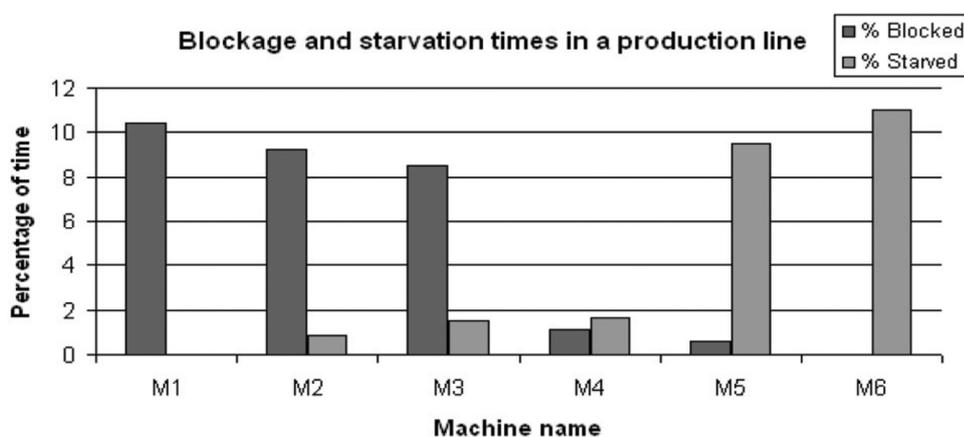


Abbildung 24: „Turning Point Method“ (Li et al. 2009b: 5024)

Darauf aufbauend haben die Autoren in Li et al. (2009c) sowie Li und Ni (2009) ein Online-Entscheidungsunterstützungssystem vorgestellt, das sowohl eine Priorisierung von ungeplant eintretenden Stillständen als auch eine Planung von präventiven Instandhaltungsmaßnahmen auf Basis der bereits in Li et al. (2009a) verwendeten kurzzyklischen Engpassermittlung mittels der „Turning Point Method“ erlaubt. Dabei wurde die Engpassermittlung im Rahmen der vorgestellten Fallstudie eines realen Produktionssystems täglich durchgeführt.

In Chang et al. (2007) wird eine simulationsbasierte Methode vorgeschlagen, um den Engpass mittels einer Sensitivitätsanalyse kurzzyklisch zu bestimmen und damit die Priorisierung vorzunehmen. Dazu wird mit Hilfe eines Simulationsmodells und unter Verwendung von historischen Produktionsdaten in bestimmten Abständen eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei der iterativ die Auswirkung einer Durchsatzänderung einer Maschine auf die Gesamtausbringung des Produktionssystems untersucht wird. Das finale Engpassranking ergibt sich entsprechend der größten Sensitivität und bleibt als Priorisierungsreihenfolge bis zur nächsten Bestimmung des Engpassrankings aktuell.

In Guner et al. (2015) werden ungeplant eintretende Stillstände unter Verwendung eines für jede Produktionsschicht neu bestimmten Engpassrankings priorisiert. Dazu werden zu Beginn jeder Schicht auf Basis des zu diesem Zeitpunkt anliegenden Systemzustandes die Engpässe der Schicht mittels Simulation vorhergesagt, wobei als Engpassermittlungsmethode die „Active Period Method“ nach Roser et al. (2001) verwendet wird.

Dynamische Priorisierungsmethoden

Mosley et al. (1998) haben in einer Simulationsstudie verschiedene Priorisierungsstrategien untersucht und festgestellt, dass die Anzahl an Produktionsmitarbeitern den Mehrwert einer Priorisierung von Stillständen signifikant beeinflusst. Die Zuordnung des Produktionspersonals zu stillstehenden Maschinen erfolgte dabei u. a. nach der kürzesten Reparaturdauer, der höchsten Auslastung sowie der längsten Warteschlange von zu produzierenden Teilen vor einer Maschine. Auch Kombinationen dieser Strategien, wie die Priorisierung nach längster Warteschlange und kürzester Reparaturdauer, wurden untersucht.

In Yang et al. (2007) sowie Ni und Jin (2012) wurde die Wichtigkeit der Berücksichtigung von Online-Produktionsinformationen, insbesondere des aktuellen Systemzustandes, bei der Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen hervorgehoben. Dafür wurde eine simulationsbasierte Priorisierungsmethode vorgeschlagen, die auf Basis des aktuellen Systemzustandes, in diesem Fall der räumlichen Verteilung der Werkstücke innerhalb des Produktionssystems zum Entscheidungszeitpunkt, die Priorisierungsreihenfolge bestimmt. Mit der Annahme, dass die zu priorisierenden Stillstände sequentiell behoben werden, wird ein Reihenfolgenoptimierungsproblem mit $|S|!$ Behebungsreihenfolgen konstruiert, wobei S die Menge aller Prozesse mit zu priorisierenden Stillständen ist. Die möglichen Behebungsreihenfolgen werden hier mittels Simulation bewertet. Als Bewertungskriterium wird dabei der Systemwert verwendet, wobei den Werkstücken ein monetärer Wert zugeteilt wird, der in der Regel ansteigt, je weiter stromabwärts sich die Werkstücke in der Prozesskette befinden. Folglich kann auf Basis des aktuellen Systemzustandes der Systemwert für jede mögliche Behebungsreihenfolge nach einer in diesem Fall statisch festgesetzten Simulationszeit von acht Stunden bestimmt werden. Die Priorisierungsreihenfolge ist schließlich die Behebungsreihenfolge mit dem höchsten Systemwert. Für größere Lösungsräume schlagen Yang et al. (2007) die Verwendung eines genetischen Algorithmus vor, damit die Entscheidungsfindung in hinnehmbarer Zeit abläuft. Guo et al. (2013) haben diesen Ansatz ebenfalls aufgegriffen und für die Anwendung bei Mehrprodukt Montagesystemen erweitert.

In Gopalakrishnan et al. (2016) wurden ebenfalls die aktuellen Pufferfüllstände bzw. die aktuelle Pufferausnutzung zur Bestimmung der Behebungsreihenfolge reaktiver Instandhaltungsmaßnahmen in Fließfertigungssystemen verwendet. Dabei ergibt sich die aktuelle Pufferausnutzung für jede Verkettung zu einem

beliebigen Zeitpunkt als Verhältnis aus aktuellem Pufferfüllstand bezogen auf die Pufferkapazität. Somit hat die Maschine die höchste Priorität, die stromabwärts des Verkettungselements mit der höchsten Pufferausnutzung liegt (Abbildung 25).

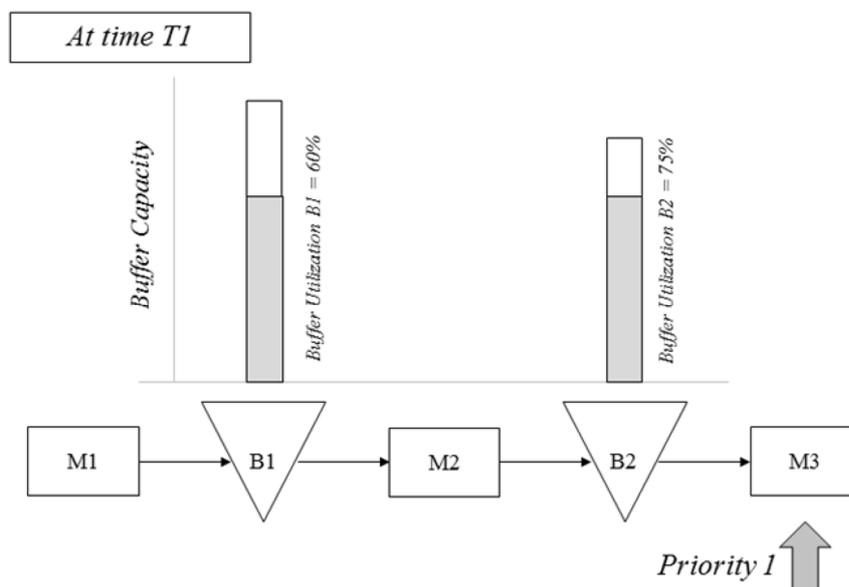


Abbildung 25: Pufferausnutzung zur Bestimmung der Priorisierungsreihenfolge
(Gopalakrishnan et al. 2016: 2800)

In Subramaniyan et al. (2016) wurde ein Algorithmus vorgestellt, mit dem aus Echtzeitproduktionsdaten sowohl die momentanen wie auch die durchschnittlichen Engpässe eines verketteten Produktionssystems ermittelt werden können, sodass folglich eine entsprechende Priorisierung von reaktiven wie auch präventiven Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden kann. Wie bereits bei Gopalakrishnan et al. (2014), wird dafür die „Shifting Bottleneck Detection Method“ verwendet, mit der neben den durchschnittlichen auch die momentanen Engpässe bestimmt werden können. Subramaniyan et al. (2016) schlagen vor, dass sich präventive Instandhaltungsmaßnahmen dabei auf die durchschnittlichen Engpässe fokussieren, während reaktive Instandhaltungsmaßnahmen, aufgrund ihrer Kurzzeitorientierung, basierend auf den momentanen Engpässen priorisiert werden sollten.

Wie bereits die Verwendung der „Shifting Bottleneck Detection Method“ angedeutet, sind Engpässe nicht statisch, sondern werden durch das dynamische Verhalten eines Produktionssystems beeinflusst. Folglich kann es sein, dass die momentanen Engpässe andere sind als die Engpässe in der nächsten Zeitperiode. In diesem Kontext hat Wedel (2016) eine mehrstufige Methode für die Priorisierung von Störungen in komplexen Produktionssystemen hergeleitet, bei der zwischen Echtzeitengpässen sowie Engpässen in naher Zukunft unterschieden wird. Dabei

sind Echtzeitengpässe gestörte Maschinen, die bereits benachbarte Maschinen in einen logistischen Stillstand versetzt haben. Engpässe in naher Zukunft sind hingegen gestörte Maschinen, die aufgrund vorhandener Pufferkompensation noch keine benachbarten Maschinen beeinflussen. Folglich sind Echtzeitengpässe grundsätzlich höher zu priorisieren als Engpässe in naher Zukunft.

In Subramaniyan et al. (2018) wird ein Algorithmus vorgestellt, mit dem die Engpässe in einem Produktionssystem basierend auf den historischen Aktivzeiten der Maschinen vorhergesagt werden können. Dazu werden historische Daten über die Aktivzeiten von Maschinen in stationäre Zeitreihen umgewandelt. Diese Daten werden dann mittels eines „Auto Regressive Integrated Moving Average“ (ARIMA) Modells bewertet und in die Zukunft extrapoliert, sodass für jede Maschine der Aktivzeitanteil für eine Zeitperiode nach dem jetzigen Zeitpunkt t vorhergesagt werden kann (Abbildung 26).

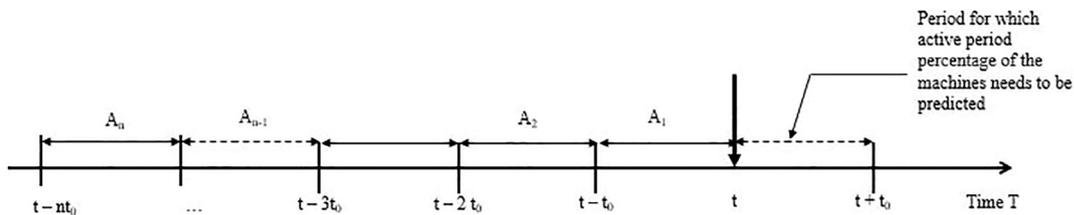


Abbildung 26: Engpassvorhersage mittels ARIMA Modell
(Subramaniyan et al. 2018: 538)

Die Engpässe der zukünftigen Zeitperiode ergeben sich schließlich nach der in Roser et al. (2001) vorgestellten „Active Period Method“ entsprechend des größten Aktivzeitanteils aus einem Vergleich der prognostizierten Aktivzeiten für alle Maschinen.

2.4.2 Analyse und Bewertung der Forschungsansätze

Wie der Überblick über relevante Forschungsansätze zeigt, existieren bereits einige Ansätze zur Priorisierung von Maschinenstillständen. Für die Bewertung dieser Ansätze werden die folgenden Bewertungskriterien herangezogen:

- Betrachtete Entscheidungsgröße(n)
- Priorisierungsentscheidung aus einer Systemperspektive
- Dynamische Bestimmung der Priorisierungsreihenfolge
- Einbeziehung zukünftiger Stillstandszeiten in die Entscheidung

In der Praxis werden Priorisierungsentscheidungen durch das für die Stillstandsbehebung zuständige Personal auf Basis ihrer Erfahrung und ihres Wissens, mittels Intuition oder durch Versuch und Irrtum getroffen (vgl. Yang et al. 2007: 435;

Guo et al. 2013: 473; Gopalakrishnan et al. 2015: 485). Folglich wird die Priorisierung von Stillständen hier häufig subjektiv durchgeführt. Im Gegensatz dazu zeigt die Analyse bestehender Forschungsansätze, dass sämtliche Ansätze eine faktenbasierte und somit objektive Entscheidungsfindung unterstützen.

Um zu objektiven, faktenbasierten Entscheidungen zu kommen, werden unterschiedliche Entscheidungsgrößen herangezogen. Neben festen Kriterien wie bei Bengtsson (2011), Gupta et al. (2013) oder Silvestri et al. (2014) sind dies vor allem Engpassrankings, die mittels verschiedener Engpassermittlungsverfahren bestimmt werden. So verwenden u. a. Gopalakrishnan et al. (2014) und Guner et al. (2015) die „Active Period Method“ zur Engpassbestimmung, während in Li et al. (2009a) die „Turning Point Method“ angewendet wird. In Wedel (2016) werden Echtzeitengpässe und Engpässe in naher Zukunft mittels Informationen über Wartezustände von Maschinen sowie Pufferfüllständen bestimmt. Yang et al. (2007) verwenden hingegen für die Auswahl der Priorisierungsreihenfolge einen Systemwert, der mittels Simulation bestimmt wird. Insgesamt zeigt sich, dass in den betrachteten Forschungsansätzen durchaus unterschiedliche Entscheidungsgrößen für die Priorisierung von Maschinenstillständen verwendet werden. Das übergeordnete Ziel einer Priorisierung ist letztendlich aber die Erhöhung der Ausbringung des gesamten Produktionssystems.

Damit dieses Ziel erreicht werden kann, sollten Priorisierungsentscheidungen aus einer Systemperspektive durchgeführt werden, wie es in Gopalakrishnan und Skoogh (2018: 667) sowie in Alrabghi und Tiwari (2015: 174) gefordert wird. Anstelle einer isolierten Betrachtung einzelner Produktionsressourcen wird bei einer Systemperspektive die Auswirkung der Priorisierungsreihenfolge auf das gesamte Produktionssystem untersucht, wobei in verketteten Produktionssystemen insbesondere die dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Produktionsressourcen zu berücksichtigen sind (vgl. Roy et al. 2016: 682; Skoogh et al. 2011: 3). Auf festen Kriterien beruhende Priorisierungsmethoden, wie bei Bengtsson (2011) oder Silvestri et al. (2014), erfüllen diese Systemperspektive nicht, da die Wechselwirkungen mit anderen Produktionsressourcen nur unzulänglich über Informationen zu Auslastungen oder Funktionsredundanzen erfasst werden. Auch die bestehenden Priorisierungsmethoden basierend auf Engpassrankings können die geforderte Systemperspektive nur teilweise erfüllen. Hier wird zwar grundsätzlich der Systemgedanke angewendet, allerdings wird die Auswirkung einer Priorisierung auf das Gesamtsystem lediglich indirekt über die Engpassmaschinen abgebildet. Da die Engpassbestimmung bei den meisten Methoden auf historischen Daten basiert, wird die Dynamik folglich nur unzureichend berücksichtigt. Bei Wedel (2016) werden Stillstände zwar mittels Echtzeitengpässen und Engpässen in naher Zukunft bestimmt, allerdings werden die Wechselwirkungen dabei nur zwischen benachbarten Produktionsressourcen und nicht gesamtheitlich betrachtet. Im Gegensatz dazu ermöglichen die Forschungsansätze von Yang et al. (2007), Ni und Jin (2012) sowie Guo et al. (2013)

durch die Anwendung der Simulation zur Bewertung der möglichen Behebungsreihenfolgen eine vollständige Systemperspektive, bei der sowohl die Komplexität als auch die Dynamik eines Produktionssystems berücksichtigt werden.

Vielfach werden die Priorisierungen statisch durchgeführt, d. h. die Priorisierungsentscheidung wird anhand einer zuvor bestimmten, übergeordneten Priorisierungsreihenfolge zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt getroffen. Dabei erfolgt die jeweilige Priorisierung eines Stillstandes entsprechend der Position der betroffenen Produktionsressource in der übergeordneten Priorisierungsreihenfolge. Allerdings führt dies im Allgemeinen nicht zu der besten Priorisierungsentscheidung, da sich die Wichtigkeit einzelner Produktionsressourcen in einem dynamischen Produktionssystem über die Zeit ändern kann (vgl. Yang et al. 2007: 436). Vor diesem Hintergrund werden in Yang et al. (2007), Ni und Jin (2012), Guo et al. (2013) sowie in Wedel (2016) Online-Produktionsinformationen des Produktionssystems, wie beispielweise Pufferfüllstände oder Betriebszustände einzelner Ressourcen, für die Priorisierung verwendet, sodass bei diesen Ansätzen die Priorisierungsentscheidungen stets auf Basis des aktuellen Systemzustandes getroffen werden können.

In Wedel (2016) wurden bereits Engpässe in naher Zukunft betrachtet, d. h. es wurde bei der Priorisierungsentscheidung berücksichtigt, wann Stillstände im weiteren zeitlichen Verlauf zu einem Engpass des Produktionssystems führen. Allerdings sind bei diesem Ansatz die berücksichtigten Stillstände zum Entscheidungszeitpunkt schon eingetreten. Einen Schritt weiter gehen letztendlich Subramanian et al. (2018), die auf Basis historischer Daten über die Aktivzeitanteile der Maschinen die Engpässe der nächsten Zeitperiode vorhersagen. Folglich wird hier versucht, noch nicht eingetretene Stillstände bzw. Engpässe vorherzusagen. Dabei beruht die Prädiktion allerdings auf Informationen aus vergangenheitsbezogenen Daten. Somit wird unterstellt, dass das zukünftige Verhalten des Produktionssystems mit dem historischen Verhalten korreliert. Zudem verknüpfen die Autoren die gewonnenen Informationen über zukünftige Engpässe nur indirekt mit einer methodischen Priorisierungsentscheidung. Es wird lediglich vorgeschlagen, dass das für die Stillstandsbehebung zuständige Personal diese Informationen in ihren Priorisierungsentscheidungen berücksichtigen sollte.

Wie die Gegenüberstellung in Abbildung 27 zeigt, existieren bereits einige Forschungsansätze, bei denen eine Priorisierung von Maschinenstillständen aus einer Systemperspektive durchgeführt wird. Dabei erfolgt die Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge häufig dynamisch, d. h. die Reihenfolge wird zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt neu bestimmt. Dazu werden in den meisten Fällen zwar historische Daten sowie der aktuelle Systemzustand verwendet, allerdings existiert bisher kein Ansatz, der zum Entscheidungszeitpunkt verfügbare Informationen über zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten konkret in die Priorisierungsentscheidung miteinbezieht.

| Forschungsansatz | Betrachtete Entscheidungsgröße(n) | Priorisierungsentscheidung aus einer Systemperspektive | Dynamische Bestimmung der Priorisierungsergebnisse | Einbeziehung zukünftiger Stillstandszeiten in die Entscheidung |
|------------------------------|---|--|--|--|
| Bengtsson (2011) | Funktionsredundanz, Qualität, Auslastung, Maschinenalter | ○ | ○ | ○ |
| Gupta et al. (2013) | Zuverlässigkeit, Stillstandskosten | ○ | ○ | ○ |
| Silvestri et al. (2014) | Verwendungshäufigkeit, Instandhaltungskosten, Zykluszeit, Fehleranzahl und -vielfalt | ○ | ○ | ○ |
| Stadnika et al. (2014) | Auslastung, Anzahl und Gesamtdauer Stillstände, Redundanz, Umwelt und Sicherheit | ○ | ○ | ○ |
| Gopalakrishnan et al. (2013) | Engpassranking mittels „Active Period Method“ | ◐ | ○ | ○ |
| Gopalakrishnan et al. (2014) | Engpassranking mittels „Active Period Method“ und „Shifting Bottleneck Detection Method“ | ◐ | ◐ | ○ |
| Langer et al. (2010) | Engpassranking mittels „Arrow Based Method“ | ◐ | ◐ | ○ |
| Li et al. (2009a) | Engpassranking mittels „Turning Point Method“ | ◐ | ◐ | ○ |
| Li et al. (2009c) | Engpassranking mittels „Turning Point Method“ | ◐ | ◐ | ○ |
| Li und Ni (2009) | Engpassranking mittels „Turning Point Method“ | ◐ | ◐ | ○ |
| Chang et al. (2007) | Engpassranking mittels Sensitivitätsanalyse | ◐ | ◐ | ○ |
| Guner et al. (2015) | Engpassranking mittels „Active Period Method“ | ◐ | ◐ | ○ |
| Mosley et al. (1998) | u. a. kürzeste Reparaturdauer, höchste Auslastung, längste Warteschlange | ○ | ● | ○ |
| Yang et al. (2007) | Systemwert | ● | ● | ○ |
| Ni und Jin (2012) | Systemwert | ● | ● | ○ |
| Guo et al. (2013) | Systemwert | ● | ● | ○ |
| Gopalakrishnan et al. (2016) | Höchste Pufferausnutzung | ◐ | ● | ○ |
| Subramaniyan et al. (2016) | Längste ununterbrochene Aktivzeit („Shifting Bottleneck Detection Method“) | ◐ | ● | ○ |
| Wedel (2016) | Echtzeitengpass, Engpass in naher Zukunft, logistische Stillstände, Pufferfüllstand, Reparaturdauer | ◐ | ● | ○ |
| Subramaniyan et al. (2018) | „Active Period Method“ mit prognostizierten Aktivzeiten | ● | ● | ○ |

○ kaum erfüllt ◐ teilweise erfüllt ● voll erfüllt

Abbildung 27: Bewertung bestehender Forschungsansätze

2.4.3 Fazit und Ableitung des Handlungsbedarfs

Die bestehenden Forschungsansätze im Bereich „Priorisierung von Maschinenstillständen“ zeigen, dass Priorisierungsentscheidungen dynamisch und aus einer Systemperspektive getroffen werden sollten, wobei die Dynamik und Komplexität moderner Produktionssysteme, wie das in Kapitel 2.1.2 vorgestellte und in dieser Arbeit betrachtete Fließfertigungssystem, zu berücksichtigen sind. Dabei hat sich die ereignisdiskrete Simulation (vgl. Kapitel 2.3.2) zur Beurteilung von Handlungsalternativen, wie sie die unterschiedlichen Behebungsreihenfolgen ungeplanter Stillstände im Rahmen einer Priorisierung darstellen, bewährt und soll somit auch im Rahmen dieser Arbeit Anwendung finden. Aus der Anwendung der Simulationstechnik in der Betriebsphase von Produktionssystemen resultieren außerdem besondere Anforderungen, wie die Initialisierung des Simulationsmodells aus aktuellen Produktionsdaten sowie eine angemessene Entscheidungsfindungszeit im Hinblick auf die Laufzeit von Simulationsmodellen (vgl. Kapitel 2.3.1).

Durch die Analyse der Forschungsansätze konnte zudem herausgearbeitet werden, dass in den bestehenden Ansätzen zwar historische Daten sowie der aktuelle Systemzustand bei den Priorisierungsentscheidungen berücksichtigt werden, allerdings existiert bisher kein Ansatz, bei dem Informationen über zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten systematisch in die Priorisierungsentscheidung ungeplanter Stillstände miteinbezogen werden. In Produktionssystemen treten neben ungeplanten Stillständen aber auch geplante Stillstände auf (vgl. Kapitel 2.2.2), die ebenfalls zu Produktionsverlusten führen können, insbesondere, wenn das Produktionssystem hoch ausgelastet ist und deshalb in einem Dreischichtbetrieb produziert (vgl. Bokrantz et al. 2016: 1057). Folglich können geplante Stillstandszeiten als Ursache für potenzielle Engpässe angesehen werden. Dabei resultieren geplante Stillstände nicht nur aus präventiven Instandhaltungsmaßnahmen, sondern treten vermehrt durch Maßnahmen auf, die aufgrund einer zustandsbasierten, vorausschauenden Instandhaltungsstrategie proaktiv zum Erhalt bzw. zur Steigerung der langfristigen Verfügbarkeit des gesamten Produktionssystems durchgeführt werden (vgl. Kapitel 2.2.1).

Es fehlen somit Vorgehensweisen zur Priorisierung von Stillständen, die für die Priorisierungsentscheidung nicht nur die zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt zu priorisierenden Stillstände und deren jeweilige Auswirkung auf die Produktionsleistung des gesamten Fließfertigungssystems berücksichtigen, sondern auch die Informationen über zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten miteinbeziehen. Darüber hinaus fehlt das Wissen über den konkreten Zusammenhang zwischen der Priorisierungsentscheidung ungeplanter Stillstände und der Auswirkung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten sowie über den Nutzen und die Grenzen einer Priorisierung unter Berücksichtigung zukünftig eintretender geplanter Stillstände.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Nachdem für das Verständnis dieser Arbeit wichtige Grundlagen vorgestellt und Begriffe definiert sowie relevante Forschungsansätze im Bereich „Priorisierung von Maschinenstillständen“ analysiert wurden, wird in diesem Kapitel die Zielsetzung der Arbeit definiert. Zudem werden aus der Zielsetzung zwei Forschungsfragen abgeleitet und die Vorgehensweise zur Beantwortung dieser Fragen sowie zur Erreichung der Zielsetzung erläutert.

3.1 Zielsetzung und Forschungsfragen

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines operativen Entscheidungsunterstützungssystems, welches den Produktionsmitarbeitern eine dynamisch sowie objektiv ermittelte Priorisierungsreihenfolge ungeplant eingetretener Stillstände in komplexen Fließfertigungssystemen zur Verfügung stellt, wobei neben den zum Entscheidungszeitpunkt zu priorisierenden Stillständen auch Informationen über zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten in die Priorisierungsentscheidung miteinbezogen werden. Dabei soll durch die Berücksichtigung geplanter Stillstandszeiten, die in Form eines Lookahead bereits zum Entscheidungszeitpunkt zur Verfügung stehen, die Auswirkung dieser Stillstände proaktiv vermindert werden. Des Weiteren soll die Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge aus einer Systemperspektive erfolgen, sodass die Priorisierungsreihenfolge letztendlich diejenige Behebungsreihenfolge widerspiegelt, mit der die höchste Produktionsleistung des gesamten Fließfertigungssystems erzielbar ist. Schließlich sollen durch die Einbeziehung sowohl aktuell anliegender Stillstände als auch geplanter zukünftiger Stillstandszeiten in die Entscheidungsfindung Produktionsverluste minimiert und Produktionskosten nachhaltig gesenkt werden.

Aus dieser Zielsetzung lassen sich zwei konkrete Forschungsfragen ableiten:

Forschungsfrage 1

„Welchen Einfluss hat die Information über zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten auf die Priorisierungsreihenfolge der zum Entscheidungszeitpunkt anliegenden Stillstände?“

Forschungsfrage 2

„Führt eine Priorisierung ungeplanter Stillstände unter Berücksichtigung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten zu einem Mehrwert in Bezug auf die erzielbare Produktionsleistung komplexer Fließfertigungssysteme?“

3.2 Vorgehensweise

Um die erste Forschungsfrage zu beantworten, wird zunächst das Grundproblem einer Priorisierung von Stillständen in verketteten Fließfertigungssystemen näher betrachtet (Kapitel 4). Ausgehend von einem Ansatz (Kapitel 4.1), der eine Formulierung als Reihenfolgenoptimierungsproblem ermöglicht, wird eine simulationsbasierte (Kapitel 4.2) sowie eine analytische Vorgehensweise (Kapitel 4.3) zur Bestimmung des Zielfunktionswertes hergeleitet. Hierbei wird zunächst nur der reine Online-Fall betrachtet, d. h. Informationen über zukünftig eintretende Stillstandszeiten stehen für die Entscheidungsfindung nicht zur Verfügung.

In Kapitel 5 wird dann als Problemerweiterung einer Priorisierung von Stillständen die Verfügbarkeit von Informationen über zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten in Form eines Lookahead zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt betrachtet. In diesem Kapitel wird somit das Reihenfolgenoptimierungsproblem als Online-Optimierungsproblem mit Lookahead aufgefasst. Als zukünftig eintretende Eingabedaten, die im Rahmen eines Lookahead bereits zum Entscheidungszeitpunkt zur Verfügung stehen, können dabei geplante Stillstandszeiten für proaktiv durchzuführende Instandhaltungsmaßnahmen angesehen werden. Die in Kapitel 4 bei der Herleitung der Vorgehensweisen zur Priorisierung ohne Lookahead gewonnenen Erkenntnisse bilden dazu das theoretische Grundgerüst für die Analyse des Zusammenhangs zwischen der Priorisierung ungeplanter Stillstände und der Auswirkung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten (Kapitel 5.2). Die theoretischen Grundlagen aus der Analyse dieses Zusammenhangs werden schließlich für die Herleitung einer simulationsbasierten Vorgehensweise verwendet, die eine Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge unter Berücksichtigung geplanter Stillstandszeiten in Form eines Lookahead ermöglicht (Kapitel 5.3).

Zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage wird diese neue Vorgehensweise zur Priorisierung von Stillständen zusammen mit den in Kapitel 4 hergeleiteten Vorgehensweisen in Form eines Entscheidungsunterstützungssystems in eine Simulationsumgebung implementiert (Kapitel 6.1). Anhand zweier Modelle von Fließfertigungssystemen wird der Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead im Vergleich zu einer Priorisierung ohne Lookahead wie auch einer statischen Priorisierungsstrategie nach dem FCFS-Prinzip im Rahmen einer Simulationsstudie evaluiert (Kapitel 6.2). Dabei werden neben grundsätzlichen Einflussfaktoren auf die Effektivität einer Priorisierung (Kapitel 6.3) auch Einflussfaktoren untersucht, die speziell aus einer Priorisierung mit Lookahead resultieren (Kapitel 6.4).

Im letzten Kapitel dieser Arbeit wird die prototypische Anwendung einer Priorisierung unter Berücksichtigung geplanter Stillstandszeiten anhand einer Simulationsstudie eines komplexen Fließfertigungssystems aus der Automobilindustrie aufgezeigt. Neben der Modellerstellung (Kapitel 7.1) wird hier ein Vorgehen

beschrieben, mit dem die hergeleiteten Vorgehensweisen zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge mit und ohne Lookahead auch für größere Lösungsräume angewendet werden können (Kapitel 7.2). Damit ist es schließlich möglich, den Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead auch für ein real existierendes Fließfertigungssystem zu analysieren (Kapitel 7.3).

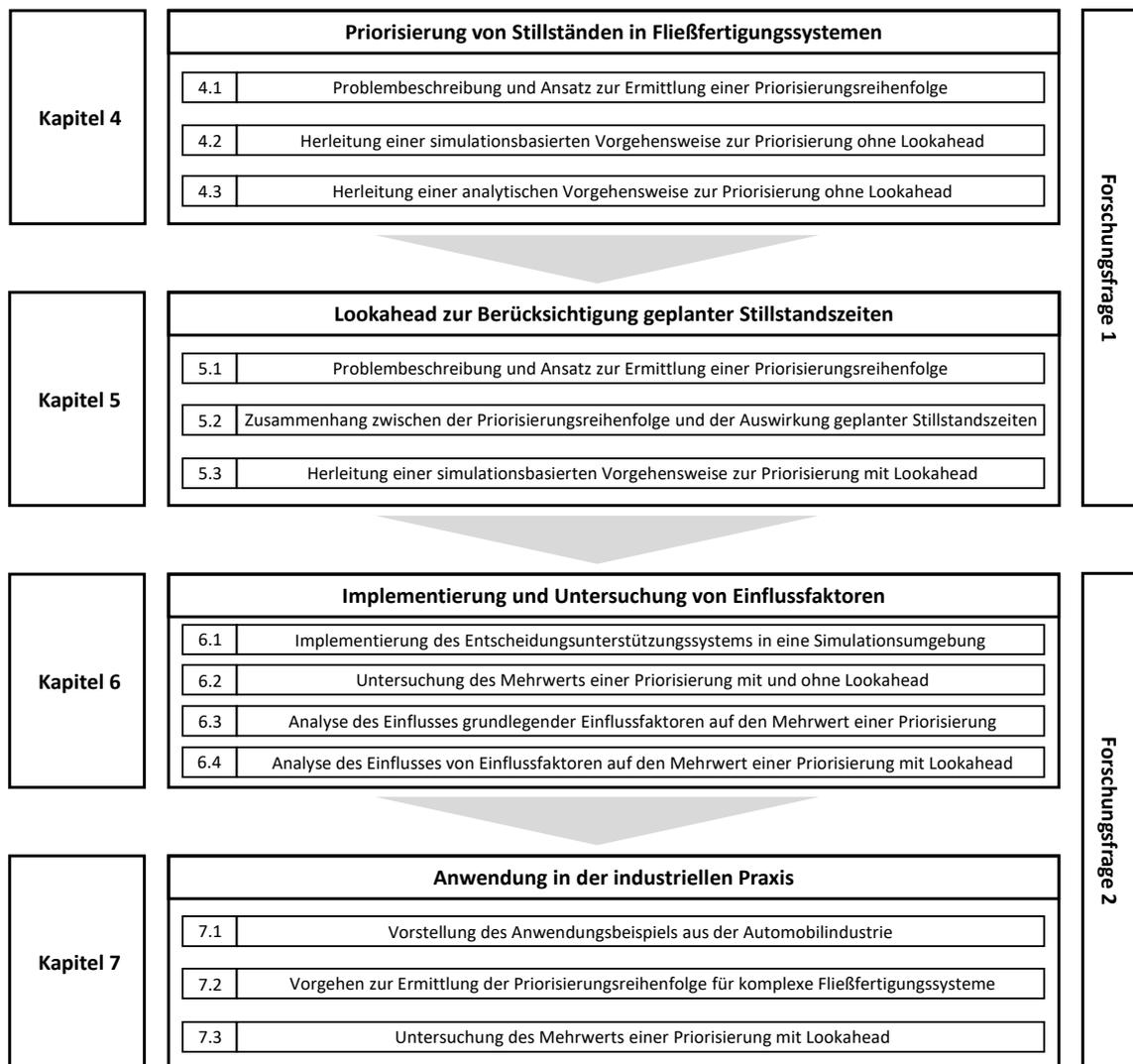


Abbildung 28: Aufbau der Arbeit

4 Priorisierung von Stillständen in Fließfertigungssystemen

In diesem Kapitel wird zunächst das Grundproblem einer Priorisierung von ungeplant eintretenden Stillständen in Fließfertigungssystemen näher untersucht, wobei zunächst nur der reine Online-Fall betrachtet wird, d. h. es wird angenommen, dass nur die zum Entscheidungszeitpunkt zu priorisierenden Stillstände als Eingabedaten bekannt sind. Auf Basis grundsätzlicher Überlegungen zu der Auswirkung von Stillständen in verketteten Fließfertigungssystemen werden zwei Vorgehensweisen vorgestellt, die eine Priorisierung von Stillständen durch Ermittlung einer zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt neu bestimmten und damit dynamischen Priorisierungsreihenfolge unter Beachtung einer Systemperspektive sowie der dynamischen Wechselbeziehungen zwischen den Produktionsressourcen ermöglicht. Damit bilden die in diesem Kapitel vorgestellten Vorgehensweisen die theoretische Grundlage für die Berücksichtigung geplanter Stillstandszeiten als zusätzliche Information in Form eines Lookahead bei der Priorisierung von Stillständen.

4.1 Problembeschreibung und Ansatz

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erläutert, kann in komplexen Fließfertigungssystemen der Fall eintreten, dass mehrere Stillstände gleichzeitig anliegen. Ist in diesem Fall die Anzahl an Produktionsmitarbeitern, die zur Stillstandsbehebung zur Verfügung stehen, geringer als die Anzahl an liegenden Stillständen, so müssen die Stillstände priorisiert werden. In Abbildung 29 ist ein schematischer Stillstandsverlauf von vier Prozessen (P_1 bis P_4) im zeitlichen Verlauf rückblickend dargestellt. Unter den Annahmen, dass nur ein Mitarbeiter für die Stillstandsbehebung verfügbar war und eine begonnene Instandsetzung nicht aufgrund eines neuen, ggf. höher priorisierten Stillstandes abgebrochen wurde, musste der Mitarbeiter zu den Zeitpunkten t_1 , t_2 , t_3 und t_4 entscheiden, welcher Prozess als nächstes instandgesetzt wird.

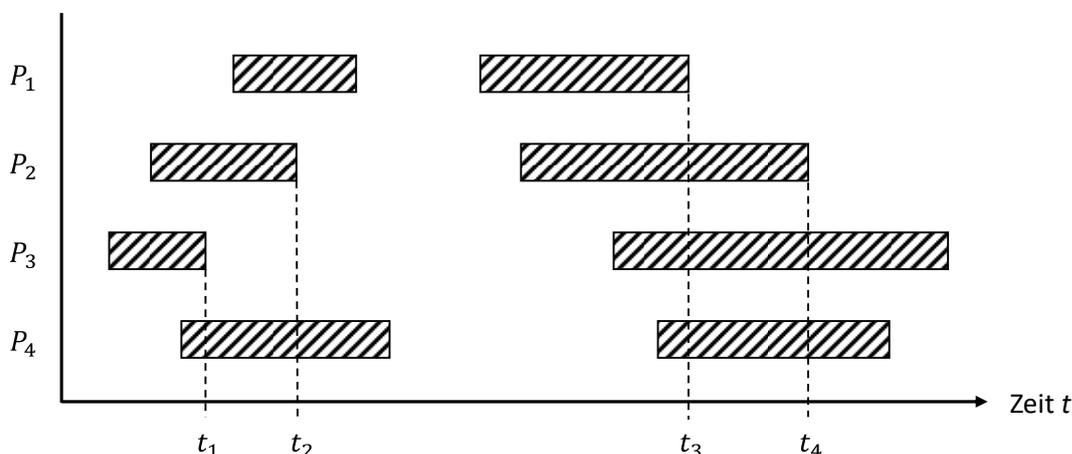


Abbildung 29: Schematischer Stillstandsverlauf mit Entscheidungszeitpunkten

Wird beispielsweise der Entscheidungszeitpunkt t_1 näher betrachtet, so ergaben sich zu diesem Zeitpunkt grundsätzlich zwei verschiedene Handlungsalternativen. Entweder wird zunächst der Prozess P_2 und folgend dann der Prozess P_4 instandgesetzt oder es erfolgt zunächst eine Instandsetzung des Prozesses P_4 und anschließend die Instandsetzung von Prozess P_2 . Somit liegt hier ein kombinatorisches Optimierungsproblem vor, wobei sich abhängig von der Mächtigkeit der Menge S , die alle Prozesse mit zu priorisierenden Stillständen enthält, insgesamt

$$L = |S|! \quad (4.1)$$

mögliche Handlungsalternativen, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch als Behebungsreihenfolgen bezeichnet werden, ergeben. Dabei soll zunächst nur der reine Online-Fall betrachtet werden, d. h. zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt t_d liegen nur die aktuell zu priorisierenden Stillstände als Eingabedaten vor. Insbesondere werden hier keine zukünftigen Eingabedaten in Form von Informationen über zukünftig eintretende Stillstände betrachtet.

Wie die Analyse bestehender Forschungsansätze bereits gezeigt hat, wird durch eine Priorisierung von Stillständen eine Erhöhung der Produktionsleistung des Produktionssystems angestrebt (vgl. Kapitel 2.4.2). Zur Bewertung der Behebungsreihenfolgen bietet sich folglich die Ausbringung bzw. die erzielbare Ausbringungsmenge zu einem Vergleichszeitpunkt an (vgl. Kapitel 2.1.3).

Wie bereits in Yang et al. (2007) vorgestellt, sollen auch in dieser Arbeit die zu priorisierenden Stillstände in ein Reihenfolgenoptimierungsproblem transformiert werden (vgl. Kapitel 2.4.1). Dafür wird die grundlegende Annahme getroffen, dass Stillstände nur sequentiell behoben werden, sodass die Handlungsalternativen als mögliche Behebungsreihenfolgen aufgefasst werden können. Folglich ergibt sich die Formulierung des Reihenfolgenoptimierungsproblems mit der zu maximierenden Zielgröße Ausbringungsmenge wie folgt:

$$\text{Max} \rightarrow \text{Ausbringungsmenge} = \max_{k=1}^L A(k) \quad (4.2)$$

Bei dieser Formulierung beschreibt L die Gesamtanzahl möglicher Behebungsreihenfolgen (vgl. Formel 4.1) und $A(k)$ die erzielte Ausbringungsmenge der Behebungsreihenfolge k . Gesucht ist schließlich die Behebungsreihenfolge, die im Vergleich zu den möglichen L Reihenfolgen die größte Ausbringungsmenge erzielt. Diese Reihenfolge, nach der schließlich die stillstehenden Prozesse instandgesetzt werden, wird im Folgenden als Priorisierungsreihenfolge bezeichnet.

4.2 Simulationsbasierte Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

Da sich Zielfunktionen zur Lösung von Problemstellungen bei komplexen Produktionssystemen, insbesondere bei den in dieser Arbeit betrachteten Fließfertigungssystemen, in der Regel nicht in geschlossener Form darstellen lassen, soll die Bestimmung der Zielfunktionswerte mit Hilfe der ereignisdiskreten Simulation erfolgen. Somit ergibt sich nach VDI 3633 (2016: 4) ein simulationsbasiertes Optimierungssystem nach Kategorie D, bei dem die Simulation in die Optimierung integriert ist (vgl. Kapitel 2.3.2). In Abbildung 30 ist dieses System schematisch dargestellt.

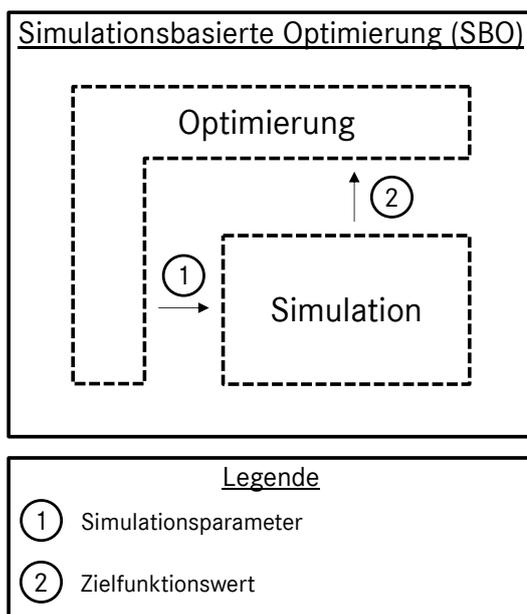


Abbildung 30: Schnittstellen eines simulationsbasierten Optimierungssystems

Bei diesem System greift die Optimierung als dominierende Komponente des simulationsbasierten Optimierungssystems auf das Simulationsmodell zur Berechnung des Zielfunktionswertes zurück und übergibt die erforderlichen Simulationsparameter. Nach erfolgter Simulation erhält die Optimierungskomponente schließlich als Ergebnis einen Zielfunktionswert zurück.

4.2.1 Grundprinzip und einführendes Beispiel

Im Folgenden wird das Grundprinzip des verfolgten Ansatzes anhand eines einfach nachvollziehbaren Beispiels verdeutlicht (vgl. Hegemann und Nickel 2019: 553-555). Dazu wird eine einzelne Priorisierungsentscheidung zum Entscheidungszeitpunkt t_d für ein eindimensionales Fließfertigungssystem betrachtet, welches aus zwei Prozessen und einem Verkettungselement besteht (Abbildung 31). Für dieses System sei angenommen, dass nur ein Mitarbeiter zur Instandsetzung von Stillständen zur Verfügung steht.

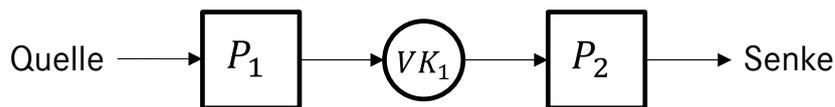


Abbildung 31: Eindimensionale Prozesskette als 2P-1VK Modell

Zum Entscheidungszeitpunkt t_d haben die beiden Prozesse P_1 und P_2 keine Werkstücke in Bearbeitung und das Verkettungselement VK_1 weist einen Pufferfüllstand $P_{VK_1}(t_d)$ sowie die Pufferkapazität $P_{VK_1,max}$ auf. Es wird ferner angenommen, dass P_1 immer mit Werkstücken aus der Quelle versorgt wird, d. h. P_1 muss nie auf Werkstücke warten. Analog kann P_2 fortlaufend Werkstücke in die Senke abführen, d. h. P_2 ist nie blockiert. Die für dieses Beispiel verwendeten Werte sind in Tabelle 1 aufgeführt. Da die Prozesse jeweils nur ein Werkstück gleichzeitig fertigen können, entsprechen die Taktzeiten den Prozesszeiten.

Tabelle 1: Technische Daten für das eindimensionale 2P-1VK Modell

| | P_1 | VK_1 | P_2 |
|---------------|-------|----------|-------|
| $PZ_i = TZ_i$ | 60 s | - | 60 s |
| TTR_i | 120 s | - | 120 s |
| $P_j(t_d)$ | - | 5 Stück | - |
| $P_{j,max}$ | - | 10 Stück | - |

Beide Prozesse stehen zum Zeitpunkt t_d still, sodass der Mitarbeiter entscheiden muss, welcher der Prozesse als Erstes instandgesetzt wird. Dabei bezeichnet die „Time To Repair“ (TTR) die Reparaturdauer, die zur Instandsetzung eines Prozesses benötigt wird. Da in diesem Fall zwei zu priorisierende Stillstände vorliegen, ergeben sich nach Formel 4.1 folglich auch zwei mögliche Behebungsreihenfolgen (Abbildung 32).

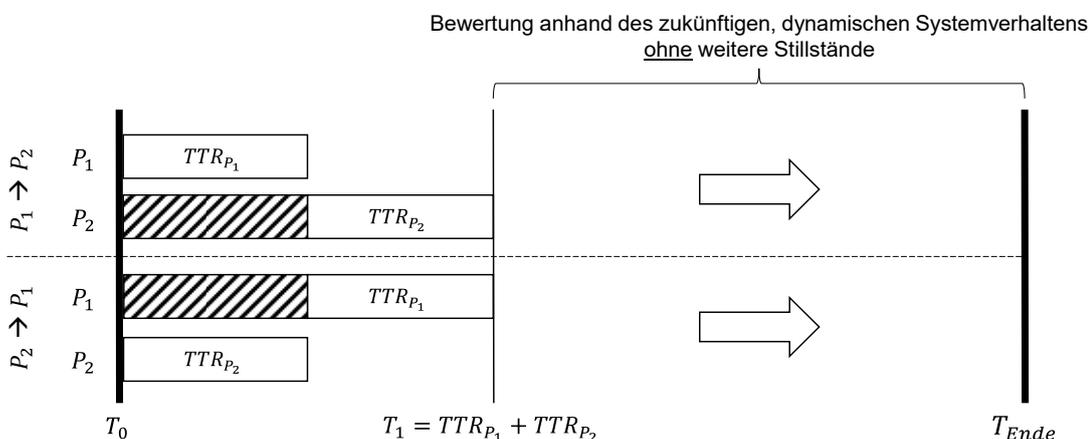


Abbildung 32: Ansatz zur Bestimmung der Priorisierungsreihenfolge

Bei der ersten möglichen Reihenfolge, der Sequenz $Seq_1 = P_1 \rightarrow P_2$, wird zunächst der Stillstand des Prozesses P_1 behoben. Nach der Reparaturdauer TTR_{P_1} produziert Prozess P_1 wieder und der Stillstand des Prozesses P_2 wird behoben. Zum Zeitpunkt T_1 sind schließlich beide Prozesse instandgesetzt und können produzieren. Hierbei wird die Zeit, die der Mitarbeiter für den Wechsel von Prozess P_1 zu Prozess P_2 benötigt, nicht betrachtet, d. h. die Stillstandsbehebung von P_2 beginnt direkt, nachdem der Prozess P_1 instandgesetzt wurde. Im Gegensatz dazu wird bei der zweiten Reihenfolge, der Sequenz $Seq_2 = P_2 \rightarrow P_1$, als Erstes der Stillstand des Prozesses P_2 behoben und danach erst der Stillstand des Prozesses P_1 , wobei schließlich zum Zeitpunkt T_1 wieder beide Prozesse produzieren.

Durch die Simulation ist es nun möglich, die Auswirkung jeder Reihenfolge ausgehend von dem Systemzustand des Fließfertigungssystems zum Entscheidungszeitpunkt t_d auf die Ausbringung des gesamten Fließfertigungssystems zu beurteilen. Dazu wird für jede Behebungsreihenfolge ein Simulationslauf durchgeführt, bei dem die Prozesse entsprechend der jeweiligen Reihenfolge instandgesetzt werden, wobei aufgrund des Online-Charakters der Problemstellung ab dem Zeitpunkt T_1 keine weiteren Stillstände mehr betrachtet werden. Für jeden Simulationslauf wird der initiale Zustand des Simulationsmodells zum Zeitpunkt T_0 entsprechend dem Zustand des Fließfertigungssystems zum Entscheidungszeitpunkt t_d eingestellt. Die Priorisierungsreihenfolge entspricht schließlich der Behebungsreihenfolge mit dem größten Wert für die Ausbringungsmenge zum Vergleichszeitpunkt T_{Ende} .

In Abbildung 33 ist die kumulierte Ausbringungsmenge über der Simulationszeit für die beiden möglichen Behebungsreihenfolgen dargestellt. Der Simulationsendzeitpunkt wurde dabei mit $T_{Ende} = 1140$ s angenommen.

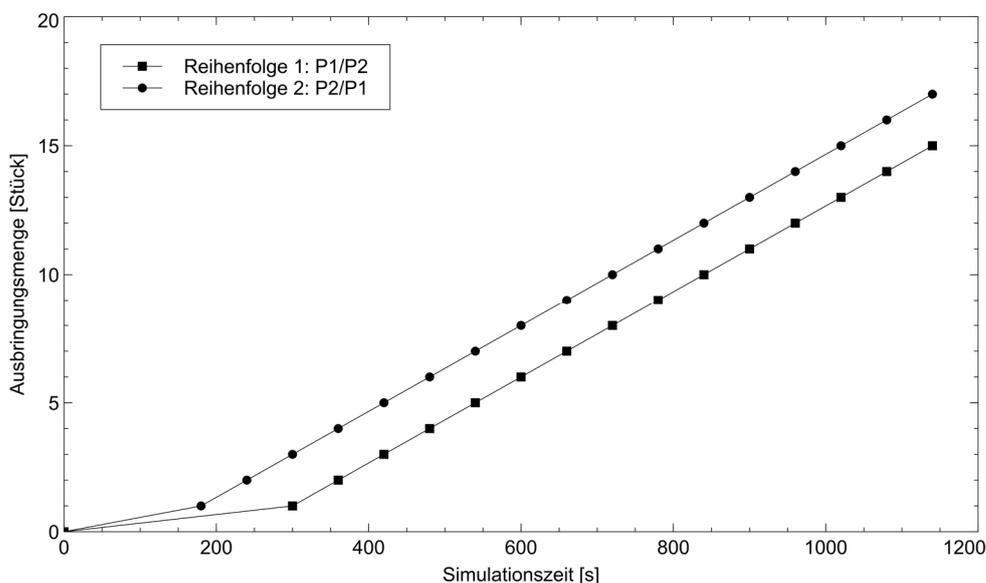


Abbildung 33: Systemverhalten für das eindimensionale 2P-1VK Modell

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass nach 1140 s die Ausbringungsmenge mit der Sequenz Seq_1 15 Werkstücke beträgt, während mit der Sequenz Seq_2 insgesamt 17 Werkstücke als Ausbringungsmenge erzielt werden konnten. Somit ist die Sequenz $Seq_2 = P_2 \rightarrow P_1$ aufgrund der höheren Ausbringung die Priorisierungsreihenfolge, sodass der Stillstand an Prozess P_2 höher zu priorisieren ist als der Stillstand an Prozess P_1 . An dieser Stelle sei bereits angemerkt, dass in diesem Fall mit Sequenz Seq_2 zwar eine höhere Ausbringung erzielt werden kann, allerdings befinden sich in dem Verkettungselement nach Stillstandsbehebung auch weniger Werkstücke als mit Sequenz Seq_1 . Somit ist das System in Hinblick auf zukünftige Stillstände weniger robust. Auf diesen Zusammenhang wird in Kapitel 5 näher eingegangen.

4.2.2 Vorgehensweise zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

Wie dieses einführende Beispiel zeigt, lassen sich mit Hilfe der Simulation die unterschiedlichen Auswirkungen der Behebungsreihenfolgen auf die Produktionsleistung des gesamten Systems bewerten. Im Folgenden wird nun eine Vorgehensweise für ein simulationsbasiertes Optimierungssystem hergeleitet, mit der eine Priorisierung von Stillständen vorgenommen werden kann, wobei die Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge dabei stets unter Berücksichtigung der Auswirkung auf die Produktionsleistung des gesamten Fließfertigungssystems erfolgt (Abbildung 34).

