

Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Christopher Mundt

aus
Hamburg

2024

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Tag der mündlichen Prüfung: 16. April 2024

Zusammenfassung

Die Lieferzeiten und die Liefertermineinhaltung sind für die Kunden von Auftragsfertigern wichtige Entscheidungskriterien. Umso problematischer ist es, dass es vielen Unternehmen nicht gelingt, ihren Kunden verbindliche Lieferzeiten zu nennen. Dies ist Aufgabe der Auftragsannahme und -terminierung.

Eine Analyse der Auftragsannahme und -terminierung hat gezeigt, dass (1) bestehende Modelle der Produktionslogistik die Auftragsannahme und -terminierung nicht vollständig abbilden, (2) bestehende Verfahren zur Auftragsannahme und -terminierung nicht immer wirksam, mit der Fertigungssteuerung abgestimmt sowie einfach umzusetzen sind und (3) die Auswirkungen einer fehlerhaften Umsetzung der Verfahren bislang nicht beurteilt werden können.

Ziel der Arbeit ist es daher, fehlende logistische Modelle für die Auftragsannahme und -terminierung abzuleiten, darauf aufbauend ein modellbasiertes Verfahren zu entwickeln und dieses zu evaluieren.

Eine Modellierung der Annahmequote aus dem Angebotsbestand und der Unsicherheiten im Plan-Abgang aus Angeboten ergänzt bestehende produktionslogistische Modelle um Vorgänge in der Auftragsannahme und -terminierung.

Ein Konzept für eine modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung beschreibt, wie im Durchlaufdiagramm eine zielgerichtete Terminplanung erfolgen kann, indem der Plan-Abgang um die wahrscheinlichen Arbeitsinhalte aus offenen Angeboten ergänzt wird. Mit dem Plan-Abgang steuert das Verfahren eine zentrale Stellgröße, um den Rückstand und damit die mittlere Terminabweichung wirksam zu begrenzen.

Das Verfahren wird mit Hilfe von Simulationsuntersuchungen und einer Modellierung umfangreich evaluiert. Ziel der Evaluation ist es, die Wirksamkeit des Verfahrens mit gültigen Verfahrensannahmen sowie die Robustheit des Verfahrens bei einer fehlerhaften Parametrisierung zu beurteilen.

Im ersten Bestandteil der Evaluation wird in umfangreichen Simulationsexperimenten die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung im Vergleich mit einer Referenzkonfiguration mit Standardlieferzeiten beurteilt. Zentrales Ergebnis ist, dass das Verfahren die Produktion vor Überlastung schützt und die Termintreue sowie Auslastung als Hauptzielgrößen vieler Unternehmen der Auftragsfertigung wirksam unterstützt. Insbesondere die Kombination des vorgestellten Planungsverfahrens mit einer bestandssteuernden Auftragsfreigabe nach ConWIP und einer Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin verbessert und stabilisiert die Erreichung der logistischen Ziele zusätzlich.

Im zweiten Bestandteil der Evaluation wird das Verhalten des Verfahrens bei einer fehlerhaften Einschätzung der zentralen Eingangsparameter Annahmequote, Produktivität und Auftragsinhalt beurteilt. Dafür wurde die Rückstandsentwicklung bei fehlerhaften Verfahrensparametern modelliert und diese Modellierung mithilfe von Simulationsexperimenten evaluiert. Die Modellierung zeigt, dass die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung aufgrund des rückstandsregelnden Verhaltens auch auf fehlerhafte Eingangsgrößen robust reagiert und einen großen Teil des Fehlers ausgleicht.

Wissen schafft Innovation

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Prof. Dr.-Ing. Jan