Der Ausgangspunkt ist immer ein Entscheidungszeitpunkt t_d , an dem ein Mitarbeiter entscheiden muss, welcher der zu diesem Zeitpunkt anliegenden und noch nicht in Reparatur befindlichen Stillstände als Nächstes instandgesetzt werden soll. Damit die Entscheidung auf Basis des aktuellen Abbildes des Fließfertigungssystems getroffen werden kann, sollten insbesondere die Werkstückverteilung in der gesamten Prozesskette, die Pufferfüllstände der Verkettungselemente, die Zustände sowie die Restbearbeitungszeiten der Prozesse zum Zeitpunkt t_d bekannt sein. Folgende Annahmen werden bei der Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge vorausgesetzt:

- Die Stillstände werden im Rahmen der Berechnung sequentiell behoben
- Wegezeiten zwischen stillstehenden Prozessen werden vernachlässigt
- Die erste Prozessstufe wird immer mit Werkstücken beliefert
- Die letzte Prozessstufe kann immer Werkstücke abführen
- Prozesszeiten sind innerhalb des Simulationslaufes konstant
- Neben den zu priorisierenden Stillständen treten keine weiteren Stillstände während eines Simulationslaufs auf (Online-Fall)
- Weitere stochastische Einflüsse, wie Ausschuss und Nacharbeit, werden nicht betrachtet

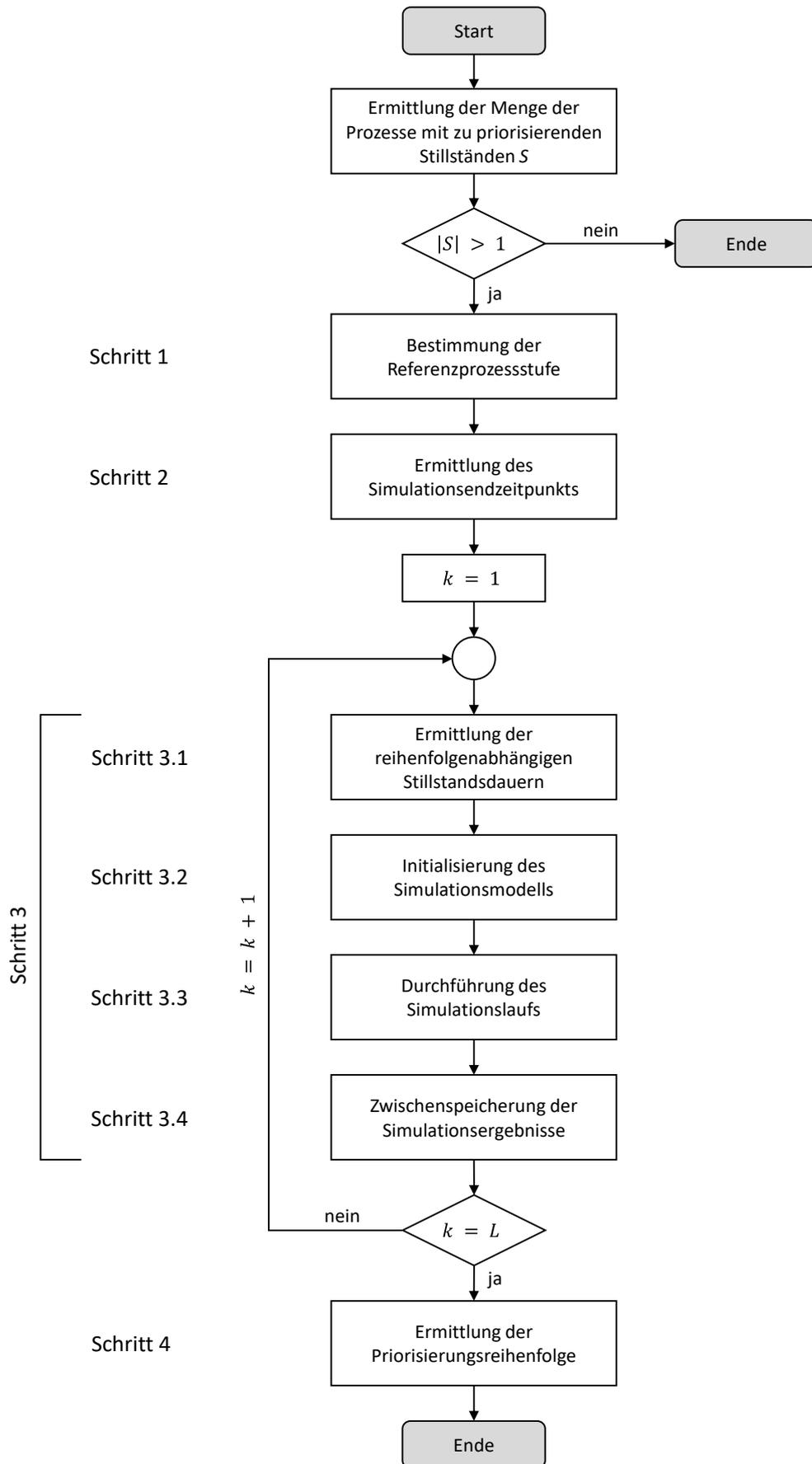


Abbildung 34: Simulationsbasierte Vorgehensweise zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

Damit eine Priorisierung überhaupt notwendig ist, muss zunächst die Anzahl zu priorisierender Stillstände größer als eins sein. Zur Menge S zählen dabei sowohl Stillstände an einfachen Prozessstufen wie auch stillstehende Prozesse, die in einer redundanten Prozessstufe angeordnet sind (vgl. Kapitel 2.1.2). Die Menge S beinhaltet somit sämtliche Prozesse P_n der Prozesskette, die zum Zeitpunkt t_d stillstehen und priorisiert werden sollen. Ist die Mächtigkeit der Menge S eins, so liegt nur ein stillstehender Prozess in der Prozesskette an. Folglich wird dieser Stillstand einem Mitarbeiter direkt zugeordnet. Ist die Mächtigkeit der Menge S hingegen größer als eins, so kann die Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge entsprechend folgender vier Schritte durchgeführt werden:

Schritt 1: Bestimmung der Referenzprozessstufe

Durch den Einsatz der Simulation soll es möglich sein, die Auswirkungen der unterschiedlichen Behebungsreihenfolgen auf die Produktionsleistung des gesamten Fließfertigungssystems zu bewerten. Dafür wurde die Ausbringung, die als Quotient aus Ausbringungsmenge bezogen auf eine Zeiteinheit definiert ist (vgl. Kapitel 2.1.3), als Bewertungskriterium ausgewählt. Die Ausbringungsmenge ist schließlich als gefertigte Stückzahl innerhalb eines Zeitraumes der am weitesten stromabwärtsliegenden Prozessstufe definiert. Das hier für die Priorisierung von Stillständen verwendete Simulationsmodell kann ferner als ein deterministisches System aufgefasst werden, da weder die Prozesszeiten respektive die Taktzeiten schwanken noch irgendwelche anderen stochastischen Einflüsse während der Simulationszeit berücksichtigt werden. Wie im weiteren Verlauf dieses Abschnittes gezeigt wird, können für das hier betrachtete System die Auswirkungen der Stillstände auf die Ausbringung direkt an einer Referenzprozessstufe bestimmt werden. Als Referenzprozessstufe wird dabei diejenige Prozessstufe definiert, die die größte Taktzeit aufweist.

Um die Referenzprozessstufe auch für Prozessketten mit redundanten Prozessstufen zu bestimmen, kann die organisatorische Zusammenfassung von Prozessstufen mit mehreren Prozessen zu einfachen Prozessstufen durch die Berechnung einer repräsentativen Taktzeit nach Wedel (2016: 22) angewendet werden:

$$TZ_{rep} = \left[\sum_{i \in R} \frac{1}{TZ_i} \right]^{-1} \quad (4.3)$$

Nach Formel 4.3 wird die repräsentative Taktzeit einer redundanten Prozessstufe bestimmt, indem die Summe der Kehrwerte der Taktzeiten aller Prozesse $P_n \in R$ der Prozessstufe und anschließend nochmals der Kehrwert gebildet wird, wobei R die Menge aller Prozesse einer redundanten Prozessstufe ist.

Dadurch ist es nun möglich, die Referenzprozessstufe für das Abbild eines Fließfertigungssystems zum Entscheidungszeitpunkt t_d in dieser Arbeit als diejenige

Prozessstufe zu definieren, die die größte (repräsentative) Taktzeit aufweist. Sollten mehrere Prozessstufen dieselbe Taktzeit aufweisen, so ist die am weitesten stromabwärtsgelegene Prozessstufe die Referenzprozessstufe.

Da an der Referenzprozessstufe die Ausbringung des gesamten Fließfertigungssystems bestimmt werden kann, müssen sich die unterschiedlichen Behebungsreihenfolgen somit ebenfalls auf die Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe auswirken, sofern diese die Ausbringung des Fließfertigungssystems beeinflussen. Folglich kann äquivalent zur Ausbringung, die an der am weitesten stromabwärtsgelegenen Prozessstufe ermittelt wird, der Durchsatz der Referenzprozessstufe zur Bewertung der Auswirkung der jeweiligen Behebungsreihenfolge verwendet werden. Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhanges wird folgendes Beispiel betrachtet (Abbildung 35).

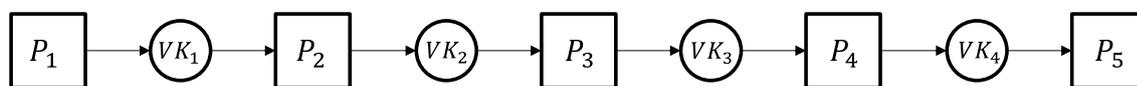


Abbildung 35: Eindimensionale Prozesskette als 5P-4VK Modell

Die Prozesskette besteht aus fünf einfachen Prozessstufen, die jeweils durch ein Verkettungselement miteinander verbunden sind, wobei zwei Stillstände an den Prozessen P_1 und P_4 zu priorisieren sind. Zur Vereinfachung sind zum Entscheidungszeitpunkt t_d keine Werkstücke in den Prozessen. Zudem sollen die Verzögerungsdauern der Verkettungselemente in diesem Beispiel vernachlässigbar sein. Weitere wichtige Daten sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Technische Daten zum Entscheidungszeitpunkt für das 5P-4VK Modell

| | P_1 | VK_1 | P_2 | VK_2 | P_3 | VK_3 | P_4 | VK_4 | P_5 |
|---------------|-------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|
| $PZ_i = TZ_i$ | 60 s | - | 50 s | - | 70 s | - | 60 s | - | 50 s |
| TTR_i | 210 s | - | - | - | - | - | 480 s | - | - |
| $P_j(t_d)$ | - | 3 Stk. | - | 4 Stk. | - | 6 Stk. | - | 2 Stk. | - |
| $P_{j\max}$ | - | 6 Stk. | - | 10 Stk. | - | 8 Stk. | - | 4 Stk. | - |

Abbildung 36 zeigt die kumulierte Ausbringungsmenge über der Simulationszeit, wobei der Simulationsendzeitpunkt mit 7000 s angenommen wurde. Es ist zu erkennen, dass mit der ersten möglichen Reihenfolge, der Sequenz $Seq_1 = P_1 \rightarrow P_4$, eine Ausbringungsmenge von 99 Werkstücken und mit der Sequenz $Seq_2 = P_4 \rightarrow P_1$ eine Menge von 102 Werkstücken erzielt werden konnte. Der Unterschied in der Ausbringungsmenge zwischen den Behebungsreihenfolgen beträgt somit drei Werkstücke.

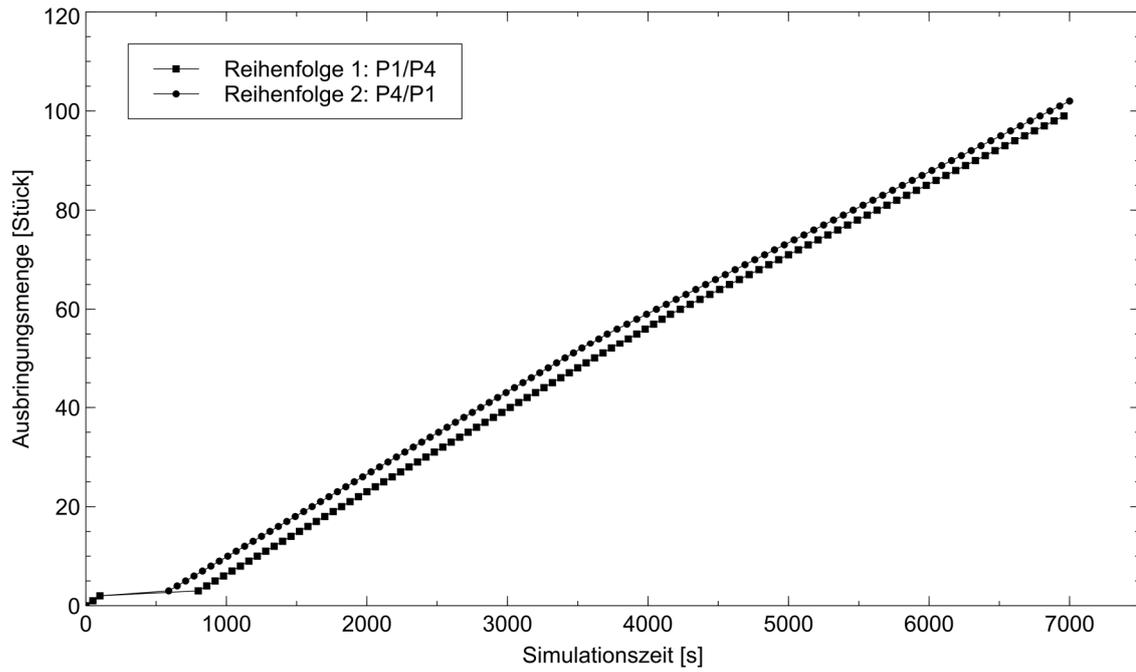


Abbildung 36: Verlauf der Ausbringungsmenge in Abhängigkeit der Behebungsreihenfolge

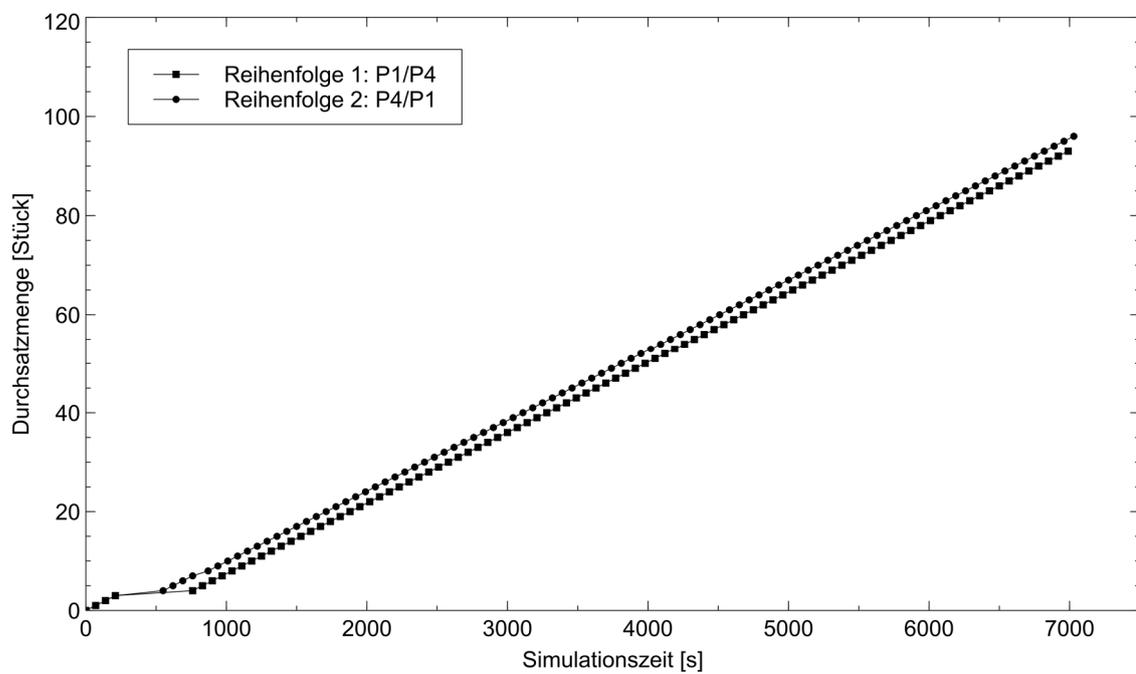


Abbildung 37: Verlauf der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe in Abhängigkeit der Behebungsreihenfolge

Aus den Daten in Tabelle 2 geht hervor, dass der Prozess P_3 die höchste Prozesszeit im Vergleich zu den anderen Prozessen aufweist. Da es sich in diesem Beispiel um eine eindimensionale Prozesskette handelt und die Prozesse jeweils nur ein Werkstück gleichzeitig bearbeiten können, ist P_3 folglich die Referenzprozessstufe. In Abbildung 37 ist die kumulierte Durchsatzmenge dieser Prozessstufe über der Simulationszeit für die beiden Behebungsreihenfolgen aufgetragen.

Für den Vergleich der beiden Alternativen, Betrachtung des Durchsatzes sowie Betrachtung der Ausbringung, wird der Simulationsendzeitpunkt bei der Alternative Betrachtung des Durchsatzes zu 7030 s bestimmt. Dadurch erhöht sich bei beiden Alternativen zum jeweiligen Zeitpunkt T_{Ende} für die Sequenz Seq_1 die Ausbringungsmenge bzw. die Durchsatzmenge um ein Werkstück. Diese Kalibrierung hat zur Folge, dass die Ergebnisse zum jeweiligen Simulationsendzeitpunkt für die beiden Alternativen nun vergleichbar sind. Wie aus Abbildung 37 ersichtlich ist, beträgt die Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe mit der Sequenz Seq_1 bei $T_{Ende} = 7030$ s insgesamt 93 Werkstücke und mit der Sequenz Seq_2 96 Werkstücke, wobei die Differenz zwischen den Reihenfolgen drei Werkstücke beträgt. Der Vergleich mit der Differenz bei der Bewertung mittels der Ausbringung zeigt, dass nicht nur die Sequenz $Seq_2 = P_4 \rightarrow P_1$ als finale Priorisierungsreihenfolge gleich ist, sondern auch, dass die Differenzen exakt die gleichen Werte aufweisen. Folglich kann zur Bewertung der Auswirkungen der Behebungsreihenfolgen der Durchsatz der Referenzprozessstufe verwendet werden. Dies ermöglicht schließlich nicht nur eine Bewertung äquivalent zur Ausbringung, sondern bietet auch ein Potenzial zur Verkürzung der Entscheidungsfindungszeit. Darauf wird im zweiten Schritt der Vorgehensweise näher eingegangen.

Schritt 2: Ermittlung des Simulationsendzeitpunkts

Wie bereits beschrieben, beruht der hier verfolgte Ansatz zur Priorisierung von Stillständen auf einem Vergleich der Ausbringung der am weitesten stromabwärtsgelegenen Prozessstufe respektive auf einem Vergleich des Durchsatzes der Referenzprozessstufe. Dafür muss ein bestimmter Zeitpunkt definiert werden, an dem die Auswirkungen der unterschiedlichen Behebungsreihenfolgen vollständig feststellbar sind (vgl. Hegemann und Nickel 2019: 558). In Yang et al. (2007: 438) wurde für den Simulationsendzeitpunkt beispielsweise ein fester Wert von acht Stunden angesetzt, mit der Begründung, dass es sich bei der Priorisierung um eine Verbesserungsmaßnahme mit einem eher kurzfristig orientierten Zeithorizont handelt. Allerdings wird mit diesem Vergleichszeitpunkt auch die für eine Entscheidung benötigte Simulationszeit und damit ebenfalls die Entscheidungsfindungszeit maßgeblich mitbestimmt. Dabei sollte die Entscheidungsfindungszeit für operative Entscheidungsunterstützungssysteme gering

sein, sodass eine möglichst kurze Simulationszeit angestrebt wird (vgl. Kapitel 2.3.1).

In Abbildung 37 ist bereits zu erkennen, dass die Durchsatzmenge der Sequenz Seq_1 nach einem gewissen Zeitpunkt proportional zu der Durchsatzmenge der Sequenz Seq_2 ansteigt. Die Ursache dafür ist, dass hier, wie einführend beschrieben, ein deterministisches Modell zur Bewertung der Behebungsreihenfolgen verwendet wird. Sobald sich die Auswirkungen der Stillstände nach der Stillstandsbehebung in der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe vollständig realisiert haben, stellt sich die Differenz zwischen den erzielbaren Durchsatzmengen der Reihenfolgen ab einem gewissen Zeitpunkt statisch ein. Somit stellt dieser Zeitpunkt den frühestmöglichen Vergleichszeitpunkt dar, an dem sich die Auswirkung einer Behebungsreihenfolge auf das gesamte Fließfertigungssystem vollständig beurteilen lässt. Folglich kann dieser Zeitpunkt als Simulationsendzeitpunkt verwendet werden.

Der Simulationsendzeitpunkt entspricht somit dem Zeitpunkt, an dem sich die Auswirkungen aller zu priorisierender Stillstände vollständig in der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe niedergeschlagen haben. Um dies zu verdeutlichen, wird die Auswirkung eines Stillstandes auf die Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe anhand des bereits in Kapitel 4.2.1 vorgestellten einfachen Modells eines Fließfertigungssystems näher betrachtet (vgl. Abbildung 31). Die verwendeten Daten können der Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3: Technische Daten für das 2P-1VK Modell zur Verdeutlichung der Auswirkung eines Stillstandes

| | P_1 | VK_1 | P_2 |
|---------------|-------|----------|-------|
| $PZ_i = TZ_i$ | 60 s | - | 60 s |
| TTR_i | 300 s | - | - |
| $P_j(T_0)$ | - | 3 Stück | - |
| $P_j max$ | - | 10 Stück | - |

Da eine eindimensionale Prozesskette vorliegt, beide Prozesse die gleiche Prozesszeit aufweisen und jeder Prozess jeweils nur ein Werkstück parallel bearbeiten kann, ist der stromabwärtsgelegenste Prozess P_2 die Referenzprozessstufe. Zum Zeitpunkt T_0 haben beide Prozesse kein Werkstück in Bearbeitung und Prozess P_1 kann aufgrund eines Stillstandes für 300 s nicht produzieren. Die Auswirkung dieses Stillstandes auf die Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe P_2 ist in Abbildung 38 grafisch dargestellt.

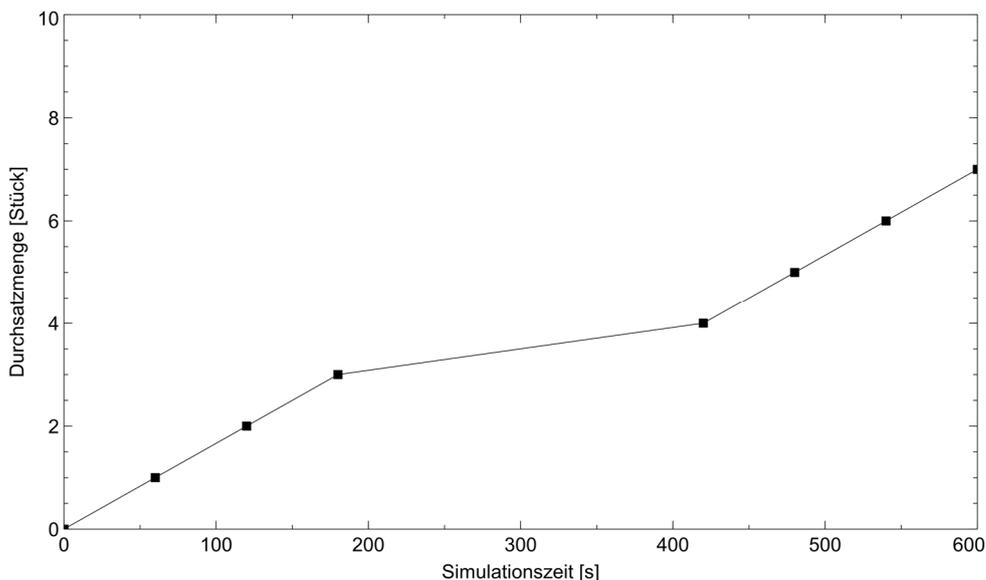


Abbildung 38: Auswirkung eines Stillstandes auf die Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe

Es ist zu erkennen, dass Prozess P_2 zunächst im Arbeitstakt von 60 s drei Werkstücke produziert, wobei der Arbeitstakt der Taktzeit von P_2 entspricht. Nachdem das dritte Werkstück produziert wurde, zum Zeitpunkt $t = 180$ s, wird das nächste Werkstück erst zum Zeitpunkt $t = 420$ s fertiggestellt. Dies liegt daran, dass der Prozess P_2 zunächst die drei Werkstücke, die initial im Verkettungselement gespeichert sind, produzieren kann. Nachdem das letzte dieser Werkstücke produziert wurde, zum Zeitpunkt $t = 180$ s, muss P_2 aufgrund des noch andauernden Stillstandes an P_1 auf Werkstücke warten.

In Abbildung 39 ist dieser Zusammenhang dargestellt, wobei die Arbeitstakte durch senkrechte Striche begrenzt sind. Der Arbeitstakt von Prozess P_2 zwischen der Fertigstellung des dritten und des vierten Werkstückes beinhaltet aufgrund des Stillstandes an P_1 neben der Taktzeit TZ_{P_2} auch einen Wartezeitanteil WZ von 180 s. Die Zykluszeit ZZ_{P_2} dieses Arbeitstaktes beträgt somit insgesamt 240 s. Nach 360 s hat der Prozess P_1 das erste Werkstück nach Instandsetzung fertiggestellt und produziert fortan ungestört, sodass die Zykluszeit der nachfolgenden Arbeitstakte wieder der Taktzeit entspricht. Da in diesem Beispiel eine mögliche Verzögerungszeit des Verkettungselements VK_1 nicht betrachtet wird, kann Prozess P_2 sofort mit der Produktion des Werkstückes beginnen. Ab dem Zeitpunkt $t = 420$ s taktet der Prozess P_2 wieder mit einer Zykluszeit ZZ_{P_2} entsprechend der Taktzeit TZ_{P_2} und die Auswirkung des Stillstandes an Prozess P_1 hat sich vollständig in der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe niedergeschlagen.

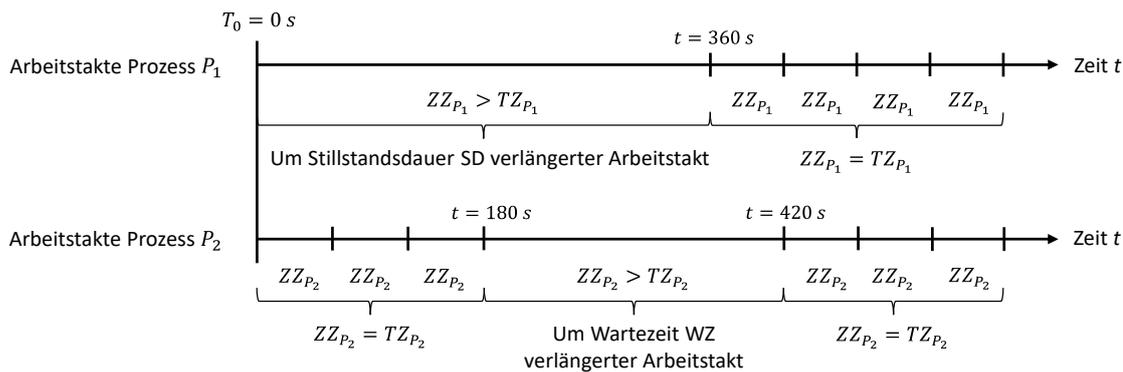


Abbildung 39: Auswirkung eines Stillstandes auf den Arbeitstakt der Referenzprozessstufe

Wie dieses Beispiel zeigt, führt ein Stillstand zu einem höheren Arbeitstakt der Referenzprozessstufe aufgrund eines Wartezeitanteils. Diese Wartezeit entsteht dabei abhängig von der relativen Lage der Stillstandsprozessstufe zu der Referenzprozessstufe entweder, wenn am Einlauf der Referenzprozessstufe keine Werkstücke vorhanden sind (Stillstandsprozess stromaufwärts) oder, wenn der Auslauf der Referenzprozessstufe blockiert ist (Stillstandsprozess stromabwärts). Damit ist es nun möglich, den Simulationsezeitpunkt T_{Ende} als Zeitpunkt zu definieren, an dem nach Instandsetzung aller zu priorisierender Stillstände die Referenzprozessstufe bei allen Behebungsreihenfolgen wieder einen Arbeitstakt äquivalent zu ihrer Taktzeit aufweist.

Für die folgenden Berechnungen wird eine Prozesskette, bestehend aus insgesamt M Prozessstufen (einfache oder redundante) und $M - 1$ Verkettungselementen, zu Grunde gelegt (Abbildung 40). Die Prozessstufen sowie die Verkettungselemente werden, beginnend an der am weitesten stromaufwärtsgelegenen Stufe respektive Verkettung, aufsteigend durchnummeriert. Der im Folgenden jeweils betrachtete Prozess P_n ist dabei Bestandteil der zugehörigen Prozessstufe PS_m . Die Referenzprozessstufe und das nachfolgende Verkettungselement werden durch den Index Ref gekennzeichnet.

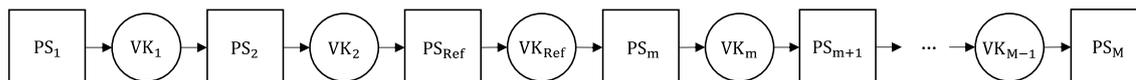


Abbildung 40: Grundlegende Indexierung einer Prozesskette

Bei der Berechnung des Simulationsezeitpunkts muss zwischen stromaufwärts sowie stromabwärts zu der Referenzprozessstufe gelegenen Stillstandsprozessen differenziert werden. Für Stillstände an Prozessen, die stromaufwärts

der Referenzprozessstufe liegen, lässt sich der Simulationsendzeitpunkt des betrachteten Stillstandes an Prozess P_n mit der zu diesem Prozess gehörigen Prozessstufe PS_m wie folgt berechnen:

$$T_{Ende P_n} = \sum_{i \in S} TTR_i + DLZ_{P_n \rightarrow PS_{Ref}} + PZ_{PS_{Ref}} \quad (4.4)$$

Der erste Summand in der Formel 4.4 beschreibt dabei, durch die Summe der Reparaturdauern aller zu priorisierender Prozesse $P_n \in S$, den spätmöglichsten Instandsetzungszeitpunkt des betrachteten Prozesses P_n , während der zweite Summand die Durchlaufzeit des ersten bearbeiteten Werkstücks nach Instandsetzung von Prozess P_n bis zum Einlauf der Referenzprozessstufe PS_{Ref} und der dritte Summand die Prozesszeit der Referenzprozessstufe $PZ_{PS_{Ref}}$ bezeichnet. Die Durchlaufzeit wird mittels der Restprozesszeit $RPZ_{P_n}(t_d)$ des betrachteten Prozesses P_n zum Zeitpunkt t_d , der Summe der Prozesszeiten PZ aller Prozessstufen zwischen dem betrachteten Prozess P_n und der Referenzprozessstufe, wobei die Prozesszeit des betrachteten Prozesses nicht miteinbezogen wird, sowie der Summe aller Verzögerungsdauern VD der Verkettungselemente zwischen der dem Prozess P_n zugehörigen Prozessstufe PS_m und PS_{Ref} berechnet. Folgende Formel fasst dies zusammen:

$$DLZ_{P_n \rightarrow PS_{Ref}} = RPZ_{P_n}(t_d) + \sum_{i=PS_m+1}^{PS_{Ref}-1} PZ_i + \sum_{j=VK_m}^{VK_{Ref}-1} VD_j \quad (4.5)$$

Falls während des Stillstandes im Prozess P_n kein Werkstück vorhanden ist, so ist anstelle der Restprozesszeit die Prozesszeit PZ_{P_n} in Formel 4.5 zu verwenden. Des Weiteren kann zum Entscheidungszeitpunkt t_d für eine redundante Prozessstufe nicht ermittelt werden, welcher der $|R|$ Prozesse, die zu der redundanten Prozessstufe gehören und unterschiedliche Prozesszeiten aufweisen können, das für die Durchlaufzeitermittlung relevante Werkstück produzieren wird. Allerdings kann als Abschätzung die größte Prozesszeit aller $|R|$ Prozesse einer redundanten Prozessstufe als Prozesszeit für die Summation verwendet werden. Damit ist sichergestellt, dass das erste Werkstück des Prozesses P_n nach Instandsetzung auf jeden Fall zum Simulationsendzeitpunkt $T_{Ende P_n}$ von der Referenzprozessstufe bearbeitet wurde. Folglich hat sich nach dieser Zeit auch die Auswirkung des Stillstandes vollständig in der Durchsatzmenge niedergeschlagen. Sollten in einem Fließfertigungssystem spezielle Be- und Entladeeinrichtungen, wie Drehtische oder Ladeportale vorhanden sein, so kann Formel 4.5 um die Zeitdauern für entsprechende Be- und Entladevorgänge erweitert werden.

Für Stillstände an Prozessen, die stromabwärts der Referenzprozessstufe liegen, lässt sich der Simulationsendzeitpunkt des betrachteten Stillstandes an Prozess $P_n \in S$ wie folgt berechnen:

$$T_{Ende P_n} = \sum_{i \in S} TTR_i + RPZ_{P_n}(t_d) \quad (4.6)$$

Neben dem spätmöglichsten Instandsetzungszeitpunkt wird hier nur die Restprozesszeit zur Berechnung herangezogen. Sollte während des Stillstandes im Prozess P_n kein Werkstück vorhanden sein, entfällt der zweite Summand in Formel 4.6. Werden Verzögerungen durch Aufrückvorgänge von Werkstücken in Verkettungselementen vernachlässigt, so ist der Auslauf der Referenzprozessstufe nach diesem Zeitpunkt nicht mehr blockiert und die Referenzprozessstufe produziert im Arbeitstakt entsprechend ihrer Taktzeit.

Zur Bestimmung des Simulationsendzeitpunkts für eine Priorisierungsentscheidung müssen zunächst für jeden zu priorisierenden Stillstand, d. h. für alle Prozesse, die Element der Menge S sind, die Simulationsendzeitpunkte $T_{Ende P_n}$ entsprechend Formeln 4.4 und 4.6 bestimmt werden. Der finale Simulationsendzeitpunkt ergibt sich schließlich zu:

$$T_{Ende} = \sup (\{T_{Ende P_n} | P_n \in S\}) \quad (4.7)$$

Zur Verdeutlichung soll abschließend der Simulationsendzeitpunkt für das bereits bei der Ermittlung der Referenzprozessstufe vorgestellte Beispiel einer Priorisierungsentscheidung für ein Fließfertigungssystem mit fünf Prozessen und vier Verkettungselementen bestimmt werden. Die verwendeten Daten bleiben unverändert und können der Tabelle 2 entnommen werden.

Für den Prozess P_1 , der relativ zu der Referenzprozessstufe P_3 stromaufwärts liegt, ergibt sich nach den Formeln 4.4 und 4.5 folgender Simulationsendzeitpunkt:

$$T_{Ende P_1} = (210 \text{ s} + 480 \text{ s}) + (60 \text{ s} + 50 \text{ s}) + 70 \text{ s} = 870 \text{ s} \quad (4.8)$$

Im Gegensatz zu Prozess P_1 liegt der Prozess P_4 stromabwärts der Referenzprozessstufe, sodass der Simulationsendzeitpunkt nach Formel 4.6 wie folgt bestimmt werden kann:

$$T_{Ende P_4} = (210 \text{ s} + 480 \text{ s}) = 690 \text{ s} \quad (4.9)$$

Der finale Simulationsendzeitpunkt für die Priorisierungsentscheidung T_{Ende} beträgt entsprechend Formel 4.7 schließlich 870 s. Die Abbildung 41 zeigt den für die Bestimmung des Simulationsendzeitpunktes relevanten Ausschnitt der Durchsatzverläufe der Referenzprozessstufe (vgl. auch Abbildung 37). Zum Zeitpunkt T_{Ende} beträgt die erzielbare Durchsatzmenge mit der Sequenz $Seq_1 = P_1 \rightarrow P_4$ insgesamt fünf Werkstücke, während mit der Sequenz $Seq_2 = P_4 \rightarrow P_1$ insgesamt acht Werkstücke fertiggestellt werden konnten. Die Differenz beträgt folglich drei Werkstücke und weist damit den gleichen Wert auf, wie bei Betrachtung der Ausbringungsmenge nach 7000 s sowie der Durchsatzmenge nach 7030 s (vgl. Abbildung 36 und Abbildung 37).

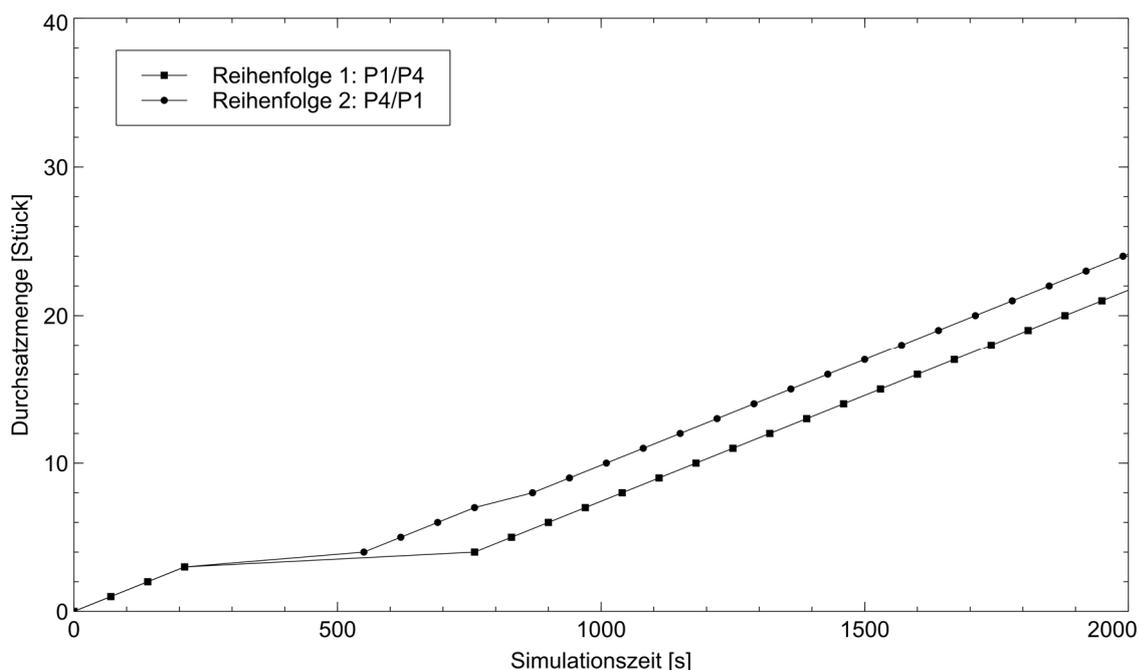


Abbildung 41: Verlauf der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe in Abhängigkeit der Behebungsreihenfolge (Ausschnitt)

Wie dieses Beispiel verdeutlicht, ist es somit möglich, auf Basis bereits zum Entscheidungszeitpunkt t_d bekannter Daten, den frühestmöglichen Zeitpunkt zu bestimmen, an dem die behebungsreihenfolgenabhängigen Unterschiede in der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe feststellbar sind. Dadurch kann ein Simulationsendzeitpunkt berechnet werden, der eine effiziente Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge ermöglicht.

Schritt 3.1: Ermittlung der reihenfolgenabhängigen Stillstandsdauern

Nachdem die Referenzprozessstufe sowie der Simulationsendzeitpunkt bestimmt wurden, können nun die einzelnen Simulationsläufe vorbereitet werden. Für eine Priorisierungsentscheidung werden entsprechend der Anzahl zu bewertender Behebungsreihenfolgen mehrere Simulationsläufe durchgeführt. Die möglichen Behebungsreihenfolgen können nach Formel 4.2 aufgestellt werden, wobei nun anstelle der Ausbringungsmenge die Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe verwendet wird. In einem ersten Schritt müssen die für jede Behebungsreihenfolge zu parametrisierenden Stillstandsdauern der zu priorisierenden Prozesse bestimmt werden. Dabei setzt sich die Stillstandsdauer $SD_{P_n}(k)$ eines Prozesses $P_n \in S$ für eine Behebungsreihenfolge k wie folgt zusammen:

$$SD_{P_n}(k) = TTR_{P_n} + WZ_{Instand P_n}(k) \quad (4.10)$$

Mit der „Time To Repair“ (TTR_{P_n}) wird die reine Reparaturzeit beschrieben, die ein Arbeiter zur Instandsetzung eines Prozesses P_n benötigt. Hier sei angemerkt, dass weitere Zeitanteile, insbesondere die Zeit, bis Personal an dem Stillstandsprozess vor Ort ist, nicht zu der TTR_{P_n} zählen (vgl. Abbildung 14). Der zweite Summand in Formel 4.10 beschreibt die behebungsreihenfolgenabhängige Wartezeit des Prozesses P_n auf Instandsetzung. Diese ergibt sich, wenn andere der zu priorisierenden Prozesse entsprechend der jeweiligen Reihenfolge als Erstes instandgesetzt werden. Dementsprechend kann $WZ_{Instand P_n}(k)$ Werte zwischen Null (Prozess P_n wird als Erstes instandgesetzt) und der Summe der TTR -Zeiten aller restlichen zu priorisierenden Prozesse (Prozess P_n wird als Letztes instandgesetzt) annehmen. Somit wird durch die Behebungsreihenfolge die Wartezeit auf Instandsetzung beeinflusst, wodurch sich folglich auch die Stillstandsdauer eines Prozesses behebungsreihenfolgenabhängig einstellt.

Schritt 3.2: Initialisierung des Simulationsmodells

Zur Beurteilung der Auswirkung einer Behebungsreihenfolge soll der aktuelle Zustand des Fließfertigungssystems zum Entscheidungszeitpunkt t_d berücksichtigt werden. Dafür wird der aktuelle Zustand des Fließfertigungssystems als Startbedingung für das Simulationsmodell verwendet, sodass das Simulationsmodell zum Zeitpunkt T_0 ein möglichst genaues Abbild des realen Fließfertigungssystems zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt t_d ist (Abbildung 42).

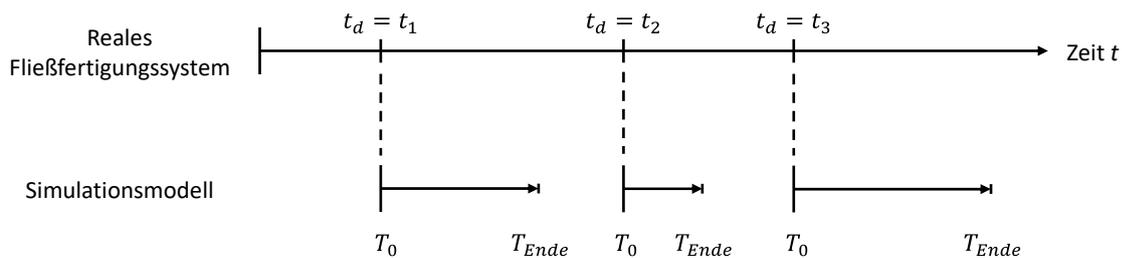


Abbildung 42: Initialisierung des Simulationsmodells zum Entscheidungszeitpunkt

Wie in Cardin und Castagna (2011: 177) bereits angemerkt wurde, sollte die Abbildungsgenauigkeit dabei möglichst hoch sein, da gerade bei kurzen Simulationszeiten, wie sie bei der Priorisierung von Maschinenstillständen ebenfalls vorkommen, die Ergebnisgüte stark von dem initialen Zustand abhängig ist. Die Komplexität des betrachteten Fließfertigungssystems bestimmt ferner den Umfang der benötigten Eingangsdaten der Simulation, die in Anlehnung an VDI 3633 (2014: 3) in Eingabedaten und Experimentdaten differenziert werden können.

Eingabedaten, die für eine Priorisierungsentscheidung nur einmal benötigt werden, sind beispielsweise Prozesszeiten und Restprozesszeiten sowie Pufferkapazitäten und Pufferfüllstände. Aber auch der Simulationsendzeitpunkt wird für jede Entscheidung nur einmal ermittelt, sodass dieser auch zu den Eingabedaten gehört. Der letztendliche Umfang der Eingabedaten zur Generierung eines möglichst genauen Abbildes ist schließlich für jedes Fließfertigungssystem individuell zu bestimmen (vgl. Kapitel 6.1 und Kapitel 7.1). Im Gegensatz zu den Eingabedaten werden Experimentdaten für jeden Simulationslauf neu bestimmt. Experimentdaten sind in diesem Fall nur die Stillstandsdauern der zu priorisierenden Prozesse, die für jeden Simulationslauf entsprechend der zu bewertenden Behebungsreihenfolge neu bestimmt werden.

Schritt 3.3: Durchführung des Simulationslaufs

Zur Bewertung der Auswirkung einer Behebungsreihenfolge wird ein Simulationslauf auf Basis des zum Entscheidungszeitpunkt aktuellen Abbildes des realen Fließfertigungssystems durchgeführt. Die zu priorisierenden Prozesse stehen zum Zeitpunkt T_0 still und werden im Verlauf des Simulationslaufs entsprechend der zu bewertenden Behebungsreihenfolge nach der jeweiligen Stillstandsdauer $SD_{p_n}(k)$ sequentiell wieder produktiv geschaltet (vgl. Formel 4.10). Ein Simulationslauf endet schließlich, sobald der in Schritt 2 ermittelte Simulationsendzeitpunkt erreicht ist.

Schritt 3.4: Zwischenspeicherung der Simulationsergebnisse

Zum Simulationsendzeitpunkt T_{Ende} werden folgende Simulationsergebnisse an der Referenzprozessstufe ausgelesen und zwischengespeichert:

- Durchsatzmenge
- Restprozesszeit

Ist die Referenzprozessstufe eine redundante Prozessstufe mit insgesamt $|R|$ Prozessen, so ergibt sich die Durchsatzmenge der Stufe als Summe aller Durchsatzmengen der $|R|$ Prozesse. Die Restprozesszeit ist in diesem Fall die kleinste aller Restprozesszeiten der $|R|$ Prozesse.

Schritt 3 wird schließlich solange durchlaufen, bis die Gesamtanzahl möglicher Behebungsreihenfolgen nach Formel 4.1 erreicht ist.

Schritt 4: Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

Sind alle möglichen Behebungsreihenfolgen bewertet, kann abschließend die Priorisierungsreihenfolge bestimmt werden. Diese entspricht der Behebungsreihenfolge mit dem größten Wert für die Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe. Sollten mehrere Behebungsreihenfolgen dabei den maximalen Wert aufweisen, so ist als zweites Kriterium die ermittelte Restprozesszeit heranzuziehen, wobei die Behebungsreihenfolge mit der geringsten Restprozesszeit die Priorisierungsreihenfolge bildet (Abbildung 43). Sollte es trotzdem noch mehr als eine Reihenfolge geben, die die maximale Durchsatzmenge sowie die minimale Restprozesszeit aufweisen, so sind diese Reihenfolgen im Sinne der Auswirkung auf die Ausbringung des Fließfertigungssystems identisch. Eine definierte Auswahl kann in diesem Fall schließlich über eine FCFS-Regel realisiert werden, wobei die Priorisierungsreihenfolge die Behebungsreihenfolge ist, deren am höchsten priorisierter Stillstand zeitlich am frühesten eingetreten ist.

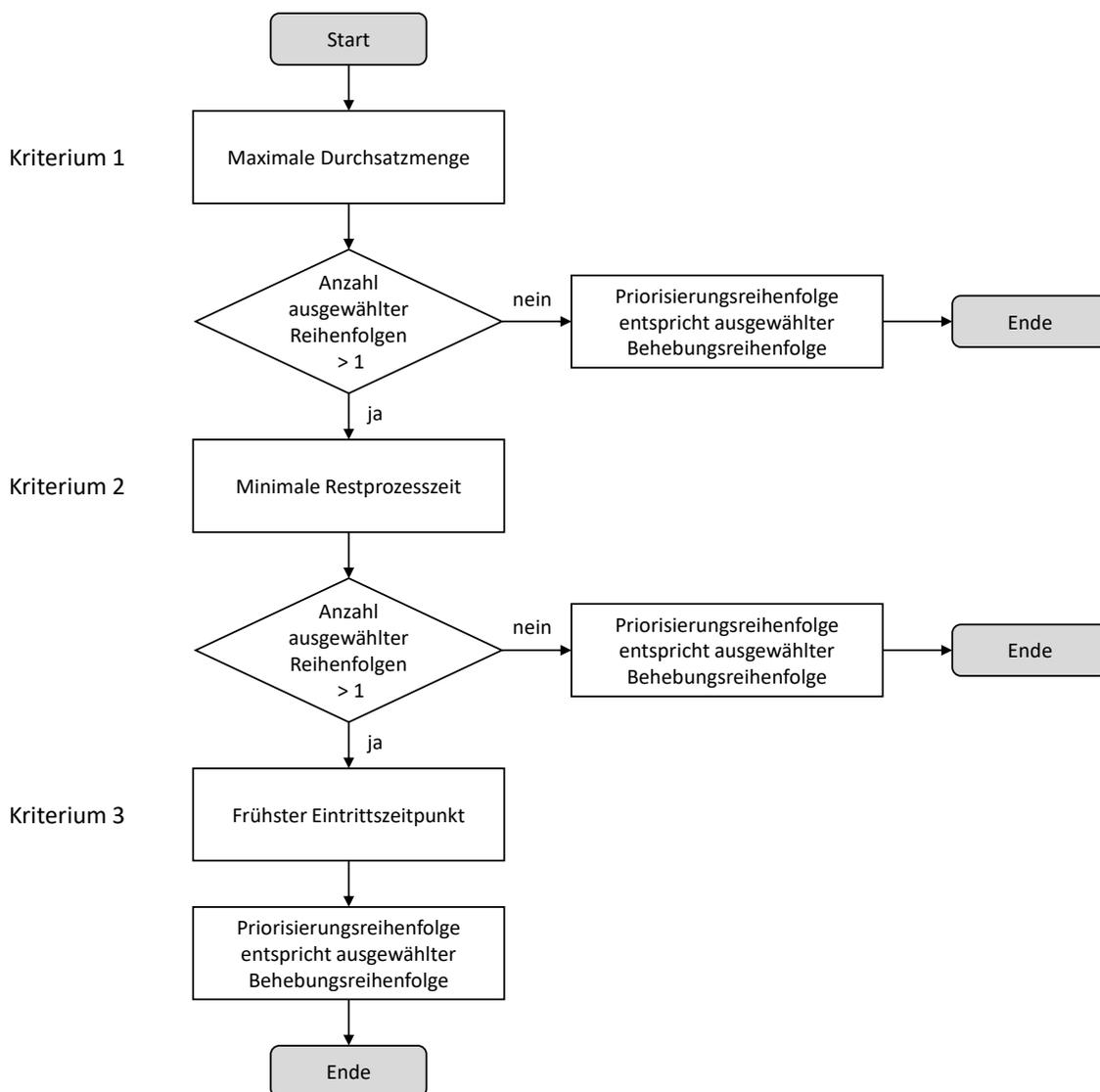


Abbildung 43: Drei Kriterien zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

4.3 Analytische Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, eignet sich die Simulation insbesondere bei sehr komplexen Fließfertigungssystemen zur Bewertung möglicher Behebungsreihenfolgen im Rahmen von Priorisierungsentscheidungen. Zum besseren Verständnis der komplexen Zusammenhänge zwischen Stillständen und deren Auswirkung auf den Materialfluss eines verketteten Fließfertigungssystems, wird im Folgenden auf Basis der Erkenntnisse der simulationsbasierten Vorgehensweise eine weitere Möglichkeit vorgestellt, wie Stillstände anhand ihrer Auswirkungen auf die Ausbringung priorisiert werden können. Damit wird das theoretische Grundgerüst aufgebaut, um den Zusammenhang zwischen der Priorisierung ungeplanter Stillstände und der Auswirkung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten in Kapitel 5 tiefergehend zu untersuchen.

4.3.1 Grundprinzip des Ausbringungsverlustes und einführendes Beispiel

Wie bereits bei der Herleitung der simulationsbasierten Vorgehensweise aufgezeigt, kann die Auswirkung von Stillständen anhand der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe messbar gemacht werden (vgl. Kapitel 4.2.2). Ferner hat ein Stillstand zur Folge, dass sich der Arbeitstakt der Referenzprozessstufe verlängert, sodass die Zykluszeit $ZZ_{PS_{Ref}}$ Werte größer als die eigentliche Taktzeit $TZ_{PS_{Ref}}$ annimmt. Der verlängerte Arbeitstakt resultiert hierbei aus Wartezeiten oder Stillstandsdauern. Wartezeiten in Form eines Sekundärstillstandes entstehen, wenn der Referenzprozessstufe aufgrund eines Primärstillstandes an einem stromaufwärtsgelegenen Prozess keine Werkstücke am Einlauf zur Verfügung stehen oder, wenn der Auslauf aufgrund eines Primärstillstandes an einem stromabwärtsgelegenen Prozess blockiert ist und die Referenzprozessstufe keine Werkstücke mehr abführen kann. Ein durch eine Stillstandsdauer verlängerter Arbeitstakt entsteht hingegen, wenn an der Referenzprozessstufe selbst ein Primärstillstand anliegt. Somit gilt: Je geringer die Wartezeit respektive die Stillstandsdauer der Referenzprozessstufe, desto höher ist der Durchsatz dieser Stufe und desto höher ist folglich auch die Ausbringung des gesamten Fließfertigungssystems.

Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Zeitanteile Wartezeit sowie Stillstandsdauer, in denen die Referenzprozessstufe aufgrund von Stillständen in der Prozesskette nicht produzieren kann, zusammengefasst und als Ausbringungsverlust definiert. Der Ausbringungsverlust ist somit die Zeitspanne, in der die Referenzprozessstufe aufgrund eines Primärstillstandes oder eines Sekundärstillstandes nicht entsprechend der Taktzeit $TZ_{PS_{Ref}}$ produzieren kann.

Übertragen auf die hier betrachtete Problemstellung der Priorisierung ungeplanter Stillstände wird schließlich die Behebungsreihenfolge gesucht, die den kleinsten Ausbringungsverlust $AV(k)$ von allen möglichen Reihenfolgen zur Folge hat. Die Zielfunktion für dieses Optimierungsproblem lautet:

$$\text{Min} \rightarrow \text{Ausbringungsverlust} = \min_{k=1}^L AV(k) \quad (4.11)$$

Analog zu der Formulierung in Formel 4.2 beschreibt L die Gesamtanzahl möglicher Behebungsreihenfolgen (vgl. Formel 4.1) und $AV(k)$ den resultierenden Ausbringungsverlust der Behebungsreihenfolge k .

Zur Verdeutlichung des beschriebenen Zusammenhangs wird auf das einführende Beispiel einer Priorisierungsentscheidung für ein eindimensionales Fließfertigungssystem aus Kapitel 4.2.1 zurückgegriffen. Die Prozesskette aus zwei einfachen Prozessstufen und einem Verkettungselement ist in Abbildung 31 dargestellt. Die Randbedingungen sowie die verwendeten Werte bleiben unverändert und können weiterhin Tabelle 1 entnommen werden. Zum Entscheidungszeitpunkt t_d stehen beide Prozesse still und der Produktionsmitarbeiter muss

entscheiden, welcher Stillstand als Erstes behoben wird. Grundsätzlich ergeben sich auch hier wieder die beiden Behebungsreihenfolgen mit den Sequenzen $Seq_1 = P_1 \rightarrow P_2$ sowie $Seq_2 = P_2 \rightarrow P_1$. Zur Priorisierung wird nun der resultierende Ausbringungsverlust für jede mögliche Behebungsreihenfolge berechnet:

Ausbringungsverlust der Sequenz $Seq_1 = P_1 \rightarrow P_2$

Um den Ausbringungsverlust der Sequenz Seq_1 zu bestimmen, wird zunächst für jeden Prozess $P_n \in S$ in Abhängigkeit der Position des betroffenen Prozesses in der Behebungsreihenfolge der aus dem Stillstand an Prozess P_n resultierende Ausbringungsverlust $AV_{P_n}(k)$ berechnet. Für den Prozess P_1 ergibt sich der Ausbringungsverlust zu:

$$AV_{P_1}(k = 1) = [TTR_{P_1} + PZ_{P_1}] - [P_{VK_1}(t_d) * PZ_{PS_{Ref}}] \quad (4.12)$$

Wie bereits erläutert, kommt es zu einem Ausbringungsverlust, wenn der Arbeitstakt der Referenzprozessstufe aufgrund von Wartezeiten oder Stillstandszeiten länger als die eigentliche Taktzeit $TZ_{PS_{Ref}}$ ist. In diesem Beispiel ist dies der Fall, sobald der Prozess P_2 aufgrund des Stillstandes an P_1 keine Werkstücke mehr am Einlauf zur Verfügung hat, d. h. sobald P_2 alle zum Zeitpunkt t_d in der Verkettung VK_1 gelagerten Teile fertiggestellt hat. Der Ausdruck in der zweiten Klammer in Formel 4.12 beschreibt diesen Zeitpunkt. Der Wartezustand von P_2 endet schließlich, sobald das erste Werkstück nach Instandsetzung des Prozesses P_1 am Einlauf von P_2 verfügbar ist. Da bei dieser Reihenfolge der Stillstand an P_1 als Erstes behoben wird und sich zum Zeitpunkt t_d kein Werkstück in P_1 befindet, ist das erste Werkstück nach der Summe aus Reparaturdauer TTR_{P_1} und Prozesszeit PZ_{P_1} am Einlauf von Prozess P_2 verfügbar.

Der Ausbringungsverlust, der aus dem Stillstand des Prozesses P_2 an der Referenzprozessstufe bei dieser Reihenfolge resultiert, kann wie folgt berechnet werden:

$$AV_{P_2}(k = 1) = TTR_{P_1} + TTR_{P_2} \quad (4.13)$$

Da es sich bei dem Prozess P_2 um die Referenzprozessstufe handelt, führt ein Stillstand dieser Stufe unmittelbar zu einem Ausbringungsverlust. Dieser entspricht dabei genau der behebungsreihenfolgenabhängigen Stillstandsdauer und somit der Summe der Reparaturdauern von P_1 und P_2 .

Ausbringungsverlust der Sequenz $Seq_2 = P_2 \rightarrow P_1$

Der Ausbringungsverlust des Prozesses P_1 bei der Sequenz Seq_2 kann äquivalent zum Vorgehen bei der Behebungsreihenfolge 1 berechnet werden, wobei sich nur

die Zeitdauer, bis das erste Werkstück nach Instandsetzung von P_1 am Einlauf von P_2 zur Verfügung steht, um die Reparaturdauer TTR_{P_2} verlängert:

$$AV_{P_1}(k = 2) = [TTR_{P_1} + TTR_{P_2} + PZ_{P_1}] - [P_{VK_1}(t_d) * PZ_{PS_{Ref}}] \quad (4.14)$$

Der Ausbringungsverlust durch den Stillstand des Prozesses P_2 bei dieser Behebungsreihenfolge entspricht der Reparaturdauer TTR_{P_2} :

$$AV_{P_2}(k = 2) = TTR_{P_2} \quad (4.15)$$

Die nach den Formeln 4.12 bis 4.15 berechneten Ausbringungsverluste der zu priorisierenden Prozesse sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Zunächst fällt auf, dass der Wert für den Ausbringungsverlust aufgrund des Stillstandes an Prozess P_1 bei der Sequenz $Seq_1 = P_1 \rightarrow P_2$ negativ ist. Dies ist damit zu begründen, dass der Pufferfüllstand des Verkettungselements VK_1 in diesem Beispiel ausreicht, um die Referenzprozessstufe mit Werkstücken zu versorgen, bis das erste Werkstück nach Instandsetzung von P_1 zu Verfügung steht. Ein negativer Ausbringungsverlust bedeutet somit, dass die Pufferkompensationsfähigkeit der Verkettung noch nicht erschöpft ist und es folglich auch zu keinem Ausbringungsverlust an der Referenzprozessstufe kommt.

Der Ausbringungsverlust $AV(k)$ für eine Behebungsreihenfolge k entspricht schließlich dem größten Wert aller Ausbringungsverluste $AV_{P_n}(k)$ der einzelnen Prozesse. Dementsprechend führt die Behebungsreihenfolge 1 zu einem Ausbringungsverlust von 240 s, während aus der Reihenfolge 2 ein Ausbringungsverlust von 120 s resultiert. Folglich stellt die Sequenz $Seq_2 = P_2 \rightarrow P_1$ die Priorisierungsreihenfolge dar.

Tabelle 4: Behebungsreihenfolgenabhängiger Ausbringungsverlust für das 2P-1VK

| | Modell | |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | $k = 1$ | $k = 2$ |
| Seq_k | $P_1 \rightarrow P_2$ | $P_2 \rightarrow P_1$ |
| $AV_{P_1}(k)$ | - 120 s | 0 s |
| $AV_{P_2}(k)$ | 240 s | 120 s |
| $AV(k)$ | 240 s | 120 s |

Die Differenz zwischen den Ausbringungsverlusten beträgt 120 s, was übertragen auf eine Stückzahl bei einer Taktzeit von $TZ_{PS_{Ref}} = 60$ s einer Differenz in der Ausbringungsmenge von zwei Werkstücken entspricht. Wird dieses Ergebnis mit dem in Kapitel 4.2.1 mittels Simulation bestimmten Ergebnis verglichen, so zeigt sich, dass sowohl die Priorisierungsreihenfolgen als auch die Differenzen

zwischen den Ausbringungsmengen bzw. den Ausbringungsverlusten identisch sind.

Wie dieses Beispiel anschaulich zeigt, kann die Priorisierungsreihenfolge auch über einen Vergleich des behebungsrundenfolgenabhängigen Ausbringungsverlustes ermittelt werden. Im Folgenden wird nun eine Vorgehensweise vorgestellt, die diesen Ansatz aufgreift und eine systematische Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge auch für komplexere Fließfertigungssysteme ermöglicht.

4.3.2 Vorgehensweise zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

Bei dieser analytischen Vorgehensweise kann auf einen Einsatz der Simulation zur Bewertung der Behebungsreihenfolgen vollständig verzichtet werden, wobei die gleichen Annahmen wie bei der simulationsbasierten Vorgehensweise getroffen werden (vgl. Kapitel 4.2.2). Ausgangspunkt zur Durchführung einer Priorisierung ist erneut ein Entscheidungszeitpunkt t_d , an dem ein Mitarbeiter entscheiden muss, welcher der zu diesem Zeitpunkt anliegenden und noch nicht in Reparatur befindlichen Stillstände als Nächstes instandgesetzt werden soll. Die Menge S beinhaltet dabei weiterhin sowohl Stillstände an einfachen Prozessstufen wie auch stillstehende Prozesse, die in einer redundanten Prozessstufe angeordnet sind (vgl. Kapitel 4.2.2). Ist die Mächtigkeit der Menge S größer als eins, so kann die Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge entsprechend der in Abbildung 44 abgebildeten Vorgehensweise durchgeführt werden.

Schritt 1: Ermittlung der Menge zu priorisierender Prozessstufen

Im ersten Schritt werden die zu priorisierenden Prozesse $P_n \in S$ nach Prozessstufen gefiltert, wobei dieser Schritt nur bei mehrdimensionalen Prozessketten notwendig ist. Dafür wird die Prozesskette, beginnend bei der ersten Prozessstufe, stromabwärts durchlaufen. Dabei wird für jede einfache wie auch redundante Prozessstufe überprüft, ob diese zu priorisierende Prozesse enthält. Ist dies der Fall, wird die Stufe zur Menge T aller zu priorisierender Prozessstufen, die einen oder mehrere zu priorisierende Prozesse aufweisen, hinzugefügt, sodass sich die Anzahl zu priorisierender Prozessstufen respektive die Mächtigkeit der Menge T um eins erhöht. Ist schließlich nach Durchlaufen der gesamten Prozesskette die Mächtigkeit der Menge T gleich eins, so liegen nur Stillstände an einer Prozessstufe an. In diesem Fall kann die Priorisierungsreihenfolge entsprechend Vorgehen A (Schritt 2) ermittelt werden. Ist die Mächtigkeit hingegen größer als eins, liegen folglich an mehreren Prozessstufen Stillstände an und Schritt 3 der Vorgehensweise wird ausgeführt.

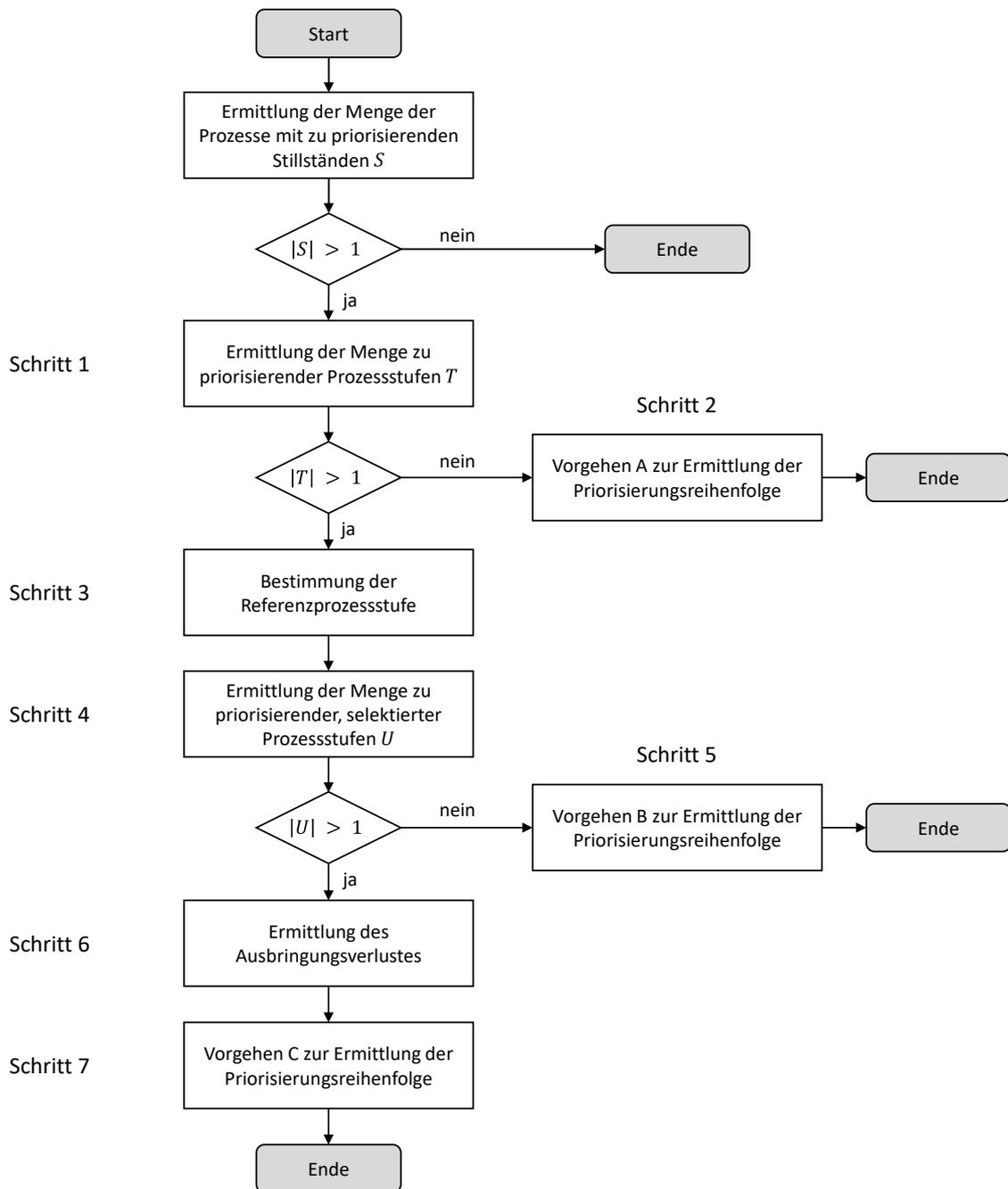


Abbildung 44: Analytische Vorgehensweise zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

Schritt 2: Vorgehen A zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

Liegen Stillstände an mehreren Prozessen an, die aber zu einer Prozessstufe gehören, so ergibt sich die Priorisierungsreihenfolge nach aufsteigenden Reparaturdauern, wobei der Prozess mit der kürzesten Reparaturdauer die höchste Priorität erhält. Somit werden die Prozesse mit der kürzesten Reparaturdauer als Erstes instandgesetzt, sodass sichergestellt wird, dass der Durchsatz der gesam-

ten Prozessstufe möglichst schnell wieder erhöht wird. Folglich wird eine mögliche Auswirkung auf den Durchsatz der Referenzprozessstufe und damit auf die Ausbringung des gesamten Fließfertigungssystems reduziert.

Schritt 3: Bestimmung der Referenzprozessstufe

In diesem Schritt wird die Referenzprozessstufe der betrachteten Prozesskette bestimmt, wobei das Vorgehen analog zu Schritt 1 der simulationsbasierten Vorgehensweise ist (vgl. Kapitel 4.2.2). Dementsprechend ist die Referenzprozessstufe für das Abbild des Fließfertigungssystems zum Entscheidungszeitpunkt t_d diejenige Prozessstufe, die die größte (repräsentative) Taktzeit aufweist. Sollten dabei mehrere Prozessstufen dieselbe Taktzeit aufweisen, so ist die am weitesten stromabwärts gelegene Prozessstufe die Referenzprozessstufe.

Schritt 4: Ermittlung der Menge zu priorisierender, selektierter Prozessstufen

Damit es zu einem Ausbringungsverlust aufgrund eines Sekundärstillstandes der Referenzprozessstufe kommt, muss der Werkstücktransport zu dieser Prozessstufe bzw. von dieser Prozessstufe weg in einem Takt erfolgen, der höher als die Taktzeit $TZ_{PS_{Ref}}$ ist. Nur so kann es zu einem Mangel an Werkstücken am Einlauf bzw. einer Blockade des Auslaufs der Referenzprozessstufe und folglich zu einem Sekundärstillstand kommen. Liegt ein Primärstillstand an einer einfachen Prozessstufe an, so wird der Materialfluss vollständig unterbrochen, sodass bei aufgebrauchter Pufferkompensation ein Sekundärstillstand an der Referenzprozessstufe eintreten und ein Ausbringungsverlust entstehen kann. Bei einer redundanten Prozessstufe hingegen können nur einzelne Prozesse der Stufe stillstehen, während die restlichen Prozesse weiterproduzieren (Abbildung 45).

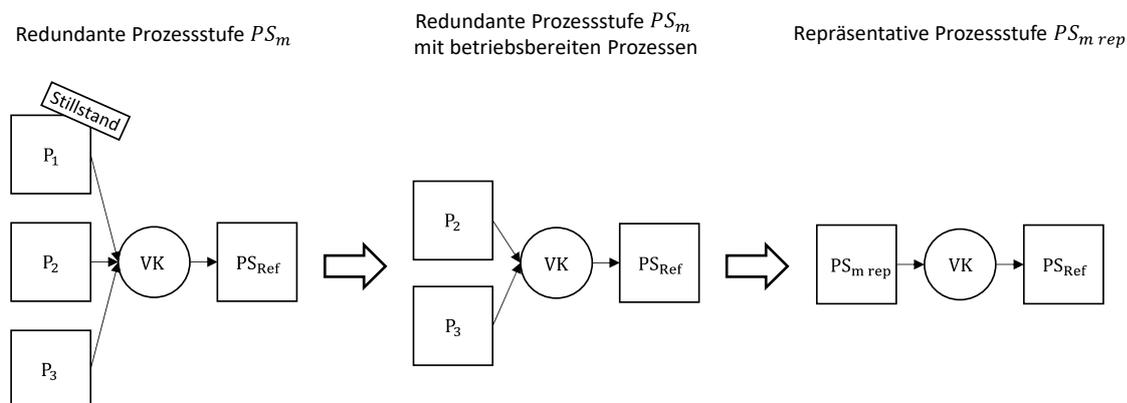


Abbildung 45: Zusammenfassung redundanter Prozessstufen mit stillstehenden Prozessen

Somit kann der Fall eintreten, dass der Durchsatz der betriebsbereiten Prozesse ausreicht, um die Referenzprozessstufe im Takt ihrer Taktzeit $TZ_{PS_{Ref}}$ mit Werkstücken zu versorgen bzw. die Werkstücke abzuführen. Folglich kommt es zu keiner Beeinflussung des Durchsatzes der Referenzprozessstufe durch einen Sekundärstillstand und somit zu keinem Ausbringungsverlust.

Um die zu priorisierenden Prozessstufen der Menge T dahingehend zu filtern, wird folgendes Vorgehen für die redundanten Prozessstufen aus der Menge T angewendet:

Für jede redundante Prozessstufe $PS_m \in T$ werden die betriebsbereiten Prozesse mit Hilfe der Formel 4.3 zu einer einfachen Prozessstufe $PS_{m\ rep}$ mit der repräsentativen Zykluszeit $ZZ_{rep\ PS_m}$ zusammengefasst (Abbildung 45). Anschließend wird die repräsentative Zykluszeit mit der Taktzeit der Referenzprozessstufe verglichen:

- **Fall A:** $ZZ_{rep\ PS_m} \leq TZ_{PS_{Ref}}$

Ist die repräsentative Zykluszeit aller betriebsbereiten Prozesse der Prozessstufe $PS_m \in T$ kleiner oder gleich der Taktzeit $TZ_{PS_{Ref}}$, so führen die stillstehenden Prozesse der betrachteten Prozessstufe zu keinem Ausbringungsverlust. Diese Prozesse werden zwischengespeichert und erst wieder bei der abschließenden Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge in Schritt 5 bzw. Schritt 7 weiter betrachtet.

- **Fall B:** $ZZ_{rep\ PS_m} > TZ_{PS_{Ref}}$

Ist im Gegensatz dazu die Zykluszeit $ZZ_{rep\ PS_m}$ größer als die Taktzeit $TZ_{PS_{Ref}}$, kann es bei aufgebrauchter Pufferkompensation zu einem Ausbringungsverlust kommen.

Schließlich enthält die Menge U alle redundanten Prozessstufen aus Fall B sowie die zu priorisierenden einfachen Prozessstufen. Ist $|U|$ kleiner oder gleich eins, so wird Schritt 5 ausgeführt und die Priorisierungsreihenfolge nach Vorgehen B bestimmt. Ist $|U|$ hingegen größer als eins, so wird mit Schritt 6 fortgefahren.

Schritt 5: Vorgehen B zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

In diesem Schritt wird das Vorgehen beschrieben, wie ausgehend von der Prozessstufenebene schließlich eine Priorisierungsreihenfolge auf Prozessebene abgeleitet werden kann (Abbildung 46). Mit diesem Vorgehen soll erreicht werden, dass die Zykluszeiten aller Prozessstufen wieder geringer oder gleich der Taktzeit der Referenzprozessstufe sind, wodurch ein möglicher Ausbringungsverlust begrenzt oder sogar verhindert werden kann. Dabei zielt die Auswahl der Prozesse darauf ab, dass die Stillstände, die als schnellstes behoben werden können, auch am höchsten priorisiert werden, sodass die repräsentativen Zykluszeiten der Prozessstufen möglichst schnell sinken.

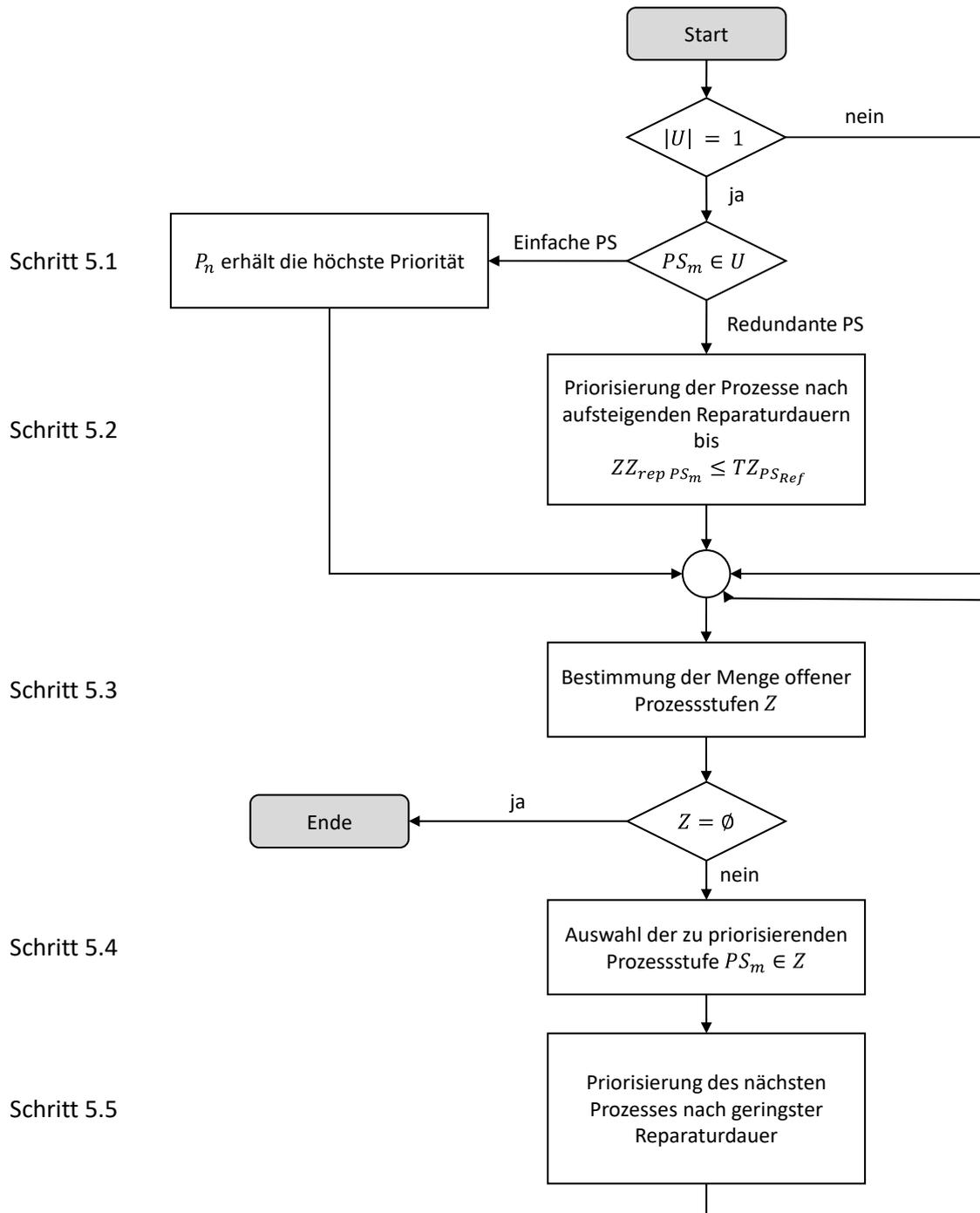


Abbildung 46: Vorgehen B zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

Zunächst ist dafür zu differenzieren, ob die Menge U der gefilterten Prozessstufen leer oder die Mächtigkeit der Menge U eins ist. Ist die Menge leer, so existieren keine einfachen Prozessstufen, die im Rahmen der betrachteten Entscheidung priorisiert werden müssen. Auch redundante Prozessstufen, deren repräsentative Zykluszeit größer als die Taktzeit der Referenzprozessstufe ist, müssen nicht priorisiert werden. Die Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge auf Prozessebene beginnt in diesem Fall mit Schritt 5.3. Ist die Mächtigkeit der Menge U hingegen eins, so wird mit Schritt 5.1 begonnen:

Schritt 5.1: Differenzierung nach einfacher und redundanter Prozessstufe

Ist die betrachtete Prozessstufe $PS_m \in U$ eine einfache Prozessstufe, so existiert in dieser Stufe per Definition genau ein Prozess P_n . Der Stillstand dieses Prozesses erhält folglich die höchste Priorität.

Handelt es sich bei der betrachteten Prozessstufe um eine redundante Stufe, so wird Schritt 5.2 durchgeführt.

Schritt 5.2: Priorisierung der Prozesse nach aufsteigenden Reparaturdauern

In diesem Schritt wird die Priorisierungsreihenfolge mittels der Reparaturdauern der Prozesse sowie der repräsentativen Zykluszeit der Prozessstufe ermittelt. Dazu werden die stillstehenden Prozesse der Prozessstufe nach aufsteigenden Reparaturdauern sortiert und, beginnend mit dem Prozess mit der geringsten Reparaturdauer, schrittweise der Priorisierungsreihenfolge hinzugefügt. Nach jedem neu hinzugefügten Prozess wird die repräsentative Zykluszeit der Prozessstufe $ZZ_{rep PS_m}$ aus allen betriebsbereiten sowie bereits der Priorisierungsreihenfolge hinzugefügten Prozessen nach Formel 4.3 berechnet. Solange die iterativ berechnete repräsentative Zykluszeit der Prozessstufe größer als die Taktzeit der Referenzprozessstufe ist, wird die Priorisierungsreihenfolge mit den Prozessen entsprechend den Reparaturdauern ergänzt. Sobald die Zykluszeit $ZZ_{rep PS_m}$ kleiner oder gleich der Taktzeit $TZ_{PS_{Ref}}$ ist, werden etwaige noch offene, nicht priorisierte Prozesse dieser Stufe zwischengespeichert. Auf diese wird in Schritt 5.3 weiter eingegangen.

Schritt 5.3: Bestimmung der Menge offener Prozessstufen

Um alle Prozesse entsprechend ihrer Priorität der Priorisierungsreihenfolge hinzuzufügen, werden in diesem Schritt alle Prozessstufen mit noch offenen, zu priorisierenden Prozessen bestimmt. Zu dieser Menge Z können zählen:

- Die redundante Prozessstufe aus Schritt 5.2
- Redundante Prozessstufen aus Schritt 4 Fall A

Sollten die Menge noch offener Prozessstufen Z dabei leer sein, so sind bereits alle zu priorisierenden Prozesse der Priorisierungsreihenfolge hinzugefügt und die Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge ist abgeschlossen. Ist die Menge Z hingegen nicht leer, werden die Schritte 5.4 und 5.5 sowie die Bestimmung der noch offenen Prozessstufen solange durchlaufen, bis die Menge Z leer ist und alle zu priorisierenden Prozesse in der Priorisierungsreihenfolge enthalten sind.

Schritt 5.4: Auswahl der zu priorisierenden Prozessstufe

Für die Auswahl der nächsten zu priorisierenden Prozessstufe werden die repräsentativen Zykluszeiten aller Prozessstufen der Menge Z absteigend sortiert, so dass die Prozessstufe $PS_m \in Z$ mit der höchsten Zykluszeit $ZZ_{rep\ PS_m}$ ausgewählt werden kann.

Schritt 5.5: Priorisierung des nächsten Prozesses nach geringster Reparaturdauer

Die zu priorisierenden Prozesse der ausgewählten Prozessstufe $PS_m \in Z$ werden nach aufsteigenden Reparaturdauern sortiert, wobei der Prozess mit der geringsten Reparaturdauer der Priorisierungsreihenfolge hinzugefügt wird. Danach wird die repräsentative Zykluszeit der Prozessstufe unter Einbeziehung aller betriebsbereiten sowie aller bereits in der Priorisierungsreihenfolge enthaltenen Prozesse neu berechnet.

Sollten mit Priorisierung des letzten Prozesses alle offenen, zu priorisierenden Prozesse der Prozessstufe PS_m in der Priorisierungsreihenfolge enthalten sein, so verringert sich folglich die Menge offener Prozessstufen Z in Schritt 5.3.

Schritt 6: Ermittlung des Ausbringungsverlustes

Ist die Mächtigkeit der Menge U nach Durchführung des Schrittes 4 größer als eins, so existieren mindestens zwei zu priorisierende Prozessstufen, die zu einem Ausbringungsverlust führen können. Um diese Prozessstufen zu priorisieren, werden die folgenden Schritte für jede der Prozessstufen $PS_m \in U$ durchgeführt (Abbildung 47):

Schritt 6.1: Differenzierung nach Prozessstufen und Referenzprozessstufe

Zunächst wird überprüft, ob es sich bei der ausgewählten Prozessstufe $PS_m \in U$ um die Referenzprozessstufe handelt. Ist dies der Fall, so wirkt sich ein Stillstand ohne eine eventuelle Verzögerung durch Pufferkompensation auf den Arbeitstakt der Referenzprozessstufe aus. Folglich existiert hier keine latente Phase (vgl. Kapitel 2.2.2). Ebenso ist die Nachwirkzeit eines Primärstillstandes der Referenzprozessstufe gleich null.

Handelt es sich bei der betrachteten Prozessstufe $PS_m \in U$ hingegen nicht um die Referenzprozessstufe, so wird mit der Berechnung der Dauer der latenten Phase sowie der Nachwirkzeit in den Schritten 6.2 und 6.3 fortgefahren.

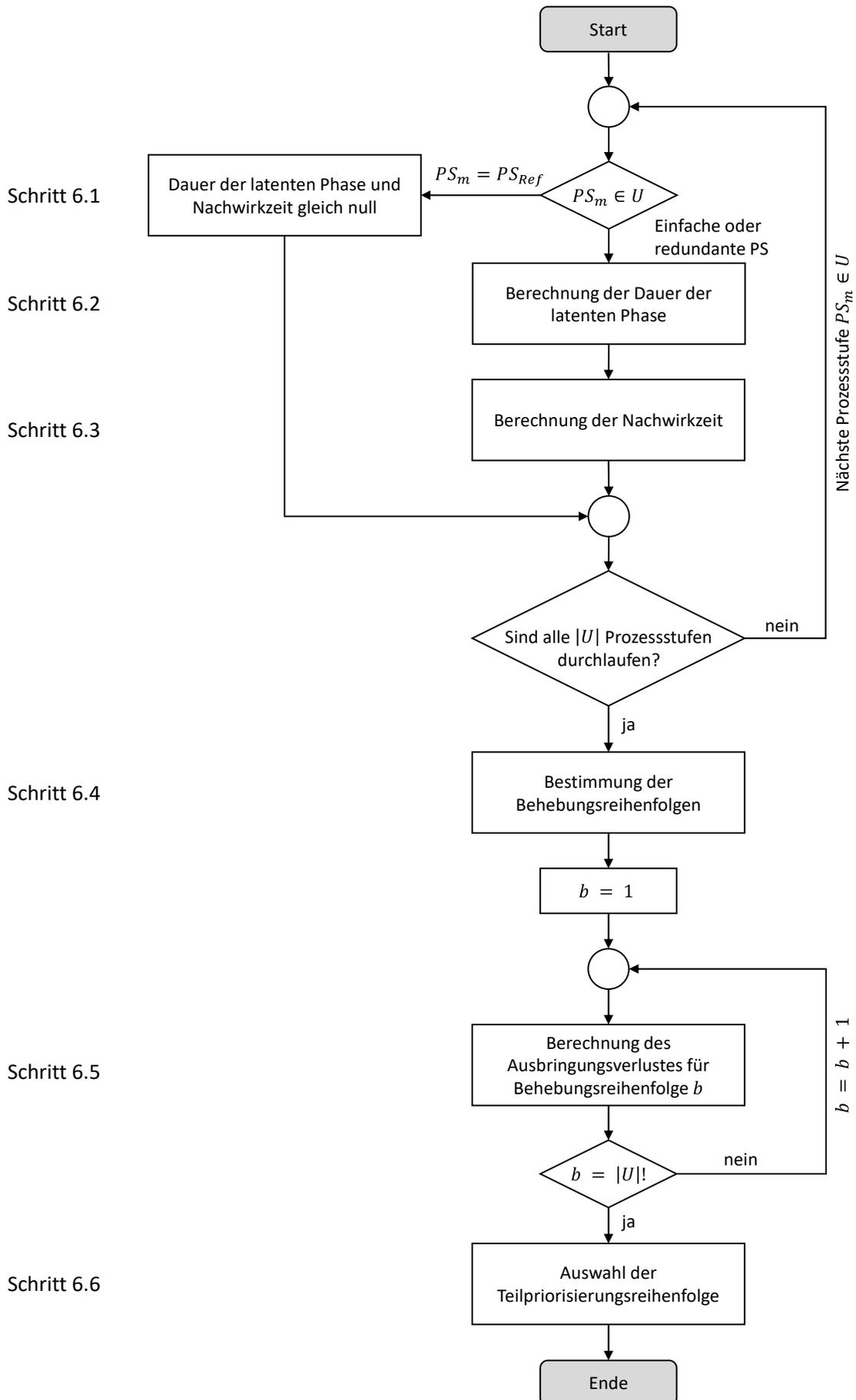


Abbildung 47: Schritte zur Ermittlung des Ausbringungsverlustes

Schritt 6.2: Berechnung der Dauer der latenten Phase

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 erläutert, beschreibt die latente Phase die Zeitdauer, bis die Produktionsleistung eines Fließfertigungssystems durch die Auswirkung eines Stillstandes beeinflusst wird. Die Dauer der latenten Phase wird dabei maßgeblich durch die Pufferkompensation vorhandener Verkettungselemente bestimmt. In Kapitel 4.2.2 konnte gezeigt werden, dass die Produktionsleistung eines gesamten Fließfertigungssystems anhand der Leistung der Referenzprozessstufe bestimmt werden kann. Ferner wurde herausgearbeitet, dass sich der Arbeitstakt der Referenzprozessstufe durch die Auswirkung eines Stillstandes aufgrund von Warte- und Stillstandszeiten verlängert. In diesem Zusammenhang kann die latente Phase somit als Zeitspanne zwischen dem Eintritt eines Primärstillstandes und dem Beginn der Beeinflussung des Arbeitstaktes der Referenzprozessstufe durch diesen Stillstand, d. h. dem Beginn des Sekundärstillstandes an der Referenzprozessstufe, aufgefasst werden. Bei der Berechnung der Dauer der latenten Phase muss die relative Position der betrachteten Prozessstufe $PS_m \in U$ zu der Referenzprozessstufe PS_{Ref} berücksichtigt werden:

Prozessstufe ist stromaufwärts zu der Referenzprozessstufe gelegen

Liegt die betrachtete Prozessstufe stromaufwärts der Referenzprozessstufe, kann ein Primärstillstand dieser Stufe zu einem Mangel an Werkstücken am Einlauf der Referenzprozessstufe führen. Die Dauer der latenten Phase $\Delta t_{latente Phase PS_m}$ für eine einfache Prozessstufe $PS_m \in U$ berechnet sich in diesem Fall zu:

$$\begin{aligned} \Delta t_{latente Phase PS_m} &= \sum_{i=PS_m+1}^{PS_{Ref}-1} B_i(t_d) * PZ_{PS_{Ref}} + \sum_{j=VK_m}^{VK_{Ref}-1} P_j(t_d) * PZ_{PS_{Ref}} \\ &+ RPZ_{PS_{Ref}}(t_d) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Wie aus Formel 4.16 ersichtlich, wird die Dauer der latenten Phase durch die Werkstückbelegung $B_i(t_d)$ der Prozessstufen und der Anzahl der Werkstücke in den Verkettungselementen zwischen der betrachteten Prozessstufe PS_m und der Referenzprozessstufe PS_{Ref} sowie der Restprozesszeit der Referenzprozessstufe zum Entscheidungszeitpunkt t_d bestimmt. Ist zu diesem Zeitpunkt kein Werkstück in der Referenzprozessstufe in Bearbeitung, so wird in Formel 4.16 die Restprozesszeit $RPZ_{PS_{Ref}}$ zu null gesetzt.

Da es bei redundanten Prozessstufen im Gegensatz zu einfachen Prozessstufen nicht zu einem kompletten Abriss des Materialflusses kommt, wenn nur einzelne Prozesse der redundanten Stufe stillstehen, muss bei der Berechnung der Dauer der latenten Phase von redundanten Prozessstufen zusätzlich die reduzierte Durchsatzmenge der Prozessstufe berücksichtigt werden. Sollten alle Prozesse der Prozessstufe stillstehen, so bricht der Materialfluss, wie bei einer einfachen Prozessstufe, komplett ab, sodass zur Berechnung der Dauer der latenten Phase erneut Formel 4.16 verwendet werden kann.

Für die Berechnung der Dauer der latenten Phase bei redundanten Prozessstufen mit einzelnen stillstehenden Prozessen kann das in Abbildung 48 dargestellte Ersatzmodell für den relevanten Abschnitt der Prozesskette aufgestellt werden.

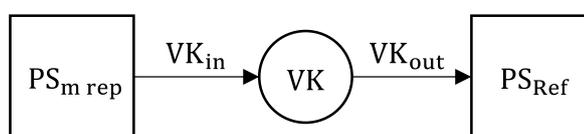


Abbildung 48: Ersatzmodell zur Berechnung der latenten Phase einer stromaufwärtsgelegenen redundanten Prozessstufe

Die betriebsbereiten Prozesse der betrachteten redundanten Prozessstufe $PS_m \in U$ werden, wie bereits ins Schritt 4 beschrieben, mit Hilfe von Formel 4.3 zusammengefasst, sodass die Prozessstufe schließlich die repräsentative Zykluszeit $ZZ_{rep PS_m}$ aufweist. Die Restprozesszeit dieser Stufe wird mit der kleinsten Restprozesszeit aller nicht stillstehenden Prozesse angenommen. Sollten alle betriebsbereiten Prozesse keine Werkstücke in Bearbeitung haben, so ergibt sich die Restprozesszeit aus dem arithmetischen Mittel der Prozesszeiten aller betriebsbereiten Prozesse.

Das Verkettungselement des Ersatzmodells fasst alle Prozesse und Verkettungselemente zwischen der betrachteten Prozessstufe und der Referenzprozessstufe zusammen. Der Pufferfüllstand $P_{VK}(t_d)$ zum Zeitpunkt t_d kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$P_{VK}(t_d) = \sum_{i=PS_m+1}^{PS_{Ref}-1} B_i(t_d) + \sum_{j=VK_m}^{VK_{Ref}-1} P_j(t_d) \quad (4.17)$$

Die Verzögerungsdauer VD_{VK} des Verkettungselements VK ergibt sich entsprechend der Durchlaufzeit eines Werkstücks vom Auslauf der betrachteten Prozessstufe bis zum Einlauf der Referenzprozessstufe zu:

$$VD_{VK} = DLZ_{PS_m \rightarrow PS_{Ref}} = \sum_{i=PS_m+1}^{PS_{Ref}-1} PZ_i + \sum_{j=VK_m}^{VK_{Ref}-1} VD_j \quad (4.18)$$

Dabei wird angenommen, dass alle Werkstücke, die sich zum Zeitpunkt t_d in diesem Verkettungselement befinden, ohne Verzögerung am Einlauf der Referenzprozessstufe zur Verfügung stehen.

Für die Berechnungen wird ferner angenommen, dass die Prozessstufe PS_m immer mit Werkstücken versorgt wird, d. h. nie aufgrund fehlender Werkstücke am Einlauf warten muss. Folglich schleust PS_m nach Berücksichtigung einer Restprozesszeit im Takt der Zykluszeit $ZZ_{rep\ PS_m}$ kontinuierlich Werkstücke in das Verkettungselement ein. Es wird weiter angenommen, dass die Referenzprozessstufe PS_{Ref} immer Werkstücke abführen kann, d. h. nie aufgrund eines blockierten Auslaufs warten muss. Folglich entnimmt PS_{Ref} nach Berücksichtigung einer Restprozesszeit entsprechend der Taktzeit $TZ_{PS_{Ref}}$ Werkstücke, bis der Pufferfüllstand den Wert null erreicht und die Referenzprozessstufe aufgrund Werkstückmangels am Einlauf warten muss.

Der Pufferfüllstand $P_{VK}(t)$ zum Zeitpunkt $t > t_d$ kann entsprechend folgender Formeln berechnet werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass Pufferfüllstandsänderungen in diskreten Zeitschritten ablaufen (vgl. Abbildung 48):

$$P_{VK}(t) = VK_{in}(t) + P_{VK}(t_d) - VK_{out}(t) \quad (4.19)$$

$$VK_{in}(t) = \frac{t - RPZ_{rep\ PS_m}(t_d)}{ZZ_{rep\ PS_m}} \quad (4.20)$$

$$VK_{out}(t) = \frac{t - RPZ_{PS_{Ref}}(t_d)}{TZ_{PS_{Ref}}} \quad (4.21)$$

Zur Berechnung der Dauer der latenten Phase kann nun mit Hilfe der Formeln 4.19 bis 4.21 der Zeitpunkt $t = t_0$ ermittelt werden, an dem die Referenzprozessstufe das letzte Werkstück aus der Verkettung VK entnimmt, sodass der Pufferfüllstand erstmalig den Wert null annimmt. Da in der Zeit, in der die Referenzprozessstufe dieses Werkstück bearbeitet, durchaus ein neues Werkstück durch PS_m fertig gestellt und in VK eingeschleust werden kann, muss in einem nächsten Schritt überprüft werden, ob die Restzykluszeit der betrachteten Prozessstufe zum Zeitpunkt t_0 größer als die Taktzeit der Referenzprozessstufe ist:

- **Fall A:** $RZZ_{rep\ PS_m}(t_0) > TZ_{PS_{Ref}}$

Die Referenzprozessstufe wartet aufgrund Werkstückmangels am Einlauf erstmalig nach Ablauf der Taktzeit zum Zeitpunkt $t_w = t_0 + TZ_{PS_{Ref}}$.

- **Fall B:** $RZZ_{rep\ PS_m}(t_0) \leq TZ_{PS_{Ref}}$

Nach Ablauf der Taktzeit steht der Referenzprozessstufe ein neues Werkstück zur Verfügung, sodass im Gegensatz zu Fall A ein Wartezustand zum Zeitpunkt t_w noch nicht anliegt.

Die Restzykluszeit der betrachteten Prozessstufe zum Zeitpunkt $t = t_0$ ergibt sich dabei zu:

$$RZZ_{rep\ PS_m}(t) = ZZ_{rep\ PS_m} - \left[(t - RPZ_{rep\ PS_m}(t_d)) \bmod ZZ_{rep\ PS_m} \right] \quad (4.22)$$

Im Fall B liegt noch kein Wartezustand zum Zeitpunkt t_w an. Die zusätzlichen Werkstücke W , die die Referenzprozessstufe in diesem Fall noch produzieren kann, können mit nachfolgender Formel berechnet werden, wobei etwaige Nachkommastellen wegen der Berücksichtigung diskreter Zeitschritte entfallen:

$$W = \frac{TZ_{PS_{Ref}} - RZZ_{rep\ PS_m}(t_0)}{ZZ_{rep\ PS_m} - TZ_{PS_{Ref}}} + 1 \quad (4.23)$$

Aufgrund Werkstückmangels am Einlauf wartet die Referenzprozessstufe im Fall B schließlich erstmalig zum Zeitpunkt:

$$t_w = t_0 + W * TZ_{PS_{Ref}} + TZ_{PS_{Ref}} \quad (4.24)$$

Da bei der Berechnung des Zeitpunktes t_w die Verzögerungsdauer des Verkettungselements nicht berücksichtigt wird, muss abschließend geprüft werden, ob die Zeitspanne zwischen Ein- und Ausschleusung der Werkstücke mindestens der Verzögerungsdauer des Verkettungselements entspricht (vgl. Formel 4.18):

$$t_{out} - t_{in} \geq VD_{VK} \quad (4.25)$$

Dafür wird zunächst der Zeitpunkt t_{out} bestimmt, an dem das letzte Werkstück ohne Wartezeitanteil von der Referenzprozessstufe aus dem Verkettungselement entnommen wird:

$$t_{out} = t_w - TZ_{PSRef} \quad (4.26)$$

Der Zeitpunkt t_{in} , an dem dieses Werkstück in das Verkettungselement eingeschleust wurde, ergibt sich mit der Restzykluszeit $RZZ_{rep PS_m}(t_w)$ zum Zeitpunkt $t = t_w$ nach Formel 4.22 zu:

$$t_{in} = t_w - ZZ_{rep PS_m} - RZZ_{rep PS_m}(t_w) \quad (4.27)$$

Ist die Bedingung nach Formel 4.25 erfüllt, ist die Verzögerungsdauer zwischen Ein- und Ausschleusungsvorgang des letzten Werkstückes eingehalten und die Dauer der latenten Phase für die betrachtete redundante Prozessstufe $PS_m \in U$ folgt zu:

$$\Delta t_{latente Phase PS_m} = t_w \quad (4.28)$$

Ist die Bedingung in Formel 4.25 hingegen nicht erfüllt, so liegt ein Wartezustand an der Referenzprozessstufe bereits früher vor. In diesem Fall kann mit Formel 4.29 rückwirkend berechnet werden, für welches Werkstück zuletzt die Bedingung nach Formel 4.25 erfüllt war. W_{VD} ist dabei die Anzahl an Werkstücken, für die rückwirkend die Bedingung in Formel 4.25 nicht erfüllt ist.

$$VD_{VK} \geq (t_{out} - W_{VD} * TZ_{PSRef}) - (t_{in} - W_{VD} * ZZ_{rep PS_m}) \quad (4.29)$$

Die Dauer der latenten Phase der Prozessstufe $PS_m \in U$ folgt hier schließlich zu:

$$\Delta t_{latente Phase PS_m} = t_w - W_{VD} * TZ_{PSRef} \quad (4.30)$$

Prozessstufe ist stromabwärts zu der Referenzprozessstufe gelegen

Liegt die betrachtete Prozessstufe stromabwärts der Referenzprozessstufe, kann ein Primärstillstand dieser Stufe zu einer Blockade des Auslaufs der Referenz-

prozessstufe führen. Die Dauer der latenten Phase $\Delta t_{\text{latente Phase } PS_m}$ für eine einfache Prozessstufe $PS_m \in U$ kann bei dieser Konstellation wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{latente Phase } PS_m} &= \sum_{i=PS_{Ref}+1}^{PS_m-1} [B_{i \max} - B_i(t_d)] * PZ_{PS_{Ref}} \\ &+ \sum_{j=VK_{Ref}}^{VK_m-1} [P_{j \max} - P_j(t_d)] * PZ_{PS_{Ref}} + RPZ_{PS_{Ref}}(t_d) \end{aligned} \quad (4.31)$$

Im Gegensatz zur Berechnung bei stromaufwärtsgelegenen Prozessstufen wird hier nun die freie Pufferkapazität als Differenz aus maximaler Pufferkapazität und aktuellem Pufferfüllstand für Verkettungselemente bzw. aus maximaler Werkstückbelegung und aktueller Werkstückbelegung für Prozessstufen bestimmt.

Wie bereits bei stromabwärtsgelegenen Prozessstufen erläutert, unterscheidet sich die Berechnung der Dauer der latenten Phase für einfache Prozessstufen von der Berechnung für redundante Prozessstufen. Sollten allerdings alle Prozesse einer redundanten Prozessstufe stillstehen, so bricht der Materialfluss, wie bei einer einfachen Prozessstufe, komplett ab, sodass zur Berechnung der Dauer der latenten Phase Formel 4.31 verwendet werden kann.

Für die Berechnung der Dauer der latenten Phase bei redundanten Prozessstufen mit einzelnen stillstehenden Prozessen kann das in Abbildung 49 dargestellte Ersatzmodell für den relevanten Abschnitt der Prozesskette aufgestellt werden. Die repräsentative Zykluszeit der betrachteten redundanten Prozessstufe $PS_m \in U$ sowie die Restprozesszeiten können analog zum Vorgehen bei stromaufwärtsgelegener Prozessstufe bestimmt werden.

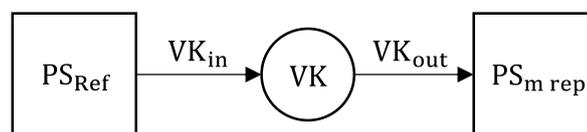


Abbildung 49: Ersatzmodell zur Berechnung der latenten Phase einer stromabwärtsgelegenen redundanten Prozessstufe

Das Verkettungselement des Ersatzmodells fasst alle Prozesse und Verkettungselemente zwischen der Referenzprozessstufe und der betrachteten Prozessstufe zusammen. Die Pufferkapazität $P_{VK \max}$ des Verkettungselements berechnet sich folglich zu:

$$P_{VK\ max} = \sum_{i=PS_{Ref}+1}^{PS_m-1} B_{i\ max} + \sum_{j=VK_{Ref}}^{VK_m-1} P_{j\ max} \quad (4.32)$$

Der Pufferfüllstand $P_{VK}(t_d)$ zum Zeitpunkt t_d kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$P_{VK}(t_d) = \sum_{i=PS_{Ref}+1}^{PS_m-1} B_i(t_d) + \sum_{j=VK_{Ref}}^{VK_m-1} P_j(t_d) \quad (4.33)$$

Für die Berechnungen wird angenommen, dass die Referenzprozessstufe PS_{Ref} immer mit Werkstücken versorgt wird, d. h. nie aufgrund fehlender Werkstücke am Einlauf warten muss. Folglich schleust PS_{Ref} nach Berücksichtigung einer Restprozesszeit entsprechend der Taktzeit $TZ_{PS_{Ref}}$ Werkstücke in das Verkettungselement ein, bis der Pufferfüllstand die Pufferkapazität erreicht hat und die Referenzprozessstufe aufgrund eines blockierten Auslaufs warten muss. Ferner wird angenommen, dass die betrachtete Prozessstufe PS_m immer Werkstücke abführen kann, d. h. nie aufgrund eines blockierten Auslaufs warten muss. Folglich entnimmt PS_m nach Berücksichtigung einer Restprozesszeit im Takt der Zykluszeit $ZZ_{rep\ PS_m}$ kontinuierlich Werkstücke.

Zur Berechnung der Dauer der latenten Phase kann nun der Zeitpunkt $t = t_0$ ermittelt werden, an dem die Referenzprozessstufe das letzte Werkstück in VK einschleust, sodass der Pufferfüllstand erstmalig die Pufferkapazität erreicht:

$$P_{VK}(t) = P_{VK\ max} = VK_{in}(t) + P_{VK}(t_d) - VK_{out}(t) \quad (4.34)$$

$$VK_{in}(t) = \frac{t - RPZ_{PS_{Ref}}(t_d)}{TZ_{PS_{Ref}}} \quad (4.35)$$

$$VK_{out}(t) = \frac{t - RPZ_{rep\ PS_m}(t_d)}{ZZ_{rep\ PS_m}} \quad (4.36)$$

Auch bei stromabwärtsgelegenen Prozessstufen muss überprüft werden, ob die Restzykluszeit der betrachteten Prozessstufe zum Zeitpunkt t_0 größer als die Taktzeit der Referenzprozessstufe ist (vgl. Formel 4.22):

- **Fall A:** $RZZ_{rep\ PS_m}(t_0) > TZ_{PS_{Ref}}$

Die Referenzprozessstufe wartet aufgrund eines blockierten Auslaufs erstmalig nach Ablauf der Taktzeit zum Zeitpunkt $t_w = t_0 + TZ_{PS_{Ref}}$.

- **Fall B:** $RZZ_{rep\ PS_m}(t_0) \leq TZ_{PS_{Ref}}$

Nach Ablauf der Taktzeit kann die Referenzprozessstufe ein neues Werkstück in das Verkettungselement einschleusen, sodass im Gegensatz zu Fall A ein Wartezustand zum Zeitpunkt t_w noch nicht anliegt.

Die zusätzlichen Werkstücke W , die die Referenzprozessstufe im Fall B produzieren kann, können erneut mit Hilfe der Formeln 4.22 und 4.23 berechnet werden. Somit wartet die Referenzprozessstufe schließlich erstmalig zum Zeitpunkt:

$$t_w = t_0 + W * TZ_{PS_{Ref}} + TZ_{PS_{Ref}} \quad (4.37)$$

Die Dauer der latenten Phase für eine stromabwärtsgelegene redundante Prozessstufe $PS_m \in U$ ergibt sich abschließend zu:

$$\Delta t_{latente\ Phase\ PS_m} = t_w \quad (4.38)$$

Nachdem nun die Dauer der latenten Phase sowohl für einfache wie auch redundante Prozessstufen abhängig von der relativen Position zu der Referenzprozessstufe ermittelt wurde, kann im nächsten Schritt die Nachwirkzeit eines Stillstandes berechnet werden.

Schritt 6.3: Berechnung der Nachwirkzeit

Die Nachwirkzeit eines Primärstillstandes beschreibt die Zeitspanne zwischen dem Ende des Primärstillstandes an der betroffenen Prozessstufe und dem Ende der Auswirkung dieses Stillstandes auf die Produktionsleistung des gesamten Produktionssystems (vgl. Abbildung 14). Weiterhin gilt, dass die Produktionsleistung des gesamten Produktionssystems durch die Leistung der Referenzprozessstufe definiert wird, wobei sich der Arbeitstakt der Referenzprozessstufe durch die Auswirkung eines Stillstandes aufgrund Warte- und Stillstandszeiten verlängert. Die Nachwirkzeit kann folglich als Zeitspanne zwischen dem Ende eines Primärstillstandes und dem Ende des daraus resultierenden Sekundärstillstandes an der Referenzprozessstufe aufgefasst werden. Wie bereits bei der Berechnung der Dauer der latenten Phase muss auch bei der Berechnung der Nachwirkzeit die relative Position der betrachteten Prozessstufe $PS_m \in U$ zu der Referenzprozessstufe PS_{Ref} berücksichtigt werden:

Prozessstufe ist stromaufwärts zu der Referenzprozessstufe gelegen

Liegt die betrachtete Prozessstufe $PS_m \in U$ stromaufwärts der Referenzprozessstufe, so ist die Nachwirkzeit die Durchlaufzeit des ersten bearbeiteten Werkstücks nach Instandsetzung aller stillstehenden Prozesse der betrachteten Prozessstufe PS_m bis zum Einlauf der Referenzprozessstufe PS_{Ref} :

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{Nachwirkzeit } PS_m} \\ = DLZ_{PS_m \rightarrow PS_{Ref}} = RPZ_{PS_m}(t_d) + \sum_{i=PS_m+1}^{PS_{Ref}-1} PZ_i + \sum_{j=VK_m}^{VK_{Ref}-1} VD_j \end{aligned} \quad (4.39)$$

Die Restprozesszeit $RPZ_{PS_m}(t_d)$ zum Entscheidungszeitpunkt entspricht bei einfachen Prozessstufen der Restprozesszeit des stillstehenden Prozesses P_n zu diesem Zeitpunkt. Falls während des Stillstandes im Prozess P_n kein Werkstück vorhanden ist, so ist anstelle der Restprozesszeit die Prozesszeit PZ_{P_n} in Formel 4.39 zu verwenden. Bei redundanten Prozessstufen wird die größte Restprozesszeit aller stillstehenden Prozesse dieser Stufe als $RPZ_{PS_m}(t_d)$ verwendet. Sollten dabei in allen stillstehenden Prozessen keine Werkstücke vorhanden sein, so ist anstelle der Restprozesszeit die größte Prozesszeit aller stillstehenden Prozesse dieser Stufe in Formel 4.39 zu verwenden.

Bei der Summation der Prozesszeiten kann ferner für eine redundante Prozessstufe zum Entscheidungszeitpunkt t_d nicht ermittelt werden, welcher der insgesamt $|R|$ Prozesse, die zu der Prozessstufe gehören und unterschiedliche Prozesszeiten aufweisen können, das für die Durchlaufzeitermittlung relevante Werkstück produzieren wird. Als Abschätzung wird daher die größte Prozesszeit aller $|R|$ Prozesse einer redundanten Prozessstufe als Prozesszeit für die Summation verwendet.

Prozessstufe ist stromabwärts zu der Referenzprozessstufe gelegen

Liegt die betrachtete Prozessstufe $PS_m \in U$ stromabwärts der Referenzprozessstufe, so lässt sich die Nachwirkzeit wie folgt berechnen:

$$\Delta t_{\text{Nachwirkzeit } PS_m} = RPZ_{PS_m}(t_d) \quad (4.40)$$

Die Restprozesszeit der betrachteten Prozessstufe PS_m wird dabei analog zum Fall bei einer stromaufwärtsgelegenen Prozessstufe bestimmt.

Nachdem nun die Dauer der latenten Phase sowie die Nachwirkzeit für die Prozessstufen mit stillstehenden Prozessen berechnet wurde, kann im Folgenden der behebungsrerienfolgenabhängige Ausbringungsverlust ermittelt werden.

Schritt 6.4: Bestimmung der Behebungsreihenfolgen

Zur Berechnung des Ausbringungsverlustes werden in diesem Schritt zunächst die möglichen Behebungsreihenfolgen gebildet. Da es sich hier, wie bereits in Kapitel 4.3.1 erläutert, um ein Reihenfolgenoptimierungsproblem handelt, ergeben sich mit der Mächtigkeit der Menge U insgesamt $|U|!$ mögliche Behebungsreihenfolgen. Die Stillstandsdauer $SD_{PS_m}(b)$ der betrachteten Prozessstufe $PS_m \in U$ für eine mögliche Behebungsreihenfolge b ergibt sich entsprechend ihrer Position in der Behebungsreihenfolge zu:

$$SD_{PS_m}(b) = \sum_{i \in M_b} TTR_i \quad (4.41)$$

Mit M_b wird in Formel 4.41 die Menge aller Prozessstufen bezeichnet, die in der Behebungsreihenfolge b vor der betrachteten Prozessstufe PS_m stehen. Die Stillstandsdauer berechnet sich somit aus der Summe der Reparaturdauern aller Prozessstufen, die in der Behebungsreihenfolge vor der betrachteten Prozessstufe stehen, wobei die Reparaturdauer von PS_m in diese Summe ebenfalls miteinbezogen wird.

Da bei dieser analytischen Vorgehensweise zur Priorisierung von Stillständen Prozesse zu Prozessstufen zusammengefasst werden, kann die sequentielle Instandsetzung einzelner Prozesse innerhalb einer redundanten Prozessstufe bei der Berechnung des Ausbringungsverlusts nicht berücksichtigt werden. Als Reparaturdauer einer redundanten Prozessstufe wird daher die Summe aller Reparaturdauern der zugehörigen stillstehenden Prozesse für die weiteren Berechnungen verwendet.

Schritt 6.5: Berechnung des Ausbringungsverlustes

In diesem Schritt wird der Ausbringungsverlust für jede Behebungsreihenfolge b berechnet. Der Ausbringungsverlust beschreibt die Zeitdauer, in der die Referenzprozessstufe durch einen Primärstillstand, wenn die Referenzprozessstufe selbst mindestens einen stillstehenden Prozess aufweist, oder durch einen Sekundärstillstand, ausgelöst durch eine stromabwärtsgelegene oder stromaufwärtsgelegene Prozessstufe, keine Werkstücke entsprechend ihrer Taktzeit produzieren kann.

Für die Berechnung des Ausbringungsverlusts $AV(b)$ einer Behebungsreihenfolge b wird für jede Prozessstufe $PS_m \in U$ entsprechend ihrer Position in der

Behebungsreihenfolge ein Ausbringungsverlust $AV_{PS_m}(b)$ ermittelt. Der Ausbringungsverlust $AV(b)$ ist schließlich das Maximum aus allen einzelnen Ausbringungsverlusten $AV_{PS_m}(b)$ der insgesamt $|U|$ Prozessstufen. Bei der Berechnung muss erneut zwischen einfachen und redundanten Prozessstufen differenziert werden:

Ausbringungsverlust für eine einfache Prozessstufe

Der Ausbringungsverlust $AV_{PS_m}(b)$ der betrachteten einfachen Prozessstufe $PS_m \in U$ kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$AV_{PS_m}(b) = SD_{PS_m}(b) + \Delta t_{\text{Nachwirkzeit } PS_m} - \Delta t_{\text{latente Phase } PS_m} \quad (4.42)$$

Aus Formel 4.42 ist ersichtlich, dass ein Primärstillstand der betrachteten Prozessstufe nur zu einem Ausbringungsverlust führt, wenn die Dauer der latenten Phase kleiner als die Summe aus Stillstandsdauer und Nachwirkzeit ist. Ist die Dauer der latenten Phase hingegen größer, führt dies zu einem negativen Wert für den Ausbringungsverlust. In diesem Fall kann der Stillstand vollständig kompensiert werden, sodass die Referenzprozessstufe stets entsprechend ihrer Taktzeit produzieren kann. Eine Auswirkung auf die Ausbringung des Gesamtsystems ist folglich nicht gegeben, weswegen ein negativer Wert letztendlich einem Ausbringungsverlust $AV_{PS_m}(b)$ von null entspricht.

Sollte die Referenzprozessstufe ebenfalls zu den zu priorisierenden Prozessstufen gehören, dann kann der Ausbringungsverlust unabhängig davon, ob die Referenzprozessstufe eine einfache oder eine redundante Stufe ist, mit Formel 4.42 berechnet werden, wobei in diesem Fall die Nachwirkzeit sowie die Dauer der latenten Phase, wie bereits erläutert, dem Wert Null entsprechen.

Ausbringungsverlust für eine redundante Prozessstufe

Im Gegensatz zu Stillständen an einfachen Prozessstufen reißt der Materialfluss bei Stillständen an redundanten Prozessstufen nicht komplett ab. Zwar verringert sich der Durchsatz einer redundanten Prozessstufe aufgrund der stillstehenden Prozesse, allerdings werden entsprechend der repräsentativen Zykluszeit $ZZ_{rep PS_m}$ weiterhin noch Werkstücke produziert. Dies ist ebenfalls bei der Berechnung des Ausbringungsverlustes $AV_{PS_m}(b)$ einer redundanten Prozessstufe $PS_m \in U$ zu berücksichtigen:

$$\begin{aligned}
 AV_{PS_m}(b) & \\
 &= SD_{PS_m}(b) + \Delta t_{Nachwirkzeit PS_m} - \Delta t_{latente Phase PS_m} - \Delta t_{produktiv PS_m}
 \end{aligned}
 \tag{4.43}$$

Der Ausbringungsverlust verringert sich somit um die Zeitdauer, in der die Referenzprozessstufe die Werkstücke produziert, die durch die betriebsbereiten Prozesse der redundanten Prozessstufe fertiggestellt werden. In Abbildung 50 ist dieser Zusammenhang für eine stromaufwärts zur Referenzprozessstufe gelegene redundante Prozessstufe schematisch dargestellt.

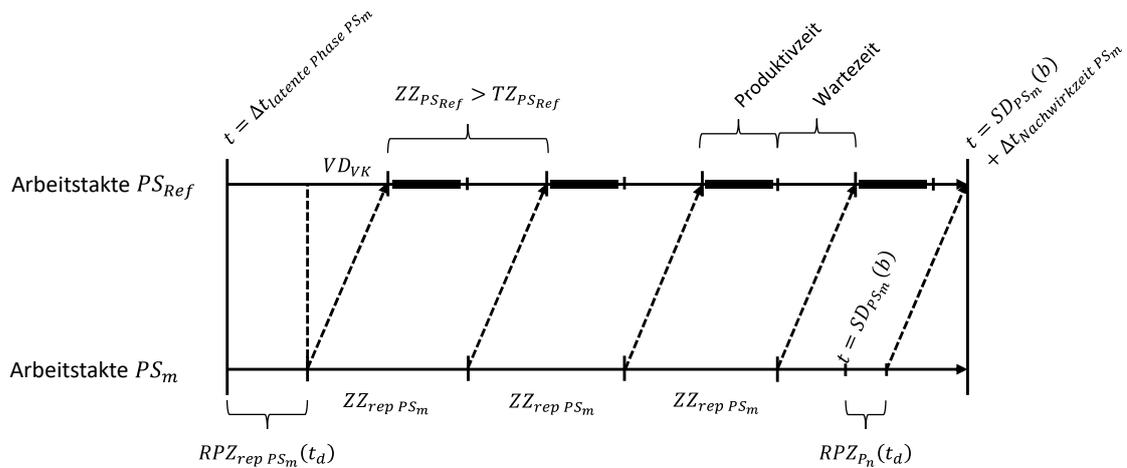


Abbildung 50: Schematische Darstellung des Ausbringungsverlusts bei einer stromaufwärts gelegenen redundanten Prozessstufe

Zum Zeitpunkt $t = \Delta t_{latente Phase PS_m}$ endet die latente Phase des Stillstandes der redundanten Prozessstufe und die manifeste Phase schließt sich an. Somit wirkt sich ab diesem Zeitpunkt der Stillstand auf den Durchsatz der Referenzprozessstufe und damit auf die Ausbringung des gesamten Fließfertigungssystems aus. Die Referenzprozessstufe erhält allerdings nach Ablauf der Restprozesszeit $RPZ_{rep PS_m}(t_d)$ der betrachteten Prozessstufe sowie der Verzögerungsdauer VD_{VK} des Verkettungselements aufgrund der betriebsbereiten produzierenden Prozesse der redundanten Prozessstufe ein weiteres Werkstück zur Bearbeitung. Bis zum Ende der manifesten Phase zum Zeitpunkt $t = SD_{PS_m}(b) + \Delta t_{Nachwirkzeit PS_m}$ folgen entsprechend der Zykluszeit $ZZ_{rep PS_m}$ der betrachteten Prozessstufe weitere Werkstücke. Dabei ist die Zykluszeit der Referenzprozessstufe nun identisch der Zykluszeit der betrachteten Prozessstufe, wobei sich die Zykluszeit $ZZ_{PS_{Ref}}$ aus einer Produktivzeit und einer Wartezeit zusammensetzt. Die Produktivzeit ist hier die Zeitspanne, in der die Referenzprozessstufe entsprechend ihrer Taktzeit produziert. Die Wartezeit beschreibt hingegen die Zeitspanne, in der die Referenzprozessstufe auf das nächste Werkstück warten muss und sich somit in einem Sekundärstillstand befindet.

Zur Berechnung des Ausbringungsverlustes müssen nun die Produktivzeiten während der manifesten Phase ermittelt und entsprechend der Formel 4.43 berücksichtigt werden. Dazu wird zunächst die Zeitspanne $\Delta t_{Zyklus\ PS_m}$ berechnet, in der die Referenzprozessstufe entsprechend der Zykluszeit der betrachteten Prozessstufe produziert:

$$\begin{aligned} \Delta t_{Zyklus\ PS_m} &= SD_{PS_m}(b) + \Delta t_{Nachwirkzeit\ PS_m} - \Delta t_{latente\ Phase\ PS_m} - RPZ_{rep\ PS_m}(t_d) \\ &\quad - VD_{VK} \end{aligned} \quad (4.44)$$

Die Verzögerungsdauer des Verkettungselements muss dabei nur bei stromaufwärtsgelegener Prozessstufe PS_m berücksichtigt werden, bei stromabwärtsgelegener Prozessstufe entfällt diese.

Die Anzahl an Werkstücken p , die in dieser Zeitspanne am Einlauf der Referenzprozessstufe zur Verfügung stehen, wird wie folgt berechnet, wobei die Division aufgrund der diskreten Zustandsänderungen als Ganzzahldivision auszuführen ist:

$$p = \Delta t_{Zyklus\ PS_m} \text{ div } ZZ_{rep\ PS_m} \quad (4.45)$$

Abschließend ist noch die Länge des letzten Arbeitstaktes der Referenzprozessstufe Δt_{Rest} , bei dem die Zykluszeit ZZ_{PSRef} noch größer als die Taktzeit TZ_{PSRef} und dessen Ende durch das Ende der manifesten Phase charakterisiert ist, zu ermitteln:

$$\Delta t_{Rest} = \Delta t_{Zyklus\ PS_m} - (p * ZZ_{rep\ PS_m}) \quad (4.46)$$

Die Zeitspanne $\Delta t_{produktiv\ PS_m}$ zur Berechnung des Ausbringungsverlusts für eine redundante Prozessstufe nach Formel 4.43 ergibt sich schließlich abhängig von der Länge des letzten Arbeitstaktes zu:

- **Fall A:** $\Delta t_{Rest} < TZ_{PSRef}$

Ist die Länge des letzten Arbeitstaktes kleiner als die Taktzeit der Referenzprozessstufe, so entsteht im letzten Arbeitstakt keine weitere Wartezeit:

$$\Delta t_{produktiv\ PS_m} = p * TZ_{PSRef} - \Delta t_{Rest} \quad (4.47)$$

- **Fall B:** $\Delta t_{Rest} \geq TZ_{PS_{ref}}$

Ist die Länge des letzten Arbeitstaktes hingegen größer als die Taktzeit der Referenzprozessstufe, entsteht weitere Wartezeit, nachdem das Werkstück fertiggestellt wurde:

$$\Delta t_{produktiv\ PS_m} = p * TZ_{PS_{Ref}} - TZ_{PS_{Ref}} \quad (4.48)$$

Mit den Formeln 4.42 und 4.43 ist es somit möglich, den Ausbringungsverlust $AV_{PS_m}(b)$ für einfache wie auch redundante Prozessstufen zu berechnen. Nachdem für die betrachtete Behebungsreihenfolge b die einzelnen Ausbringungsverluste $AV_{PS_m}(b)$ für alle zu priorisierenden Prozessstufen $PS_m \in U$ bestimmt wurden, entspricht der Ausbringungsverlust $AV(b)$ der Behebungsreihenfolge b dem Maximum aller Ausbringungsverluste der einzelnen Prozessstufen $AV_{PS_m}(b)$. Nachdem der Ausbringungsverlust auf diese Weise für jede mögliche Behebungsreihenfolge berechnet wurde, kann im nächsten Schritt die Teilpriorisierungsreihenfolge bestimmt werden.

Schritt 6.6: Auswahl der Teilpriorisierungsreihenfolge

Ist der Ausbringungsverlust für alle möglichen Behebungsreihenfolgen berechnet, kann die Teilpriorisierungsreihenfolge für die insgesamt $|U|$ Prozessstufen bestimmt werden. Diese entspricht nach Formel 4.11 der Behebungsreihenfolge mit dem kleinsten Wert für den Ausbringungsverlust. Sollten mehrere Behebungsreihenfolgen dabei den minimalen Wert aufweisen, so sind diese Reihenfolgen im Sinne der Auswirkung auf die Ausbringung des Fließfertigungssystems identisch. Eine definierte Auswahl kann hier wieder über eine FCFS-Regel realisiert werden, wobei die Teilpriorisierungsreihenfolge die Behebungsreihenfolge ist, deren am höchsten priorisierter Stillstand zeitlich am frühesten eingetreten ist.

Schritt 7: Vorgehen C zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

Im letzten Schritt wird schließlich die finale Priorisierungsreihenfolge auf Prozessebene unter Berücksichtigung der Teilpriorisierungsreihenfolge aus Schritt 6 sowie den Prozessstufen mit stillstehenden Prozessen aus Schritt 4, deren repräsentative Zykluszeit kleiner oder gleich der Taktzeit der Referenzprozessstufe ist, ermittelt (Abbildung 51).

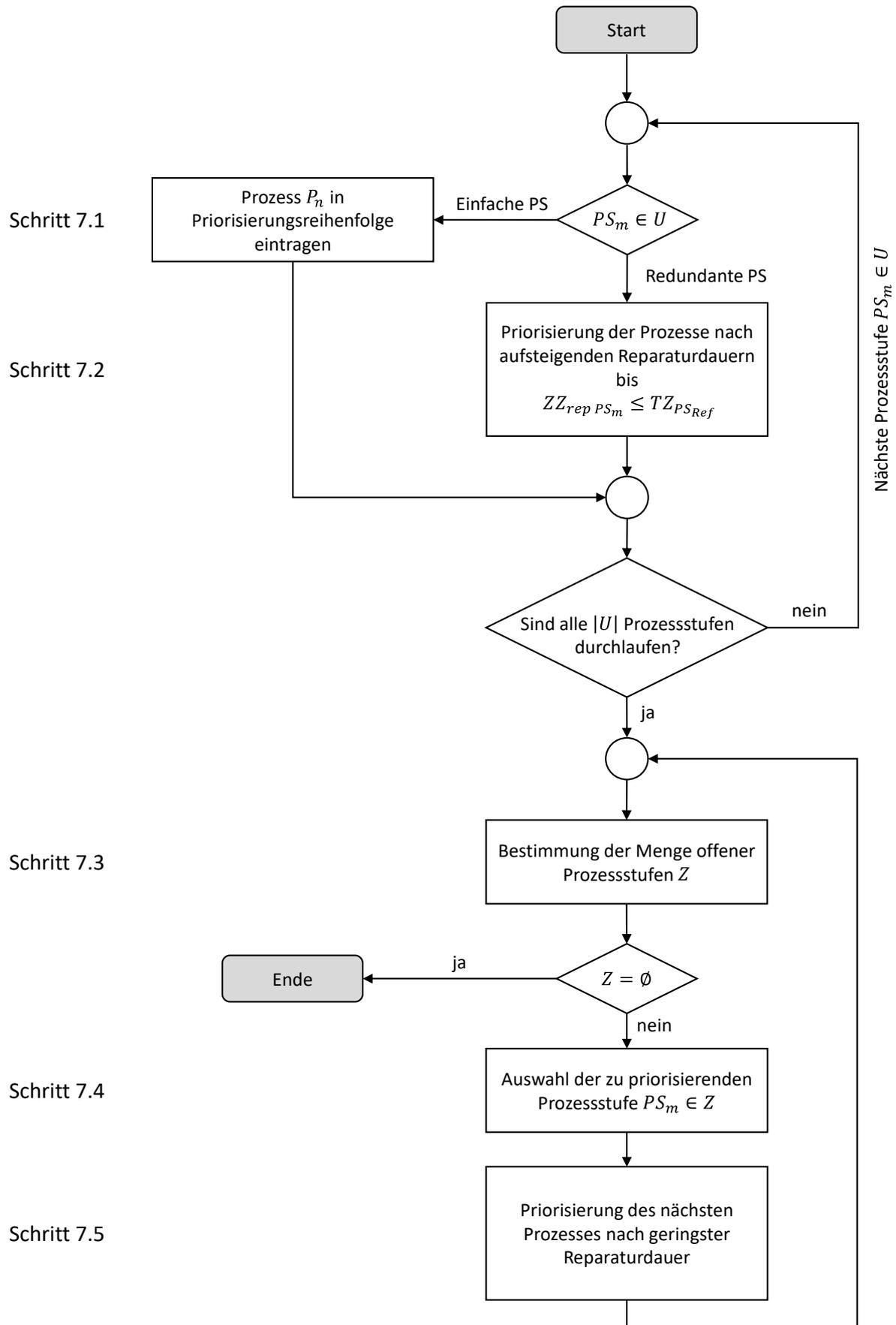


Abbildung 51: Vorgehen C zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

Schritt 7.1: Differenzierung nach einfachen und redundanten Prozessstufen

Zunächst werden alle Prozessstufen der Menge U entsprechend der in Schritt 6 ermittelten Teilpriorisierungsreihenfolge, beginnend mit der am höchsten priorisierten Prozessstufe, in die finale Priorisierungsreihenfolge übernommen. Dazu muss unterschieden werden, ob es sich bei der jeweiligen Prozessstufe $PS_m \in U$ um eine einfache oder um eine redundante Prozessstufe handelt. Ist PS_m eine einfache Prozessstufe, so kann der stillstehende Prozess dieser Stufe P_n direkt in die Priorisierungsreihenfolge an der nächsten Stelle einsortiert werden. Handelt es sich hingegen um eine redundante Prozessstufe, so wird Schritt 7.2 ausgeführt.

Schritt 7.2: Priorisierung der Prozesse nach aufsteigenden Reparaturdauern

In diesem Schritt werden die stillstehenden Prozesse einer redundanten Prozessstufe mittels den Reparaturdauern der Prozesse sowie der repräsentativen Zykluszeit der Prozessstufe der finalen Priorisierungsreihenfolge zugeordnet. Dazu werden die stillstehenden Prozesse der Prozessstufe nach aufsteigenden Reparaturdauern sortiert und, beginnend mit dem Prozess mit der geringsten Reparaturdauer, schrittweise der Priorisierungsreihenfolge hinzugefügt. Nach jedem neu hinzugefügten Prozess wird die repräsentative Zykluszeit der Prozessstufe $ZZ_{rep\ PS_m}$ aus allen betriebsbereiten sowie bereits der Priorisierungsreihenfolge hinzugefügten Prozessen nach Formel 4.3 berechnet. Solange die iterativ berechnete repräsentative Zykluszeit der Prozessstufe größer als die Taktzeit der Referenzprozessstufe ist, wird die Priorisierungsreihenfolge mit den Prozessen entsprechend den Reparaturdauern ergänzt. Sobald die Zykluszeit $ZZ_{rep\ PS_m}$ kleiner oder gleich der Taktzeit $TZ_{PS_{Ref}}$ ist, werden etwaige noch offene, nicht priorisierte Prozesse dieser Stufe zwischengespeichert. Auf diese wird in Schritt 7.3 weiter eingegangen.

Schritte 7.3 bis 7.5

Da das Vorgehen der Schritte 7.3 bis 7.5 analog zum Vorgehen der bereits beschriebenen Schritte 5.3 bis 5.5 ist, wird an dieser Stelle auf die bestehende Beschreibung des Schrittes 5 verwiesen.

4.4 Fazit

In diesem Kapitel wurde das Grundproblem der Priorisierung ungeplant eintretender Stillstände näher betrachtet. Dazu wurde anhand eines einfachen Beispielmotors eines Fließfertigungssystems dargestellt, welche grundsätzlichen Handlungsalternativen ein Mitarbeiter zur Behebung von Stillständen hat und welche Auswirkungen unterschiedliche Behebungsreihenfolgen auf die Ausbringung und damit auf die Produktionsleistung eines Fließfertigungssystems haben. Das daraus resultierende Reihenfolgenoptimierungsproblem wurde hier zunächst

als reines Online-Optimierungsproblem aufgefasst, wobei folglich nur die zum Entscheidungszeitpunkt zu priorisierenden Stillstände als Eingabedaten bekannt waren. Zur Lösung dieses Optimierungsproblems und der damit verbundenen Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge wurden zwei Vorgehensweisen vorgestellt.

Bei der simulationsbasierten Vorgehensweise zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge, die auf dem Prinzip eines simulationsbasierten Optimierungssystems beruht, konnte zunächst gezeigt werden, dass die behebungsbereitstellungsreihenfolgeabhängigen Unterschiede in der Ausbringungsmenge identisch mit den Unterschieden in der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe sind, wobei die Referenzprozessstufe in dieser Arbeit die Stufe mit der höchsten (repräsentativen) Taktzeit in einer Prozesskette ist. Darüber hinaus wurde ein Vorgehen vorgestellt, mit dem der Simulationsendzeitpunkt dynamisch für jede Priorisierungsentscheidung berechnet werden kann. Dabei stellt der Simulationsendzeitpunkt den frühestmöglichen Vergleichszeitpunkt dar, ab dem sich die Auswirkungen aller zu priorisierender Stillstände in der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe realisiert haben. Diese simulationsbasierte Vorgehensweise bietet somit die Möglichkeit, auf effiziente Weise die ausbringungsoptimale Behebungsreihenfolge ungeplant eintretender Stillstände in komplexen Fließfertigungssystemen zu ermitteln.

Um die komplexen Wechselwirkungen mehrerer Stillstände auf den Materialfluss eines Fließfertigungssystems besser zu verstehen und damit die theoretische Grundlage für den in Kapitel 5 aufzuzeigenden Zusammenhang zwischen der Priorisierung ungeplanter Stillstände und der Auswirkung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten aufzubauen, wurde zudem eine analytische Vorgehensweise zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge hergeleitet. Dazu wurde der Ausbringungsverlust als Zeitspanne definiert, in der die Referenzprozessstufe aufgrund von Stillstandszeiten oder Wartezeiten nicht produzieren kann. Stillstandszeiten resultieren dabei aus Primärstillständen an der Referenzprozessstufe. Liegt hingegen ein Primärstillstand an einer anderen Prozessstufe in der Prozesskette an, so kann dieser zu Wartezeit aufgrund fehlender Werkstücke am Einlauf oder eines blockierten Auslaufs und damit zu einem Sekundärstillstand der Referenzprozessstufe führen. Mit Hilfe der analytischen Vorgehensweise kann letztendlich die Behebungsreihenfolge als Priorisierungsreihenfolge ermittelt werden, die den geringsten Ausbringungsverlust erzeugt und damit die höchste Ausbringung eines mehrdimensionalen, verketteten Fließfertigungssystems erzielt. Diese Vorgehensweise eignet sich dabei auch für Fließfertigungssysteme, deren Komplexitätsgrad eine simulationsbasierte Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge nicht unbedingt erforderlich macht. Allerdings wird sich im weiteren Verlauf dieser Arbeit zeigen, dass die analytische Vorgehensweise bei Fließfertigungssystemen, die u. a. aus mehreren redundanten Prozessstufen bestehen, an ihre Grenzen stößt.

Die in diesem Kapitel gewonnenen Erkenntnisse bilden schließlich die Grundlage für das Verständnis des nächsten Kapitels, in dem die Erweiterung des Grundproblems der Priorisierung ungeplant eintretender Stillstände durch Einbeziehung von Informationen über zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten und damit die Betrachtung als Online-Optimierungsproblem mit Lookahead behandelt wird.

5 Lookahead zur Berücksichtigung geplanter Stillstandszeiten

In diesem Kapitel wird das Grundproblem der Priorisierung von Stillständen in komplexen Fließfertigungssystemen erweitert, indem zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten als weitere Information in Form eines Lookahead in die Priorisierungsentscheidung miteinbezogen werden. Auf Basis der Erkenntnisse des vierten Kapitels wird dazu zunächst der grundsätzliche Zusammenhang zwischen der Priorisierung von Stillständen und der Auswirkung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten aufgezeigt. Daraus wird schließlich eine Vorgehensweise abgeleitet, die die simulationsbasierte Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge unter Berücksichtigung eines Lookahead auch für komplexe Fließfertigungssysteme ermöglicht.

5.1 Problembeschreibung und Ansatz

Bei dem hier betrachteten Szenario liegen, wie bereits bei der Betrachtung in Kapitel 4, wieder mehrere Stillstände zeitlich parallel an, sodass die Anzahl an Stillständen größer als die Anzahl an Mitarbeitern, die zur Stillstandsbehebung zur Verfügung stehen, ist. Die Stillstände müssen folglich priorisiert werden, wobei die Priorisierungsreihenfolge weiterhin so zu bestimmen ist, dass eine möglichst hohe Ausbringung des Fließfertigungssystems erreicht wird.

Im Unterschied zum reinen Online-Fall, bei dem nur die aktuell anliegenden Stillstände als Eingangsdaten für das Optimierungsproblem zur Verfügung stehen, sind nun weitere Informationen in Form eines Lookahead zum Entscheidungszeitpunkt t_d verfügbar. Diese Informationen beziehen sich dabei auf zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten, die durch einen festen Eintrittszeitpunkt sowie eine geplante Stillstandsdauer charakterisiert sind. Geplante Stillstandszeiten resultieren aus der zunehmenden Anwendung einer zustandsbasierten, vorausschauenden Instandhaltungsstrategie (vgl. Kapitel 2.2.1), die zum Ziel hat, den zeitlichen Verlauf des Abnutzungsvorrats von Produktionsressourcen zu prognostizieren und so frühzeitig Instandhaltungsbedarfe zu ermitteln. Das Ergebnis dieser Strategie sind somit planbare Instandhaltungsmaßnahmen, die neben periodisch durchzuführenden Maßnahmen, resultierend aus klassischen Wartungsplänen, als zusätzliche Information zur Verfügung stehen. Im Folgenden sollen nun die Informationen über geplante Stillstandszeiten in Form eines Lookahead in die Priorisierungsentscheidung einfließen.

Dazu wird der in Kapitel 4 vorgestellte Ansatz verwendet, bei dem die zu priorisierenden Stillstände in ein Reihenfolgenoptimierungsproblem transformiert werden. Dabei werden die bereits gewonnenen Erkenntnisse berücksichtigt, sodass die Formulierung des Reihenfolgenoptimierungsproblems mit der zu maximierenden Zielgröße Durchsatzmenge wie folgt beschrieben werden kann (vgl. Hegemann und Nickel 2020: 336):

$$\text{Max} \rightarrow \text{Durchsatzmenge} = \max_{k=1}^L D(k) \quad (5.1)$$

Bei dieser Formulierung beschreibt L die Gesamtanzahl möglicher Behebungsreihenfolgen (vgl. Formel 4.1) und $D(k)$ die erzielte Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe mit der Behebungsreihenfolge k . Gesucht ist schließlich die Behebungsreihenfolge, die im Vergleich zu den möglichen Reihenfolgen die größte Durchsatzmenge erzielt. Diese Behebungsreihenfolge entspricht schließlich der Priorisierungsreihenfolge.

5.2 Zusammenhang zwischen der Priorisierung ungeplanter Stillstände und der Auswirkung geplanter Stillstandszeiten

Da auch geplante Stillstände, insbesondere in hoch ausgelasteten und im Dreischichtbetrieb produzierenden Fließfertigungssystemen, zu Produktionsverlusten führen können, wird im Folgenden der Zusammenhang zwischen der Priorisierung von Stillständen und der Auswirkung geplanter Stillstandszeiten analysiert. Dazu wird hergeleitet, wie die Auswirkung von zukünftig eintretenden geplanten Stillständen durch eine Priorisierung ungeplant eingetretener Stillstände bereits zum Entscheidungszeitpunkt t_d beeinflusst werden kann.

5.2.1 Einführendes Beispiel

Zur Verdeutlichung des Zusammenhangs zwischen der Priorisierung und der Auswirkung geplanter Stillstandszeiten wird das in Kapitel 4.1 eingeführte Beispiel einer einzelnen Priorisierungsentscheidung zum Entscheidungszeitpunkt t_d für ein eindimensionales Fließfertigungssystem (vgl. Abbildung 31) erweitert (vgl. Hegemann und Nickel 2019: 556). Dabei bleiben grundsätzlich alle beschriebenen Randbedingungen bestehen, sodass die für dieses Beispiel verwendeten Werte weiterhin der Tabelle 1 entnommen werden können.

Beide Prozesse stehen zum Zeitpunkt t_d still, sodass der Mitarbeiter wieder entscheiden muss, welcher der Prozesse als Erstes instandgesetzt wird. Dabei steht nun als zusätzliche Information bereits zum Zeitpunkt t_d fest, dass für den Prozess P_1 ein geplanter Stillstand vorgesehen ist. Der Eintrittszeitpunkt dieses Stillstandes sei dabei zum Zeitpunkt $t = 500$ s terminiert und die geplante Stillstandsdauer mit 300 s angenommen.

Da auch in diesem erweiterten Beispiel zum Entscheidungszeitpunkt nur zwei zu priorisierende Stillstände vorliegen, ergeben sich weiterhin zwei mögliche Behebungsreihenfolgen. Für jede Behebungsreihenfolge wird wieder ein Simulationslauf durchgeführt, bei dem die Prozesse entsprechend der jeweiligen Reihenfolge instandgesetzt werden, wobei nun zusätzlich der geplante Stillstand berücksichtigt wird, indem der Prozess P_1 nach 500 s Simulationszeit für weitere

300 s Simulationszeit stillsteht. Die Priorisierungsreihenfolge entspricht schließlich der Behebungsreihenfolge mit dem größten Wert für die Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe zum Vergleichszeitpunkt bzw. Simulationsendzeitpunkt T_{Ende} . Da in diesem Beispiel beide Prozesse die gleiche Taktzeit aufweisen, ist die am weitesten stromabwärtsgelegene Prozessstufe und somit der Prozess P_2 die Referenzprozessstufe.

In Abbildung 52 ist schließlich die kumulierte Durchsatzmenge des Prozesses P_2 über der Simulationszeit für die beiden möglichen Behebungsreihenfolgen dargestellt. Der Simulationsendzeitpunkt wurde dabei bei $T_{Ende} = 1140$ s belassen.

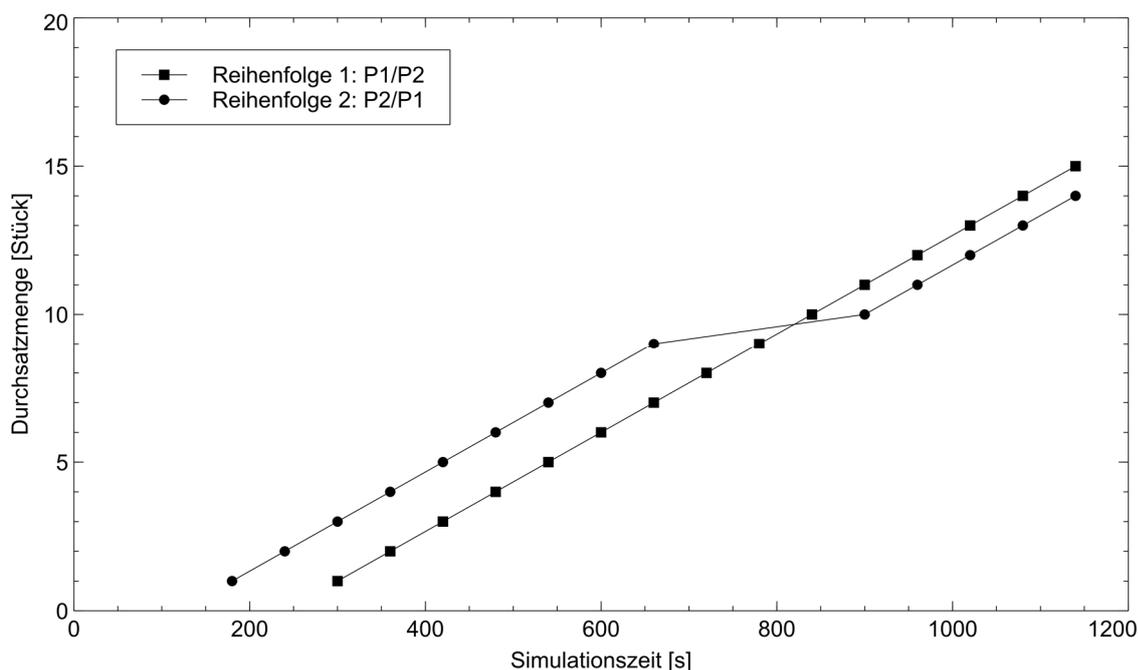


Abbildung 52: Systemverhalten für das 2P-1VK Modell mit Lookahead

Der zeitliche Verlauf der Durchsatzmenge mit der Sequenz $Seq_2 = P_2 \rightarrow P_1$ zeigt dabei deutlich die Auswirkung des geplanten Stillstandes, der in der Zeitspanne von 500 s bis 800 s an Prozess P_1 anliegt. Im Gegensatz dazu ist eine Auswirkung dieses Stillstandes bei der Sequenz $Seq_1 = P_1 \rightarrow P_2$ nicht zu erkennen. Wird ferner die nach 1140 s erzielbare Durchsatzmenge betrachtet, so beträgt diese mit der Sequenz Seq_1 insgesamt 15 Werkstücke und mit der Sequenz Seq_2 14 Werkstücke. Somit ist die Sequenz Seq_1 aufgrund des höheren Durchsatzes der Referenzprozessstufe die Priorisierungsreihenfolge, sodass der Stillstand an Prozess P_1 höher zu priorisieren ist als der Stillstand an Prozess P_2 . Folglich sollte unter Berücksichtigung des Lookahead der Stillstand an P_1 als Erstes behoben werden.

5.2.2 Grundprinzip des Gesamtausbringungsverlustes

Wie dieses Beispiel zeigt, kann die Einbeziehung zusätzlicher Informationen über geplante Stillstandszeiten in Form eines Lookahead zu einer anderen Priorisierungsentscheidung als im reinen Online-Fall führen (vgl. Kapitel 4.2.1). Im Folgenden wird nun hergeleitet, wie die Auswirkung zukünftig eintretender geplanter Stillstände auf die Produktionsleistung eines verketteten Fließfertigungssystems durch die Priorisierung ungeplanter Stillstände beeinflusst werden kann.

Wie bereits bei der Berechnung des Ausbringungsverlustes in Kapitel 4.3.2 gezeigt, kommt es zu Produktionsverlusten, sobald die Referenzprozessstufe aufgrund eines Primär- oder Sekundärstillstandes nicht entsprechend ihrer Taktzeit $TZ_{PS_{Ref}}$ produzieren kann. Ein Primärstillstand an der Referenzprozessstufe führt dabei direkt zu einem Verlust, während ungeplante wie auch geplante Stillstände an anderen Prozessstufen in Abhängigkeit vorhandener Pufferkompensation erst verzögert zu Sekundärstillständen der Referenzprozessstufe führen können. Ein Sekundärstillstand tritt auf, wenn die Referenzprozessstufe keine neuen Werkstücke am Einlauf zur Verfügung hat oder, wenn die Referenzprozessstufe fertig bearbeitete Werkstücke aufgrund eines blockierten Auslaufs nicht weitergeben kann. Die Länge des Sekundärstillstandes und damit der Ausbringungsverlust ist dabei von der Dauer der latenten Phase, d. h. der Zeitspanne, in der die Referenzprozessstufe entsprechend ihrer Taktzeit nach Eintritt eines Primärstillstandes an einer stromaufwärts- oder stromabwärtsgelegenen Prozessstufe noch Werkstücke fertigstellen kann, abhängig. Die Dauer der latenten Phase wird ferner maßgeblich durch die vorhandene Pufferkompensation der Produktionsressourcen, wie Verkettungselemente oder auch Prozesse, zwischen der Prozessstufe, an der ein Primärstillstand anliegt, und der Referenzprozessstufe bestimmt. Folglich bedeutet dies für eine Prozessstufe, die stromaufwärts zur Referenzprozessstufe innerhalb der Prozesskette angeordnet ist, dass je größer die Anzahl an Werkstücken in diesem Bereich zum Eintrittszeitpunkt des Stillstandes ist, desto größer ist auch die Dauer der latenten Phase und desto geringer ist generell die Auswirkung dieses Stillstandes auf die Ausbringung des gesamten Fließfertigungssystems. Im Gegensatz dazu gilt für eine Prozessstufe, die stromabwärts zur Referenzprozessstufe gelegen ist, dass je geringer die Anzahl an Werkstücken in diesem Bereich zum Eintritt des Stillstandes ist, desto größer ist auch hier die Dauer der latenten Phase und desto geringer ist folglich die Auswirkung auf das Gesamtsystem.

Ist die Pufferkompensation ausreichend, so überwiegt die latente Phase im Extremfall sogar die Stillstandsdauer sowie die Nachwirkzeit eines Primärstillstandes an einer Prozessstufe, sodass es zu keinem Sekundärstillstand an der Referenzprozessstufe kommt. Diese Stillstände, die keine manifeste Phase aufweisen, haben somit keine Auswirkung auf die Produktionsleistung des Fließfertigungssystems und stellen damit auch keinen Engpass dar (vgl. Kapitel 2.1.3).

Um den Produktionsverlust eines Fließfertigungssystems durch geplante Stillstände zu minimieren, muss folglich die Anzahl an Werkstücken in den Bereichen der Prozesskette zwischen der jeweils vom Stillstand betroffenen Prozessstufe und der Referenzprozessstufe so beeinflusst werden, dass zum Zeitpunkt des Stillstandseintritts eine ausreichend hohe Pufferkompensation und damit eine entsprechend lange Dauer der latenten Phase gegeben ist. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass dies nicht für einen geplanten Stillstand an der Referenzprozessstufe gilt, da hier ein Primärstillstand ohne Auftreten einer latenten Phase direkt zu einem Ausbringungsverlust führt (vgl. Kapitel 4.3.2).

Bei der Herleitung der simulationsbasierten Vorgehensweise zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge für den reinen Online-Fall wurde außerdem gezeigt, dass die Stillstandsdauer durch die Priorisierungsreihenfolge beeinflusst wird (vgl. Formel 4.10). Je länger ein Stillstand dabei andauert, desto größer ist die Anzahl der benachbarten Prozessstufen, die in einen Sekundärstillstand versetzt werden. Dies bedeutet, dass ein Primärstillstand an einer Prozessstufe bei entsprechend langer Stillstandszeit sämtliche Prozessstufen und deren Prozesse innerhalb einer Prozesskette in einen Sekundärstillstand versetzen kann. Dies schließt insbesondere die Referenzprozessstufe sowie die Prozessstufen mit zukünftig eintretenden geplanten Stillstandszeiten ein.

Über die behebugreihenfolgenabhängige Stillstandsdauer kann also beeinflusst werden, ob die Referenzprozessstufe, aber auch, ob eine Prozessstufe mit geplanter Stillstandszeit in einen Sekundärstillstand gezwungen wird. Dabei hat ein Sekundärstillstand zur Folge, dass sich der Durchsatz dieser Prozessstufe verringert und sich damit letztendlich, je nach räumlicher Lage, mehr oder weniger Werkstücke zwischen dieser Prozessstufe und der Referenzprozessstufe zum Eintrittszeitpunkt des geplanten Stillstandes befinden. Folglich sind auch die Dauer der latenten Phase und somit die Auswirkung eines geplanten Stillstandes beeinflussbar, sodass es einen direkten Zusammenhang zwischen der Priorisierung ungeplanter Stillstände und der Auswirkung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten auf die Produktionsleistung eines verketteten Fließfertigungssystems gibt.

Übertragen auf das hier betrachtete Reihenfolgenoptimierungsproblem ist auch bei einer Berücksichtigung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten die Behebungsreihenfolge gesucht, bei der die Referenzprozessstufe die geringste Zeitspanne aufweist, in der sie aufgrund eines Primärstillstandes oder eines Sekundärstillstandes nicht entsprechend der Taktzeit TZ_{PSRef} produzieren kann und sich somit ein Ausbringungsverlust einstellt:

$$\text{Min} \rightarrow \text{Gesamtausbringungsverlust} = \min_{k=1}^k AV_{ges}(k) \quad (5.2)$$

Der Gesamtausbringungsverlust $AV_{ges}(k)$ einer Behebungsreihenfolge k setzt sich dabei aus dem mit dieser Reihenfolge erzielbaren Ausbringungsverlust $AV(k)$ aufgrund der zum Entscheidungszeitpunkt t_d zu priorisierenden Stillstände (vgl. Kapitel 4.3.2) sowie der Summe der Ausbringungsverluste $AV_{Lookahead P_n}(k)$, die aufgrund der zukünftig eintretenden geplanten Stillstände an den Prozessen $P_n \in F$ entstehen und deren Auswirkungen ebenfalls von der Behebungsreihenfolge abhängig sind, zusammen:

$$AV_{ges}(k) = AV(k) + \sum_{i \in F} AV_{Lookahead i}(k) \quad (5.3)$$

Die Menge F beinhaltet dabei sämtliche Prozesse P_n , für die zum Entscheidungszeitpunkt zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten bekannt sind.

Der beschriebene Zusammenhang wird nachfolgend an dem im Kapitel 5.2.1 vorgestellten Beispiel einer eindimensionalen Prozesskette mit zwei Prozessen und einem Verkettungselement verdeutlicht. Die Randbedingungen sowie die verwendeten Werte bleiben weiterhin unverändert. Der Ausbringungsverlust der zum Entscheidungszeitpunkt t_d zu priorisierenden Stillstände $AV(k)$ wurde bereits in Kapitel 4.3.1 für die beiden möglichen Behebungsreihenfolgen berechnet und ist Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Ausbringungsverlust und Gesamtausbringungsverlust für das 2P-1VK Modell

| | $k = 1$ | $k = 2$ |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Seq_k | $P_1 \rightarrow P_2$ | $P_2 \rightarrow P_1$ |
| $AV(k)$ | 240 s | 120 s |
| AV_{P_1} | 0 s | 180 s |
| $AV_{ges}(k)$ | 240 s | 300 s |

Zur Priorisierung soll nun der resultierende Gesamtausbringungsverlust für jede mögliche Behebungsreihenfolge berechnet werden, wobei dafür der Ausbringungsverlust des geplanten Stillstandes des Prozesses P_1 zum Zeitpunkt $t = 500$ s mit der geplanten Stillstandsdauer von 300 s zu berücksichtigen ist:

Gesamtausbringungsverlust der Sequenz $Seq_1 = P_1 \rightarrow P_2$

Um den Gesamtausbringungsverlust der Sequenz Seq_1 bzw. der Behebungsreihenfolge 1 zu bestimmen, muss zunächst der behebungsreihenfolgenabhängige Ausbringungsverlust des geplanten Stillstandes an Prozess P_1 ermittelt werden. Dazu ist in Tabelle 6 der mit der Sequenz Seq_1 resultierende Systemzustand zum Eintrittszeitpunkt des geplanten Stillstandes nach 500 s aufgeführt.

Tabelle 6: Systemzustand nach 500 s für Sequenz Seq_1

| | P_1 | VK_1 | P_2 |
|----------------------------|-------|---------|-------|
| $RPZ_i(t = 500 \text{ s})$ | 40 s | - | 40 s |
| $P_j(t = 500 \text{ s})$ | - | 6 Stück | - |

Wie bereits in Kapitel 4.3.2 erläutert, kommt es zu einem Ausbringungsverlust, wenn der Arbeitstakt der Referenzprozessstufe aufgrund von Wartezeiten oder Stillstandszeiten länger als die eigentliche Taktzeit $TZ_{PS_{Ref}}$ ist. Da in diesem Beispiel der Prozess P_2 die Referenzprozessstufe ist, kommt es hier zu einem Ausbringungsverlust, wenn P_2 aufgrund des geplanten Stillstandes an P_1 keine Werkstücke mehr am Einlauf zur Verfügung hat, d. h. sobald P_2 alle zum Zeitpunkt $t = 500 \text{ s}$ in der Verkettung VK_1 gelagerten Teile fertiggestellt hat. Der Wartezustand von P_2 endet schließlich wieder, sobald das erste Werkstück nach Ende des geplanten Stillstandes des Prozesses P_1 am Einlauf von P_2 verfügbar ist. Der Ausbringungsverlust $AV_{Lookahead P_1}(k = 1)$, der aus dem geplanten Stillstand des Prozess P_1 an der Referenzprozessstufe resultiert, folgt somit analog Formel 4.42 zu:

$$\begin{aligned} AV_{Lookahead P_1}(k = 1) \\ = SD_{P_1}(1) + \Delta t_{Nachwirkzeit P_1}(1) - \Delta t_{latente Phase P_1}(1) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Wie aus Formel 5.4 ersichtlich, sind nun die Dauer der latenten Phase sowie die Nachwirkzeit von der Behebungsreihenfolge abhängig. Dies liegt daran, dass die Berechnungen sich nicht mehr auf den Systemzustand zum Zeitpunkt t_d beziehen, der unabhängig von der Behebungsreihenfolge ist, sondern auf den Eintrittszeitpunkt des geplanten Stillstandes mit $t > t_d$, wobei der Systemzustand zum Zeitpunkt t von der Behebungsreihenfolge abhängig ist.

Die Stillstandsdauer $SD_{P_1}(1)$ beträgt 300 s, während sich die Nachwirkzeit nach Formel 4.39 mit den entsprechenden Werten aus Tabelle 6 wie folgt berechnet:

$$\Delta t_{Nachwirkzeit P_1}(k = 1) = RPZ_{P_1}(t = 500 \text{ s}) \quad (5.5)$$

Die Dauer der latenten Phase folgt analog Formel 4.16 mit den Werten für den Pufferfüllstand des Verkettungselements VK_1 sowie der Restprozesszeit der Referenzprozessstufe P_2 zum Zeitpunkt $t = 500 \text{ s}$ (Tabelle 6) zu:

$$\Delta t_{latente Phase P_1}(k = 1) = P_{VK_1}(t = 500 \text{ s}) * PZ_{P_2} + RPZ_{P_2}(t = 500 \text{ s}) \quad (5.6)$$

Somit folgt der Ausbringungsverlust des geplanten Stillstandes bei der Reihenfolge 1 zu:

$$AV_{Lookahead P_1}(k = 1) = 300 s + 40 s - 6 * 60 s - 40 s = - 60 s \quad (5.7)$$

Wie bereits erläutert, bedeutet ein negativer Ausbringungsverlust, dass die vorhandene Pufferkapazität ausreicht, um die Auswirkung des Stillstandes vollständig zu kompensieren. Ein Sekundärstillstand der Referenzprozessstufe tritt in diesem Fall nicht ein, sodass kein Ausbringungsverlust durch den geplanten Stillstand an Prozess P_1 mit dieser Behebungsreihenfolge entsteht. Der Gesamtausbringungsverlust $AV_{ges}(k = 1)$ der Sequenz $Seq_1 = P_1 \rightarrow P_2$ ergibt sich schließlich aus der Summe der einzelnen Ausbringungsverluste zu 240 s (Tabelle 5).

Gesamtausbringungsverlust der Sequenz $Seq_2 = P_2 \rightarrow P_1$

Der Gesamtausbringungsverlust der Sequenz Seq_2 bzw. der Behebungsreihenfolge 2 kann äquivalent zum Vorgehen bei der Sequenz Seq_1 berechnet werden, wobei sich nur der Systemzustand zum Zeitpunkt $t = 500 s$ aufgrund der anderen Behebungsreihenfolge der zu priorisierenden Stillstände ändert (Tabelle 7):

$$\begin{aligned} & AV_{Lookahead P_1}(k = 2) \\ & = SD_{P_1}(2) + \Delta t_{Nachwirkzeit P_1}(2) - \Delta t_{latente Phase P_1}(2) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Mit den Formeln 4.16 und 4.39 sowie den Werten aus Tabelle 7 folgt der Ausbringungsverlust des geplanten Stillstandes somit zu:

$$AV_{Lookahead P_1}(k = 2) = 300 s + 40 s - 2 * 60 s - 40 s = 180 s \quad (5.9)$$

Im Gegensatz zu Sequenz Seq_1 reicht bei dieser Reihenfolge in diesem Beispiel die verfügbare Pufferkapazität nicht aus, um einen Sekundärstillstand der Referenzprozessstufe aufgrund des Primärstillstandes des Prozesses P_1 zu verhindern. Folglich führt der geplante Stillstand zu einem Ausbringungsverlust von 180 s. Der Gesamtausbringungsverlust für die Sequenz $Seq_2 = P_2 \rightarrow P_1$ folgt wiederum als Summe der einzelnen Ausbringungsverluste zu 300 s (Tabelle 5).

Tabelle 7: Systemzustand nach 500 s für Sequenz Seq_2

| | P1 | VK1 | P2 |
|----------------------------|------|--------|------|
| $RPZ_i(t = 500 \text{ s})$ | 40 s | - | 40 s |
| $P_j(t = 500 \text{ s})$ | - | 2 Stk. | - |

Werden die berechneten Gesamtausbringungsverluste den aus der Simulation resultierenden Ergebnissen gegenübergestellt, zeigt sich ein übereinstimmendes Ergebnis (vgl. Kapitel 5.2.1). So beträgt die Differenz zwischen den Gesamtausbringungsverlusten 60 s, was übertragen auf eine Stückzahl bei einer Taktzeit von $TZ_{PS_{Ref}} = 60 \text{ s}$ einer Differenz der Ausbringungswerte von einem Werkstück entspricht. Somit wird mit $Seq_1 = P_1 \rightarrow P_2$ als Priorisierungsreihenfolge eine um ein Werkstück höhere Ausbringungsmenge erreicht, wenn zunächst der Stillstand an P_1 und danach erst der Stillstand an P_2 behoben wird (vgl. Abbildung 52).

Dieses Beispiel zeigt anschaulich, dass die Berücksichtigung eines zukünftig eintretenden geplanten Stillstandes in Form eines Lookahead zu einer anderen Priorisierungsreihenfolge ungeplanter Stillstände führen kann. Dabei sei insbesondere angemerkt, dass sich eine Reihenfolge als Priorisierungsreihenfolge herausstellen kann, die zwar zu einem größeren Ausbringungsverlust der zu priorisierenden Stillstände im Vergleich zu den anderen möglichen Behebungsreihenfolgen führt, allerdings führen die im Lookahead enthaltenen geplanten Stillstände mit dieser Behebungsreihenfolge zu geringeren Ausbringungsverlusten, sodass der Gesamtausbringungsverlust aller bei der Entscheidungsfindung berücksichtigter Stillstände letztendlich doch am geringsten ist.

5.3 Vorgehensweise zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge mit Lookahead

Im Folgenden wird nun eine systematische Vorgehensweise vorgestellt, mit der eine Priorisierungsentscheidung unter Berücksichtigung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten in Form eines Lookahead getroffen werden kann (vgl. Hegemann und Nickel 2020: 336-338). Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, muss zur Berechnung der Ausbringungsverluste der geplanten Stillstände der Systemzustand zum jeweiligen Stillstandseintrittszeitpunkt bekannt sein. Dieser ist insbesondere von der Behebungsreihenfolge der zu priorisierenden ungeplanten Stillstände sowie von den wechselseitigen Auswirkungen der geplanten Stillstände auf die davon betroffenen Prozessstufen sowie auf die Referenzprozessstufe abhängig. Da die erforderlichen Systemzustände zum Entscheidungszeitpunkt t_d nicht ohne Weiteres bekannt sind und eine analytische Ermittlung aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen in komplexen Fließfertigungssystemen

men nicht weiter verfolgt wird, soll die in Kapitel 4.2.2 vorgestellte simulationsbasierte Vorgehensweise zur Priorisierung ungeplanter Stillstände um die Berücksichtigung eines Lookahead erweitert werden. Als Grundlage dient dabei die in Abbildung 34 dargestellte Vorgehensweise, wobei im Folgenden nur auf Schritte eingegangen wird, die für eine Berücksichtigung des Lookahead angepasst werden müssen. Alle weiteren Schritte bleiben unverändert und werden bei der Anwendung dieser Vorgehensweise wie in Kapitel 4.2.2 vorgestellt ausgeführt.

Schritt 2: Ermittlung des Simulationsendzeitpunkts

Damit die Auswirkungen von allen geplanten Stillständen an den Prozessen, die im Rahmen des Lookahead in der Menge F enthalten sind, vollständig erfasst werden können, müssen alle durch diese Stillstandszeiten resultierenden Primär- bzw. Sekundärstillstände der Referenzprozessstufe im Simulationslauf abgebildet werden. Folglich kann der Simulationsendzeitpunkt als Zeitpunkt definiert werden, an dem nach Behebung aller in der Menge F enthaltener geplanter Stillstände die Referenzprozessstufe bei allen Behebungsreihenfolgen wieder einen Arbeitstakt äquivalent zu ihrer Taktzeit aufweist.

Um den Simulationsendzeitpunkt bereits zum Entscheidungszeitpunkt t_d zu bestimmen, wird zunächst der Stillstand eines Prozesses $P_n \in F$ ausgewählt, dessen Behebungszeitpunkt als Summe aus Stillstandseintrittszeitpunkt $T_{Start P_n}$ und geplanter Stillstandsdauer TTR_{P_n} am weitesten in der Zukunft liegt. Für diesen Stillstand des Prozesses P_n wird anschließend in Abhängigkeit der relativen Lage der zum Prozess P_n zugehörigen Prozessstufe PS_m zu der Referenzprozessstufe der Simulationsendzeitpunkt berechnet:

$$T_{Ende} = T_{Start P_n} + TTR_{P_n} + \Delta t_{Nachwirkzeit PS_m} + PZ_{PS_{Ref}} \quad (5.10)$$

Die ersten beiden Summanden in der Formel 5.10 beschreiben dabei das geplante Stillstandsende an dem betrachteten Prozess $P_n \in F$. Die Nachwirkzeit $\Delta t_{Nachwirkzeit PS_m}$ der zugehörigen Prozessstufe PS_m lässt sich für einen Stillstand an einer Prozessstufe, die stromaufwärts der Referenzprozessstufe liegt, als Durchlaufzeit des ersten bearbeiteten Werkstücks nach Instandsetzung von Prozess P_n bis zum Einlauf der Referenzprozessstufe PS_{Ref} berechnen:

$$\Delta t_{Nachwirkzeit PS_m} = DLZ_{P_n \rightarrow PS_{Ref}} = PZ_{P_n} + \sum_{i=PS_m+1}^{PS_{Ref}-1} PZ_i + \sum_{j=VK_m}^{VK_{Ref}-1} VD_j \quad (5.11)$$

Die Nachwirkzeit wird dabei grundsätzlich analog zu Formel 4.5 berechnet, wobei anstelle der Restprozesszeit des betrachteten Prozesses P_n die Prozesszeit verwendet wird. Dies ist nötig, da zum Entscheidungszeitpunkt t_d die Restprozesszeit zum Eintrittszeitpunkt des geplanten Stillstandes nicht bekannt ist. Durch die Abschätzung mit der Prozesszeit ist schließlich sichergestellt, dass das erste Werkstück des Prozesses P_n nach Durchführung des geplanten Stillstandes auf jeden Fall zum Simulationsendzeitpunkt T_{Ende} von der Referenzprozessstufe bearbeitet wurde, sodass sich nach dieser Zeit auch die Auswirkung des Stillstandes vollständig in der Durchsatzmenge niedergeschlagen hat.

Neben der Prozesszeit setzt sich die Nachwirkzeit aus der Summe der Prozesszeiten aller Prozessstufen zwischen der Prozessstufe PS_m und der Referenzprozessstufe, wobei die Prozesszeit des betrachteten Prozesses P_n nicht miteinbezogen wird, sowie der Summe aller Verzögerungsdauern der Verkettungselemente zwischen PS_m und PS_{Ref} zusammen. Sollten dabei redundante Prozessstufen vorliegen, wird weiterhin als Abschätzung die größte Prozesszeit aller $|R|$ Prozesse der redundanten Prozessstufe als Prozesszeit für die Summation verwendet. Sollten ferner spezielle Be- und Entladeeinrichtungen, wie Drehtische oder Ladeportale vorhanden sein, so kann Formel 5.11 um die Zeitdauern für entsprechende Be- und Entladevorgänge erweitert werden.

Für einen Stillstand an einem Prozess $P_n \in F$ und der zugehörigen Prozessstufe PS_m , die stromabwärts der Referenzprozessstufe liegt, wird die Nachwirkzeit wie folgt berechnet:

$$\Delta t_{\text{Nachwirkzeit } PS_m} = PZ_{P_n} \quad (5.12)$$

Auch hier wird die eigentlich benötigte Restprozesszeit des betrachteten Prozesses P_n zum Eintrittszeitpunkt des geplanten Stillstandes mit der Prozesszeit abgeschätzt. Werden Verzögerungen durch Aufrückvorgänge von Werkstücken in Verkettungselementen vernachlässigt, so hat sich die Auswirkung des geplanten Stillstandes zu diesem Zeitpunkt vollständig in der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe widergespiegelt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Nachwirkzeit eines zeitlich vor dem ausgewählten Stillstandes an Prozess P_n beendeten weiteren Stillstandes größer als die Nachwirkzeit des Prozesses P_n sein kann, sodass der Fall eintreten könnte, dass die Auswirkung dieses weiteren Stillstandes zum Zeitpunkt T_{Ende} noch nicht vollständig in der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe realisiert ist. Da der Einfluss der zeitlich am spätesten eintretenden Stillstände allerdings gering ist, wie sich im weiteren Verlauf der Arbeit herausstellen wird (vgl. Kapitel 6.4.2), kann dieser Fall als vernachlässigbar angesehen werden.

Zur Verdeutlichung soll abschließend der Simulationsendzeitpunkt für das in Kapitel 5.2.1 vorgestellte Beispiel einer Priorisierungsentscheidung unter Berücksichtigung eines Lookahead berechnet werden. Da in diesem Beispiel nur ein zukünftiger Stillstand bekannt ist, entspricht der Simulationsendzeitpunkt dem Zeitpunkt, an dem sich die Auswirkung des geplanten Stillstandes an Prozess P_1 vollständig in der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe widerspiegelt hat. Für den Prozess P_1 , der relativ zu der Referenzprozessstufe P_2 stromaufwärts liegt, ergibt sich somit nach den Formeln 5.10 und 5.11 folgender Simulationsendzeitpunkt:

$$T_{Ende} = 500 \text{ s} + 300 \text{ s} + 60 \text{ s} + 60 \text{ s} = 920 \text{ s} \quad (5.13)$$

Zum berechneten Zeitpunkt T_{Ende} beträgt die erzielte Durchsatzmenge mit der Behebungsreihenfolge $Seq_1 = P_1 \rightarrow P_2$ insgesamt elf Werkstücke, während mit der Reihenfolge $Seq_2 = P_2 \rightarrow P_1$ insgesamt zehn Werkstücke fertiggestellt werden konnten (vgl. Abbildung 52). Da die Restbearbeitungszeit der Referenzprozessstufe zu diesem Zeitpunkt für beide Behebungsreihenfolgen 40 s beträgt und damit identisch ist, kann der Unterschied in der Ausbringung direkt aus der Differenz der Durchsatzmengen abgelesen werden. Die Differenz beträgt ein Werkstück, sodass der Ausbringungsverlust mit der Behebungsreihenfolge Seq_1 um ein Werkstück bzw. unter Berücksichtigung der Taktzeit der Referenzprozessstufe um 60 s geringer ausfällt als bei der Reihenfolge Seq_2 . Dieses Ergebnis weist damit den gleichen Wert auf wie das Ergebnis bei der Betrachtung der Durchsatzmenge nach 1140 s (vgl. Abbildung 52) sowie bei der Berechnung des Gesamtausbringungsverlustes in Kapitel 5.2.2.

Schritt 3.2: Initialisierung des Simulationsmodells

Zusätzlich zu den in Kapitel 4.2.2 bereits aufgeführten Eingabe- und Experimentdaten müssen die Informationen über zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten bei der Initialisierung des Simulationsmodells berücksichtigt werden. Die im Lookahead enthaltenen Stillstände werden dazu für jeden Simulationslauf parametrisiert, sodass die betroffenen Prozesse entsprechend dem jeweiligen Eintrittszeitpunkt und der geplanten Stillstandsdauer stillstehen.

5.4 Fazit

In diesem Kapitel wurde die Priorisierung ungeplanter Stillstände unter Berücksichtigung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten, wie sie beispielsweise aus der Anwendung einer zustandsorientierten, vorausschauenden Instandhaltungsstrategie resultieren, betrachtet. Dafür konnte zunächst auf Basis der in Kapitel 4 gewonnenen Erkenntnisse anhand eines Beispiels aufgezeigt

werden, dass die Auswirkung eines geplanten Stillstandes in einem verketteten Fließfertigungssystem insbesondere von der zum Stillstandseintritt verfügbaren Pufferkapazität innerhalb des relevanten Abschnitts der Prozesskette abhängig ist, wobei diese Pufferkapazität letztendlich durch die Behebungsreihenfolge und damit durch die Priorisierung ungeplanter Stillstände beeinflussbar ist.

Darauf aufbauend wurde vorgestellt, wie das in Kapitel 4 aufgestellte Online-Optimierungsproblem erweitert werden kann, damit zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten als weitere Informationen in die Priorisierungsentscheidung einfließen können. Für das daraus resultierende Online-Optimierungsproblem mit Lookahead konnte weiter gezeigt werden, dass die Behebungsreihenfolge mit dem geringsten Gesamtausbringungsverlust die höchste Ausbringung erzielt und damit die Priorisierungsreihenfolge darstellt. Dabei setzt sich der Gesamtausbringungsverlust aus dem Ausbringungsverlust der zum Entscheidungszeitpunkt zu priorisierenden Stillstände sowie der Summe der Ausbringungsverluste, die aufgrund geplanter Stillstandszeiten entstehen, zusammen.

Um die Priorisierungsreihenfolge unter Einbeziehung eines Lookahead auch für komplexe Fließfertigungssysteme zu bestimmen, wurde schließlich eine simulationsbasierte Vorgehensweise, basierend auf der bereits in Kapitel 4.2.2 hergeleiteten Vorgehensweise, vorgestellt.

6 Implementierung und Untersuchung von Einflussfaktoren

Nachdem der Zusammenhang zwischen der Priorisierung von Stillständen und der Auswirkung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten aufgezeigt wurde, wird im Folgenden nun der Mehrwert einer Priorisierung von ungeplanten Stillständen, bei der zukünftig eintretende geplante Stillstände als zusätzliche Information in Form eines Lookahead in die Entscheidungsfindung einfließen, im Vergleich zu einer Priorisierung ohne Lookahead untersucht. Dazu wird zunächst auf die programmiertechnische Umsetzung der in Kapitel 4 und 5 vorgestellten Vorgehensweisen in Form eines Entscheidungsunterstützungssystems, welches in eine Simulationsumgebung implementiert wurde, eingegangen. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird dann der Mehrwert, den eine Priorisierung mit Lookahead im Vergleich zu dem reinen Online-Fall aufweist, in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren untersucht.

6.1 Implementierung des Entscheidungsunterstützungssystems in eine Simulationsumgebung

Im Folgenden werden nun wichtige Punkte bei der Implementierung der hergeleiteten Vorgehensweisen zur Priorisierung ungeplanter Stillstände mit Hilfe der Simulationssoftware Siemens Plant Simulation näher beschrieben (vgl. Hege- mann und Nickel 2020: 338 f.). Die in den vorherigen Kapiteln aufgeführten Schritte der drei verschiedenen Vorgehensweisen wurden dabei mittels der Programmiersprache SimTalk und mit Hilfe von Tabellen, Variablen und ablauffähigen Methoden programmiertechnisch umgesetzt. Die wichtigsten Bausteine des implementierten Entscheidungsunterstützungssystems sind in Abbildung 53 schematisch dargestellt.

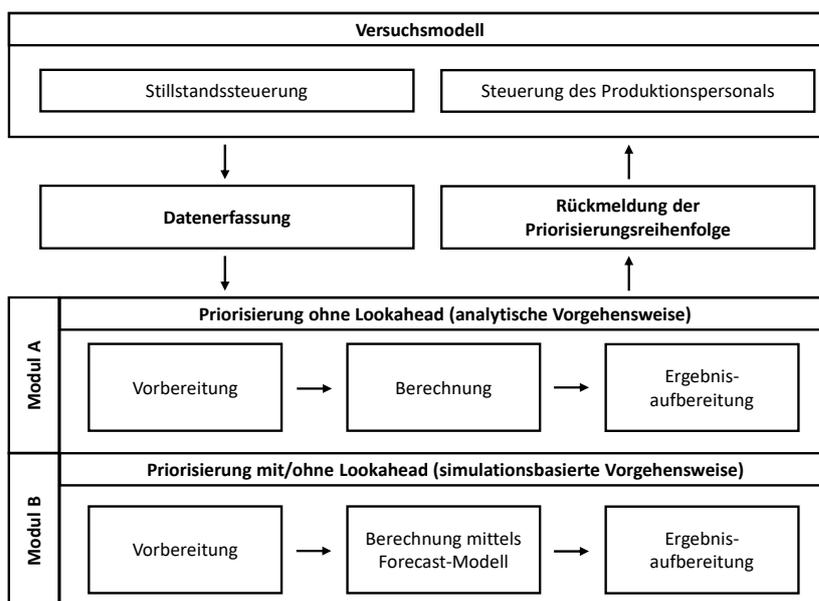


Abbildung 53: Wichtige Bausteine der Implementierung

Einen Überblick über die programmiertechnische Umsetzung der im Folgenden beschriebenen Bausteine mit Hilfe der Simulationssoftware Siemens Plant Simulation geben die Abbildungen 79 bis 82 im Anhang A.1.

Versuchsmodell

Eine erste Instanz der Simulationssoftware beinhaltet das ablauffähige Modell eines Fließfertigungssystems, wobei hier unter Instanz eine Modelldatei der Simulationssoftware verstanden wird. Da für die Untersuchungen in dieser Arbeit unterschiedliche Modelle verwendet werden, sei für den Aufbau und die nähere Beschreibung der Modelle auf die Kapitel 6.2.1, 6.2.2 sowie 7.1 verwiesen.

Das Simulationsmodell bildet das dynamische Verhalten des jeweils betrachteten Fließfertigungssystems ab. Dabei sind im Kontext der Problemstellung dieser Arbeit insbesondere die Aufprägung von Stillständen sowie eine entsprechende Steuerung der Stillstandsbehebung entscheidend. Für die Simulation von Stillständen wurde eine manuelle Aufprägung implementiert. Dies hat im Vergleich zu der Verwendung des softwareeigenen Störgenerators den Vorteil, dass die während der Simulationszeit auftretenden Stillstände in einer Tabelle aufgelistet sind und somit sämtliche Stillstandszeiten zu jedem Simulationszeitpunkt bekannt sind. Damit ist es zum einen möglich, für Untersuchungszwecke die exakte Reparaturdauer der zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt zu priorisierenden Stillstände in die Entscheidungsfindung einfließen zu lassen und zum anderen überhaupt die Information über im weiteren Simulationsverlauf eintretende Stillstandszeiten für einen Lookahead zu generieren. Diese Form der Stillstands-aufprägung ermöglicht es zudem, die Größe des Lookahead zu parametrisieren und diesen Einfluss auf den Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead zu untersuchen (vgl. Kapitel 6.4.2).

Zur Erstellung der Tabelle mit den während des Simulationszeitraums auftretenden Stillständen wurde ein weiteres Simulationsmodell in einer eigenen Instanz verwendet, welches vom Aufbau identisch mit dem Modell des jeweils betrachteten Fließfertigungssystems ist. Dabei wurde für jeden Produktionsprozess der softwareeigene Störgenerator mit Hilfe der für das Simulationsexperiment verwendeten Werte für die Verfügbarkeit und die Reparaturdauer parametrisiert. Des Weiteren wurde in diesem Modell kein Produktionspersonal abgebildet, sodass die eintretenden Stillstände unverzüglich instandgesetzt werden. Während eines Simulationslaufs können nun die eintretenden Stillstände aufgezeichnet werden, sodass nach Ablauf der gewählten Simulationszeit eine Tabelle über sämtliche Stillstände mit Eintrittszeitpunkt, Stillstandsdauer sowie betroffenem Produktionsprozess vorliegt.

Diese Tabelle dient dann zur Aufprägung der Stillstände in dem Versuchsmodell des betrachteten Fließfertigungssystems. Dafür wurde für jeden Produktionspro-

zess ein Baustein zur Stillstandssteuerung erstellt, der die Einplanung des nächsten Stillstandes in die Ereignisliste sowie die Anfrage und Entgegennahme der Dienste im Zusammenspiel mit dem Broker-Baustein, auf den später noch detaillierter eingegangen wird, übernimmt.

Die Einplanung des nächsten Stillstandes wird direkt nach Instandsetzung eines Prozesses ausgeführt. Dafür wird ausgehend von der Position des gerade behobenen Stillstandes in der Stillstandstabelle die nächste Stillstandszeit des jeweiligen Prozesses ausgewählt. Ist der Stillstandseintrittszeitpunkt dabei größer als der aktuelle Simulationszeitpunkt, so wird der neue Stillstand entsprechend seines Eintrittszeitpunktes in die Ereignisliste eingestellt. Da bei der Erzeugung der Stillstandstabelle das Produktionspersonal zur Stillstandsbehebung nicht betrachtet wurde, kann der Fall eintreten, dass der Eintrittszeitpunkt des nächsten Stillstandes kleiner als der aktuelle Simulationszeitpunkt ist. Dieser Fall tritt ein, wenn die gesamte Stillstandsdauer, die sich neben der Reparaturdauer auch aus der Wartezeit bis Personal zur Stillstandsbehebung vor Ort ist zusammensetzt, größer als der zeitliche Abstand zwischen zwei Stillstandseintrittszeitpunkten ist. Der Beginn des neuen Stillstandes wird in diesem Fall dann auf den aktuellen Simulationszeitpunkt gesetzt. Dabei muss für die Vergleichbarkeit der Simulationläufe, insbesondere bei der Verwendung von niedrigen Verfügbarkeitswerten, sichergestellt werden, dass die über die gesamte Simulationszeit summierte Reparaturzeit für jeden Prozess der in der Stillstandstabelle vorgesehenen Gesamtzeit entspricht.

An dieser Stelle sei zudem bereits darauf hingewiesen, dass die in dem Modell zur Generierung der Stillstandstabelle verwendeten Verfügbarkeitswerte sowie Reparaturdauern nicht den messbaren Werten in dem Versuchsmodell entsprechen, da durch die limitierende Anzahl an Produktionsmitarbeitern Wartezeiten auf verfügbares Personal zur Instandsetzung eines Prozesses entstehen und sich dies mindernd auf die Gesamtverfügbarkeit des Prozesses auswirkt. Dies muss bei den verwendeten Verfügbarkeits- und Reparaturwerten berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 7.1).

Damit überhaupt eine Priorisierung von Stillständen nötig ist, muss das Produktionspersonal, welches in realen Fließfertigungssystemen für die Stillstandsbehebung zuständig ist, als limitierende Ressource abgebildet werden. Dafür wurde das von Plant Simulation zur Verfügung gestellte Konzept einer Vermittlung von Dienste-Angebot und Dienste-Nachfrage mittels eines Broker-Bausteins verwendet und so implementiert, dass ein Importer, in diesem Fall ein Prozess des betrachteten Fließfertigungssystems, bei einem Stillstandseintritt den Dienst Instandsetzung beim Broker anfragt. Dieser vermittelt dann die, diesen Dienst anbietenden, Exporter. Die Exporter stellen folglich das zur Instandsetzung erforderliche Produktionspersonal dar. Diese Implementierung ermöglicht dabei nicht nur die Abbildung der limitierenden Ressource Produktionspersonal, sondern ermöglicht auch die, insbesondere bei großen Fließfertigungssystemen übliche,

Einteilung des Produktionspersonals in bestimmte Zuständigkeitsbereiche, so dass ein Mitarbeiter nur bestimmte, ihm zugeteilte Produktionsressourcen in stand setzen kann.

Darüber hinaus ist es möglich, die Vermittlung der Dienste des Broker-Bausteins problemspezifisch zu programmieren und somit für die Implementierung der hergeleiteten Vorgehensweisen zu nutzen. So wurde in einer übergeordneten Vermittlungssteuerung festgelegt, dass die eigentliche Vermittlung des Produktionspersonals nur gestartet wird, wenn überhaupt zuständiges Personal zur Instandsetzung des anfragenden Prozesses verfügbar ist. Außerdem wird in der Vermittlungssteuerung abgefragt, ob die Anzahl zu priorisierender Stillstände größer als eins ist (vgl. Abbildung 34 und Abbildung 44). Ist die Anzahl eins, so wird das verfügbare Produktionspersonal diesem Stillstand direkt zugeordnet. Ist hingegen mehr als ein Stillstand zu vermitteln, so wird eine Priorisierung entsprechend der ausgewählten Vorgehensweise ausgeführt (vgl. Modul A oder Modul B).

Datenerfassung

Um eine Priorisierungsreihenfolge zu ermitteln, wurde eine Methode geschrieben, die die folgenden Daten des Versuchsmodells zum Entscheidungszeitpunkt t_d ausliest und in Tabellen abspeichert:

- Prozesszeiten, Restprozesszeiten und Erholzeiten
- Exakte Reparaturdauern der anliegenden Stillstände (*TTR*-Werte) bzw. die durchschnittlichen Reparaturdauern (*MTTR*-Werte)
- Pufferkapazitäten und Pufferfüllstände sowie Verzögerungsdauern und Restverzögerungsdauern der Verkettungselemente

Mit Hilfe der Restprozesszeiten wird außerdem die aktuelle Belegung der Prozessbausteine erfasst, wobei ein Prozess, der zum Entscheidungszeitpunkt kein Werkstück in Bearbeitung hat, folglich auch keine Restprozesszeit aufweisen kann. Da zur Abbildung von Beladungs- und Entladungsvorrichtungen für das in Kapitel 7 untersuchte Fließfertigungssystem Prozessbausteine mit Erholzeiten verwendet wurden, werden diese Zeiten ebenfalls ausgelesen. Die Erholzeit beschreibt dabei die Zeit, die ein Baustein verbraucht bis ein neues Werkstück aufgenommen wird, nachdem das zuletzt bearbeitete Werkstück an den nachfolgenden Baustein abgegeben wurde.

Da im Rahmen der Untersuchungen des Mehrwerts einer Priorisierung mit Lookahead in Kapitel 6.3.4 auch der Einfluss der Annahme der Reparaturdauer von Prozessen näher betrachtet wird, werden neben den exakten Reparaturdauern auch die für die Praxis relevanteren durchschnittlichen Reparaturdauern erfasst.

Wenn in einem Verkettungselement mindestens ein Werkstück enthalten ist, dann wird neben dem aktuellen Pufferfüllstand ebenfalls die Restverzögerungsdauer ausgelesen. Dies hat den Hintergrund, dass, wenn die Verweilzeit eines Werkstücks in einem Verkettungselement kürzer als die Verzögerungsdauer des Verkettungselements ist, dieses Werkstück noch nicht bereit ist, das Verkettungselement zu verlassen. Wird in diesem Fall die Restverzögerungsdauer erfasst, kann diese Restriktion bei der Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge berücksichtigt werden.

Die drei in Kapitel 4 und 5 vorgestellten Vorgehensweisen zur Priorisierung von Stillständen mit und ohne Lookahead wurden in zwei Modulen implementiert. Die Auswahl erfolgt schließlich in der Experimentsteuerung, mit der zudem die Versuchsparameter, wie beispielsweise die Größe des Lookahead, eingestellt werden können.

Modul A: Priorisierung ohne Lookahead (analytische Vorgehensweise)

In einem ersten Modul wurde die analytische Vorgehensweise zur Priorisierung ungeplanter Stillstände ohne Berücksichtigung eines Lookahead (vgl. Kapitel 4.3.2) umgesetzt, wobei sich der Ablauf in die drei Phasen Vorbereitung, Berechnung und Ergebnisaufbereitung unterteilt.

In der Vorbereitungsphase werden die Schritte 1, 3 und 4 nach Abbildung 44 ausgeführt, d. h. die Prozesse mit zu priorisierenden Stillständen werden zunächst zu Prozessstufen zusammengefasst. Anschließend wird die Referenzprozessstufe auf Basis des zum Entscheidungszeitpunkt ausgelesenen Abbilds des Fließfertigungssystems bestimmt und die Menge zu priorisierender, selektierter Prozessstufen ermittelt.

In der sich daran anschließenden Berechnungsphase werden die Ausbringungsverluste für die möglichen Behebungsreihenfolgen entsprechend Schritt 6 dieser Vorgehensweise ermittelt. Dazu wurden die in Abbildung 47 aufgeführten Teilschritte programmiertechnisch so umgesetzt, dass schließlich nach Ausführung des Algorithmus die Ausbringungsverluste für jede Behebungsreihenfolge in einer Tabelle aufgelistet sind. An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass die Berechnungsphase bei Entscheidungen, bei denen die Mächtigkeit der Menge zu priorisierender, selektierter Prozessstufen eins beträgt, entfällt und sich an die Vorbereitungsphase direkt die Ergebnisaufbereitung anschließt.

In der letzten Phase wird schließlich die finale Priorisierungsreihenfolge ermittelt. Dafür wurden die Schritte 2, 5 und 7 nach Abbildung 44 umgesetzt, wobei die Wahl, welcher dieser Schritte letztendlich ausgeführt wird, durch die Menge zu priorisierender, selektierter Prozessstufen bestimmt wird.

Modul B: Priorisierung mit/ohne Lookahead (simulationsbasierte Vorgehensweise)

Die simulationsbasierten Vorgehensweisen zur Priorisierung von Stillständen (vgl. Kapitel 4.2.2 und 5.3), die sich durch die Verwendung eines Lookahead unterscheiden, wurden in einem zweiten Modul implementiert, wobei der Ablauf analog zu Modul A in die Phasen Vorbereitung, Berechnung und Ergebnisaufbereitung unterteilt ist.

In der Vorbereitungsphase werden die Schritte 1, 2 sowie der Teilschritt 3.1 entsprechend Abbildung 34 ausgeführt. Neben der Bestimmung der Referenzprozessstufe und der Ermittlung der reihenfolgenabhängigen Stillstandsdauern beinhaltet dies die Ermittlung des Simulationsendzeitpunktes. Dazu werden die in Kapitel 4 und 5 hergeleiteten Berechnungsschritte programmieretechnisch umgesetzt, sodass der Simulationsendzeitpunkt entsprechend der in der Experimentsteuerung ausgewählten Priorisierungsmethode gewählt werden kann.

In der Berechnungsphase werden für jede mögliche Behebungsreihenfolge mittels eines Simulationslaufs die Ergebnisgrößen Durchsatzmenge und Restprozesszeit der Referenzprozessstufe zum Simulationsendzeitpunkt ermittelt. Dafür wird eine zweite Instanz der Simulationssoftware verwendet, in der ein zu dem Versuchsmodell identisches Modell des betrachteten Fließfertigungssystems abgebildet ist, wobei einzig auf die Abbildung des Produktionspersonals verzichtet wird. Folglich werden in diesem Forecast-Modell eintretende Stillstände ohne einen Zeitverzug durch Warten auf Personal behoben.

Die Kommunikation zwischen der Instanz, die das Versuchsmodell beinhaltet, und der Instanz, die zur Entscheidungsfindung verwendet wird, wurde über eine TCP/IP-Schnittstelle realisiert. Diese Schnittstelle ermöglicht eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen den Instanzen und wird für den Austausch der Befehle zum Initialisieren, Starten und Zurücksetzen des Simulationsmodells wie auch für die Übermittlung der Ergebnisgrößen nach Beendigung eines Simulationslaufs verwendet. Für die Übertragung der benötigten Eingabedaten und Experimentdaten wurde auf die Möglichkeit zurückgegriffen, Tabellen als Objektdatei zu speichern. Damit ist es möglich, in Tabellen oder Listen abgespeicherte Daten, wie beispielsweise die für die Initialisierung benötigten Simulationsdaten, in einer anderen Instanz wieder einzulesen und weiter zu verwenden.

Damit das Forecast-Simulationsmodell eine aussagekräftige Beurteilung der verschiedenen Behebungsreihenfolgen ermöglicht, muss der Zustand des Simulationsmodells den aktuellen Zustand des Versuchsmodells zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt möglichst genau widerspiegeln. Um dies zu gewährleisten, wird eine Initialisierung des Modells vorgenommen, wobei nach Hanisch und Schulze (2005: 1797) eine Initialisierung auf Basis aktueller Daten durchgeführt wird (vgl. Abbildung 17). Neben der aktuellen Belegung der Prozesse mit Werkstücken werden die Prozesszeiten und entsprechende Restprozesszeiten initiali-

siert. Ebenfalls werden die Pufferkapazitäten, Verzögerungsdauern sowie die aktuellen Füllstände der Verkettungselemente entsprechend des aktuellen Abbildes des Versuchsmodells zum Entscheidungszeitpunkt eingestellt. Dabei werden auch etwaige Restverzögerungsdauern der Werkstücke berücksichtigt.

Bei einer Priorisierung mit Lookahead wird zusätzlich noch die Information über zukünftig eintretende Stillstandszeiten bei der Initialisierung verarbeitet. Dafür existiert in dem zur Bewertung verwendeten Simulationsmodell eine Tabelle, in der, analog zu der Stillstandstabelle des Versuchsmodells, sämtliche Stillstände aufgelistet sind, die während eines Simulationslaufs eintreten sollen. Die Stillstände entsprechen dabei exakt dem zur Verfügung stehenden Lookahead, wobei die Aufprägung dieser Stillstände wieder über separate Bausteine zur Stillstandssteuerung realisiert wurde.

Die bisher aufgeführten Daten bilden allerdings nur die Eingabedaten ab, d. h. die Daten, die für jeden Simulationslauf innerhalb eines Experiments respektive einer Priorisierungsentscheidung gleich sind. Als Experimentdaten können in diesem Versuchsaufbau die behebungsreihenfolgenabhängigen Stillstandsdauern der zu priorisierenden Prozesse verstanden werden, die für jeden Simulationslauf neu bestimmt werden (vgl. Kapitel 4.2.2). Diese Prozesse werden dann im Rahmen der Initialisierung stillgesetzt und ein Störende-Ereignis wird entsprechend der jeweiligen Stillstandsdauer in die Ereignisliste eingetragen.

In der letzten Phase wird schließlich die Priorisierungsreihenfolge nach Schritt 4 der simulationsbasierten Vorgehensweisen ermittelt. Dazu wurde ein Algorithmus programmiert, der aus einer Tabelle, in der die nach jedem durchgeführten Simulationslauf ermittelten Werte für die Durchsatzmenge sowie die Restprozesszeit der Referenzprozessstufe aufgeführt sind, die finale Priorisierungsreihenfolge entsprechend des beschriebenen Vorgehens nach Abbildung 43 auswählt.

Rückmeldung der Priorisierungsreihenfolge

Damit die Vermittlung der Dienste gemäß der ermittelten Priorisierungsreihenfolge erfolgen kann, wird die Priorisierungsreihenfolge der übergeordneten Vermittlungssteuerung übergeben. In dieser Steuerung wird schließlich das verfügbare Produktionspersonal den stillstehenden Prozessen zugeordnet, wobei die am höchsten priorisierten Stillstände als Erstes zugeordnet werden.

6.2 Untersuchungsschwerpunkt 1: Ausgangsversuche

Im Folgenden wird anhand einer Simulationsstudie zweier Fließfertigungssysteme untersucht, inwiefern mit den hergeleiteten und in einem Entscheidungsunterstützungssystem implementierten Vorgehensweisen zur Priorisierung von

ungeplanten Stillständen mit und ohne Berücksichtigung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten in Form eines Lookahead ein Mehrwert erzielbar ist.

6.2.1 Modell des eindimensionalen Fließfertigungssystems

Das erste Fließfertigungssystem besteht aus einer eindimensionalen Prozesskette, bestehend aus fünf einfachen Prozessstufen (Abbildung 54). Die Prozessstufen sind dabei jeweils durch ein Verkettungselement mit der Pufferkapazität $P_{j\ max}$ sowie der Verweildauer VD_j miteinander verbunden. Die Prozesse selbst können jeweils nur ein Werkstück gleichzeitig bearbeiten, sodass die Prozesszeit PZ_i in diesem Fall der Taktzeit TZ_i entspricht. Die verwendeten Systemdaten können dem Anhang A.2 entnommen werden.

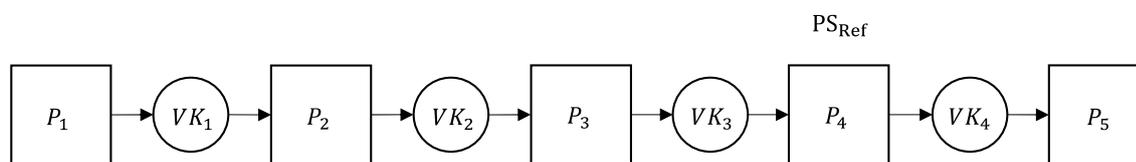


Abbildung 54: Struktur der eindimensionalen Prozesskette

Da die Taktzeiten als konstant angenommen werden, stellt der Prozess P_4 in diesem Setup die Referenzprozessstufe dar. Für die Behebung von Stillständen in diesem System ist ein Mitarbeiter zuständig, wobei die Wegezeiten dieses Mitarbeiters zwischen den Prozessen nicht berücksichtigt werden. Der Mitarbeiter kann folglich nach Beendigung einer Instandsetzungsmaßnahme direkt mit der Behebung eines Stillstandes an einem weiteren Prozess beginnen. Neben der Stillstandsbehebung hat der Mitarbeiter keine weiteren Aufgaben.

In einem ersten Simulationsexperiment soll nun die erzielbare Ausbringung dieses Fließfertigungssystems in Abhängigkeit der gewählten Vorgehensweise zur Priorisierung ungeplanter Stillstände ermittelt werden. Die Simulationszeit eines Simulationslaufes wird dabei auf 150 Tage gesetzt, wobei die Einschwingphase nach Anwendung der Methode nach Welch (vgl. Gutenschwager et al. 2017: 186) auf zehn Tage festgesetzt wird. Die zur statistischen Sicherheit erforderliche Anzahl an Replikationen, d. h. die Anzahl durchzuführender Simulationsläufe mit gleicher Parameterkonfiguration aber verschiedenen Startwerten für die Zufallszahlenströme, wird mit fünf festgelegt. Während eines Simulationslaufes wird nach jeweils 24 Stunden Simulationszeit der erzielte Wert für die Ausbringungsmenge des Fließfertigungssystems innerhalb dieses Zeitraums ermittelt. Diese Werte werden schließlich in eine durchschnittliche Ausbringung umgewandelt, gemessen in produzierten Einheiten pro Stunde bzw. „Jobs Per Hour“ (JPH). Der Stichprobenumfang beträgt folglich 700, d. h. nach Durchführung des Simulationsexperiments liegen 700 Werte für die durchschnittlich erzielte Ausbringung vor.

Als Priorisierungsmethoden zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge für die Zuordnung des Produktionspersonals zu den ungeplant eintretenden Stillständen werden die folgenden Strategien bzw. Vorgehensweisen untersucht:

- Priorisierung ohne Lookahead (simulationsbasierte Vorgehensweise)
- Priorisierung ohne Lookahead (analytische Vorgehensweise)
- Priorisierung mit Lookahead (simulationsbasierte Vorgehensweise)
- FCFS-Strategie
- Worst-Case-Szenario

Neben den in den Kapiteln 4.2.2, 4.3.2 sowie 5.3 vorgestellten Vorgehensweisen wird ebenfalls eine FCFS-Strategie betrachtet. Bei dieser Strategie werden die Stillstände entsprechend ihres Eintrittszeitpunktes priorisiert, sodass zeitlich am frühesten eingetretene Stillstände als Erstes behoben werden.

Des Weiteren wird ein Worst-Case-Szenario betrachtet, bei dem die Priorisierungsreihenfolge der Behebungsreihenfolge entspricht, die den größten Gesamtausbringungsverlust erzeugt. Die Vorgehensweise ist dabei grundsätzlich analog zu der Vorgehensweise der Priorisierung mit Lookahead (vgl. Kapitel 5.3). Allerdings erfolgt die Auswahl der Priorisierungsreihenfolge in Schritt 4 (vgl. Abbildung 34) nach den in Tabelle 8 aufgeführten Kriterien.

Tabelle 8: Auswahlkriterien der Priorisierungsreihenfolge beim Worst-Case-Szenario

| | Priorisierung mit Lookahead | Worst-Case-Szenario |
|-------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Kriterium 1 | Maximale Durchsatzmenge | Minimale Durchsatzmenge |
| Kriterium 2 | Minimale Restprozesszeit | Maximale Restprozesszeit |
| Kriterium 3 | Frühster Eintrittszeitpunkt | Frühster Eintrittszeitpunkt |

In Abbildung 55 sind die Erwartungswerte für die durchschnittliche Ausbringung des untersuchten Modells und die entsprechenden Konfidenzintervalle dargestellt. Für alle Konfidenzintervalle in dieser Arbeit wurde ein Sicherheitsniveau von 95 % angenommen. Da die Stichprobenwerte für die durchschnittliche Ausbringung aus einer Zeitreihe resultieren, wurden die Werte ebenfalls auf Autokorrelation überprüft. Dazu wurde der in der Simulationssoftware Plant Simulation integrierte Baustein „Confidence“ aus der Bibliothek „Statistische Werkzeuge“ verwendet. Lag eine Autokorrelation der Ergebnisse vor, so wurde das Konfidenzintervall um einen Korrekturfaktor erweitert, woraus letztendlich ein größeres Vertrauensintervall resultiert (vgl. Gutenschwager et al. 2017: 116).

Aus Abbildung 55 ist ersichtlich, dass mit allen in dieser Arbeit hergeleiteten Vorgehensweisen zur Ermittlung einer Priorisierungsreihenfolge eine signifikant höhere Ausbringung im Vergleich zu der FCFS-Strategie erreicht werden kann.

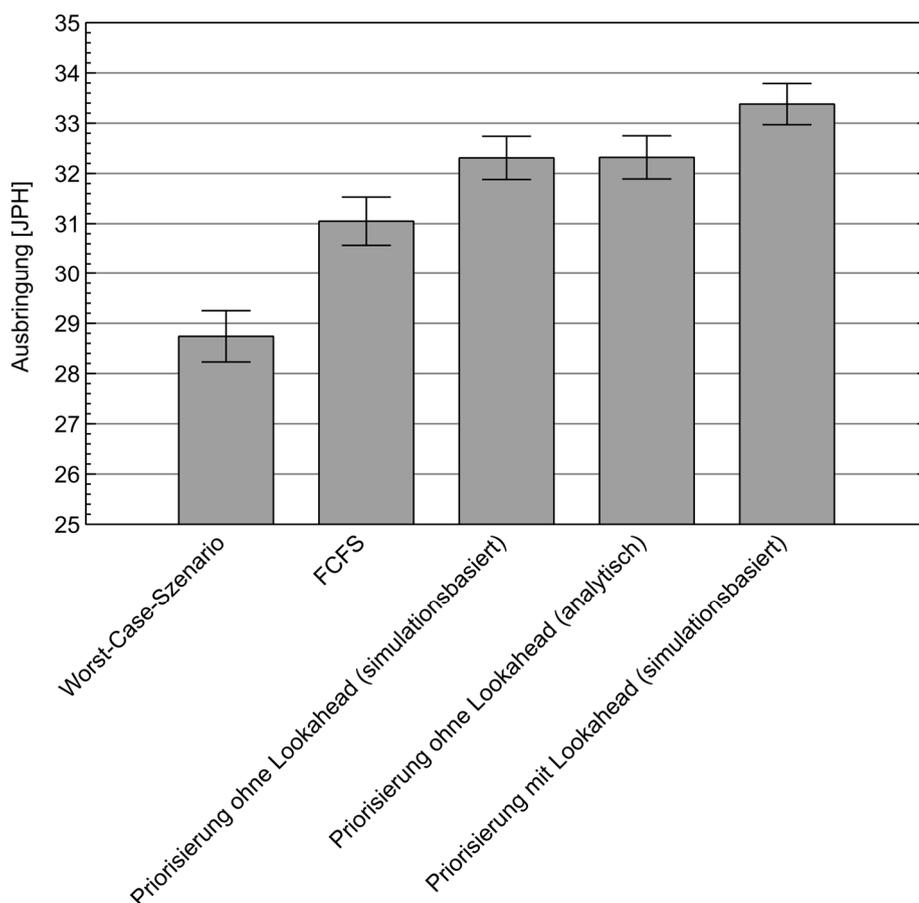


Abbildung 55: Durchschnittlich erzielbare Ausbringung des eindimensionalen Fließfertigungssystems in Abhängigkeit der Priorisierungsmethode

Dabei kann bereits mit einer Priorisierung ohne Berücksichtigung eines Lookahead ein Mehrwert im Vergleich zu der FCFS-Strategie von 4,06 % (simulationsbasierte Vorgehensweise) bzw. 4,09 % (analytische Vorgehensweise) erzielt werden (Abbildung 56 rechts). Werden darüber hinaus zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten in Form eines Lookahead bei der Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge berücksichtigt, ist ein Mehrwert von 7,50 % im Vergleich zu der FCFS-Strategie feststellbar. Der Lookahead wurde dabei als Time-lookahead definiert, wobei sämtliche Stillstandszeiten innerhalb der nächsten acht Stunden Simulationszeit, referenziert auf den jeweiligen Entscheidungszeitpunkt t_d , bekannt und im Entscheidungsfindungsprozess berücksichtigt wurden. Da alle innerhalb dieses Zeitraumes eintretenden Stillstände bekannt sind, stellt der hier ermittelte Wert folglich eine obere Grenze für den erzielbaren Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead dar. Auf diesen Sachverhalt wird in Kapitel 6.4.1 näher eingegangen.

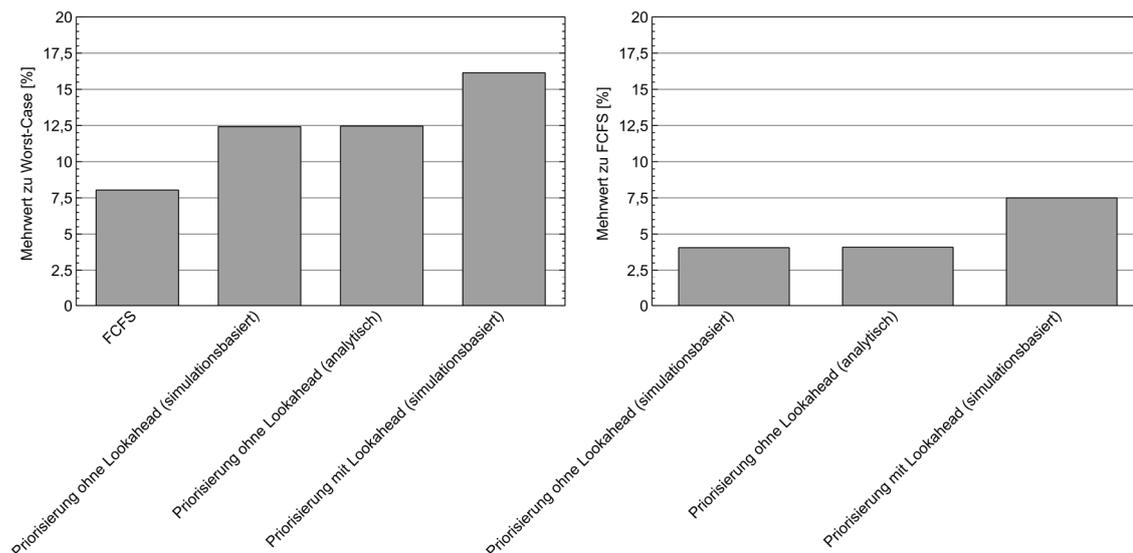


Abbildung 56: Mehrwerte der Priorisierungsmethoden für das eindimensionale Fließfertigungssystem im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)

In Abbildung 56 (links) sind ebenfalls die Mehrwerte im Vergleich zum Worst-Case-Szenario aufgeführt. Dabei zeigt sich, dass bereits mit einer robusten, einfach umzusetzenden Strategie, wie der FCFS-Strategie, ein deutlicher Mehrwert generierbar ist.

Für die simulationsbasierte Vorgehensweise zur Priorisierung ohne Lookahead wurde in Kapitel 4.2.2 ein Vorgehen zur Berechnung eines Simulationsendzeitpunkts hergeleitet, mit dem die zur Entscheidungsfindung benötigte Simulationszeit reduziert werden sollte. Um dies zu validieren, wurde zusätzlich ein Versuch durchgeführt, bei dem für den Simulationsendzeitpunkt ein statischer Wert von acht Stunden verwendet wurde. Dabei konnte festgestellt werden, dass die durchschnittliche Ausbringung exakt dem Wert entspricht, der mit einer dynamischen Bestimmung des Simulationsendzeitpunkts erzielt werden kann. Dabei beträgt die benötigte Simulationszeit für sämtliche Priorisierungsentscheidungen bei der Verwendung eines statischen Simulationsendzeitpunkts 8342 Tage und 16 Stunden. Die benötigte Simulationszeit bei Verwendung des dynamischen Simulationsendzeitpunkts beträgt hingegen nur 613 Tage, 23 Stunden, 38 Minuten und 56 Sekunden. Folglich ist die benötigte Gesamtsimulationszeit mit der dynamischen Bestimmung im Vergleich um ca. 93 % geringer, was in der Regel mit einer deutlichen Reduzierung der Rechenzeit einhergeht.

Eine weitere Einsparung der rechenzeitintensiven Simulationszeit kann bei der Anwendung der analytischen Vorgehensweise erreicht werden, da zur Bestimmung der Priorisierungsreihenfolge bei dieser Vorgehensweise auf die Simulation verzichtet wird. Wie die Werte für die durchschnittliche Ausbringung zeigen, kann bei dem hier betrachteten, eindimensionalen Fließfertigungssystem

kein signifikanter Unterschied in der Ausbringung zwischen der analytischen und der simulationsbasierten Vorgehensweise zur Priorisierung ohne Lookahead festgestellt werden (vgl. Abbildung 55). Folglich kann in diesem Fall eine ausbringungsoptimierte Priorisierung ungeplanter Stillstände auch auf analytische Weise erfolgen.

An dieser Stelle sei abschließend angemerkt, dass der geringfügige Unterschied von 0,01 JPH zwischen der durchschnittlichen Ausbringung der analytischen Vorgehensweise und der simulationsbasierten Vorgehensweise zur Priorisierung ohne Lookahead aus den getroffenen Annahmen für die analytische Berechnung des Ausbringungsverlustes, wie der Annahme, dass keine Restverweildauern der Werkstücke in den Verkettungselementen berücksichtigt werden, resultiert (vgl. Kapitel 4.3).

6.2.2 Modell des mehrdimensionalen Fließfertigungssystems

Um die hergeleiteten Vorgehensweisen zur Priorisierung ungeplanter Stillstände auch an Fließfertigungssystemen mit einem höheren Komplexitätsgrad zu untersuchen, wird im Folgenden ein Modell einer mehrdimensionalen Prozesskette, die aus vier einfachen sowie zwei redundanten Prozessstufen besteht (Abbildung 57), betrachtet (vgl. Hegemann und Nickel 2020: 339-341). Die Prozessstufen sind dabei wieder durch Verkettungselemente, die durch die Pufferkapazität $P_{j\ max}$ sowie der Verweildauer VD_j charakterisiert werden, miteinander verbunden. Analog zum Modell des eindimensionalen Fließfertigungssystems können die Prozesse jeweils nur ein Werkstück gleichzeitig bearbeiten, sodass die Prozesszeit PZ_i erneut der Taktzeit TZ_i entspricht. Ebenfalls ist wieder ein Mitarbeiter ausschließlich für die Instandsetzung der Prozesse zuständig. Da der Mitarbeiter im Vergleich zu dem in Kapitel 6.2.1 betrachteten Modell nun für eine größere Anzahl an Prozessen zuständig ist, wurden für dieses Beispiel insgesamt höhere Verfügbarkeitswerte gewählt. Damit wird sichergestellt, dass alle in der Stillstandstabelle aufgeführten Reparaturdauern während der Simulationszeit auch eintreten (vgl. Kapitel 6.1). Die Werte für die abgebildeten Verfügbarkeiten der Prozesse sowie die weiteren Systemdaten dieses mehrdimensionalen Fließfertigungssystems sind im Anhang A.3 aufgeführt.

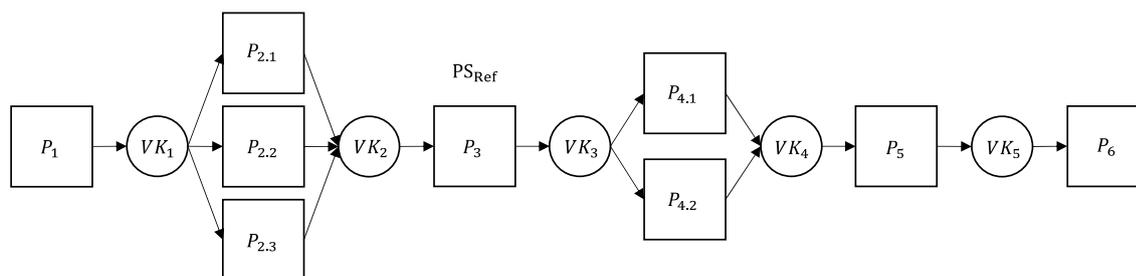


Abbildung 57: Struktur der mehrdimensionalen Prozesskette

Für die Simulationsexperimente mit diesem Modell wird die Simulationszeit eines Simulationslaufes auf 150 Tage gesetzt, wobei die Einschwingphase zehn Tage beträgt und die Anzahl an Replikationen mit zehn festgelegt wird. Somit beträgt der Stichprobenumfang für die Versuche mit dem Simulationsmodell einer mehrdimensionalen Prozesskette 1400.

In einem ersten Simulationsexperiment wurde die erzielbare Ausbringung dieses Fließfertigungssystems in Abhängigkeit der gewählten Vorgehensweise zur Priorisierung ungeplanter Stillstände ermittelt (vgl. Hegemann und Nickel 2020: 340 f.). Auch bei diesem Modell zeigt sich, dass mit allen hergeleiteten Vorgehensweisen zur Priorisierung ungeplanter Stillstände eine signifikant höhere Ausbringung im Vergleich zu der Priorisierungsstrategie FCFS erzielt werden kann (Abbildung 58). Darüber hinaus fällt ein Unterschied zwischen den Ausbringungswerten der beiden Vorgehensweisen zur Priorisierung ohne Lookahead auf. Mit der analytischen Vorgehensweise beträgt die durchschnittliche Ausbringung 43,65 JPH, was einem Mehrwert im Vergleich zur FCFS-Strategie von 1,89 % entspricht (Abbildung 59 rechts). Eine geringfügig höhere Ausbringung, mit einem Wert von 43,70 JPH bzw. einem erzielbaren Mehrwert von 2,01 %, ist bei der simulationsbasierten Vorgehensweise erkennbar.

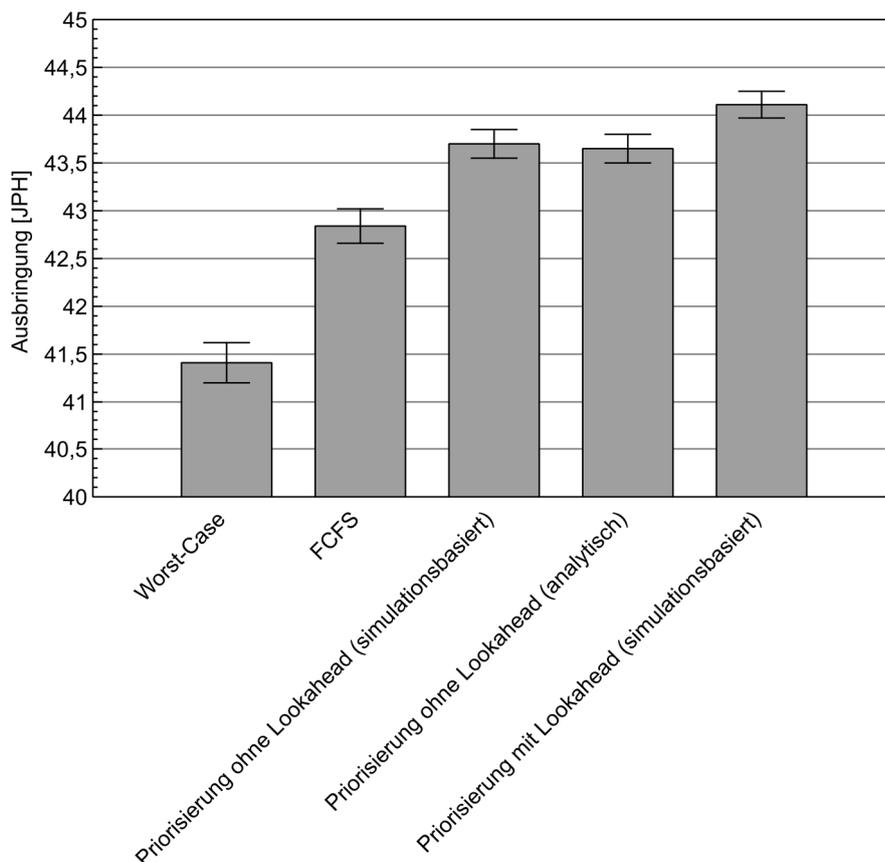


Abbildung 58: Durchschnittlich erzielbare Ausbringung des mehrdimensionalen Fließfertigungssystems in Abhängigkeit der Priorisierungsmethode

Diese Abweichung lässt sich erneut durch die bei der analytischen Vorgehensweise getroffenen Annahmen begründen. So wirkt sich bei einer mehrdimensionalen Prozesskette insbesondere die Annahme aus, dass die betriebsbereiten Prozesse einer redundanten Prozessstufe mit zu priorisierenden Prozessen zu einer einfachen repräsentativen Prozessstufe zusammengefasst werden. Dabei wird angenommen, dass nach Ablauf der Restprozesszeit diese repräsentative Prozessstufe entsprechend der berechneten repräsentativen Zykluszeit die Werkstücke bearbeitet. Dabei wird vernachlässigt, dass die Werkstücke in Wirklichkeit weiterhin parallel bearbeitet werden, sodass der zeitliche Abstand, in dem Werkstücke die Prozessstufe verlassen, keinem konstanten Takt entspricht und was schließlich zu dem beobachteten Unterschied in den Werten für die Ausbringung führen kann. Da dieser Unterschied für das betrachtete Fließfertigungssystem aber verhältnismäßig gering und letztendlich nicht signifikant ist, kann eine ausbringungsoptimierte Priorisierung ungeplanter Stillstände ohne Lookahead auch in diesem Fall auf analytische Weise erfolgen.

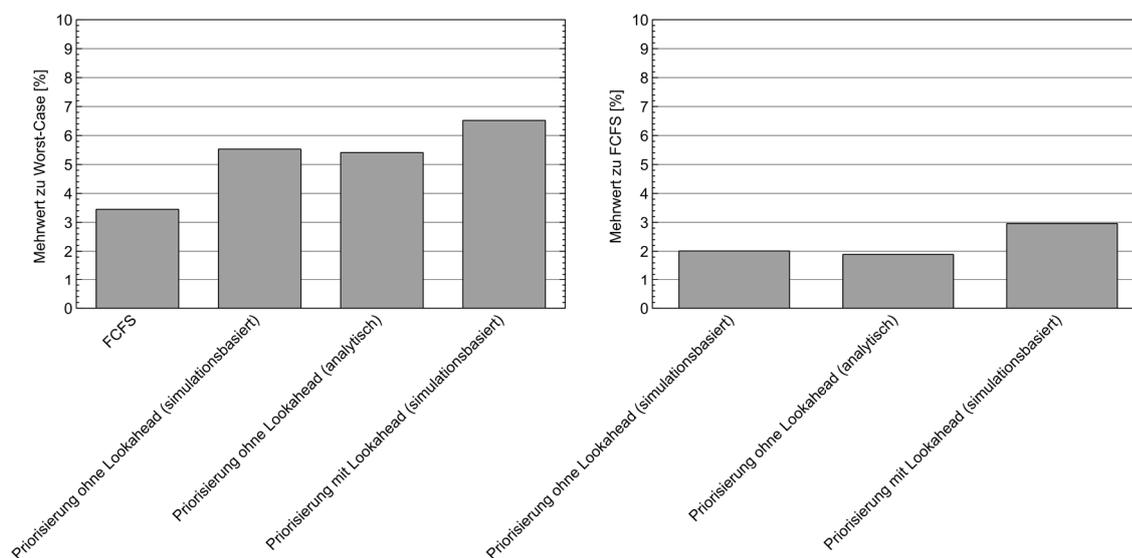


Abbildung 59: Mehrwerte der Priorisierungsmethoden für das mehrdimensionale Fließfertigungssystem im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)

Werden zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten bei der Priorisierungsentscheidung berücksichtigt, so kann auch hier der Mehrwert gegenüber einer Priorisierung ohne Lookahead signifikant gesteigert werden (vgl. Abbildung 58 und Abbildung 59). Der Lookahead wird dabei erneut als Time-Lookahead mit einer Größe von acht Stunden ausgelegt, sodass, gemessen ab dem jeweiligen Entscheidungszeitpunkt t_d , sämtliche Stillstandszeiten innerhalb der nächsten acht Stunden Simulationszeit in den Entscheidungsfindungsprozess einfließen.

6.3 Untersuchungsschwerpunkt 2: Grundlegende Einflussfaktoren

Nachdem zwei verschiedene Fließfertigungssysteme für die Evaluation der hergeleiteten Vorgehensweisen zur Priorisierung von Stillständen vorgestellt und bereits erste Erkenntnisse zum generierbaren Mehrwert aufgezeigt wurden, werden in den folgenden Unterkapiteln nun wichtige Einflussfaktoren auf die Effektivität einer Priorisierung mit und ohne Lookahead untersucht. Damit soll ein grundlegendes Verständnis geschaffen werden, welche Eigenschaften ein Fließfertigungssystem aufweisen muss, damit mit einer Priorisierung ungeplanter Stillstände letztendlich auch ein Mehrwert erzielbar ist. Dabei dienen die in Kapitel 6.2 vorgestellten Versuche als Ausgangsversuche, wobei die Versuchsplanung im Sinne eines „One-Factor-at-a-Time“ Ansatzes durchgeführt wurde, so dass im Folgenden immer nur ein Parameter bzw. Einflussfaktor betrachtet und wertemäßig variiert wird (vgl. Kleppmann 2020: 4). Mit diesem Ansatz ist es somit möglich, den Einfluss eines Parameters bzw. Einflussfaktors auf den Mehrwert einer Priorisierung mit und ohne Lookahead isoliert zu untersuchen. Es sei zudem grundsätzlich vorausgesetzt, dass die Ressource Produktionspersonal limitiert ist, sodass das Treffen einer Priorisierungsentscheidung, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, überhaupt erst erforderlich ist.

6.3.1 Einfluss der Verfügbarkeit der Prozesse

Um den Einfluss der Verfügbarkeit auf den Mehrwert einer Priorisierung von Stillständen zu untersuchen, wurde die Verfügbarkeit aller Prozesse des eindimensionalen Fließfertigungssystems schrittweise um ein Prozentpunkt erhöht bzw. verringert. In Abbildung 60 sind die erzielbaren Mehrwerte in Abhängigkeit der Verfügbarkeit dargestellt.

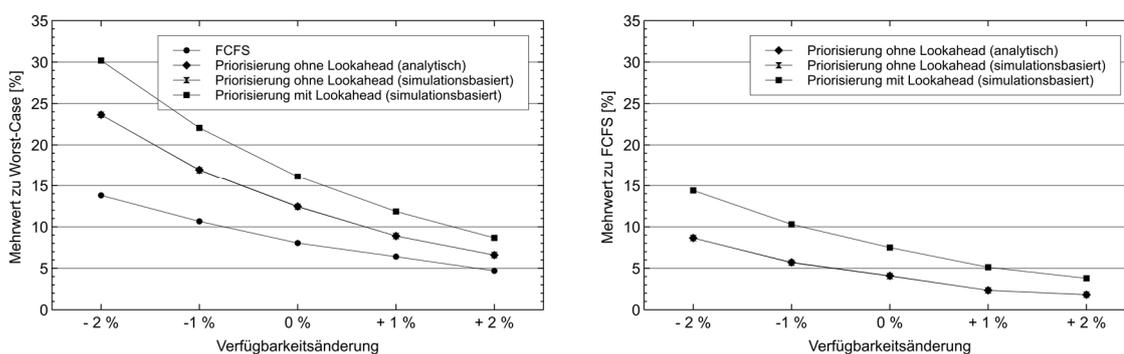


Abbildung 60: Einfluss der Verfügbarkeit auf den Mehrwert einer Priorisierung im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)

Es fällt zunächst auf, dass die erzielbaren Mehrwerte unabhängig von der verwendeten Vorgehensweise zur Priorisierung mit zunehmender Verfügbarkeit

sinken. Dabei kann für alle untersuchten Verfügbarkeitsniveaus festgestellt werden, dass eine Priorisierung mit Lookahead grundsätzlich zu einem höheren Mehrwert führt als eine Priorisierung ohne Lookahead. Bei der Priorisierung ohne Lookahead kann zudem beobachtet werden, dass mit der analytischen wie auch mit der simulationsbasierten Vorgehensweise fast identische Mehrwerte erzielbar sind.

Der Abfall des Mehrwerts mit steigender Verfügbarkeit ist darauf zurückzuführen, dass der mittlere Abstand zwischen den Stillständen $MTBF$ mit zunehmender Verfügbarkeit bei gleichbleibender Stillstandsdauer MDT gemäß Formel 2.3 zunimmt. Folglich nimmt die Anzahl an Stillständen insgesamt ab. Da weniger Stillstände eintreten, kommt es ebenfalls auch zu einer geringeren Anzahl an Priorisierungsentscheidungen, wodurch der Mehrwert einer Priorisierung sinkt. Dieser Zusammenhang bestätigt sich durch die Auswertung der durchgeführten Zuordnungen, bei denen ein verfügbarer Mitarbeiter einem Stillstand zugewiesen wurde. Dafür wurde die Gesamtanzahl an Zuordnungen als Summe der Zuordnungen ohne erforderliche Priorisierung (Anzahl zu priorisierender Stillstände ist kleiner oder gleich der Anzahl des verfügbaren Produktionspersonals) sowie den Zuordnungen mit Priorisierungsentscheidung (Anzahl zu priorisierender Stillstände ist größer als die Anzahl des verfügbaren Produktionspersonals) für jede der fünf Replikation ermittelt und daraus schließlich das arithmetische Mittel gebildet. Wie aus Abbildung 61 hervorgeht, sinkt die Gesamtanzahl an Zuordnungen mit zunehmender Verfügbarkeit von über 17000 auf ungefähr 13000 Zuordnungen. Dabei fällt auf, dass sich der Anteil von Zuordnungen mit Priorisierungsentscheidung mit zunehmender Verfügbarkeit mehr als halbiert, während der Anteil an Zuordnungen ohne erforderliche Priorisierung deutlich zunimmt.

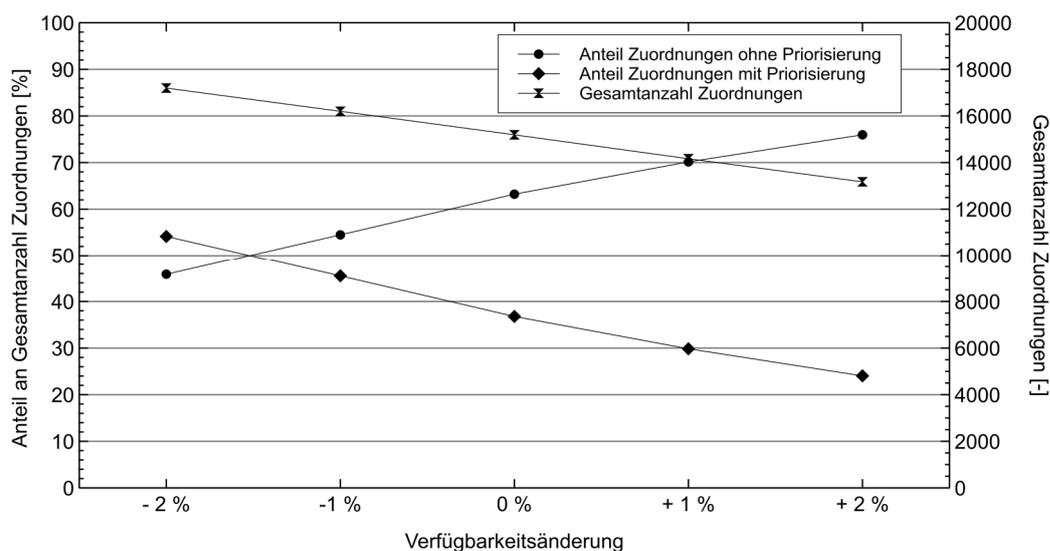


Abbildung 61: Anteil durchgeführter Zuordnungen für die Priorisierung mit Lookahead in Abhängigkeit der Verfügbarkeit

Somit beruht der Abfall des Mehrwertes einer Priorisierung mit und ohne Lookahead bei steigenden Verfügbarkeitswerten auf einem geringeren Anteil an Zuordnungen mit Priorisierungsentscheidung bei einer insgesamt geringeren Gesamtanzahl von Zuordnungen bei der Vermittlung des Produktionspersonals zu eingetretenen Stillständen.

6.3.2 Einfluss der Stillstandsdauer der Prozesse

Nachdem untersucht wurde, wie sich eine Änderung der Verfügbarkeit auf den Mehrwert einer Priorisierung von Stillständen auswirkt, wird nun der Einfluss der Stillstandsdauer näher betrachtet. Dazu wurde der zur Erzeugung der Stillstandstabelle parametrisierte *MTTR*-Wert für jeden Prozess des Modells des ein-dimensionalen Fließfertigungssystems relativ zu dem Wert des Ausgangsversuchs verändert. Hier sei darauf hingewiesen, dass damit in erster Linie die mittlere Reparaturdauer, die ein Produktionsmitarbeiter zur Instandsetzung eines stillstehenden Prozesses benötigt, bestimmt wird. Die gesamte Stillstandsdauer ergibt sich in dieser Versuchsanordnung schließlich aus der Summe der durch die Priorisierung beeinflussbaren Zeit bis der Mitarbeiter an dem stillstehenden Prozess vor Ort ist und der Reparaturdauer. Da die gesamte Stillstandsdauer dennoch maßgeblich durch die parametrisierte Reparaturdauer bestimmt wird, soll im Folgenden zum einfacheren Verständnis weiterhin von Stillstandsdauer gesprochen werden.

Wie die Ergebnisse dieses Versuchs zeigen, sinkt der Mehrwert einer Priorisierung mit und ohne Lookahead im Vergleich zu dem Worst-Case-Szenario mit zunehmender Stillstandsdauer, während der Mehrwert im Vergleich zur FCFS-Strategie aufgrund des annähernd gleichen Gradienten zunächst relativ konstant bleibt (Abbildung 62).

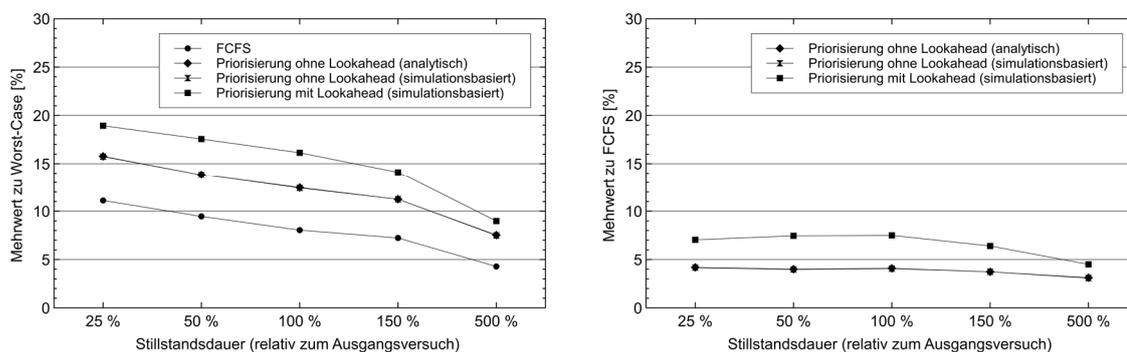


Abbildung 62: Einfluss der Stillstandsdauer auf den Mehrwert einer Priorisierung im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)

Dabei bleibt sowohl der Anteil der Zuordnungen, bei denen keine Priorisierung erforderlich ist, wie auch der Anteil der Zuordnungen mit Priorisierungsentscheidung unabhängig von der Stillstandsdauer auf einem annähernd konstanten Niveau (Abbildung 63). Allerdings sinkt die Gesamtanzahl der Zuordnungen bei der Vermittlung des Produktionspersonals zu stillstehenden Prozessen mit zunehmender Stillstandsdauer von über 60000 Zuordnungen auf unter 4000 Zuordnungen. Dies liegt daran, dass mit zunehmender Stillstandsdauer bei gleichbleibender Verfügbarkeit der Abstand zwischen den Stillständen zunimmt, wobei die Anzahl eintretender Stillstände wiederum abnimmt (vgl. Formel 2.3). Dies führt zu einer ebenfalls abnehmenden Anzahl an Zuordnungen mit Priorisierungsentscheidung und schließlich zu der beobachteten Reduzierung des Mehrwerts einer Priorisierung mit wie auch ohne Lookahead mit zunehmender Stillstandsdauer.

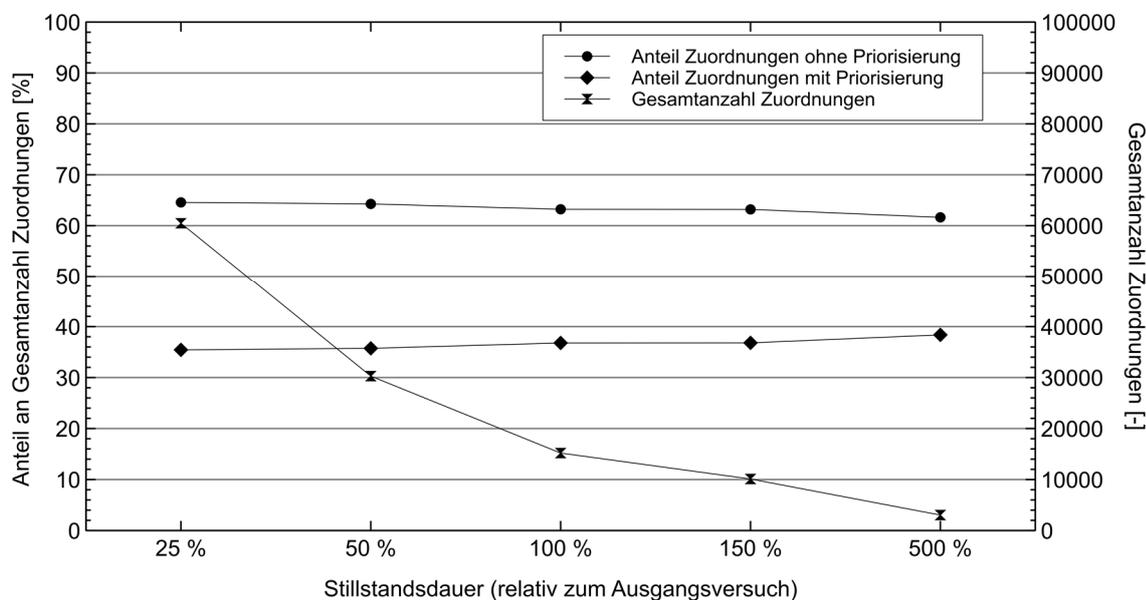


Abbildung 63: Anteil durchgeführter Zuordnungen für die Priorisierung mit Lookahead in Abhängigkeit der Stillstandsdauer

6.3.3 Einfluss der Pufferkapazität der Verkettungselemente

Da die Eigenschaft von pufferfähigen Verkettungselementen, die Auswirkungen von Stillständen an Prozessen abzumildern, in einem unmittelbaren Zusammenhang mit der in dieser Arbeit untersuchten ausbringungsoptimierten Priorisierung von Stillständen steht, wird der Einfluss der Pufferkapazität, d. h. die maximale Anzahl an Werkstücken, die zeitgleich von einem Verkettungselement aufgenommen werden kann, untersucht. Dafür wurde die Pufferkapazität aller Verkettungselemente relativ zu den Werten des Ausgangsversuchs des Modells eines eindimensionalen Fließfertigungssystems stufenweise verändert, sodass letztendlich ein Spektrum von einer starren Verkettung (0 % Pufferkapazität) bis

zur einer losen Verkettung (ab 5000 % Pufferkapazität) abgedeckt wird (vgl. Abbildung 5). Die relativ hohen Werte der eingestellten Pufferkapazität für eine lose Verkettung resultieren aus der Tatsache, dass im Verlauf der Simulationszeit ein stetiger Anstieg der Pufferfüllstände der Verkettungselemente festgestellt wurde. Um dabei sicherzustellen, dass ein Pufferfüllstand nicht die maximale Pufferkapazität erreicht und damit das Kriterium einer losen Verkettung verletzt wird, wurden entsprechend hohe Werte für die Pufferkapazität gewählt. Hier sei angemerkt, dass das System somit auch keinen eingeschwungenen Zustand erreicht, der üblicherweise für die Durchführung von Simulationsexperimenten angestrebt wird. Allerdings wird für die hier durchgeführten Untersuchungen auch kein eingeschwungenen Zustand benötigt.

Die Versuche zeigen, dass die Mehrwerte der hergeleiteten Vorgehensweisen zur Priorisierung ungeplanter Stillstände mit zunehmender Pufferkapazität ansteigen, wobei sich ab einer Pufferkapazität von 5000 % eine Sättigung einstellt (Abbildung 64).

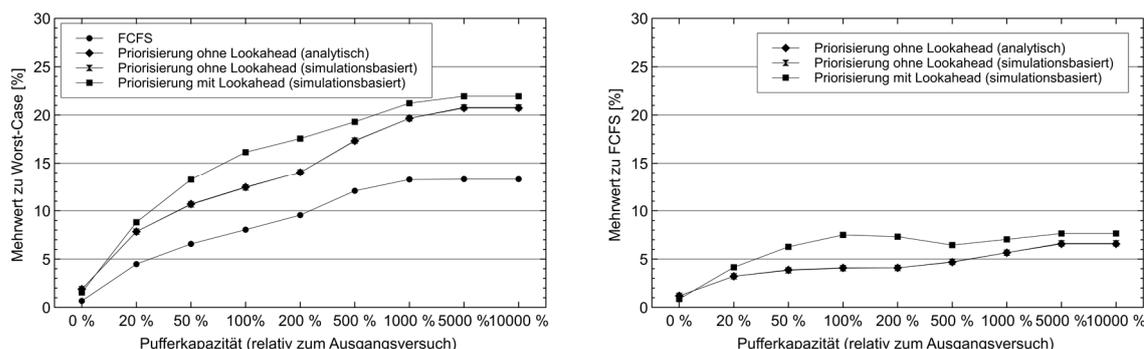


Abbildung 64: Einfluss der Pufferkapazität auf den Mehrwert einer Priorisierung im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)

Diese Sättigung ist dabei unabhängig von der verwendeten Vorgehensweise und ist ebenfalls bei einer Priorisierung nach FCFS beobachtbar. Es zeigt sich, dass bei einer starren Verkettung nur ein sehr geringer und statistisch nicht signifikanter Mehrwert generierbar ist, während bei einer losen Verkettung der höchste Mehrwert erzielt wird. Dies liegt daran, dass bei einer starren Verkettung nur die Prozesse als pufferfähige Produktionsressourcen zur Verfügung stehen, wobei die Pufferfähigkeit dieser Ressourcen in der Regel niedrig ist. Folglich ist die latente Phase von Stillständen bei starrer Verkettung vernachlässigbar gering, sodass auch der Unterschied zwischen den behebungsrundenabhängigen Gesamtausbringungsverlusten gering ist. Da die verschiedenen Behebungsreihenfolgen somit zu annähernd gleichen Auswirkungen auf die Leistung des gesamten Fließfertigungssystems führen, kann mit einer Priorisierung von Stillständen bei einer starren Verkettung kein signifikanter Mehrwert erzielt werden.

Im Gegensatz dazu führen die möglichen Behebungsreihenfolgen bei einer losen Verkettung zu unterschiedlichen Auswirkungen. Da hier sämtliche Stillstandszeiten mit Ausnahme von Primärstillständen, die direkt die Referenzprozessstufe betreffen, durch vorhandene Pufferkompensation ausgeglichen werden, kommt es bei der losen Verkettung zu dem höchsten generierbaren Mehrwert, der mit einer Priorisierung von Stillständen erzielbar ist.

Bei Betrachtung der Verläufe der Mehrwerte in Abbildung 64 fällt zudem auf, dass der Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead im Bereich von 50 % bis 200 % Pufferkapazität deutlich größer als der Mehrwert einer Priorisierung ohne Lookahead ist. Dieser Unterschied ist bei niedriger wie auch höherer Pufferkapazität nicht mehr so ausgeprägt feststellbar. Um dies näher zu analysieren, ist in Abbildung 65 der Anteil an Zuordnungen mit Priorisierungsentscheidung, bei denen ein behebungsreihenfolgenunabhängiger Gesamtausbringungsverlust ermittelt wurde, dargestellt. Ein behebungsreihenfolgenunabhängiger Gesamtausbringungsverlust bedeutet dabei, dass für alle möglichen Behebungsreihenfolgen der gleiche Wert für den Gesamtausbringungsverlust berechnet wurde.

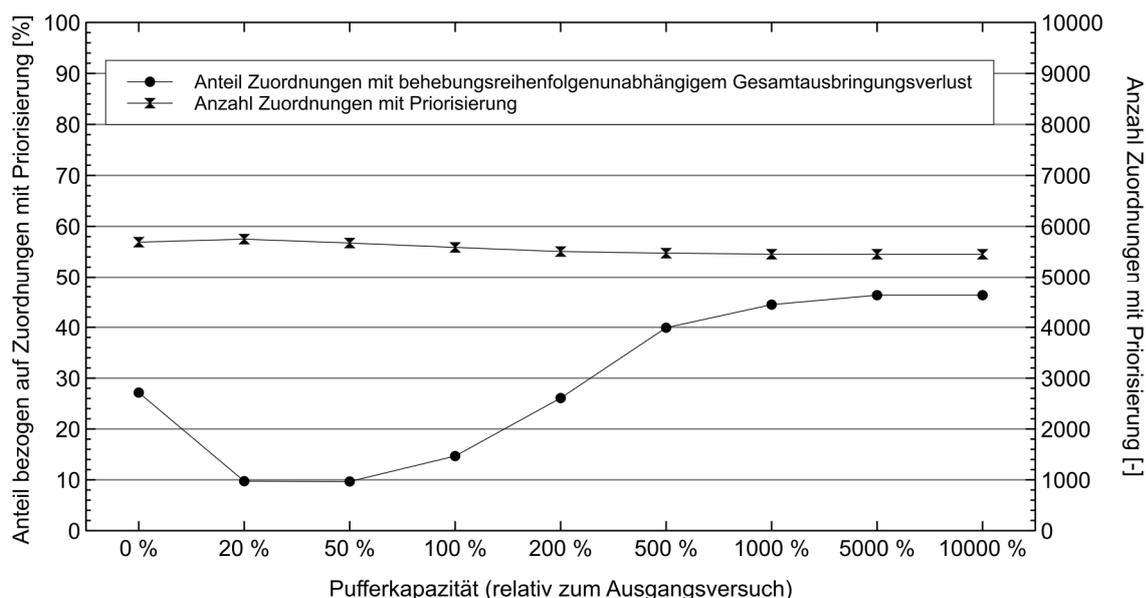


Abbildung 65: Anzahl und Anteil durchgeführter Zuordnungen mit Priorisierungsentscheidung für die Priorisierung mit Lookahead in Abhängigkeit der Pufferkapazität

Aus dieser Auswertung wird deutlich, dass bei niedriger und insbesondere bei hoher Pufferkapazität der Anteil an Zuordnungen mit Priorisierungsentscheidung, bei denen ein behebungsreihenfolgenunabhängiger Gesamtausbringungsverlust ermittelt wurde, deutlich höher ausfällt, als in dem Bereich zwischen 50 % und 200 % Pufferkapazität. Dabei bleibt die Anzahl an Zuordnungen mit Priorisierungsentscheidung mit steigender Pufferkapazität annähernd gleich. Folglich kann bei hohen Pufferkapazitäten in über 40 % der Zuordnungen mit

Priorisierungsentscheidung die Auswirkung der ungeplanten wie auch geplanten Stillstände nicht durch eine andere Priorisierungsreihenfolge beeinflusst werden. Dies untermauert die Hypothese, dass mit zunehmender Pufferkapazität ebenfalls die Wahrscheinlichkeit ansteigt, dass ein geplanter Stillstand auch ohne Beeinflussung durch die Priorisierung keine manifeste Phase aufweist und somit die Leistung des Fließfertigungssystems nicht beeinflusst wird. Bei sehr niedrigen Pufferkapazitäten hingegen ist der Mehrwert einer Priorisierung so gering, da eine Beeinflussung der zum Stillstandseintritt vorhandenen Pufferkompensation zwischen der Referenzprozessstufe und der Stillstandsprozessstufe aufgrund der geringen Pufferkapazität nicht möglich ist.

6.3.4 Einfluss der Annahme der Reparaturdauer von Prozessen

Da bei allen Vorgehensweisen zur Aufstellung der Behebungsreihenfolgen eine Reparaturdauer für jeden zu priorisierenden Stillstand benötigt wird, soll als weiterer Einflussfaktor die Annahme der Reparaturdauer betrachtet werden. Dazu werden die Ergebnisse mit dem bisherigen Vorgehen, bei dem die exakte Reparaturdauer der zu priorisierenden Stillstände zum Entscheidungszeitpunkt bekannt ist, mit den Ergebnissen verglichen, bei denen die Reparaturdauer durch die mittlere Reparaturdauer ($MTTR$) abgeschätzt wird. In Abbildung 66 ist die erzielbare Ausbringung in Abhängigkeit der Vorgehensweise zur Priorisierung für das eindimensionale Fließfertigungssystem dargestellt. Der Wert für die mittlere Reparaturdauer eines Prozesses entspricht dabei dem zur Generierung der Stillstandstabelle herangezogenen Wert (vgl. Anhang A.2, Tabelle 10, Spalte $MTTR_i$).

Auch bei Verwendung der mittleren Reparaturdauer zur Bestimmung der behebungsbereitschaftsreihenfolgenabhängigen Stillstandsdauer kann mit allen hergeleiteten Vorgehensweisen zur Priorisierung mit und ohne Lookahead eine signifikant höhere Ausbringung im Vergleich zu einer FCFS-Strategie erzielt werden. Dabei ist anzumerken, dass bei einer FCFS-Strategie Reparaturdauern im Entscheidungsfindungsprozess nicht berücksichtigt werden, sodass der Wert für die Ausbringung exakt dem Wert des Ausgangsversuchs entspricht (vgl. Abbildung 55). Des Weiteren ist ersichtlich, dass eine Priorisierung mit Lookahead auch in diesem Fall zu einer signifikant höheren Ausbringung im Vergleich zu einer Priorisierung ohne Einbeziehung zukünftiger Stillstandszeiten führt.

Werden die Mehrwerte der unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Priorisierung im Vergleich zur FCFS-Strategie näher betrachtet, so zeigt sich, dass diese sich nur geringfügig von den erzielbaren Mehrwerten bei Verwendung der exakten Reparaturdauer unterscheiden (Abbildung 56 rechts sowie Abbildung 67 rechts).

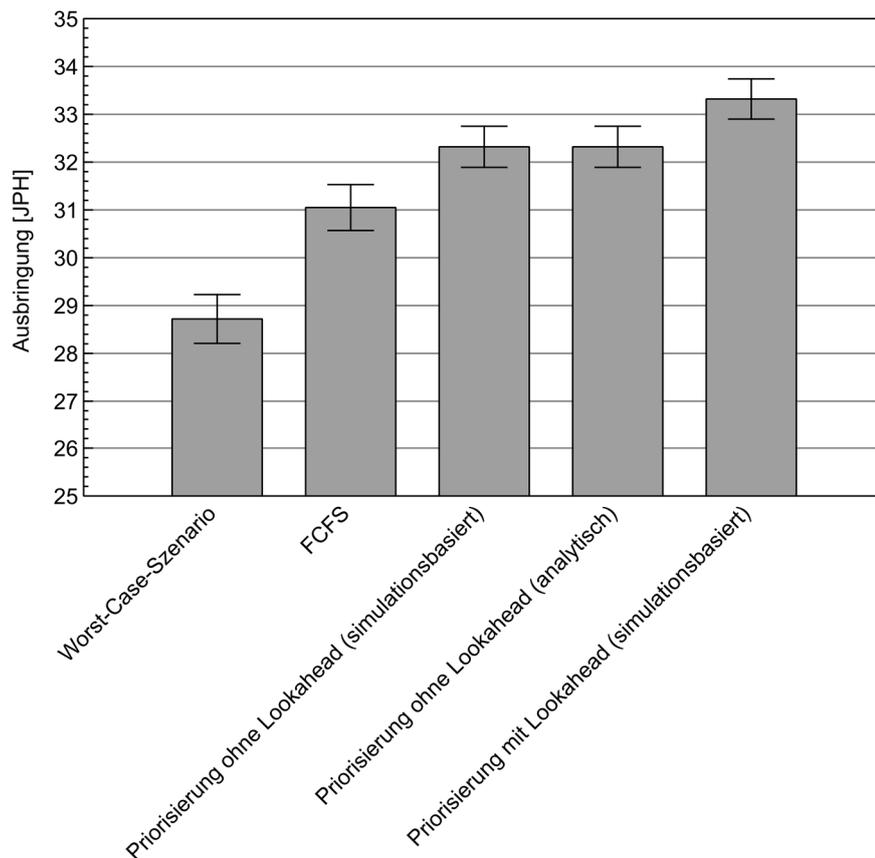


Abbildung 66: Durchschnittlich erzielbare Ausbringung des eindimensionalen Fließfertigungssystems bei Verwendung der mittleren Reparaturdauer

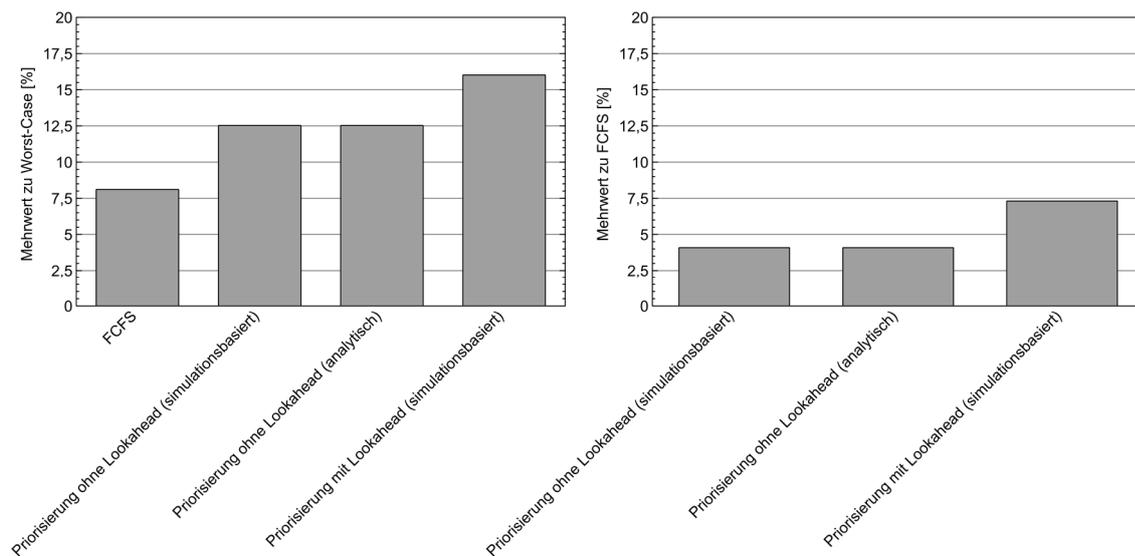


Abbildung 67: Mehrwerte der Priorisierungsmethoden für das eindimensionale Fließfertigungssystem bei Verwendung der mittleren Reparaturdauer im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)

Ein ähnliches Bild zeigt sich für das mehrdimensionale Fließfertigungssystem. Auch hier können bei Verwendung der mittleren Reparaturdauer weiterhin signifikant höhere Werte für die Ausbringung des Systems erzielt werden, wenn ungeplante Stillstände nach den hergeleiteten Vorgehensweisen priorisiert werden (Abbildung 68). Dabei zeigt sich erneut, dass eine Priorisierung mit Lookahead zu einer signifikant höheren Ausbringung im Vergleich zu einer Priorisierung ohne Lookahead führt.

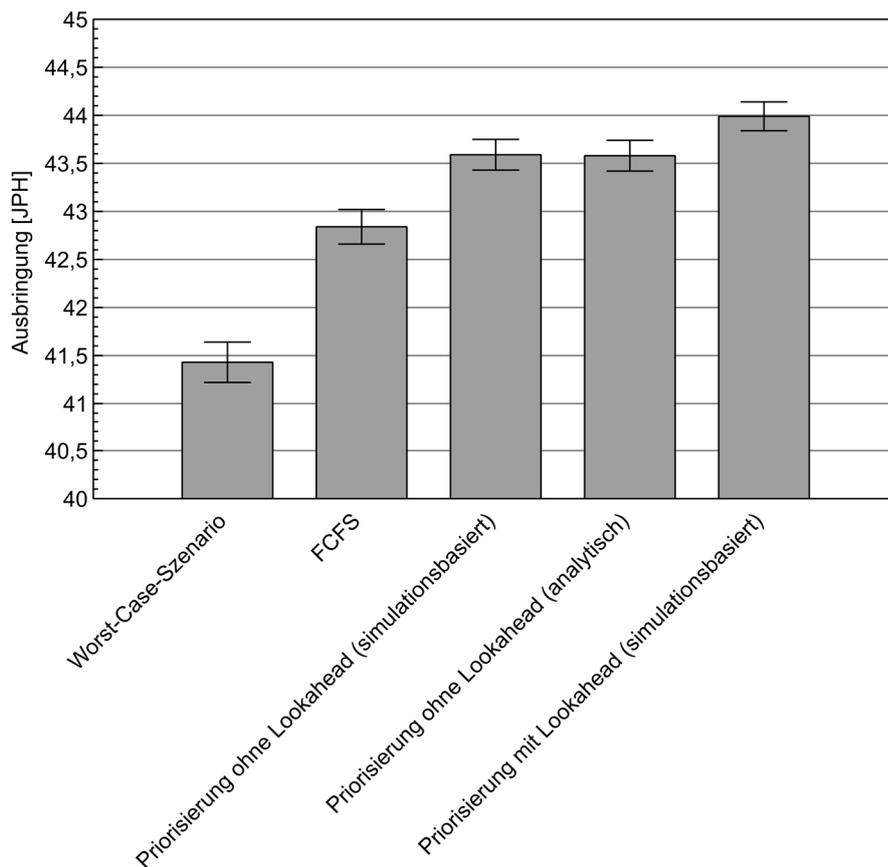


Abbildung 68: Durchschnittlich erzielbare Ausbringung des mehrdimensionalen Fließfertigungssystems bei Verwendung der mittleren Reparaturdauer

Darüber hinaus kann auch hier festgestellt werden, dass beim Vergleich der Mehrwerte der hergeleiteten Vorgehensweisen im Vergleich zur FCFS-Strategie geringfügig niedrigere Werte als bei Verwendung der exakten Reparaturdauer erzielbar sind (Abbildung 59 rechts sowie Abbildung 69 rechts).

Da die Unterschiede in den Mehrwerten sowohl bei dem eindimensionalen Fließfertigungssystem als auch bei dem mehrdimensionalen System aus nicht signifikant unterschiedlichen Werten für die Ausbringung resultieren, kann für die Annahme der Reparaturdauer ebenfalls die mittlere Reparaturdauer verwendet werden. Auf diese Erkenntnis wird bei der Simulationsstudie eines real existierenden Fließfertigungssystems in Kapitel 7 zurückgegriffen.

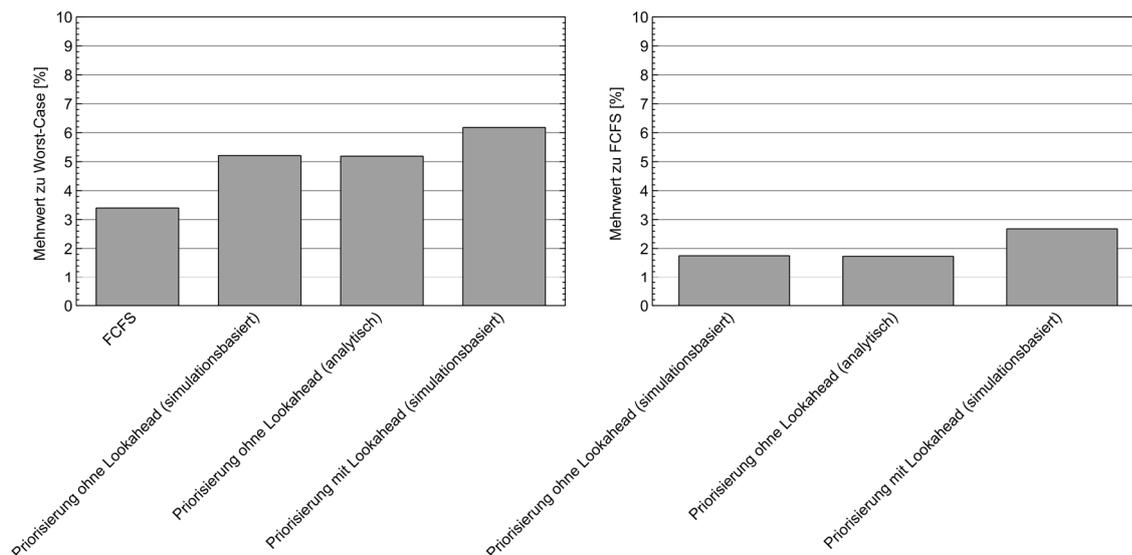


Abbildung 69: Mehrwerte der Priorisierungsmethoden für das mehrdimensionale Fließfertigungssystem bei Verwendung der mittleren Reparaturdauer im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)

6.4 Untersuchungsschwerpunkt 3: Einflussfaktoren Lookahead

Nachdem grundlegende Einflussfaktoren auf den Mehrwert einer Priorisierung von ungeplanten Stillständen identifiziert und analysiert wurden, werden nun die Parameter untersucht, die sich speziell aus der Anwendung eines Lookahead ergeben. Dazu zählt neben der Größe eines Lookahead, die sowohl für einen Time- wie auch einen Request-Lookahead variiert wird, auch der Anteil, den geplante Stillstände an der Gesamtzahl eintretender Stillstände haben.

6.4.1 Einfluss des Anteils geplanter Stillstände an der Gesamtzahl eintretender Stillstände

Da bei einer praxisnahen Anwendung der Priorisierung von Stillständen unter Einbeziehung eines Lookahead nicht davon ausgegangen werden kann, dass sämtliche zukünftig eintretende Stillstandszeiten zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt bekannt sind, wird der Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead im Folgenden in einem Setup analysiert, in dem neben geplanten und im Lookahead enthaltenden Stillständen auch ungeplante, d. h. zum Entscheidungszeitpunkt nicht bekannte Stillstände eintreten (vgl. Hegemann und Nickel 2020: 341).

Dazu wurde aus der Stillstandstabelle des Versuchsmodells (vgl. Kapitel 6.1) eine zweite Tabelle erzeugt, die die Stillstandszeiten des Lookahead beinhaltet. Die Auswahl der Stillstandszeiten erfolgte dabei entsprechend des untersuchten Wertes für den Anteil geplanter Stillstände an der Gesamtzahl eintretender

Stillstände. So wurde beispielsweise für einen Anteil von 50 % nur jeder zweite Stillstand aus der Stillstandstabelle in die Tabelle für den Lookahead übertragen.

In Abbildung 70 sowie Abbildung 71 ist schließlich der erzielbare Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead in Abhängigkeit des Anteils geplanter Stillstände an der Gesamtanzahl eintretender Stillstände für das eindimensionale wie auch für das mehrdimensionale Fließfertigungssystem dargestellt. Der Mehrwert bezieht sich dabei entweder auf die Ausbringung bei Anwendung des Worst-Case-Szenarios oder auf die Ausbringung bei Anwendung einer FCFS-Strategie. Obwohl der hier untersuchte Einflussfaktor a priori nur den Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead beeinflussen kann, sind die erzielbaren und von dem Anteil geplanter Stillstände unabhängigen Mehrwerte der analytischen sowie der simulationsbasierten Vorgehensweise zur Priorisierung ohne Lookahead zum Vergleich ebenfalls abgebildet.

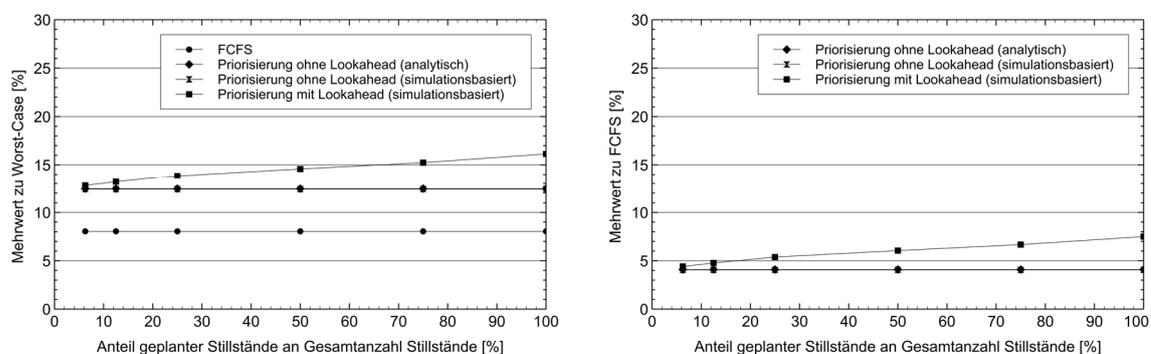


Abbildung 70: Einfluss des Anteils geplanter Stillstände auf den Mehrwert einer Priorisierung für das eindimensionale Fließfertigungssystem im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)

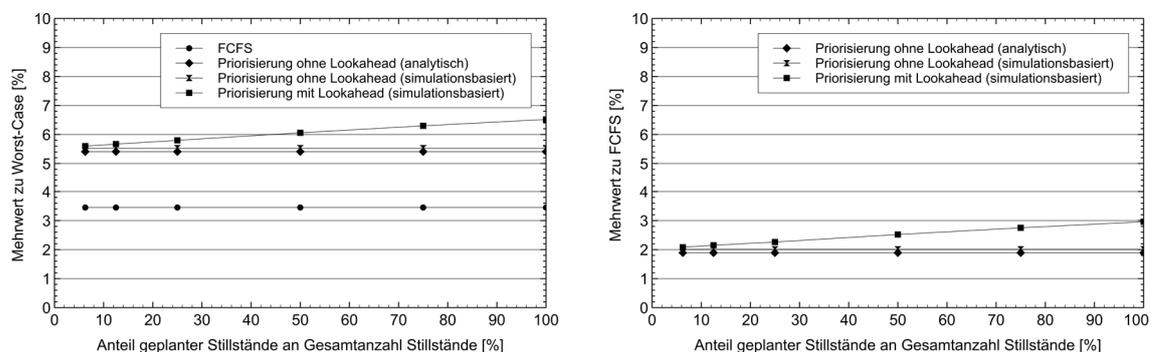


Abbildung 71: Einfluss des Anteils geplanter Stillstände auf den Mehrwert einer Priorisierung für das mehrdimensionale Fließfertigungssystem im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)

Dabei zeigt sich für die beiden untersuchten Fließfertigungssysteme, dass der Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead mit sinkendem Anteil geplanter Stillstände nahezu linear abnimmt, wobei der Mehrwert stets größer ist als der Mehrwert, der mit einer Priorisierung ohne Lookahead erzielbar ist.

Eine tiefere Analyse einzelner Priorisierungsentscheidungen hat gezeigt, dass mit abnehmendem Anteil geplanter Stillstände eine gezielte Beeinflussung der verfügbaren Pufferkompensation für einzelne nach dem Priorisierungszeitpunkt eintretende Stillstände durch die Wahl der Priorisierungsreihenfolge nicht zu dem gewünschten Ergebnis einer höheren latenten Phase dieser Stillstände durch eine entsprechende Anzahl an Werkstücken zwischen der Stillstandsprozessstufe und der Referenzprozessstufe führt. Vielmehr wird die zum Stillstandseintritt verfügbare Pufferkompensation durch das Auftreten der ungeplanten und nicht im Lookahead berücksichtigten Stillstandszeiten beeinflusst, sodass eine Priorisierung mit Lookahead bei einem geringen Anteil geplanter Stillstände keinen signifikanten Mehrwert gegenüber einer Priorisierung ohne Lookahead aufweist.

6.4.2 Einfluss der Lookahead-Größe

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Lookahead-Größe auf den Mehrwert einer Priorisierung näher untersucht. Da die Art des in den bisherigen Untersuchungen verwendeten Lookahead ein Time-Lookahead ist, wird die Größe dieses Lookahead durch einen festen Zeitraum, beginnend ab dem Entscheidungszeitpunkt t_d , definiert (vgl. Kapitel 2.3.3). Die in diesem Zeitraum eintretenden Stillstände sind dann als Lookahead zum Zeitpunkt t_d bekannt und werden in die Priorisierungsentscheidung miteinbezogen.

In Abbildung 72 ist der Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead in Abhängigkeit der Lookahead-Größe dargestellt, wobei der Wert für die Größe zwischen einer und 48 Stunden variiert wurde.

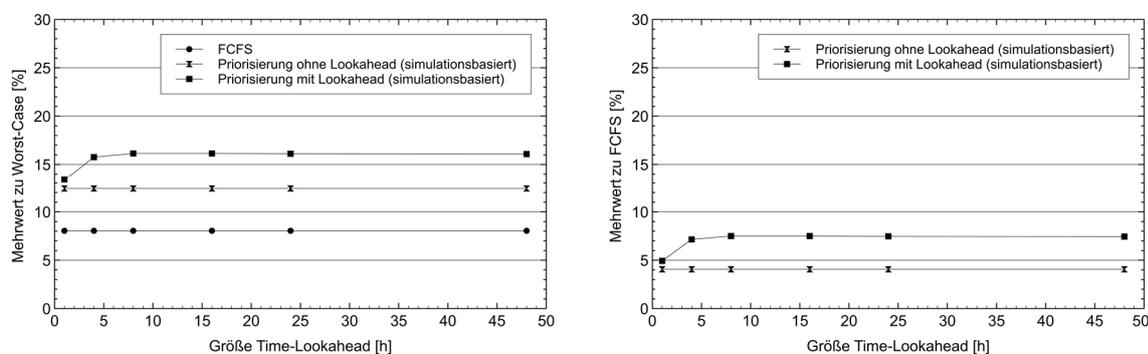


Abbildung 72: Einfluss der Größe des Time-Lookahead auf den Mehrwert einer Priorisierung im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)

Als Vergleich ist zudem der erzielbare Mehrwert einer Priorisierung ohne Lookahead angegeben. Wie die Ergebnisse zeigen, steigt der Mehrwert einer Priorisierung mit zunehmender Größe des Lookahead an, wobei bereits ab einer Größe von acht Stunden eine Sättigung des Mehrwerts feststellbar ist. Folglich führt ein größerer Lookahead zu keinem signifikanten Anstieg des Mehrwerts.

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, wie sich der Einfluss der Lookahead-Größe auf den Mehrwert einer Priorisierung auswirkt, wenn der Lookahead als Request-Lookahead beschrieben wird. Die Größe des Lookahead wird dann nicht durch einen Zeitraum, sondern durch eine Anzahl an Stillständen, die zum Entscheidungszeitpunkt bekannt sind, definiert. In Abbildung 73 ist der Mehrwert einer Priorisierung in Abhängigkeit der Größe des Request-Lookahead dargestellt, wobei Werte zwischen fünf und fünfzig Stillständen untersucht wurden.

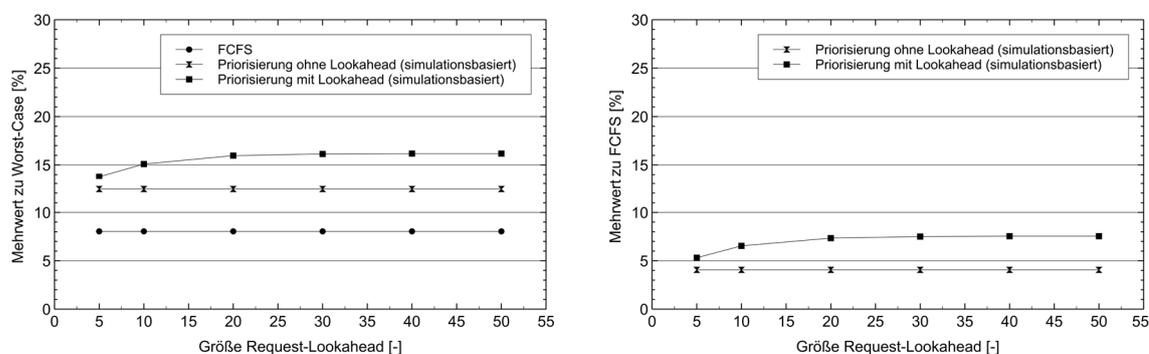


Abbildung 73: Einfluss der Größe des Request-Lookahead auf den Mehrwert einer Priorisierung im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)

Auch bei einem Request-Lookahead zeigt sich ein grundsätzlich ähnliches Bild wie bei der Untersuchung der Größe des Time-Lookahead. Der Mehrwert einer Priorisierung steigt erneut mit zunehmender Größe des Lookahead an, bis schließlich eine Sättigung ab zwanzig im Lookahead berücksichtigter Stillstandszeiten eintritt.

Eine zu gering gewählte Größe eines Lookahead führt somit zu einer unvollständigen Ausschöpfung des Potenzials, welches eine Priorisierung mit Lookahead im Hinblick auf eine Steigerung der Ausbringung eines Fließfertigungssystems besitzt. Im Gegensatz dazu führt eine zu groß gewählte Lookahead-Größe zu keinem weiteren Anstieg des Mehrwerts. Allerdings steigt mit zunehmender Lookahead-Größe die zur Entscheidungsfindung benötigte Simulationszeit weiter an, wodurch sich in der Regel auch die benötigte Rechenzeit verlängert. Dies ist für eine praxisnahe Anwendung zu berücksichtigen.

6.5 Fazit

In diesem Kapitel wurde zunächst die Umsetzung der hergeleiteten Vorgehensweisen zur Priorisierung ungeplant eintretender Stillstände mit und ohne Berücksichtigung eines Lookahead in ein Entscheidungsunterstützungssystem beschrieben, welches in die Simulationsumgebung Siemens Plant Simulation implementiert wurde. Dabei wurde insbesondere auf die Implementierung einer manuellen Stillstandsaufrägung und der Abbildung des Produktionspersonals eingegangen. Dadurch wurde schließlich die Möglichkeit geschaffen, zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten in Form eines Lookahead in die Priorisierungsentscheidungen einfließen zu lassen. Als weiteren Schwerpunkt der Implementierung wurde auf die Initialisierung eines Forecast-Simulationsmodells, welches zur Entscheidungsfindung möglichst dem exakten Abbild des eigentlichen Versuchsmodells zum Entscheidungszeitpunkt entsprechen sollte, eingegangen.

Im zweiten Teil dieses Kapitels wurde dann die Evaluierung der hergeleiteten Vorgehensweisen anhand zweier Modelle von Fließfertigungssystemen vorgestellt. Dabei konnte zunächst gezeigt werden, dass bereits mit einer ausbringungsoptimierten Priorisierung ohne Berücksichtigung eines Lookahead für die beiden untersuchten Fließfertigungssysteme eine signifikante Ausbringungssteigerung gegenüber einer FCFS-Strategie erzielt werden kann, wobei der Unterschied in der erzielbaren Ausbringung zwischen der analytischen und der simulationsbasierten Vorgehensweise für die untersuchten Systeme nicht signifikant ist. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass eine Priorisierung durch die Berücksichtigung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten in Form eines Lookahead zu einer signifikant höheren Ausbringung im Vergleich zu einer Priorisierung ohne Lookahead führt.

Im Rahmen von weiteren Simulationsexperimenten wurden ferner verschiedene Einflussfaktoren auf den erzielbaren Mehrwert einer Priorisierung mit sowie ohne Lookahead identifiziert und analysiert. Daraus ergeben sich für die Anwendung einer Priorisierung folgende Anforderungen:

- Die Verfügbarkeiten der Prozesse eines Fließfertigungssystems sollten Werte aufweisen, die das Auftreten von Priorisierungsentscheidungen überhaupt ermöglichen. Je niedriger dabei die Verfügbarkeit ist, desto höher ist die Anzahl an Stillständen und desto höher ist auch die Anzahl an Priorisierungsentscheidungen und folglich der Mehrwert einer Priorisierung.
- Die Stillstandsdauern der Prozesse sollten ebenfalls Werte aufweisen, die das Auftreten von Priorisierungsentscheidungen überhaupt ermöglichen. Je kürzer dabei die Stillstandsdauer bei gleichbleibender Verfügbarkeit ist, desto höher ist die Anzahl an Priorisierungsentscheidungen und folglich der Mehrwert einer Priorisierung.

- Die maximalen Pufferkapazitäten der Verkettungselemente sollten Werte aufweisen, die möglichst hoch sind, da mit einer losen Verkettung der größte Mehrwert erzielbar ist. An dieser Stelle sei allerdings auch angemerkt, dass diese Aussage nur für das Ziel einer maximalen Ausbringung gilt. Werden weitere Beurteilungskriterien, wie beispielsweise Bestände oder Durchlaufzeiten, hinzugezogen, sind hohe Pufferkapazitäten und entsprechende Füllstände negativ zu betrachten. Bei einer starren Verkettung und bei entsprechend geringen Pufferkapazitäten ist aufgrund der fehlender Pufferkompensationsmöglichkeit kein signifikanter Mehrwert feststellbar. Für die Anwendung einer Priorisierung mit Lookahead ist zu beachten, dass der Mehrwert dieser Priorisierung im Vergleich zu einer Priorisierung ohne Lookahead bei hohen Pufferkapazitäten sinkt, da die Stillstandszeiten aller Prozessstufen, mit Ausnahme der Referenzprozessstufe, unabhängig von einer Beeinflussung durch die Priorisierung kompensiert werden.
- Für die Anwendung einer Priorisierung mit Lookahead sollten möglichst viele der zukünftig eintretenden und innerhalb des Lookahead berücksichtigten Stillstandszeiten bekannt sein. Je weniger ungeplante Stillstände in dem Zeitraum, der durch die Lookahead-Größe definiert ist, auftreten, desto höher ist der Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead.
- Die Größe des Lookahead sollte dabei nicht zu kurz gewählt werden, da dies zu einer unvollständigen Ausschöpfung des Potenzials zur Steigerung der Ausbringung eines Fließfertigungssystems führt. Allerdings ist auch eine zu groß gewählte Lookahead-Größe zu vermeiden, da diese bei gleichbleibendem Mehrwert schließlich nur zu einer längeren Entscheidungsfindungszeit führt.

7 Anwendung in der industriellen Praxis

Um eine praxisgerechte Validierung der hergeleiteten Vorgehensweisen zur Priorisierung ungeplanter Stillstände mit und ohne Berücksichtigung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten in Form eines Lookahead zu ermöglichen, wird in diesem Kapitel als prototypische Anwendung des entwickelten Entscheidungsunterstützungssystems eine Simulationsstudie für ein komplexes Fließfertigungssystem aus der Automobilindustrie durchgeführt.

7.1 Anwendungsbeispiel Kurbelgehäusefertigungslinie

Als Anwendungsszenario dient eine Fertigungslinie zur Herstellung von Kurbelgehäusen, wobei die Organisationsform ein Fließfertigungssystem ist (vgl. Abbildung 2). Ausgehend von einem Gussrohteil werden die Kurbelgehäuse in mehreren und miteinander flexibel verketteten Prozessstufen bis zur Erreichung der Endgeometrie bearbeitet. Die gesamte Prozesskette besteht aus 40 Prozessstufen, wovon 25 einfache und 15 redundante Prozessstufen sind (Anhang A.4). Zwischen den Prozessstufen werden die Werkstücke auf wechselnden Werkstückträgern über pufferfähige Transportbänder bewegt. In der Prozesskette befinden sich zudem drei Entkopplungsmodule, deren Hauptfunktion die Minderung der Auswirkung größerer Stillstände innerhalb der Prozesskette ist. Die überwiegend automatisierten Arbeitsschritte gliedern sich in: Beladung und Fixierung des Rohteils auf einen Werkstückträger, Durchführung diverser Fräs- und Bohroperationen zur Innen- wie Außenbearbeitung, Zwischenwaschung durch Nass- und Trockenreinigung, Umladung auf einen neuen Werkstückträger, mechanische Erzeugung und Überprüfung der Oberflächenstruktur zur Beschichtung der Zylinderlaufflächen, thermische Erwärmung vor der Beschichtung, Beschichtung der Zylinderlaufflächen, Abkühlung der Werkstücke, Montage der Lagerdeckel, Umlagerung auf einen neuen Werkstückträger, Durchführung diverser Bohr-, Fräs- und Reiboperationen sowie Messoperationen, Zwischenwaschung durch Nassreinigung, Honen und Messung der Zylinderbohrungen sowie der Kurbelwellenbohrung, Umlagerung auf einen neuen Werkstückträger, Zwischenwaschung durch diverse Nass- und Trockenreinigungsoperationen, Montage von Verschlusssteilen und Lecktest, mehrstufige Qualitätskontrolle und schließlich Einspeisung in ein Fertigteillager.

Insgesamt werden drei Varianten von Kurbelgehäusen in diesem Fließfertigungssystem gefertigt. Da allerdings die Losgrößen, in denen die einzelnen Varianten sortenrein in dem Fließfertigungssystem bearbeitet werden, hohe Werte aufweisen, beschränkt sich diese Simulationsstudie auf die Abbildung der am häufigsten gefertigten Variante.

Die Eingabedaten für das ereignisdiskrete Simulationsmodell sind dem Anhang A.4 zu entnehmen, wobei die hier verwendeten Daten im Vergleich zu den Originaldaten abgeändert wurden. Dies wirkt sich allerdings nicht auf die mit dieser Simulationsstudie erzielbaren Erkenntnisse aus.

Zur Ermittlung der Verfügbarkeit sowie der Reparaturdauer von Stillständen wurde das Ausfallverhalten mit Hilfe historischer Daten über einen Zeitraum von zwei Monaten analysiert. Dabei wurden die auf Laufzeitprotokollen der Prozesse basierenden Werte eines BDE/MDE-Systems mit manuell erfassten Daten, wie den Einträgen in ein Schichtbuch, verglichen, um schließlich eine möglichst realitätsnahe Abbildung des Ausfallverhaltens innerhalb des Simulationsmodells zu gewährleisten (vgl. Kapitel 2.3.1). In diesem Rahmen war es auch möglich, für die Werte der Verfügbarkeit sowie der mittleren Reparaturdauer (*MTTR*) nur die Stillstandszeiten zu berücksichtigen, die für die Instandsetzung eines Prozesses angefallen sind. Dies ist vor dem Hintergrund der in Kapitel 6.1 beschriebenen Abbildung des zur Stillstandsbehebung zuständigen Produktionspersonals im Simulationsmodell erforderlich.

In dem betrachteten Fließfertigungssystem stehen insgesamt vierzehn Produktionsmitarbeiter für die Instandsetzung von Produktionsressourcen zur Verfügung. Dabei sind die Mitarbeiter in bestimmte Bereiche eingeteilt, sodass ein Mitarbeiter nur für die Instandsetzung der ihm zugeteilten Produktionsressourcen zuständig ist. Die Personaleinteilung für die einzelnen Prozessstufen kann Tabelle 9 entnommen werden.

Tabelle 9: Personaleinteilung

| Mitarbeiter | Zuständigkeitsbereich | Zugehörige Prozessstufen bzw. Prozesse |
|----------------|-----------------------|--|
| Mitarbeiter 1 | Bereich 1 | PS_1, PS_2, PS_3, PS_4 |
| Mitarbeiter 2 | Bereich 2 | PS_5 |
| Mitarbeiter 3 | Bereich 3 | $PS_6, PS_7, PS_8, PS_9, PS_{10}$ |
| Mitarbeiter 4 | Bereich 4 | $PS_{11}, PS_{12}, PS_{13}, PS_{14}, PS_{15}, PS_{16}$ |
| Mitarbeiter 5 | Bereich 4 | $PS_{11}, PS_{12}, PS_{13}, PS_{14}, PS_{15}, PS_{16}$ |
| Mitarbeiter 6 | Bereich 5 | PS_{17}, PS_{18} |
| Mitarbeiter 7 | Bereich 6 | $PS_{19}, PS_{20}, PS_{21}$ |
| Mitarbeiter 8 | Bereich 7 | PS_{22} |
| Mitarbeiter 9 | Bereich 8 | PS_{23}, PS_{24} |
| Mitarbeiter 10 | Bereich 9 | PS_{25}, PS_{26} |
| Mitarbeiter 11 | Bereich 10 | $PS_{27}, PS_{28}, PS_{29}, PS_{30}, PS_{31}$ |
| Mitarbeiter 12 | Bereich 11 | $PS_{32}, PS_{33}, PS_{34}, PS_{35}, PS_{36}, PS_{37}, PS_{38}, PS_{39}$ |
| Mitarbeiter 13 | Bereich 12 | $P_{40.1}$ |
| Mitarbeiter 14 | Bereich 13 | $P_{40.2}$ |

Darüber hinaus wurden die nachfolgenden Annahmen zur Vereinfachung getroffen:

- Die erste Prozessstufe wird immer mit Werkstücken aus der Quelle versorgt, während die letzte Prozessstufe immer Werkstücke in die Senke abführen kann
- Verkettungselemente weisen keine Stillstände auf
- Be- und Entladevorrichtungen weisen keine Stillstände auf
- Auf die Abbildung der Werkstückträgerkreisläufe wird hier verzichtet, da ausreichend Werkstückträger zur Verfügung stehen, sodass von einer vernachlässigbaren Auswirkung auf das Systemverhalten ausgegangen werden kann
- Der Dreischichtbetrieb des realen Systems wird im Modell nicht abgebildet, d. h. alle Produktionsressourcen stehen während der gesamten Simulationszeit grundsätzlich zur Verfügung
- Wegezeiten des Produktionspersonals werden nicht berücksichtigt
- Die Produktionsmitarbeiter haben als einzige Aufgabe die Instandsetzung der ihnen zugeteilten Produktionsressourcen und stehen für diese Aufgabe die gesamte Simulationszeit zur Verfügung, d. h. Pausenzeiten werden nicht berücksichtigt
- Ein Produktionsmitarbeiter führt eine einmal angefangene Instandhaltungsmaßnahme immer vollständig aus, bevor eine neue Maßnahme begonnen werden kann

Die Prozesse der Prozessstufen PS_{17} und PS_{27} sind getaktet, d. h. die Werkstückweitergabe von Prozess zu Prozess innerhalb der Prozessstufe erfolgt ohne Zwischenspeicherung und in einem prozessübergreifenden und fest definierten Takt. Dies wurde bei der Erstellung des Simulationsmodells wie auch bei der Initialisierung des Forecast-Modells für die simulationsbasierten Vorgehensweisen berücksichtigt.

Die redundanten Prozessstufen werden durch speziellen Be- und Entladevorrichtungen mit Werkstücken bestückt. Dabei kommen sogenannte Portale zum Einsatz, bei dem ein oder mehrere Lader auf einer Schiene verfahren und die Prozesse der redundanten Stufe mit Werkstücken versorgen. Diese Vorrichtungen wurden ebenfalls durch Prozessbausteine unter Verwendung einer Prozesszeit sowie einer Erholzeit abgebildet. Die Erholzeit, während der ein Prozess kein neues Werkstück aufnehmen kann, dient dabei zur Abbildung des Fahrweges, bis ein Lader das Fertigteil zum Auslauf der Prozessstufe transportiert hat und wieder am Einlauf für die Aufnahme eines neuen Rohteils zur Verfügung steht.

7.2 Vorgehen zur Bestimmung der Priorisierungsreihenfolge

Im Folgenden wird das Vorgehen zur Ermittlung einer Priorisierungsreihenfolge für das komplexe Fließfertigungssystem zur Fertigung von Kurbelgehäusen beschrieben. Da in diesem realen Fließfertigungssystem eine deutlich höhere Anzahl an Prozessen und Produktionsmitarbeitern als in den in Kapitel 6 betrachteten Systemen vorhanden ist, wird ein Vorgehen vorgestellt, mit dem eine Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge auf Basis der in dieser Arbeit hergeleiteten Vorgehensweisen zur Priorisierung mit und ohne Lookahead unter Einhaltung einer praxisfähigen Entscheidungsfindungszeit möglich ist. Im letzten Teil des Kapitels werden dann die erzielten Ergebnisse bei der Anwendung dieses Vorgehens auf das reale Fließfertigungssystem im Rahmen einer Simulationsstudie beschrieben.

7.2.1 Ermittlung einer Priorisierungsreihenfolge je Zuständigkeitsbereich des Produktionspersonals

Die hergeleiteten Vorgehensweisen zur Priorisierung von ungeplanten Stillständen beruhen auf der Formulierung als Reihenfolgenoptimierungsproblem. Wie aus Formel 4.1 ersichtlich, steigen bei diesem kombinatorischen Optimierungsproblem die möglichen Behebungsreihenfolgen mit zunehmender Anzahl zu priorisierender Stillstände exponentiell an. Um die für die Entscheidungsfindung benötigte Rechenzeit zu begrenzen und damit die praktische Anwendbarkeit der hergeleiteten Methoden zu gewährleisten, wurde ein Vorgehen hergeleitet, bei dem die Bestimmung der Priorisierungsreihenfolge für jeden Zuständigkeitsbereich des Produktionspersonals im Sinne einer Zerlegung des Problems in Teilprobleme erfolgt. Neben der Begrenzung der Rechenzeit hat dies den Vorteil, dass die dem Reihenfolgenoptimierungsproblem zu Grunde liegende Annahme, dass die Stillstände sequentiell behoben werden, für die meisten Zuständigkeitsbereiche erfüllt ist, da jeweils nur ein Produktionsmitarbeiter für die Behebung von Stillständen zuständig ist (vgl. Tabelle 9). Folglich ist auch eine höhere Prognosegüte mit dem Forecast-Simulationsmodell möglich.

Das Vorgehen sieht dabei eine schrittweise Bestimmung einer Priorisierungsreihenfolge für alle Zuständigkeitsbereiche eines komplexen Fließfertigungssystems vor, wobei jede Priorisierungsreihenfolge weiterhin unter Berücksichtigung der Auswirkung auf die Leistung des Gesamtsystems sowie unter Einbeziehung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten ermittelt wird. Das detaillierte Vorgehen ist Abbildung 74 zu entnehmen und wird im Folgenden näher beschrieben.

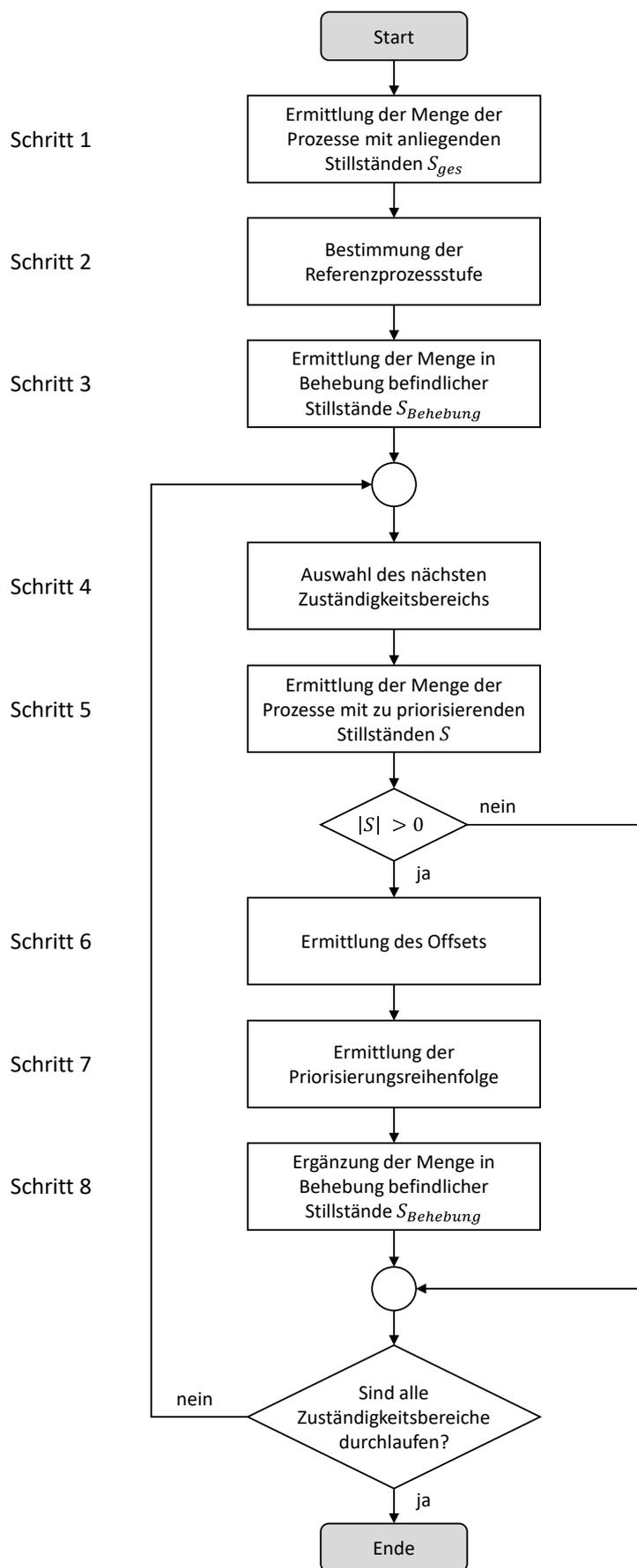


Abbildung 74: Vorgehen zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge für komplexe Fließfertigungssysteme

Schritt 1: Ermittlung der Menge der Prozesse mit anliegenden Stillständen

Im ersten Schritt werden alle Stillstände, die zum Entscheidungszeitpunkt t_d in der gesamten Prozesskette des Fließfertigungssystems anliegen, bestimmt und die betroffenen Prozesse P_n als Elemente der Menge S_{ges} definiert. Dabei werden sowohl Stillstände berücksichtigt, denen noch kein Produktionspersonal zugewiesen wurde und die folglich zu priorisieren sind, als auch stillstehende Prozesse, die sich bereits in Instandsetzung durch einen zugewiesenen Produktionsmitarbeiter befinden.

Schritt 2: Bestimmung der Referenzprozessstufe

Für das Abbild eines komplexen Fließfertigungssystems zum Entscheidungszeitpunkt t_d kann die Referenzprozessstufe erneut als diejenige Prozessstufe definiert werden, die die größte (repräsentative) Taktzeit aufweist. Sollten dabei mehrere Prozessstufen dieselbe Taktzeit aufweisen, so ist die am weitesten stromabwärts gelegene Prozessstufe die Referenzprozessstufe. Das Vorgehen zur Bestimmung der Referenzprozessstufe ist dabei analog zu Schritt 1 der simulationsbasierten Vorgehensweise einer Priorisierung ohne bzw. mit Lookahead (vgl. Kapitel 4.2.2).

Schritt 3: Ermittlung der Menge in Behebung befindlicher Stillstände

In diesem Schritt wird aus der Menge der Prozesse mit anliegenden Stillständen S_{ges} die Menge der in Behebung befindlicher Stillstände $S_{Behebung}$ für jeden Zuständigkeitsbereich abgeleitet. Zudem wird für jeden Zuständigkeitsbereich, in dem Stillstände aus der Menge $S_{Behebung}$ anliegen, und für jeden in Behebung befindlichen Stillstand dieses Bereiches mit dem Zeitstempel, der den Startzeitpunkt der Instandsetzung des betroffenen Prozesses $P_n \in S_{Behebung}$ durch das Produktionspersonal beschreibt, der mittleren Reparaturdauer und dem Entscheidungszeitpunkt t_d berechnet, wann die Instandsetzung planmäßig abgeschlossen sein wird und somit wieder Produktionspersonal für die Zuweisung zu einem weiteren Stillstand zur Verfügung steht:

$$\Delta t_{\text{Instandsetzung Rest } P_n} = t_{\text{Instandsetzung Start } P_n} + MTTR_{P_n} - t_d \quad (7.1)$$

Weist die verbleibende Instandsetzungszeit $\Delta t_{\text{Instandsetzung Rest } P_n}$ des Prozesses $P_n \in S_{Behebung}$ einen positiven Wert auf, so wird dieser Stillstand bei der Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge in Schritt 7 als Stillstand mit fester Stillstandsdauer berücksichtigt. Ist die verbleibende Instandsetzungszeit hingegen kleiner oder gleich null, so wird dieser Stillstand bei der Ermittlung der Priorisierungs-

reihenfolge nicht weiter betrachtet. Dieser Fall tritt dann ein, wenn die tatsächliche Instandsetzungszeit länger als die zur Abschätzung verwendete mittlere Reparaturdauer ist.

Schritt 4: Auswahl des nächsten Zuständigkeitsbereichs

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erläutert, wird bei diesem Verfahren für jeden Zuständigkeitsbereich mit zu priorisierenden Stillständen eine Priorisierungsreihenfolge ermittelt, wobei dies schrittweise erfolgt. Da stillstehende Prozesse in der Regel eine höhere Auswirkung auf den Durchsatz der Referenzprozessstufe und damit der Produktionsleistung des gesamten Fließfertigungssystems haben, je näher diese Prozesse an der Referenzprozessstufe angeordnet sind, werden die Priorisierungsreihenfolgen zuerst für Zuständigkeitsbereiche ermittelt, deren stillstehende Prozesse die geringste relative Position zu der Referenzprozessstufe aufweisen. Dazu wird für jeden Stillstand aus der Menge S_{ges} die relative Position des betroffenen Prozesses zu der Referenzprozessstufe innerhalb der Prozesskette bestimmt und in einer Liste aufsteigend sortiert. Somit können nun schrittweise die stillstehenden Prozesse und damit auch die zugehörigen Zuständigkeitsbereiche ausgewählt werden, die am nächsten zur Referenzprozessstufe angeordnet sind.

Schritt 5: Ermittlung der Menge der Prozesse mit zu priorisierenden Stillständen

In diesem Schritt wird die Menge aller Prozesse mit zu priorisierenden Stillständen S des betrachteten Zuständigkeitsbereichs bestimmt. Dabei zählen nur Stillstände zur Menge S , die zum Entscheidungszeitpunkt t_d bereits anliegen und sich noch nicht in Behebung befinden. Folglich werden weiterhin nur Stillstände priorisiert, für die noch eine Zuteilung des Produktionspersonals erfolgen muss.

Ist die Menge S dabei leer, so liegen in dem betrachteten Zuständigkeitsbereich keine zu priorisierenden Stillstände an. In diesem Fall wird anschließend überprüft, ob bereits alle Zuständigkeitsbereiche mit anliegenden Stillständen, die in der Menge S_{ges} enthalten sind, durchlaufen wurden. Sind noch Zuständigkeitsbereiche offen, so wird mit Schritt 4 und damit mit der Auswahl des nächsten Zuständigkeitsbereichs fortgefahren. Sind im Gegensatz dazu alle Zuständigkeitsbereiche durchlaufen, so ist die Priorisierung abgeschlossen und das verfügbare Produktionspersonal wurde entsprechend den Priorisierungsreihenfolgen den stillstehenden Prozessen zugeteilt.

Ist die Menge S hingegen nicht leer, so liegen in diesem Zuständigkeitsbereich zu priorisierende Stillstände an und es wird mit Schritt 6 fortgefahren.

Schritt 6: Ermittlung des Offsets

Da in einem Zuständigkeitsbereich neben zu priorisierenden Stillständen ebenfalls noch Stillstände anliegen können, die sich zum Entscheidungszeitpunkt t_d in Behebung befinden, muss das Vorgehen nach unterschiedlichen Fällen differenziert werden:

- **Fall A: Es liegen keine in Behebung befindliche Stillstände an**
Da in diesem Fall nur zu priorisierende Stillstände im betrachteten Zuständigkeitsbereich anliegen, kann direkt mit Schritt 7 fortgefahren werden.
- **Fall B: Es liegen in Behebung befindliche Stillstände an und deren Anzahl ist geringer als die der zuständigen Produktionsmitarbeiter**
In diesem Fall kann direkt mit Schritt 7 fortgefahren werden, da mindestens ein Mitarbeiter zur Behebung eines weiteren Stillstandes in diesem Bereich zur Verfügung steht.
- **Fall C: Es liegen in Behebung befindliche Stillstände an und deren Anzahl ist nicht geringer als die der zuständigen Produktionsmitarbeiter**
Anders als im Fall B steht hier zum Zeitpunkt t_d noch kein Produktionsmitarbeiter zur Verfügung. Trotzdem wird eine Priorisierungsreihenfolge ermittelt, deren Ergebnis für die Ermittlung der Priorisierungsreihenfolgen weiterer Zuständigkeitsbereiche verwendet wird.

Um bei der Ermittlung der Behebungsreihenfolge zu berücksichtigen, dass die Instandsetzung des am höchsten priorisierten Prozesses aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit des zuständigen Produktionspersonals nicht zum Entscheidungszeitpunkt t_d beginnt, wird im Fall C ein Offset berechnet. Dieser entspricht dabei dem geringsten Wert für die verbleibende Instandsetzungszeit $\Delta t_{\text{Instandsetzung Rest } P_n}$ aller in Instandsetzung befindlicher Prozesse $P_n \in S_{\text{Behebung}}$ in dem betrachteten Zuständigkeitsbereich (vgl. Schritt 3). Auf die Verwendung dieses Offsets bei der Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge wird im nächsten Schritt weiter eingegangen.

Schritt 7: Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge

Nachdem die Anzahl zu priorisierender Stillstände und fallabhängig ein Offset-Wert bestimmt wurde, wird in diesem Schritt nun die Priorisierungsreihenfolge ermittelt. Dabei werden grundsätzlich die in Kapitel 4 und 5 hergeleiteten Vorgehensweisen zur Priorisierung mit und ohne Lookahead angewendet, wobei sich folgende Änderungen ergeben:

Priorisierung ohne Lookahead (simulationsbasierte Vorgehensweise)

- Die Menge der Prozesse mit zu priorisierenden Stillständen S wurde bereits in Schritt 5 dieses Vorgehens ermittelt und entfällt deshalb (vgl. Abbildung 34)

- Die Bestimmung der Referenzprozessstufe wurde bereits in Schritt 2 dieses Vorgehens durchgeführt und entfällt deshalb ebenfalls
- Bei der Bestimmung des Simulationsendzeitpunkts (Schritt 2 der simulationsbasierten Vorgehensweise) werden auch die Stillstände aus Schritt 3 und 8 dieses Vorgehens berücksichtigt, wobei deren Stillstandsdauer der verbleibenden Instandsetzungszeit (Schritt 3) bzw. der sich aus der Priorisierungsreihenfolge ergebenden Instandsetzungszeit (Schritt 8) entspricht. Folglich ist der Simulationsendzeitpunkt der Zeitpunkt, an dem alle zum Entscheidungszeitpunkt t_d anliegenden Stillstände behoben sind und sich deren Auswirkungen in der Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe vollständig realisiert haben.
- Bei der Initialisierung des Forecast-Simulationsmodells werden die Stillstände aus Schritt 3 und 8 dieses Vorgehens berücksichtigt, wobei jeweils ein Störende-Ereignis entsprechend der verbleibenden Instandsetzungszeit (Schritt 3) bzw. der sich aus der Priorisierungsreihenfolge ergebenden Instandsetzungszeit (Schritt 8) erstellt wird.

Priorisierung ohne Lookahead (analytische Vorgehensweise)

- Die Menge der Prozesse mit zu priorisierenden Stillständen S wurde bereits in Schritt 5 dieses Vorgehens ermittelt und entfällt deshalb (vgl. Abbildung 44)
- Die Bestimmung der Referenzprozessstufe wurde bereits in Schritt 2 dieses Vorgehens durchgeführt und entfällt deshalb ebenfalls
- Nachdem die Ausbringungsverluste für die zu priorisierenden Stillstände bestimmt wurden (Schritt 6 der analytischen Vorgehensweise), werden nach gleicher Vorgehensweise die Ausbringungsverluste für die Stillstände aus Schritt 3 und 8 dieses Vorgehens ermittelt. Die Stillstandsdauern dieser Stillstände sind dabei beheburgsreihenfolgenunabhängig und entsprechen der verbleibenden bzw. der sich aus der Priorisierungsreihenfolge ergebenden Instandsetzungszeit. Der Ausbringungsverlust für die Behebungsreihenfolge ergibt sich schließlich aus dem Maximum der Ausbringungsverluste aller zum Zeitpunkt t_d in der gesamten Prozesskette anliegender und bisher berücksichtigter Stillstände.

Priorisierung mit Lookahead (simulationsbasierte Vorgehensweise)

Die Änderungen sind identisch mit den Änderungen, die sich bei der simulationsbasierten Vorgehensweise zur Priorisierung ohne Lookahead ergeben, wobei sich einzig die Bestimmung des Simulationsendzeitpunkts unterscheidet. Da der Simulationsendzeitpunkt durch den Lookahead definiert wird, entfällt hier eine

Anpassung, sodass dieser Schritt unverändert zur beschriebenen Vorgehensweise in Kapitel 5.3 bleibt.

Schritt 8: Ergänzung der Menge in Behebung befindlicher Stillstände

Im letzten Schritt werden nach erfolgter Priorisierung die priorisierten Stillstände der Menge S_{Behebung} hinzugefügt, wobei anstelle der verbleibenden Instandsetzungszeit die aus der Priorisierungsreihenfolge resultierende Instandsetzungszeit verwendet wird. Damit kann diese Priorisierungsentscheidung bereits für den nächsten Zuständigkeitsbereich verwendet und bei der Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge für diesen Bereich berücksichtigt werden.

Anschließend wird überprüft, ob bereits alle Zuständigkeitsbereiche mit anliegenden Stillständen, die in der Menge S_{ges} enthalten sind, durchlaufen wurden. Sind noch Zuständigkeitsbereiche offen, so wird mit Schritt 4 und damit mit der Auswahl des nächsten Zuständigkeitsbereiches fortgefahren. Sind hingegen alle Zuständigkeitsbereiche durchlaufen, so ist die Priorisierung abgeschlossen und das verfügbare Produktionspersonal wurde entsprechend den Priorisierungsreihenfolgen den stillstehenden Prozessen zugordnet.

7.2.2 Drei-Stufen-Eskalationsmodell zur Einsparung von Rechenzeit

Durch die Zerlegung in Teilprobleme und die schrittweise Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge für jeden Zuständigkeitsbereich des Produktionspersonals kann der Lösungsraum des betrachteten Reihenfolgenoptimierungsproblems bereits eingeschränkt werden. Allerdings ist die Anzahl an Prozessen und damit die Anzahl potenziell zu priorisierender Stillstände pro Zuständigkeitsbereich für das hier betrachtete, komplexe Fließfertigungssystem immer noch zu groß, um eine Priorisierungsreihenfolge nach den beschriebenen Vorgehensweisen mittels expliziter Enumeration zu ermitteln (vgl. Tabelle 9). Um die Entscheidungsfindungszeit weiter zu reduzieren und eine praxisnahe Anwendbarkeit zu gewährleisten, wurde daher ein dreistufiges Eskalationsmodell umgesetzt:

Stufe 1: Anzahl zu priorisierender Prozesse ist kleiner als Obergrenze 1

Ist die Anzahl zu priorisierender Prozesse $P_n \in S$ innerhalb eines Zuständigkeitsbereichs kleiner oder gleich einer definierbaren ersten Obergrenze, so wird die Priorisierungsreihenfolge dieser Stillstände weiterhin auf Prozessebene bestimmt. Die Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge erfolgt dabei wahlweise nach der simulationsbasierten Vorgehensweise ohne Berücksichtigung eines Lookahead (vgl. Kapitel 4.2.2) oder mit Berücksichtigung eines Lookahead (vgl. Kapitel 5.3). Bei der analytischen Vorgehensweise (vgl. Kapitel 4.3.2) entfällt diese Stufe, da hier die zu priorisierenden Prozesse im Rahmen der Bestimmung des Ausbringungsverlustes bereits zu Prozessstufen zusammengefasst werden.

Stufe 2: Anzahl zu priorisierender Prozesse ist größer als Obergrenze 1, aber Anzahl zu priorisierender Prozessstufen ist kleiner als Obergrenze 2

Ist die Anzahl zu priorisierender Prozesse $P_n \in S$ innerhalb eines Zuständigkeitsbereichs größer als eine definierbare erste Obergrenze, so werden die Prozesse bei den simulationsbasierten Vorgehensweisen analog des Vorgehens bei der analytischen Vorgehensweise zu Prozessstufen zusammengefasst (vgl. Kapitel 4.3.2). Das Ziel ist dabei, dass mehrere zu priorisierende Prozesse, die einer redundanten Prozessstufe angehören, zusammengefasst werden, sodass sich der Lösungsraum weiter reduziert.

Ist schließlich die Anzahl zu priorisierender Prozessstufen $PS_m \in T$ kleiner oder gleich einer definierbaren zweiten Obergrenze, so erfolgt die Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge nach einer der drei Vorgehensweisen, die in dieser Arbeit vorgestellt wurden. Wird dabei eine der simulationsbasierten Vorgehensweisen ausgeführt, so wird aus der ermittelten Priorisierungsreihenfolge der Prozessstufen schließlich durch Anwendung des Vorgehens C der analytischen Vorgehensweise eine Priorisierungsreihenfolge auf Prozessebene abgeleitet (vgl. Abbildung 51).

Stufe 3: Anzahl zu priorisierender Prozessstufen ist größer als Obergrenze 2

Ist die Anzahl zu priorisierender Prozessstufen $PS_m \in T$ größer als eine zweite Obergrenze, so wird anstelle der analytischen Vorgehensweise bzw. der simulationsbasierten Vorgehensweisen die Priorisierungsreihenfolge nach der Dauer der latenten Phase bestimmt. Dafür wird für jede zu priorisierende Prozessstufe $PS_m \in T$ nach Schritt 6.1 und 6.2 der analytischen Vorgehensweise die Dauer der latenten Phase $\Delta t_{\text{latente Phase } PS_m}$ ermittelt (vgl. Abbildung 47). Die Priorisierung der Prozessstufen erfolgt dann nach aufsteigender Sortierung, wobei Stillstände an Prozessstufen, die den geringsten Wert für die Dauer der latenten Phase aufweisen, am höchsten priorisiert werden. Die Priorisierungsreihenfolge auf Prozessebene kann schließlich wieder durch Anwendung des Vorgehens C der analytischen Vorgehensweise abgeleitet werden (vgl. Abbildung 51).

Die Priorisierung nach der Dauer der latenten Phase hat den Vorteil, dass die Formulierung als Reihenfolgenoptimierungsproblem und damit auch die exponentiell ansteigende Größe des Lösungsraums entfällt. Allerdings können bei Priorisierungsentscheidungen, bei denen Stufe 3 des Eskalationsmodells zur Anwendung kommt, keine zukünftig eintretenden geplanten Stillstandszeiten in Form eines Lookahead berücksichtigt werden. Im Rahmen der Diskussion der Ergebnisse der durchgeführten Simulationsstudie eines real existierenden Fließfertigungssystems wird auf das Drei-Stufen-Modell nochmals eingegangen, indem analysiert wird, wie häufig die einzelnen Stufen bei den Priorisierungsentscheidungen letztendlich angewendet werden.

7.3 Ergebnisse der Simulationsstudie

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsstudie für die in diesem Kapitel betrachtete Kurbelgehäusefertigungslinie zur Untersuchung des Mehrwerts einer Priorisierung ungeplanter Stillstände mit Berücksichtigung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten in Form eines Lookahead vorgestellt und diskutiert.

Dazu wurde das in der Simulationssoftware Siemens Plant Simulation implementierte Entscheidungsunterstützungssystem (vgl. Kapitel 6.1) um die in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Umfänge zur schrittweisen Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge je Zuständigkeitsbereich des Produktionspersonals sowie zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge entsprechend des Drei-Stufen-Eskalationsmodells (vgl. Kapitel 7.2.2) erweitert. Darüber hinaus wurde die Kurbelgehäusefertigungslinie entsprechend Kapitel 7.1 durch ein ablauffähiges Simulationsmodell abgebildet und als Versuchsmodell in den prototypischen Aufbau des Entscheidungsunterstützungssystems eingebunden (vgl. Abbildung 53).

In der Simulationsstudie wurden für jede untersuchte Parameterkonstellation fünf Replikationen mit einer Simulationszeit von je 150 Tagen durchgeführt, wobei die ersten zehn Simulationstage als Einschwingphase definiert werden. Die Ermittlung der Werte für die durchschnittliche Ausbringung der untersuchten Priorisierungsmethoden erfolgt erneut dadurch, dass während eines Simulationslaufes nach jeweils 24 Stunden Simulationszeit der erzielte Wert für die Ausbringungsmenge der Kurbelgehäusefertigungslinie innerhalb dieses Zeitraums ermittelt wird. Diese Werte werden schließlich in eine durchschnittliche Ausbringung umgewandelt (vgl. Kapitel 6.2.1). Der Stichprobenumfang für jede untersuchte Parameterkonstellation beträgt bei fünf Replikationen somit 700.

Als Priorisierungsmethoden zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge werden die fünf Strategien bzw. Vorgehensweisen, die bereits bei der in Kapitel 6 vorgestellten Simulationsstudie angewendet wurden, eingesetzt:

- Priorisierung ohne Lookahead (simulationsbasierte Vorgehensweise)
- Priorisierung ohne Lookahead (analytische Vorgehensweise)
- Priorisierung mit Lookahead (simulationsbasierte Vorgehensweise)
- FCFS-Strategie
- Worst-Case-Szenario

Die Werte für die Obergrenzen des Drei-Stufen-Eskalationsmodells wurden im Rahmen von Vorversuchen zur Kalibrierung des Entscheidungsunterstützungssystems bestimmt. So wird für diese Simulationsstudie die Obergrenze 1, d. h. der Wert, ab dem Prozesse mit zu priorisierenden Stillständen zu Prozessstufen zusammengefasst werden, auf fünf gesetzt. Ebenfalls auf fünf gesetzt wird die Obergrenze 2, d. h. der Wert, ab dem eine Priorisierung entsprechend der Dauer

der latenten Phase durchgeführt wird. Des Weiteren wurde in den Vorversuchen auch die Größe des verwendeten Time-Lookahead zu acht Stunden ermittelt.

In Abbildung 75 sind die Erwartungswerte für die durchschnittliche Ausbringung des untersuchten Modells der Kurbelgehäusefertigungslinie und die entsprechenden Konfidenzintervalle für ein Sicherheitsniveau von 95 % dargestellt.

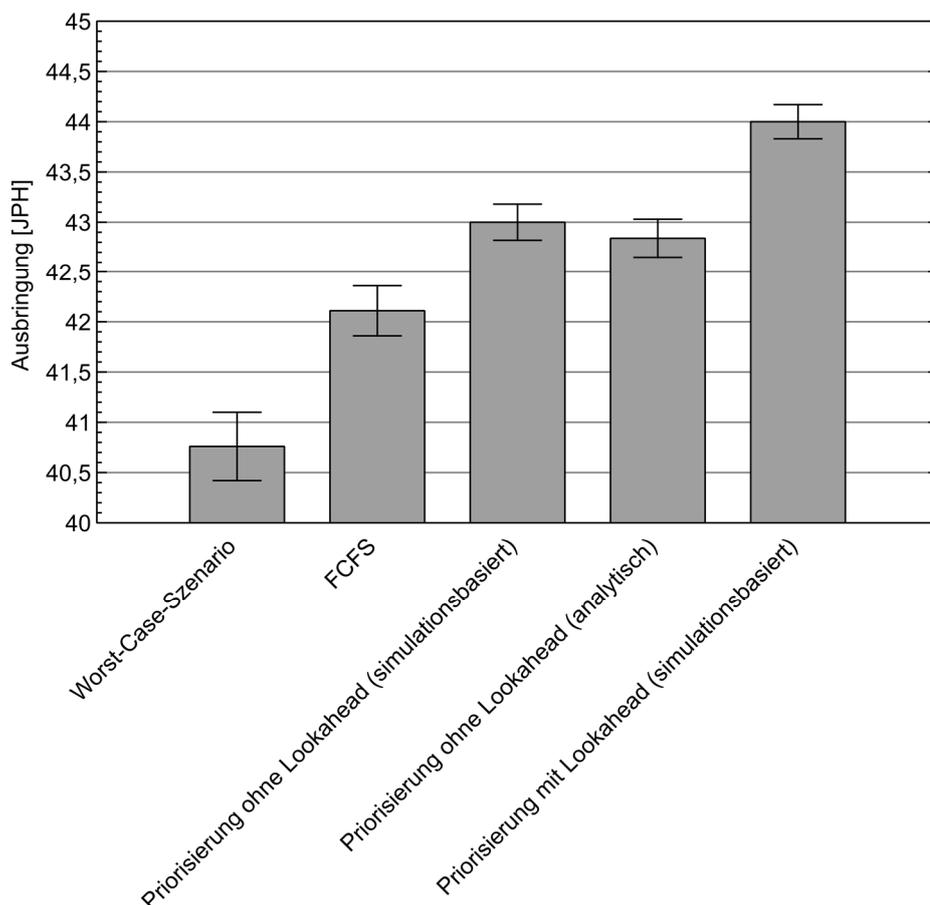


Abbildung 75: Durchschnittlich erzielbare Ausbringung der Kurbelgehäusefertigungslinie in Abhängigkeit der Priorisierungsmethode

Es ist ersichtlich, dass für die hier betrachtete Kurbelgehäusefertigungslinie mit allen in dieser Arbeit hergeleiteten Vorgehensweisen zur Ermittlung einer Priorisierungsreihenfolge eine signifikant höhere Ausbringung im Vergleich zu einer FCFS-Strategie erreicht werden kann. Dabei wird bereits mit einer Priorisierung ohne Berücksichtigung eines Lookahead ein Mehrwert im Vergleich zu der FCFS-Strategie von 2,11 % (simulationsbasierte Vorgehensweise) bzw. 1,73 % (analytische Vorgehensweise) erzielt (vgl. Abbildung 76 rechts). Werden darüber hinaus zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten in Form eines Lookahead bei der Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge berücksichtigt, ist ein Mehrwert von 4,49 % im Vergleich zu der FCFS-Strategie feststellbar. Hier sei angemerkt, dass dieser Wert erneut eine obere Grenze für den erzielbaren Mehrwert einer

Priorisierung mit Lookahead darstellt, da hier alle Stillstandszeiten während des durch den Time-Lookahead definierten Zeitraumes bekannt und im Lookahead enthalten sind. Auf diesen Punkt wird im weiteren Verlauf des Kapitels noch näher eingegangen.

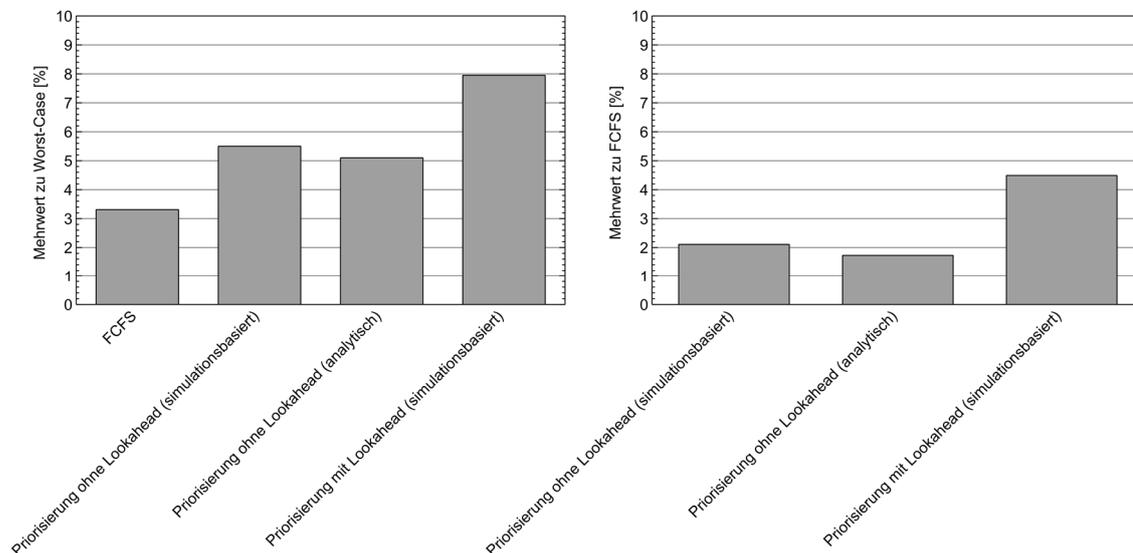


Abbildung 76: Mehrwerte der Priorisierungsmethoden für die Kurbelgehäusefertigungslinie im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)

Zur tiefergehenden Analyse wurde die Anzahl und Art der durchgeführten Zuordnungen von Produktionspersonal zu Stillständen ausgewertet. Der Anteil der Zuordnungen mit Priorisierung an der Gesamtanzahl der Zuordnungen liegt bei 15 %. Folglich liegen bei 85 % der Zuordnungen jeweils nur ein Stillstand an, sodass eine Priorisierung entfällt und ein Produktionsmitarbeiter direkt zugeteilt wird. Obwohl also nur bei ungefähr einem Sechstel der Zuordnungen eine Priorisierung durchgeführt wird, kann bereits ein Mehrwert von 2,11 % (simulationsbasierte Vorgehensweise ohne Lookahead) bzw. 4,49 % (simulationsbasierte Vorgehensweise mit Lookahead) erzielt werden.

Wie schon bei der Analyse des eindimensionalen sowie des mehrdimensionalen Fließfertigungssystems in Kapitel 6.2 diskutiert, werden mit den beiden Vorgehensweisen zur Priorisierung ohne Lookahead voneinander abweichende Mehrwerte erzielt. Dies tritt auch bei der hier betrachteten Kurbelgehäusefertigungslinie auf. So zeigt der direkte Vergleich der beiden Vorgehensweisen, dass mit der simulationsbasierten Vorgehensweise in diesem Fall ein um 0,38 Prozentpunkte höherer Mehrwert generierbar ist als mit der analytischen Vorgehensweise. Dieser Unterschied lässt sich erneut durch die bei der analytischen Vorgehensweise getroffenen Annahmen, dass keine Restverweildauern der Werkstücke in den Verkettungselementen berücksichtigt sowie betriebsbereite Prozesse

einer redundanten Prozessstufe mit zu priorisierenden Stillständen zu einer repräsentativen einfachen Prozessstufe zusammengefasst werden, begründen. Bei der simulationsbasierten Vorgehensweise werden hingegen die Komplexität und die dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Produktionsressourcen vollständig bei der Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge berücksichtigt. Allerdings ist der Unterschied zwischen den Werten für die durchschnittliche Ausbringung der beiden Vorgehensweisen insgesamt verhältnismäßig gering und zudem bei dem zu Grunde liegenden Stichprobenumfang nicht signifikant (vgl. Abbildung 75).

Bei der Analyse der Versuchsergebnisse wurde ebenfalls untersucht, wie häufig die einzelnen Stufen des Drei-Stufen-Eskalationsmodells zur Anwendung kamen, wobei hier der Schwerpunkt auf den simulationsbasierten Vorgehensweisen liegt. So wurden die zu priorisierenden Prozesse nur bei 0,77 % (Priorisierung ohne Lookahead) bzw. 0,81 % (Priorisierung mit Lookahead) der Zuordnungen mit Priorisierungsentscheidung zu Prozessstufen zusammengefasst, da die zuvor definierte erste Obergrenze von fünf Prozessen in diesen Fällen überschritten wurde (vgl. Kapitel 7.2.2). Dabei mussten bei 67 % der getroffenen Priorisierungsentscheidungen lediglich zwei mögliche Behebungsreihenfolgen mittels Simulation bewertet werden (Abbildung 77).

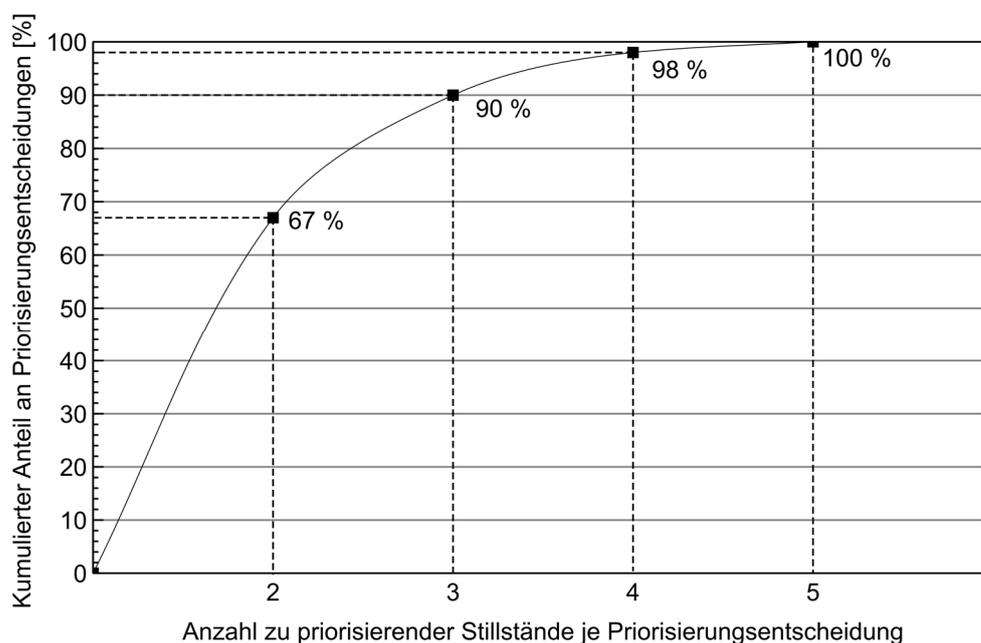


Abbildung 77: Kumulierter Anteil an getroffenen Priorisierungsentscheidungen

Bei 90 % der Priorisierungsentscheidungen sind zudem höchstens drei Stillstände zu priorisieren, wodurch sich entsprechend Formel 4.1 sechs Behebungsreihenfolgen und somit sechs Simulationsläufe zur Bewertung ergeben. Dies

zeigt, dass bei der überwiegenden Anzahl an Priorisierungsentscheidungen nur eine geringe Anzahl von möglichen Behebungsreihenfolgen bewertet werden muss, sodass auch die Entscheidungsfindungszeit in einem angemessenen Rahmen bleibt.

Ist die Anzahl zu priorisierender Prozessstufen größer als die Obergrenze 2, die hier mit fünf Prozessstufen definiert wurde, wird eine Priorisierung nach der Dauer der latenten Phase durchgeführt (vgl. Kapitel 7.2.2). Dies war allerdings nur bei 0,18 % (Priorisierung ohne Lookahead) bzw. 0,20 % (Priorisierung mit Lookahead) der Zuordnungen mit Priorisierungsentscheidung der Fall. Da in den meisten Fällen somit eine Priorisierung auf Prozessebene durchgeführt wird, kann die durch die Anwendung des Eskalationsmodells potenziell resultierende Ungenauigkeit in Bezug auf die Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge für den hier untersuchten Anwendungsfall als vernachlässigbar angesehen werden. Vielmehr überwiegt der Vorteil dieses dreistufigen Modells, eine Priorisierungsreihenfolge in der überwiegenden Anzahl an Entscheidungen exakt zu bestimmen und bei Entscheidungen mit großen Lösungsräumen eine Priorisierung in angemessener Entscheidungsfindungszeit durchzuführen.

Da bei den hergeleiteten Vorgehensweisen zur Priorisierung mit und ohne Lookahead die grundsätzliche Annahme getroffen wurde, dass die Taktzeiten der Prozesse unverändert bleiben, wurde die durchschnittliche Vorhersagelänge, die für die Ermittlung einer Priorisierungsreihenfolge als Simulationszeit des Forecast-Modells benötigt wird, für die beiden simulationsbasierten Vorgehensweisen ausgewertet. So beträgt die durchschnittliche Vorhersagelänge bei der Priorisierung ohne Lookahead ungefähr 2 Stunden und 4 Minuten und bei der Priorisierung mit Lookahead ungefähr 8 Stunden und 49 Minuten. Die deutlich kürzere Vorhersagelänge bei einer Priorisierung ohne Lookahead resultiert dabei aus der dynamischen Ermittlung des Simulationsendzeitpunkts für jede Priorisierungsentscheidung, wobei hier nur die zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt anliegenden Stillstände berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu wird bei der Priorisierung mit Lookahead die benötigte Simulationszeit maßgeblich durch die Größe des betrachteten Lookahead definiert, der hier mit acht Stunden angenommen wurde. Bei einer Übertragung der hergeleiteten Vorgehensweisen in die Praxis sollte folglich überprüft werden, ob die Taktzeiten und insbesondere die Referenzprozessstufe während des Vorhersagezeitraumes als konstant angesehen werden können und wie sich ggf. ein möglicher Wechsel der Referenzprozessstufe während des Vorhersagezeitraumes auf das Priorisierungsergebnis auswirkt.

Wie bereits an verschiedenen Stellen erwähnt, bildet der hier ermittelte Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead eine Obergrenze, da sämtliche zukünftig eintretende Stillstandszeiten zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt als bekannt vorausgesetzt werden. Bei einer praxisnahen Anwendung ist dies allerdings in der Regel nicht der Fall, sodass auch für die betrachtete Kurbelgehäusefertigungslinie untersucht wurde, wie sich ein abnehmender Anteil geplanter

Stillstände an der Gesamtanzahl eintretender Stillstände auf den Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead auswirkt (Abbildung 78). Dazu wurde analog zu Kapitel 6.4.1 eine Versuchsumgebung geschaffen, in der neben geplanten und im Lookahead enthaltenden Stillständen auch ungeplante, d. h. zum Entscheidungszeitpunkt nicht bekannte Stillstände eintreten.

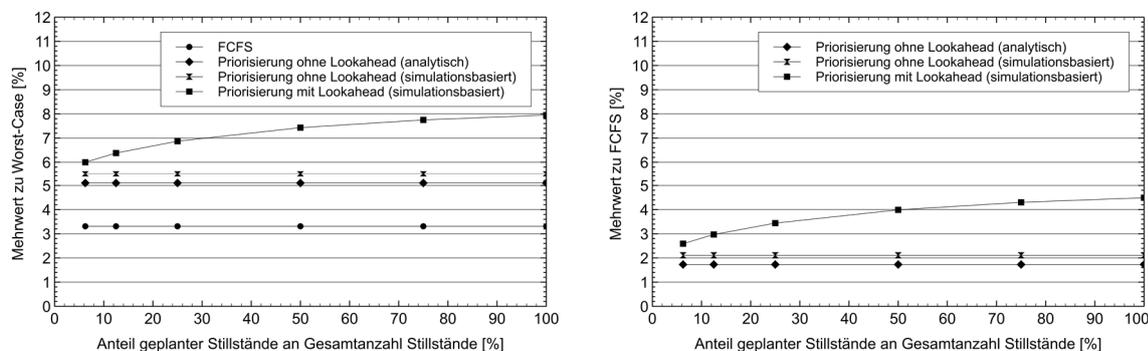


Abbildung 78: Einfluss des Anteils geplanter Stillstände auf den Mehrwert einer Priorisierung für die Kurbelgehäusefertigungslinie im Vergleich zum Worst-Case-Szenario (links) sowie zur FCFS-Strategie (rechts)

Für das untersuchte Modell der Kurbelgehäusefertigungslinie zeigt sich, dass der Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead mit sinkendem Anteil geplanter Stillstände stetig abnimmt, wobei der Mehrwert stets größer ist als der Mehrwert, der mit einer Priorisierung ohne Lookahead erzielbar ist. Die Analyse der Konfidenzintervalle zeigt hier, dass der Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead ab einem Anteil geplanter Stillstände von 12,5 % signifikant höher ist als der Mehrwert einer Priorisierung ohne Lookahead im Vergleich zu einer FCFS-Strategie. Dabei kann auch hier davon ausgegangen werden, dass mit abnehmendem Anteil geplanter Stillstände eine gezielte Beeinflussung der verfügbaren Pufferkompensation für einzelne, nach dem Priorisierungszeitpunkt eintretende Stillstände nicht möglich ist. Die Wahl der Priorisierungsreihenfolge führt dabei nicht zu dem gewünschten Ergebnis einer höheren latenten Phase dieser Stillstände durch eine entsprechende Anzahl an Werkstücken zwischen der Stillstandsprozessstufe und der Referenzprozessstufe. Das Auftreten der ungeplanten und nicht im Lookahead berücksichtigten Stillstandszeiten beeinflusst die zum Stillstandseintritt verfügbare Pufferkompensation insgesamt wesentlich stärker, sodass eine Priorisierung mit Lookahead bei einem geringen Anteil geplanter Stillstände schließlich keinen signifikanten Mehrwert gegenüber einer Priorisierung ohne Lookahead aufweist.

7.4 Fazit

Um den Mehrwert einer Priorisierung ungeplanter Stillstände unter Berücksichtigung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten in Form eines Lookahead auch in einer praxisnahen Umgebung zu untersuchen, wurde in diesem Kapitel das entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem für ein komplexes, real existierendes Fließfertigungssystem aus der Automobilindustrie anhand einer Simulationsstudie prototypisch angewendet. Dazu wurde zunächst die betrachtete Kurbelgehäusefertigungslinie beschrieben und die Überführung dieser Linie in ein Simulationsmodell skizziert. Da bei dem zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge gewählten Ansatz der Lösungsraum möglicher Behebungsreihenfolgen mit zunehmender Anzahl zu priorisierender Stillstände exponentiell ansteigt, ist folglich eine Priorisierung entsprechend der in dieser Arbeit hergeleiteten Vorgehensweisen für komplexe Fließfertigungssysteme mit einer hohen Anzahl an Prozessen nicht mehr in angemessener Rechenzeit möglich. Um die Vorgehensweisen dennoch anzuwenden, wurde ein Verfahren vorgestellt, dass eine schrittweise Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge je Zuständigkeitsbereich des Produktionspersonals im Sinne einer Zerlegung in Teilprobleme ermöglicht. Zusammen mit einem Drei-Stufen-Eskalationsmodell, wodurch die Priorisierung in Abhängigkeit der Anzahl zu priorisierender Stillstände auf Prozessebene, Prozessstufenebene oder über die Dauer der latenten Phase durchgeführt wird, können die in den vorherigen Kapiteln hergeleiteten Vorgehensweisen somit auch auf komplexe Fließfertigungssysteme mit einer hohen Anzahl an Produktionsressourcen angewendet werden.

Im letzten Abschnitt konnte abschließend der Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead anhand einer Simulationsstudie eines komplexen Fließfertigungssystems aus der Automobilindustrie aufgezeigt werden. Dabei wurde festgestellt, dass alle drei Vorgehensweisen grundsätzlich zu einem deutlichen Mehrwert gegenüber einer FCFS-Strategie führen, obwohl eine Priorisierung nur in weniger als ein Sechstel der Zuordnungen, bei denen Produktionspersonal zu stillstehenden Prozessen zugeteilt werden musste, zur Anwendung kam. Ein signifikant höherer Mehrwert ist schließlich durch eine Priorisierung unter Einbeziehung geplanter Stillstandszeiten in die Entscheidungsfindung generierbar. Dieser Mehrwert fällt umso höher aus, je weniger ungeplante Stillstände, die dementsprechend nicht im Lookahead enthalten sind und folglich auch nicht in der Priorisierungsentscheidung berücksichtigt werden, innerhalb des Vorhersagezeitraumes eintreten.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde der Zusammenhang zwischen der Priorisierung ungeplanter Stillstände und der Auswirkung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten auf die Produktionsleistung komplexer Fließfertigungssysteme untersucht. Dazu wurde zunächst das Grundproblem einer Priorisierung ungeplanter Stillstände als Reihenfolgenoptimierungsproblem formuliert und als reiner Online-Fall, d. h. ohne das Auftreten weiterer Stillstände, betrachtet. Dabei wurde eine simulationsbasierte Vorgehensweise in Form eines simulationsbasierten Optimierungssystems hergeleitet, in dem mittels der ereignisdiskreten Simulation der Zielfunktionswert, in diesem Fall die Durchsatzmenge der Referenzprozessstufe, für jede zu bewertende Behebungsreihenfolge ermittelt wird. Um darüber hinaus ein tiefergehendes Verständnis über die Wirkzusammenhänge bei der Priorisierung von Stillständen zu erlangen, wurde zusätzlich eine analytische Vorgehensweise aus den Erkenntnissen der simulationsbasierten Vorgehensweise abgeleitet, bei der die Bewertung der Behebungsreihenfolgen durch die Berechnung eines Ausbringungsverlustes durchgeführt wird.

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen der analytischen Vorgehensweise wurde in einem zweiten Schritt das Grundproblem einer Priorisierung ungeplanter Stillstände durch die Berücksichtigung zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten erweitert und das Reihenfolgenoptimierungsproblem als Online-Optimierungsproblem mit Lookahead aufgefasst. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Auswirkungen zukünftig eintretender geplanter Stillstandszeiten, die in einem Lookahead enthalten sind und zum Zeitpunkt der Priorisierung zur Verfügung stehen, durch die Priorisierungsreihenfolge beeinflussbar sind. Dies liegt daran, dass die Stillstandsdauer eines Primär- wie auch Sekundärstillstandes der Referenzprozessstufe oder einer Prozessstufe, für die zukünftig ein Stillstand geplant ist, abhängig von der Priorisierungsreihenfolge ist. Damit wird auch der Durchsatz dieser Prozessstufe durch die Priorisierungsreihenfolge bestimmt und somit auch die Anzahl an Werkstücken, die sich zum Eintrittszeitpunkt eines geplanten Stillstandes zwischen der betroffenen Prozessstufe und der Referenzprozessstufe befinden. Da die freie Pufferkapazität in diesem Bereich über die Dauer der latenten Phase eines geplanten Stillstandes entscheidet, kann die Auswirkung eines geplanten Stillstandes proaktiv durch die Priorisierungsreihenfolge ungeplanter Stillstände beeinflusst werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde dann eine simulationsbasierte Vorgehensweise vorgestellt, mit der die Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge unter Berücksichtigung geplanter Stillstandszeiten in Form eines Lookahead durchgeführt werden kann.

Um im zweiten Teil dieser Arbeit den Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead zu untersuchen, wurden die hergeleiteten Vorgehensweisen in Form eines Entscheidungsunterstützungssystems in eine Simulationsumgebung implementiert. In einer ersten Simulationsstudie, in der der Mehrwert im Allgemeinen und relevante Einflussfaktoren auf den Mehrwert einer Priorisierung mit

und ohne Lookahead im Speziellen analysiert wurden, konnte gezeigt werden, dass die Berücksichtigung geplanter Stillstandszeiten zu einem signifikant höheren Mehrwert führt als die Priorisierung ohne Lookahead. Dabei ist der erzielbare Mehrwert nicht nur von den Verfügbarkeitswerten und der mittleren Stillstandsdauer sowie den Pufferkapazitäten abhängig, sondern auch von der Lookahead-Größe und insbesondere von dem Auftreten ungeplanter und damit nicht im Lookahead berücksichtigter Stillstände während des Vorhersagezeitraumes. Hier zeigte sich zwar, dass auch bei einem geringen Anteil geplanter Stillstände tendenziell noch ein höherer Mehrwert als mit einer Priorisierung ohne Lookahead generierbar ist, allerdings nimmt der Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead bei sinkendem Anteil geplanter Stillstände deutlich ab.

In einer zweiten Simulationsstudie wurde der Mehrwert einer Priorisierung mit Lookahead anhand eines real existierenden Fließfertigungssystem aus der Automobilindustrie untersucht. Dafür wurde zunächst ein Vorgehen vorgestellt, mit dem schrittweise für jeden Zuständigkeitsbereich des Produktionspersonals im Sinne einer Zerlegung in Teilprobleme eine Priorisierungsreihenfolge ermittelt werden kann. Zusammen mit einem dreistufigen Eskalationsmodell, mit dem die Anzahl möglicher Behebungsreihenfolgen fallabhängig weiter verringert werden kann, wurde schließlich die Möglichkeit geschaffen, die hergeleiteten Vorgehensweisen zur Priorisierung von Stillständen mit und ohne Lookahead auch für größere Lösungsräume mit vertretbarer Entscheidungsfindungszeit anzuwenden. Dabei zeigte sich auch für dieses Fließfertigungssystem, dass die Einbeziehung von Informationen über zukünftig eintretende geplante Stillstände in die Priorisierungsentscheidung zu einem signifikanten Mehrwert gegenüber einer Priorisierung ohne Lookahead führen kann.

Somit konnte mit dieser Arbeit durch die Entwicklung und Evaluation eines operativen Entscheidungsunterstützungssystems, welches dem Produktionspersonal eine objektiv ermittelte Priorisierungsreihenfolge ungeplant eingetretener Stillstände zur Verfügung stellt, nachgewiesen werden, dass die Einbeziehung von Informationen über zukünftig eintretende geplante Stillstandszeiten in die Priorisierungsentscheidung zu einer höheren Produktionsleistung komplexer Fließfertigungssysteme führt. Dabei kann durch die Wahl der Priorisierungsreihenfolge die Auswirkung geplanter Stillstände proaktiv vermindert werden, wodurch das Auftreten momentaner Engpässe durch geplante Stillstandszeiten teilweise sogar verhindert werden kann.

Um die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit auch in der Praxis anwenden zu können, ergibt sich weiterer Forschungsbedarf. So wurden in dieser Arbeit die Taktzeiten der Prozesse sowie die Stillstandszeiten der geplanten Stillstände, die im Lookahead berücksichtigt werden, als konstant angenommen. Allerdings können in der Praxis auch Taktzeitschwankungen auftreten, ausgelöst beispielsweise durch den zunehmenden Verschleiß einzelner Werkzeuge und einer daraus resultierenden verlängerten Prozesszeit. Neben den Taktzeiten können zudem auch geplante Stillstandszeiten einem stochastischen Einfluss unterliegen

sein. Hier wäre eine tiefergehende Untersuchung dieser Einflüsse auf die Vorgehensweise zur Priorisierung mit Lookahead und den damit erzielbaren Mehrwert denkbar. Dabei ist allerdings im Hinblick auf die zur Abbildung stochastischer Einflüsse benötigten Replikationen zu berücksichtigen, dass für ein operatives Entscheidungsunterstützungssystem weiterhin eine angemessene Entscheidungsfindungszeit sichergestellt sein sollte.

Wie eingangs bei der Simulationsstudie des real existierenden Fließfertigungssystems erwähnt, können zudem verschiedene Bauteilvarianten in unterschiedlichen Losgrößen in solchen Systemen produziert werden. Dabei können variantenabhängige Prozesszeiten auftreten, wodurch die Referenzprozessstufe während des Vorhersagezeitraumes wechseln kann. Hier wäre eine Anpassung der simulationsbasierten Vorgehensweise, insbesondere in Bezug auf die Bestimmung des Simulationsendzeitpunkts und die zur Bewertung verwendeten Produktionskennzahlen, denkbar.

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich schließlich aus der praktischen Anwendung eines simulationsbasierten Entscheidungsunterstützungssystems. Hier bietet vor allem die Sicherstellung aktueller und fehlerfreier Produktionsdaten im Rahmen der Aufnahme, Aufbereitung und Einspeisung in das Entscheidungsunterstützungssystem einen weiteren Aufgabenbereich. Interessant wäre in diesem Rahmen die Frage nach dem notwendigen Mindestbedarf an Produktionsdaten, der für eine Priorisierung mit Lookahead benötigt wird.

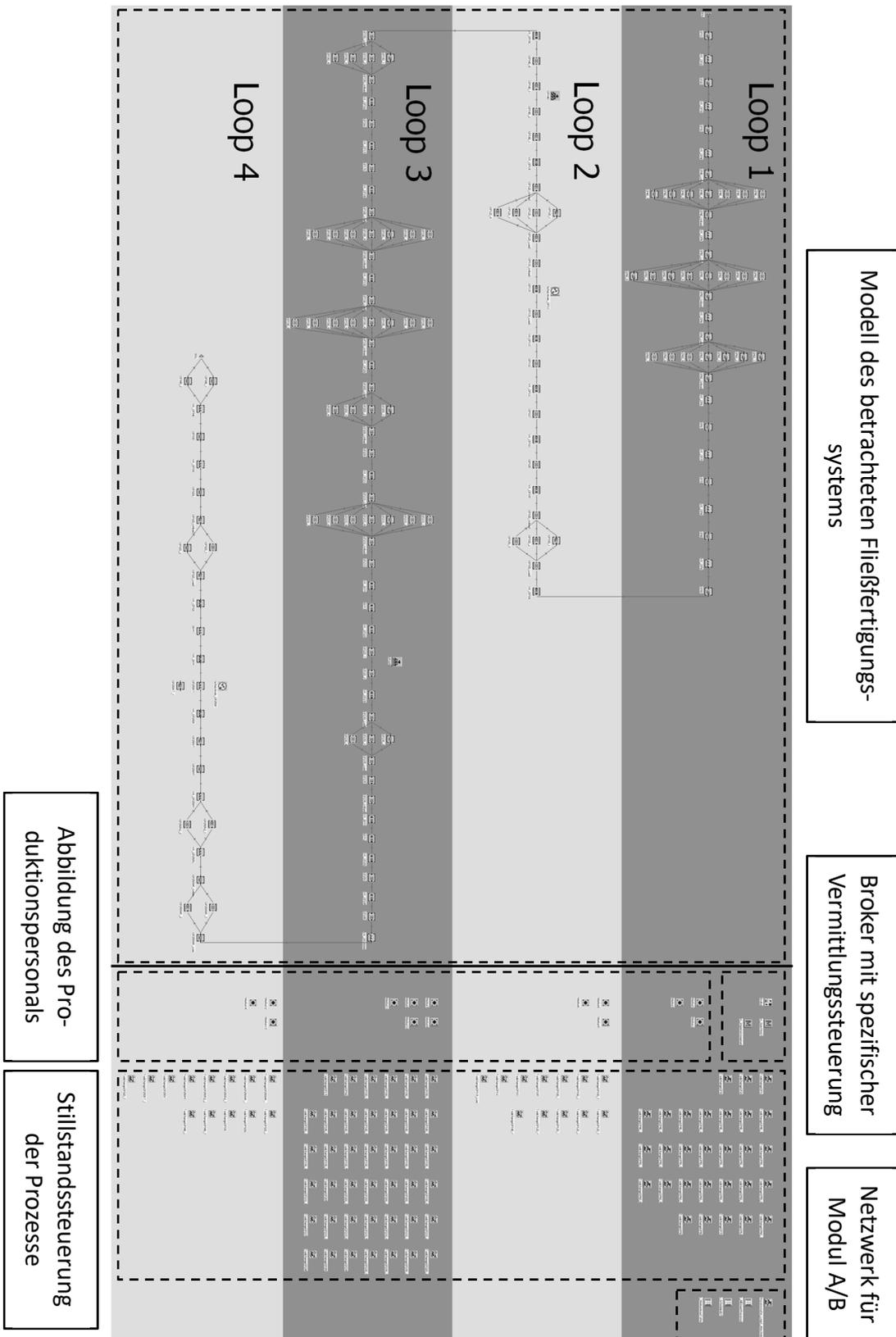


Abbildung 80: Zweite Ebene des Entscheidungsunterstützungssystems (Screenshot)

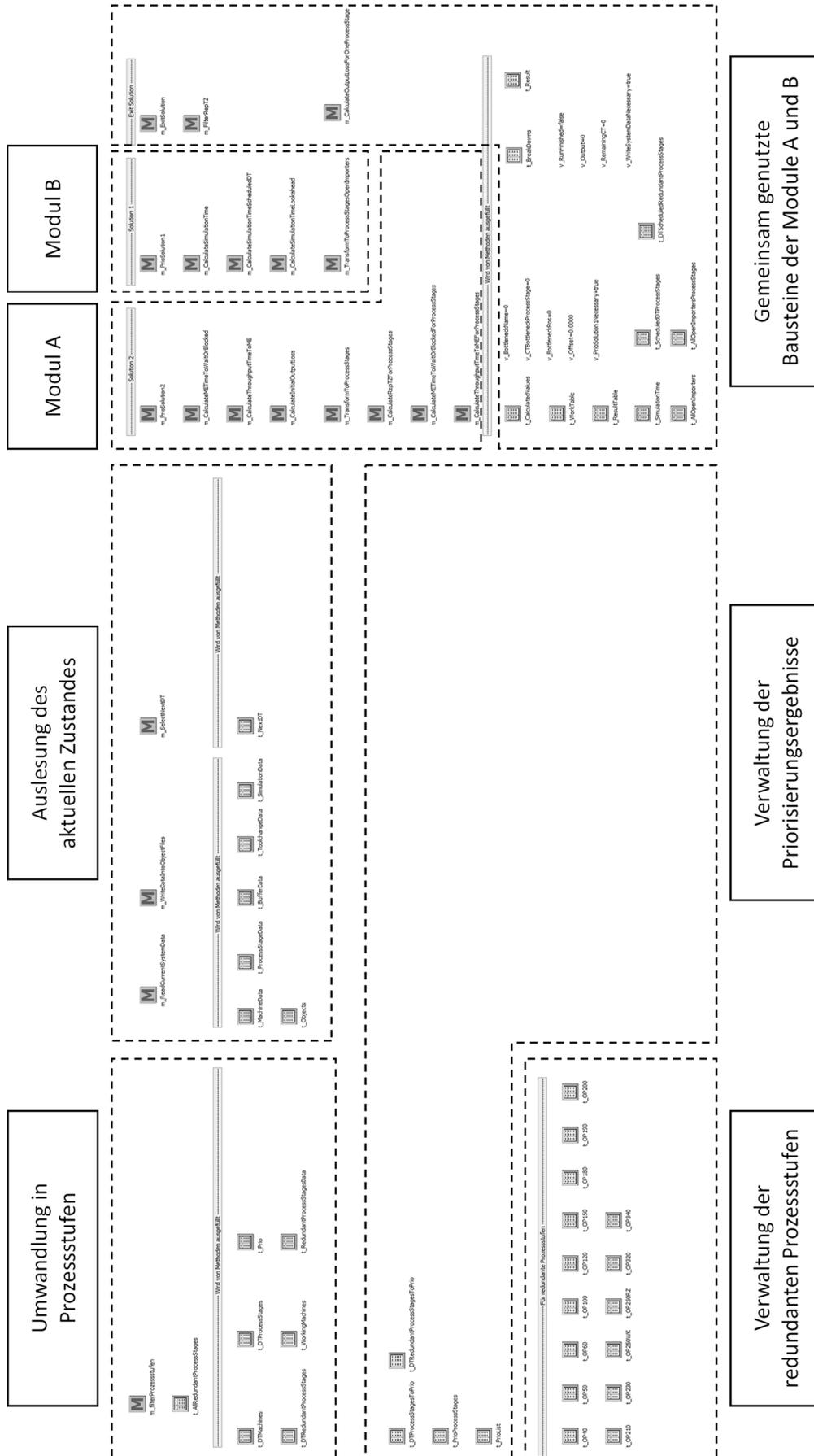


Abbildung 81: Dritte Ebene des Entscheidungsunterstützungssystems (Screenshot)

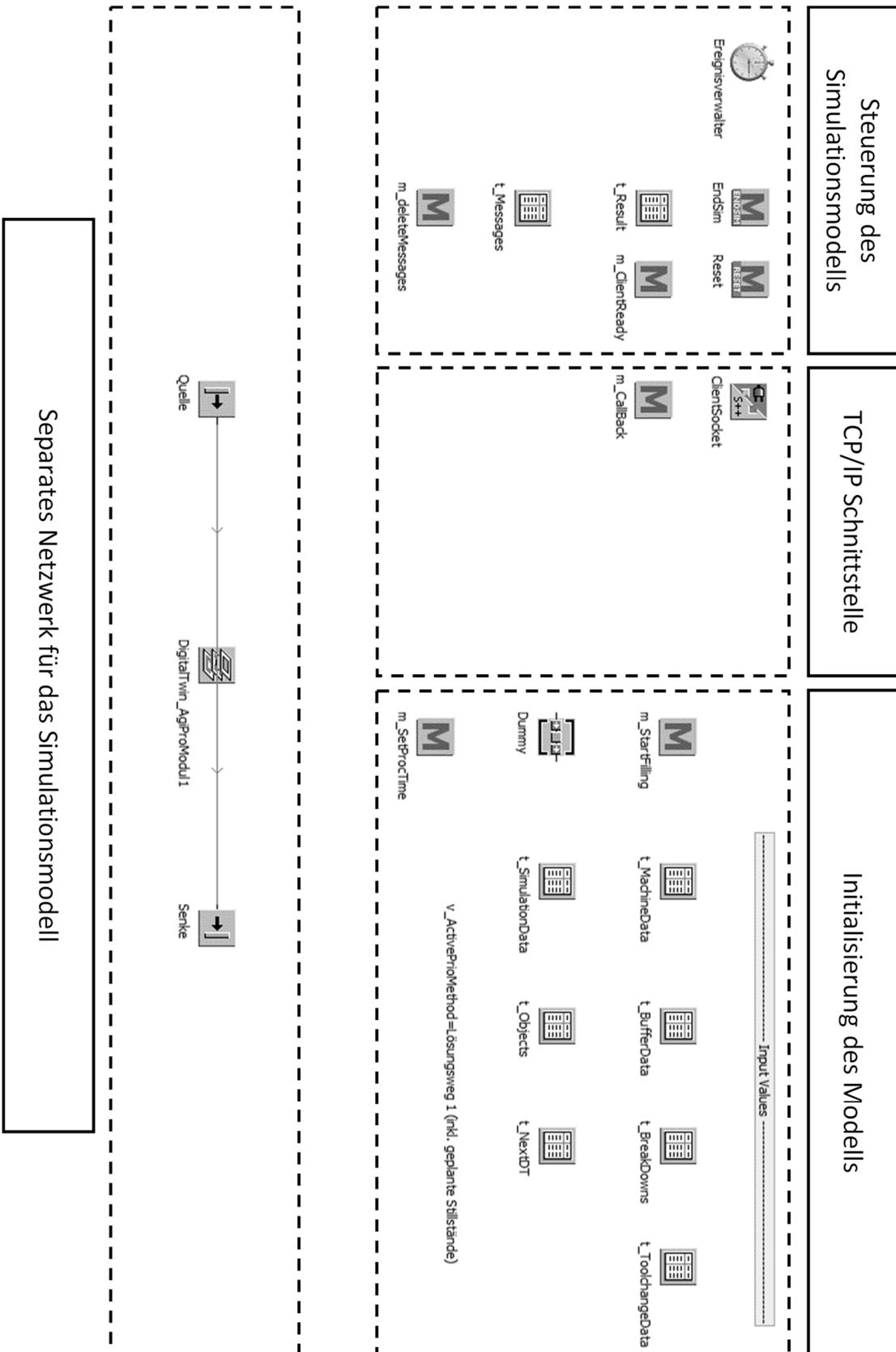


Abbildung 82: Forecast-Modell des Entscheidungsunterstützungssystems (Screenshot) (Hegemann und Nickel 2020: 339)

A.2 Systemdaten des eindimensionalen Fließfertigungssystems

Tabelle 10: Eingabedaten der Prozesse des eindimensionalen Fließfertigungssystems

| Prozess i | $PZ_i = TZ_i$ [s] | V_i [%] | $MTTR_i$ [s] |
|-------------|-------------------|-----------|--------------|
| P_1 | 60 | 84 | 600 |
| P_2 | 62 | 86 | 600 |
| P_3 | 59 | 85 | 600 |
| P_4 | 64 | 83 | 600 |
| P_5 | 58 | 87 | 600 |

Tabelle 11: Eingabedaten der Verkettungselemente des eindimensionalen Fließfertigungssystems

| Verkettungselement j | VK_j [Stück] | VD_j [s] |
|------------------------|----------------|------------|
| VK_1 | 30 | 50 |
| VK_2 | 30 | 50 |
| VK_3 | 30 | 50 |
| VK_4 | 30 | 50 |

A.3 Systemdaten des mehrdimensionalen Fließfertigungssystems

Tabelle 12: Eingabedaten der Prozesse des mehrdimensionalen Fließfertigungssystems

| Prozess i | $PZ_i = TZ_i$ [s] | V_i [%] | $MTTR_i$ [s] |
|-------------|-------------------|-----------|--------------|
| P_1 | 58 | 93 | 890 |
| $P_{2.1}$ | 184 | 96 | 640 |
| $P_{2.2}$ | 186 | 95 | 620 |
| $P_{2.3}$ | 180 | 97 | 630 |
| P_3 | 70 | 95 | 560 |
| $P_{4.1}$ | 126 | 94 | 580 |
| $P_{4.2}$ | 130 | 93 | 610 |
| P_5 | 65 | 92 | 890 |
| P_6 | 59 | 91 | 710 |

Tabelle 13: Eingabedaten der Verkettungselemente des mehrdimensionalen Fließfertigungssystems

| Verkettungselement j | VK_j [Stück] | VD_j [s] |
|------------------------|----------------|------------|
| VK_1 | 23 | 115 |
| VK_2 | 15 | 75 |
| VK_3 | 19 | 95 |
| VK_4 | 28 | 140 |
| VK_5 | 14 | 70 |

A.4 Systemdaten der Kurbelgehäusefertigungslinie

Tabelle 14: Eingabedaten der Prozesse der Kurbelgehäusefertigungslinie

| Prozess i | PZ_i [s] | TZ_i [s] | V_i [%] | $MTTR_i$ [s] |
|-------------|------------|------------|-----------|--------------|
| P_1 | 40,7 | 40,7 | 93 | 791 |
| P_2 | 48,3 | 48,3 | 98 | 454 |
| P_3 | 50,6 | 50,6 | 99 | 983 |
| $P_{4.1}$ | 258,8 | 258,8 | 94 | 675 |
| $P_{4.2}$ | 257,4 | 257,4 | 95 | 870 |
| $P_{4.3}$ | 256,7 | 256,7 | 93 | 627 |
| $P_{4.4}$ | 263,1 | 263,1 | 94 | 850 |
| $P_{4.5}$ | 255,2 | 255,2 | 96 | 774 |
| $P_{4.6}$ | 254,4 | 254,4 | 93 | 860 |
| $P_{4.7}$ | 258,1 | 258,1 | 95 | 926 |
| $P_{5.1}$ | 424,1 | 424,1 | 93 | 659 |
| $P_{5.2}$ | 425,1 | 425,1 | 95 | 599 |
| $P_{5.3}$ | 422,4 | 422,4 | 93 | 631 |
| $P_{5.4}$ | 423,5 | 423,5 | 94 | 590 |
| $P_{5.5}$ | 423,2 | 423,2 | 92 | 734 |
| $P_{5.6}$ | 424,1 | 424,1 | 94 | 686 |
| $P_{5.7}$ | 425,6 | 425,6 | 95 | 659 |
| $P_{5.8}$ | 425,1 | 425,1 | 94 | 716 |
| $P_{6.1}$ | 368,0 | 368,0 | 94 | 685 |
| $P_{6.2}$ | 370,3 | 370,3 | 92 | 573 |
| $P_{6.3}$ | 369,0 | 369,0 | 93 | 838 |
| $P_{6.4}$ | 370,9 | 370,9 | 95 | 679 |
| $P_{6.5}$ | 371,3 | 371,3 | 94 | 542 |

| | | | | |
|------------|-------|-------|-----|-----|
| $P_{6.6}$ | 370,5 | 370,5 | 95 | 608 |
| $P_{6.7}$ | 370,0 | 370,0 | 93 | 654 |
| P_7 | 41,8 | 41,8 | 93 | 605 |
| P_8 | 61,9 | 61,9 | 94 | 518 |
| P_9 | 43,7 | 43,7 | 97 | 675 |
| P_{10} | 40,0 | 40,0 | 99 | 256 |
| $P_{11.1}$ | 151,2 | 151,2 | 98 | 265 |
| $P_{11.2}$ | 151,5 | 151,5 | 99 | 272 |
| $P_{11.3}$ | 152,6 | 152,6 | 97 | 283 |
| P_{12} | 54,0 | 54,0 | 100 | 0 |
| P_{13} | 52,8 | 52,8 | 97 | 286 |
| P_{14} | 56,3 | 56,3 | 96 | 405 |
| P_{15} | 840 | 21,0 | 95 | 758 |
| $P_{16.1}$ | 168,3 | 168,3 | 94 | 231 |
| $P_{16.2}$ | 173,2 | 173,2 | 96 | 404 |
| $P_{16.3}$ | 168,9 | 168,9 | 93 | 201 |
| $P_{16.4}$ | 168,3 | 168,3 | 92 | 355 |
| $P_{17.1}$ | 54 | 54 | 100 | 0 |
| $P_{17.2}$ | 54 | 54 | 100 | 0 |
| $P_{17.3}$ | 54 | 54 | 100 | 0 |
| $P_{17.4}$ | 54 | 54 | 94 | 365 |
| $P_{18.1}$ | 210,7 | 210,7 | 93 | 523 |
| $P_{18.2}$ | 209,2 | 209,2 | 95 | 675 |
| $P_{18.3}$ | 209,1 | 209,1 | 96 | 423 |
| $P_{18.4}$ | 208,4 | 208,4 | 92 | 641 |
| P_{19} | 35,1 | 35,1 | 95 | 171 |
| P_{20} | 53,5 | 53,5 | 97 | 190 |
| $P_{21.1}$ | 349,4 | 349,4 | 94 | 575 |
| $P_{21.2}$ | 346,4 | 346,4 | 95 | 535 |
| $P_{21.3}$ | 346,4 | 346,4 | 93 | 624 |
| $P_{21.4}$ | 344,0 | 344,0 | 94 | 553 |
| $P_{21.5}$ | 343,9 | 343,9 | 95 | 507 |
| $P_{21.6}$ | 346,0 | 346,0 | 96 | 690 |
| $P_{21.7}$ | 347,6 | 347,6 | 93 | 528 |
| $P_{22.1}$ | 438,7 | 438,7 | 93 | 745 |
| $P_{22.2}$ | 443,3 | 443,3 | 94 | 717 |
| $P_{22.3}$ | 435,4 | 435,4 | 92 | 652 |
| $P_{22.4}$ | 435,6 | 435,6 | 93 | 627 |
| $P_{22.5}$ | 435,7 | 435,7 | 94 | 591 |
| $P_{22.6}$ | 440,5 | 440,5 | 95 | 652 |

| | | | | |
|------------|-------|-------|-----|-----|
| $P_{22.7}$ | 441,5 | 441,5 | 92 | 672 |
| $P_{22.8}$ | 439,7 | 439,7 | 96 | 589 |
| $P_{23.1}$ | 229,5 | 229,5 | 92 | 296 |
| $P_{23.2}$ | 224,9 | 224,9 | 94 | 358 |
| $P_{23.3}$ | 224,9 | 224,9 | 93 | 314 |
| $P_{23.4}$ | 222,9 | 222,9 | 94 | 287 |
| P_{24} | 55,0 | 55,0 | 96 | 141 |
| $P_{25.1}$ | 327,8 | 327,8 | 93 | 700 |
| $P_{25.2}$ | 325,8 | 325,8 | 94 | 593 |
| $P_{25.3}$ | 326,2 | 326,2 | 95 | 749 |
| $P_{25.4}$ | 328,2 | 328,2 | 95 | 652 |
| $P_{25.5}$ | 325,3 | 325,3 | 93 | 802 |
| $P_{25.6}$ | 327,2 | 327,2 | 94 | 639 |
| $P_{25.7}$ | 324,5 | 324,5 | 93 | 766 |
| P_{26} | 51,5 | 51,5 | 95 | 140 |
| $P_{27.1}$ | 62,7 | 62,7 | 100 | 0 |
| $P_{27.2}$ | 62,7 | 62,7 | 95 | 479 |
| $P_{28.1}$ | 144,3 | 144,3 | 92 | 568 |
| $P_{28.2}$ | 150,9 | 150,9 | 91 | 318 |
| $P_{28.3}$ | 148,2 | 148,2 | 93 | 388 |
| P_{29} | 45,5 | 45,5 | 95 | 300 |
| P_{30} | 55,0 | 55,0 | 96 | 324 |
| P_{31} | 46,2 | 46,2 | 97 | 432 |
| $P_{32.1}$ | 73,4 | 73,4 | 95 | 355 |
| $P_{32.2}$ | 74,3 | 74,3 | 96 | 315 |
| $P_{33.1}$ | 119,9 | 119,9 | 94 | 226 |
| $P_{33.2}$ | 126,4 | 126,4 | 96 | 245 |
| P_{34} | 60,0 | 60,0 | 96 | 244 |
| P_{35} | 60,0 | 60,0 | 96 | 235 |
| P_{36} | 60,0 | 10 | 95 | 176 |
| $P_{37.1}$ | 117,6 | 117,6 | 89 | 319 |
| $P_{37.2}$ | 120,5 | 120,5 | 90 | 323 |
| P_{38} | 61,6 | 61,6 | 94 | 180 |
| P_{39} | 60,8 | 60,8 | 97 | 170 |
| $P_{40.1}$ | 53,0 | 53,0 | 99 | 80 |
| $P_{40.2}$ | 53,0 | 53,0 | 99 | 76 |

Tabelle 15: Eingabedaten der Verkettungselemente der Kurbelgehäusefertigungslinie

| Verkettungselement j | VK_j [Stück] | VD_j [s] |
|-------------------------|----------------|------------|
| VK_1 | 1 | 13,8 |
| VK_2 | 1 | 21,8 |
| VK_3 | 27 | 203,7 |
| VK_4 | 16 | 76,1 |
| VK_5 | 14 | 72,4 |
| VK_6 | 37 | 264,3 |
| VK_7 | 3 | 56,4 |
| VK_8 | 2 | 57,7 |
| VK_9 | 3 | 37,7 |
| VK_{10} | 129 | 713,5 |
| VK_{11} | 10 | 71,3 |
| VK_{12} | 1 | 38,6 |
| VK_{13} | 1 | 29,4 |
| VK_{14} | 5 | 29,4 |
| VK_{16} | 110 | 680,8 |
| VK_{17} | 50 | 273,2 |
| VK_{18} | 9 | 43,7 |
| VK_{19} | 1 | 22,4 |
| VK_{20} | 11 | 58,0 |
| VK_{21} | 66 | 363,8 |
| VK_{22} | 14 | 66,90 |
| VK_{24} | 12 | 66,50 |
| $VK_{26.1}$ | 24 | 178,8 |
| $VK_{26.2}$ (EKM_1) | 88 | 0 |
| $VK_{26.3}$ | 5 | 48,1 |
| VK_{27} | 15 | 115,6 |
| $VK_{29.1}$ | 2 | 11,3 |
| $VK_{29.2}$ (EKM_2) | 64 | 0 |
| $VK_{29.3}$ | 4 | 47,8 |
| VK_{30} | 1 | 9,9 |
| VK_{31} | 3 | 16,7 |
| VK_{32} | 15 | 117,3 |
| VK_{33} | 6 | 71,9 |
| VK_{35} | 1 | 10,7 |
| $VK_{36.1}$ | 4 | 20,0 |
| $VK_{36.2}$ (EKM_3) | 88 | 0 |
| $VK_{36.3}$ | 19 | 80,9 |

| | | |
|-----------|---|------|
| VK_{38} | 9 | 54,0 |
| VK_{39} | 4 | 51,8 |

Tabelle 16: Eingabedaten der Be- und Entladeprozesse der
Kurbelgehäusefertigungslinie

| Ladeprozess | PZ_i [s] | EZ_i [s] |
|--------------------|------------|------------|
| PS_4 Beladen | 21,6 | 22,2 |
| PS_4 Entladen | 20,1 | 23,7 |
| PS_5 Beladen | 21,9 | 23,4 |
| PS_5 Entladen | 21,7 | 23,6 |
| PS_6 Beladen | 21,5 | 23,6 |
| PS_6 Entladen | 21,2 | 23,9 |
| PS_{11} Beladen | 24,9 | 24,9 |
| PS_{11} Entladen | 24,2 | 25,6 |
| PS_{15} Beladen | 20,0 | 20,0 |
| PS_{15} Entladen | 20,0 | 20,0 |
| PS_{16} Beladen | 21,3 | 24,6 |
| PS_{16} Entladen | 22,6 | 23,0 |
| PS_{18} Beladen | 25,5 | 25,6 |
| PS_{18} Entladen | 22,9 | 28,2 |
| PS_{21} Beladen | 21,5 | 22,0 |
| PS_{21} Entladen | 21,3 | 22,2 |
| PS_{22} Beladen | 21,9 | 22,6 |
| PS_{22} Entladen | 21,9 | 22,6 |
| PS_{23} Beladen | 18,5 | 20,4 |
| PS_{23} Entladen | 19,4 | 19,5 |
| PS_{25} Beladen | 21,4 | 23,1 |
| PS_{25} Entladen | 21,6 | 22,9 |
| PS_{28} Beladen | 24,6 | 9,6 |
| PS_{28} Entladen | 19,5 | 4,5 |
| PS_{29} Entladen | 19,7 | 4,7 |
| PS_{32} Beladen | 15,0 | 15,0 |
| PS_{32} Entladen | 15,0 | 15,0 |
| PS_{37} Beladen | 7,0 | 7,0 |
| PS_{37} Entladen | 7,0 | 7,0 |

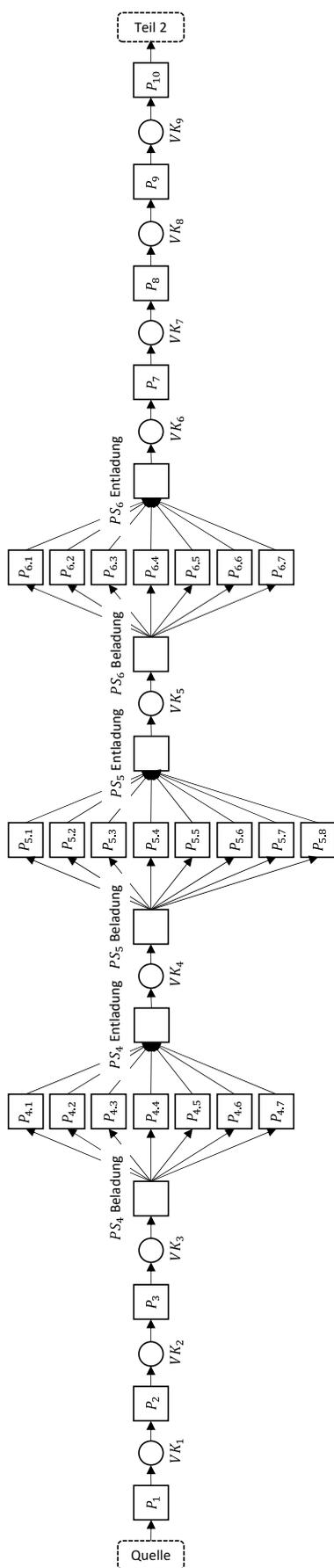


Abbildung 83: Prozesskette Teil 1

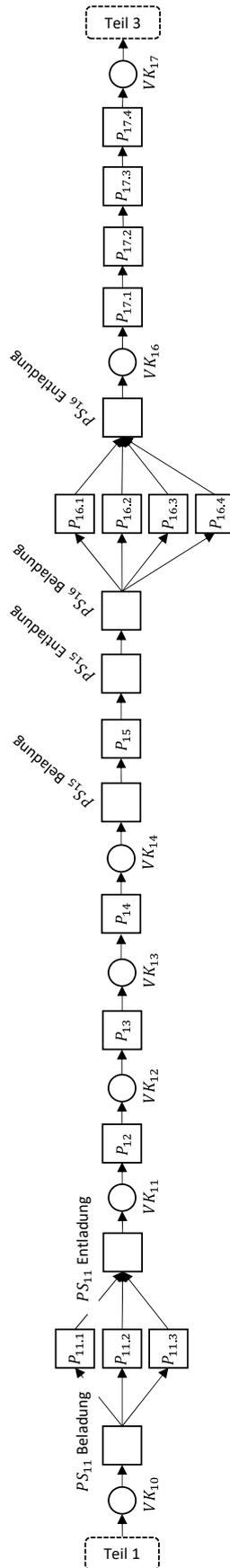


Abbildung 84: Prozesskette Teil 2

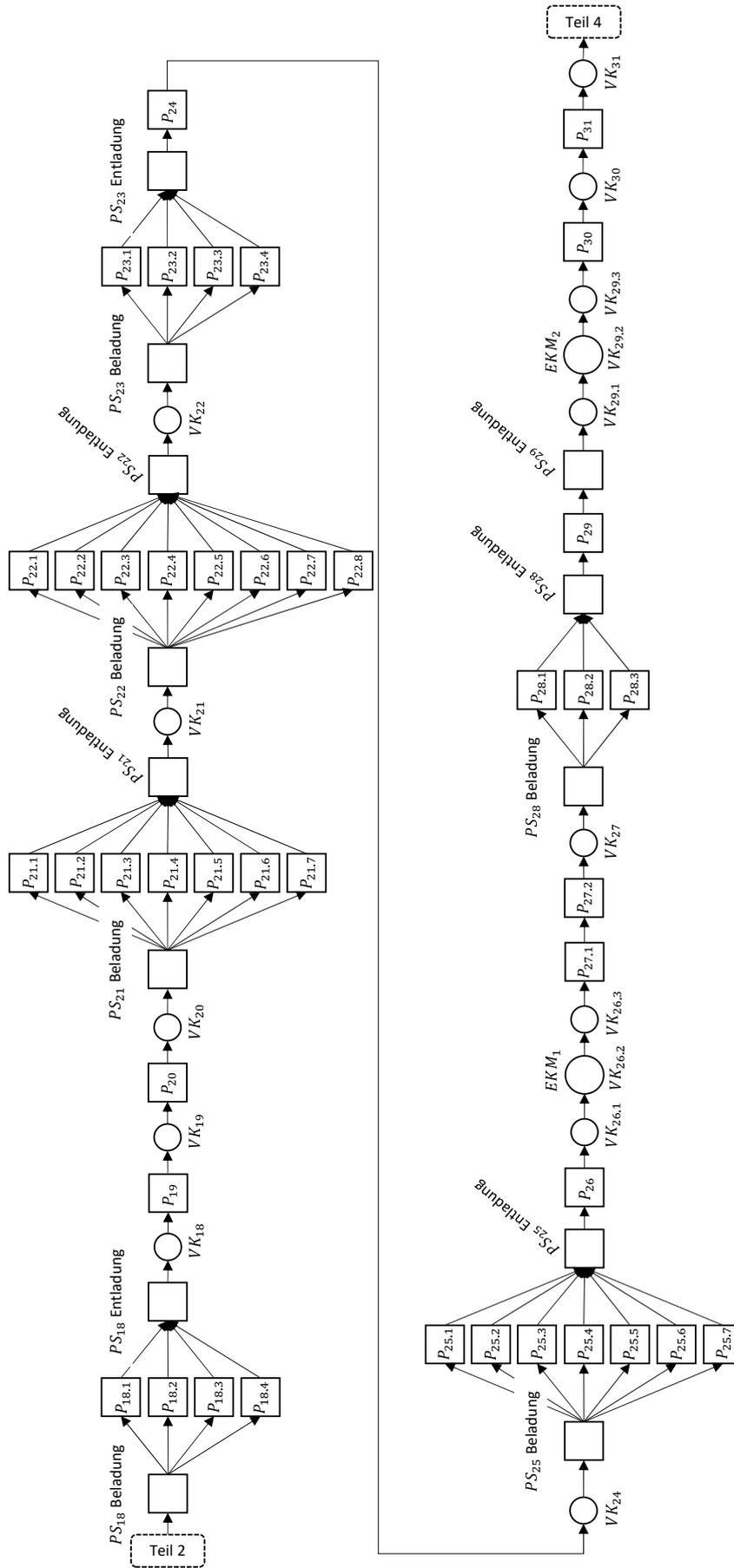


Abbildung 85: Prozesskette Teil 3

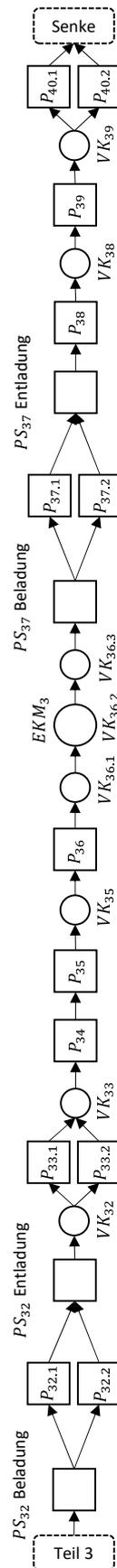


Abbildung 86: Prozesskette Teil 4

Literaturverzeichnis

- Alrabghi, A.; Tiwari, A.: State of the Art in Simulation-Based Optimisation for Maintenance Systems. In: Computers and Industrial Engineering 82 (2015), S. 167-182.
- Anders, C.: Adaptierbares Diagnosesystem bei Transferstraßen. Berlin Heidelberg: Springer 1998.
- Aydt, H.; Turner, S. J.; Cai, W.; Low, M. Y. H.: Research Issues in Symbiotic Simulation. In: Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. Austin (USA), 2009, S. 1213-1222.
- Bengtsson, M.: Classification of Machine Equipment. In: Conference on Maintenance Performance Measurement and Management. Lulea (SWE), 2011, S. 1-5.
- Bergmann, S.; Strassburger, S.: Challenges for the Automatic Generation of Simulation Models for Production Systems. In: Proceedings of the 2010 Summer Computer Simulation Conference. Ottawa (Canada), 2010, S. 545-549.
- Bergmann, S.; Stelzer, S.; Strassburger, S.: Initialization of Simulation Models using CMSD. In: Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Phoenix (USA), 2011, S. 2223-2234.
- Bokrantz, J.; Skoogh, A.; Ylipää, T.; Stahre, J.: Handling of production disturbances in the manufacturing industry. In: Journal of Manufacturing Technology Management 27 (2016) 8, S. 1054-1075.
- Brackel, T. von: Adaptive Steuerung flexibler Werkstattfertigungssysteme. Wiesbaden: Gabler 2009.
- Brecher, C.; Herfs, W.; Özdemir, D.; Obdenbusch, M.; Nittinger, J.; Wellmann, F.; Königs, M.; Krella, C.; Sittig, S.: Die vernetzte Werkzeugmaschine. In: Reinhart, G.: Handbuch Industrie 4.0. München: Carl-Hanser 2017.
- Cardin, O.; Castagna, P.: Proactive production activity control by online simulation. In: International Journal of Simulation und Process Modelling 6 (2011) 3, S. 177-186.
- Chang, Q.; Ni, J.; Bandyopadhyay, P.; Biller, S.; Xiao, G.: Supervisory Factory Control based on Real-Time Production Feedback. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering 129 (2007), S. 653-660.
- Czaja, L.; Voigt, K.I.: Störungen und Störungsauslöser in automobilen Wertschöpfungsnetzwerken - Ergebnisse einer empirischen Untersuchung in der deutschen Automobilindustrie. In: Specht, D. (Hrsg.): Weiterentwicklung der Produktion. Wiesbaden: Gabler 2009.
- DIN Deutsches Institut für Normierung: DIN 8743: Verpackungsmaschinen und Verpackungsanlagen - Kennzahlen zur Charakterisierung des Betriebsverhaltens und Bedingungen für deren Ermittlung im Rahmen eines Abnahmelaufs. Berlin: Beuth 2014.
- DIN Deutsches Institut für Normierung: DIN EN 13306: Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung. Berlin: Beuth 2018.

- DIN Deutsches Institut für Normierung: DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: Beuth 2019.
- Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R.; Scholl, A.: Einführung in Operations Research. 9. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Gabler 2015.
- Donhauser, T.; Baier, L.; Ebersbach, T.; Franke, J.; Schuderer, P.: Simulationsbasierte Optimierung von Fabrik anläufen. In: Werkstatttechnik Online 4 (2018), VDI Fachmedien, S. 221-227.
- Dunke, F.: Online Optimization with Lookahead. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2014.
- Dunke, F.; Necil, J.; Nickel, S.: Online-Optimierung und Simulation in der Logistik. In: Lübbecke, M.; Weiler, A.; Werners, B. (Hrsg.): Zukunftsperspektiven des Operations Research. Wiesbaden: Springer Gabler 2014, S. 33-47.
- Dunke, F.; Nickel, S.: Simulation-based Optimisation in Industry 4.0. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): Simulation in Production and Logistics. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2015, S. 69-78.
- Dunke, F.; Nickel, S.: A general modeling approach to online optimization with lookahead. In: Omega 63 (2016), S. 134-153.
- Eberlin, S.; Hock, B.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014.
- Erlach, K.: Wertstromdesign. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer 2010.
- Fowler, J. W.; Rose, O.: Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems. In: Simulation 80 (2004) 9, S. 469-476.
- Fuchs, F.: Kennzahlen in der automatisierten Fertigung. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 607-614.
- Galaske, N.; Anderl, R.: Disruption Management for Resilient Processes in Cyber-Physical Production Systems. In: Procedia CIRP 50 (2016), S. 442-447.
- Gopalakrishnan, M.; Skoogh, A.; Laroque, C.: Simulation-based Planning of Maintenance Activities in the Automotive Industry. In: Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference. Washington D. C. (USA), 2013, S. 2610-2621.
- Gopalakrishnan, M.; Skoogh, A.; Laroque, C.: Simulation-based Planning of Maintenance Activities by a Shifting Priority Method. In: Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. Savannah Georgia. (USA), 2014, S. 2168-2179.
- Gopalakrishnan, M.; Bokrantz, J.; Ylipää, T.; Skoogh, A.: Planning of maintenance activities - A current state mapping in industry. In: Procedia CIRP 30 (2015), S. 480-485.
- Gopalakrishnan, M.; Skoogh, A.; Laroque, C.: Buffer Utilization based Scheduling of Maintenance Activities by a Shifting Priority Approach - A Simulation Study. In: Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference, Arlington (USA), 2016, S. 2797-2808.

- Gopalakrishnan, M.; Skoogh, A.: Machine criticality based maintenance prioritization: Identifying productivity improvement potential. *International Journal of Productivity and Performance Management* 67 (2018) 4, S. 654-672.
- Grimme, C.; Bossek, J.: Einführung in die Optimierung. Wiesbaden: Springer Vieweg 2018.
- Grundig, C. G.: Fabrikplanung. 6. Auflage, München: Carl Hanser 2018.
- Günther, H. O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 9. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer 2012.
- Guner, H. U.; Chinnam, R.; Murat, A.: Simulation platform for anticipative plant-level maintenance decision support system. In: *International Journal of Production Research* (2015), S. 1-19.
- Guo, W.; Jin, J.; Hu, S. J.: Allocation of maintenance resources in mixed model assembly systems. In: *Journal of Manufacturing Systems* 32 (2013), S. 473-479.
- Gupta, S.; Bhattacharya, J.: Cost-effective importance measure: A new approach for resource prioritization in a production plant. In: *International Journal of Quality and Reliability Management* 30 (2013) 4, S. 379-386.
- Gutenschwager, K.: Online-Dispositionsprobleme in der Lagerlogistik. Berlin Heidelberg: Springer 2002.
- Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Simulation in Produktion und Logistik. Berlin: Springer Vieweg 2017.
- Habenicht, D.: Verkettungsarten im Wertstrom schlanker Unternehmen. Berlin: Springer Vieweg 2017.
- Hanisch, A.; Schulze, T.: Initialization of Online Simulation Models. In: *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*. Orlando (USA), 2005, S. 1795-1803.
- Hazen, B. T.; Boone, C. A.; Ezell, J. D.; Jones-Farmer, L. A.: Data quality for science, predictive analytics, and big data in supply chain management: An introduction to the problem and suggestions for research and applications. In: *International Journal of Production Economics* 154 (2014), S. 72-80.
- Hegemann, M.; Nickel, S.: Einfluss von zuverlässig prognostizierten Stillstandzeiten auf die simulationsbasierte Priorisierung von Maschinenstillständen in komplexen Produktionssystemen. In: Putz, M.; Schlegel, A. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik*. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten 2019, S. 551-560.
- Hegemann, M.; Nickel, S.: Ein simulationsbasiertes Optimierungssystem zur Priorisierung von Maschinenstillständen unter Einbeziehung eines Lookahead. In: Deatcu, C.; Lückerath, D.; Ullrich, O.; Durak, U. (Hrsg.): *Proceedings ASIM SST 2020*, 25. ASIM Symposium Simulationstechnik. Wien: ARGESIM Publisher 2020, S. 335-342.
- Hegenscheidt, M.: Kennliniengestützte Leistungsprognose verketteter Produktionssysteme. Dissertation, Hannover: Universität Hannover 2003.
- Heib, C.; Nickel, S.: Performancevergleich zwischen simulationsbasierter Online- und Offline-Optimierung anhand von Scheduling-Problemen. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin Heidelberg: Springer 2011, S. 205-214.

- Heil, M.: Entstörung betrieblicher Abläufe. Wiesbaden: Gabler 1995.
- Hotz, I.: Simulationsbasierte Frühwarnsysteme zur Unterstützung der operativen Produktionssteuerung und -planung in der Automobilindustrie. Dissertation, Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität 2007.
- Hotz, I.; Schulze, T.: Simulationsbasierte Frühwarnsysteme - Definition, Anforderungen, Architektur. In: Schulze, T.; Horton, G.; Preim, B.; Schlechtweg, S.: Simulation und Visualisierung 2006. Magdeburg: SCS Publishing House 2006, S. 63-78.
- Kapp, R.: Ein betriebsbegleitendes Fabriksimulationssystem zur durchgängigen Unterstützung der kontinuierlichen Fabrikadaption. Dissertation, Stuttgart: Universität Stuttgart 2011.
- Kaul, T.; Hentze, J.; Sextro, W.; Gräßler, I.: Integration von Verlässlichkeitsmodellen der Entwicklung in einen Digitalen Zwilling zur Umsetzung einer vorausschauenden Instandhaltung. In: Bertram, T.; Corves, B.; Gräßler, I.; Janschek, K. (Hrsg.): Fachtagung Mechatronik 2019. Paderborn: 2019, S. 19-24.
- Khateeb, A.: Planung und Optimierung von Fließmontagesystemen. Dissertation, Ilmenau: Universitätsverlag Ilmenau 2014.
- Kletti, J.; Schumacher, J.: Die perfekte Produktion. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2014.
- Kleppmann, W.: Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren. 10. Auflage, München: Carl-Hanser 2020.
- Kröning, S.: Integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung und -steuerung mittels Simulationstechnik. Dissertation, Hannover: Universität Hannover 2014.
- Kröning, S.; Denkena, B.: Dynamic scheduling of maintenance measures in complex production systems. *Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (2013) 4, S. 292-300.
- Krüger, T.: Nutzungssteigerung verketteter Produktionssysteme. Dissertation, Hannover: Universität Hannover 2000.
- Kummer, S.; Grün, O.; Jammerneegg, W.: Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik - das Übungsbuch. Band 2. München: Pearson Studium 2009.
- Kuo, C. T.; Lim, J. T.; Merkov, S. M.: Bottlenecks in serial production lines: A system-theoretic approach. In: *MPE* 2 (1996), S. 233-276.
- Langer, R.; Li, J.; Biller, S.; Chang, Q.; Huang, N.; Xiao, G.: Simulation study of a bottleneck-based dispatching policy for a maintenance workforce. In: *International Journal of Production Research* 48 (2010) 6, S. 1745-1763.
- Lei, Y.; Liu, J.; Ni, J.; Lee, J.: Production line simulation using STPN for maintenance. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 21 (2010), S. 213-221.
- Lemessi, M.; Rehbein, S.; Rehn, G.: Semi-Automatic Simulation-Based Bottleneck Detection Approach. In: *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, Berlin, 2012, S. 3092-3103.
- Li, L.; Chang, Q.; Ni, J.; Biller, S.: Real time production improvement through bottleneck control. In: *International Journal of Production Research*. 47 (2009a) 21, S. 6145-6158.

- Li, L.; Chang, Q.; Ni, J.: Data driven bottleneck detection of manufacturing systems. In: International Journal of Production Research 47 (2009b) 18, S. 5019-5036.
- Li, L.; Ambani, S.; Ni, J.: Plant-level maintenance decision support system for throughput improvement. In: International Journal of Production Research 47 (2009c) 24, S. 7047-7061.
- Li, L.; Ni, J.: Short-term decision support system for maintenance task prioritization. In: International Journal of Production Economics 121 (2009), S. 195-202.
- Lotter, B.: Wiendahl, H. P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin Heidelberg: Springer 2012.
- März, L.; Krug, W.: Kopplung von Simulation und Optimierung. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin Heidelberg: Springer 2011, S. 41-45.
- Mertens, P.: Integrierte Informationsverarbeitung 1 - Operative Systeme in der Industrie. 18. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler 2013.
- Mobley, R. K.: An Introduction to Predictive Maintenance. 2. Auflage. Amsterdam: Butterworth-Heinemann 2002.
- Mosley, S. A.; Teyner, T.; Uzsoy, R. M.: Maintenance Scheduling and Staffing Policies in a Wafer Fabrication Facility. In: IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 11 (1998) 2, S. 316-323.
- Mühlnickel, H.; Kurz, C. M.; Jussen P.; Emonts-Holley, R.: Smart Maintenance. In: Reichel, J.; Müller G.; Haeffs J. (Hrsg.): Betriebliche Instandhaltung. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2018, S. 349-360.
- Ni, J.; Jin, X.: Decision support systems for effective maintenance operations. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 61 (2012), S. 411-414.
- Onggo, B. S.: Symbiotic Simulation System for Industry 4.0. In: Gunal, M. M.: Simulation for Industry 4.0. Schweiz: Springer Nature 2019, S. 153-165.
- Page, B.: Diskrete Simulation. Berlin Heidelberg: Springer 1991.
- Pawellek, G.: Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer 2016.
- Rabe, M.: Einführung. In: Kuhn, A.; Rabe, M. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik - Fallbeispielsammlung. Berlin Heidelberg: Springer 1998, S. 1-10
- Reichel, J.; Müller, G.; Haeffs, J. (Hrsg.): Betriebliche Instandhaltung. 2 Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2018.
- Richter, M.; Glaser, R.; Jessen, U. Wenzel, S.: Simulationsgestützte Entscheidungsunterstützung für das Produktionsmanagement einer Verzinkerei. In Wenzel, S.; Peter, T. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2017. Kassel: kassel university press, 2017, S. 479-488.
- Roser, C.; Nakano, M.; Tanaka, M.: A Practical Bottleneck Detection Method. In: Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, Arlington (USA), 2001, S. 949-953.

- Roser, C.; Nakano, M.; Tanaka, M.: Shifting Bottleneck Detection. In: Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, Berlin, 2002, S. 1079-1086.
- Roser, C.; Nakano, M.: A Quantitative Comparison of Bottleneck Detection Methods in Manufacturing Systems with Particular Consideration for Shifting Bottlenecks. In: Umeda, S.; Nakano, M.; Mizuyama, H.; Hibino, H.; Kiritsos, D.; Cieminski, G. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems - Innovative Production Management towards Sustainable Growth. London: Springer 2015, S. 273-281.
- Roy, R.; Stark, R.; Tracht, K.; Takata, S.; Mori, M.: Continuous maintenance and the future - Foundations and technological challenges. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 65 (2016), S. 667-688.
- Saez, M.; Maturana, F. P.; Barton, K.; Tilbury, D. M.: Real-Time Manufacturing Machine and System Performance Monitoring Using Internet of Things. In: IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 15 (2018) 4, S. 1735-1748.
- Schenk, M.: Instandhaltung technischer Systeme. Berlin Heidelberg: Springer 2010.
- Schmitz, S.; Krengel, J.: Big Data im Störungsmanagement. Informatik 2014, Gesellschaft für Informatik e.V. (2014), S. 1229-1240.
- Schwartz, F.: Störungsmanagement in Produktionssystemen. Aachen: Shaker 2004.
- Sengupta, S.; Das, K.; VanTil, R. P.: A new Method for Bottleneck Detection. In: Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, Miami (USA), 2008, S. 1741-1745.
- Silvestri, A.; Cerbaso, C.; Falcone, D.; Forcina, A.; Duraccio, V.: Maintenance Critical Analysis and Priority Index: A new Model for Maintenance Priority. In: Proceedings of the 26th European Modeling and Simulation Symposium (EMSS), Bordeaux (FRA), 2014, S. 432-437.
- Skoogh, A.; Johansson, B.; Hanson, L.: Data requirements and representation for simulation of energy consumption in production systems. In: Proceedings of the 44th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Madison (USA), 2011, S. 1-6.
- Spieckermann, S.: Diskrete, ereignisorientierte Simulation in Produktion und Logistik - Herausforderungen und Trends. In: Schulze, T.; Horton, G.; Preim, B.; Schlechtweg, S.: Simulation und Visualisierung 2005. Magdeburg: SCS Publishing House 2005, S. 3-14.
- Stadnicka, D.; Antosz, K.; Ratnayake, R. M.: Development of an empirical formula for machine classification: Prioritization of maintenance tasks. In: Safety Science 63 (2014), S. 34-41.
- Stricker, N.; Lanza, G.: The concept of robustness in production systems and its correlation to disturbances. Procedia CIRP 19 (2014), S. 87-92.
- Strunz, M.: Instandhaltung – Grundlagen, Strategien, Werkstätten. Berlin Heidelberg: Springer 2012.
- Sturrock, D. T.: Using Commercial Software to Create a Digital Twin. In: Gunal, M. M.: Simulation for Industry 4.0. Schweiz: Springer Nature 2019, S. 191-210.

- Subramaniyan, M.; Skoogh, A.; Gopalakrishnan, M.; Salomonsson, H.; Hanna, A.; Lämkuill, D.: An algorithm for data-driven shifting bottleneck detection. In: *Cogent Engineering* 3 (2016), S. 1-19.
- Subramaniyan, M.; Skoogh, A.; Salomonsson, H.; Bangalore, P.: A data-driven algorithm to predict throughput bottlenecks in a production system based on active periods of machines. In: *Computers and Industrial Engineering* 125 (2018), S. 533-544.
- Syska, A.: *Produktionsmanagement*. Wiesbaden: Gabler 2006.
- Taylor, S. J. E.; Fujimoto, R.; Page, E. H.; Fishwick, P. A.; Uhrmacher, A. M.; Wainer, G.: Panel on grand challenges for modeling and simulation. In: *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, Berlin, 2012, S. 1-15.
- Uhlig, T.; Rose, O.: Reduction of Simulation Effort for Simulation-Based Optimisation. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in Production and Logistics*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2015, S. 39-48.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 3423: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen*. Berlin: Beuth 2011.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*. Berlin: Beuth 2014.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 3633 Blatt 12: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Simulation und Optimierung*. Berlin: Beuth 2016.
- VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: *VDMA Richtlinie 66412-1: Manufacturing Execution Systems (MES) Kennzahlen*. Berlin: Beuth 2009.
- Völker, S.; Schmidt, P.M.: Simulationsbasierte Optimierung von Produktions- und Logistiksystemen mit Tecnomatrix Plant Simulation. In: Zülich, G.; Stock, P. (Hrsg.): *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 93-100.
- Wedel, M.: *Effektive Priorisierung bei reaktiven Instandhaltungsmaßnahmen zur Steigerung der Ausbringung von komplexen Transferstraßen am Beispiel der Automobilindustrie*. Aachen: Shaker 2016.
- Wenzel, S.; Bernhard, J.: Definition und Modellierung von Systemlasten für die Simulation logistischer Systeme. In: Nyhius, P. (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin: Springer 2008, S. 487-509.
- Yang, Z.; Chang, Q.; Djurdjanovic, D.; Ni, J.; Lee, J.: Maintenance Priority Assignment Utilizing On-line Production Information. In: *International Journal of Manufacturing Science and Engineering* 129 (2007), S. 435-446.
- Zhai, S.; Reinhart, G.: Predictive Maintenance als Wegbereiter für die instandhaltungsgerechte Produktionssteuerung. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* 113 (2018) 5, S. 298-301.
- Zhuang, C.; Liu, J.; Xiong, H.: Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96 (2018), S. 1149-1163.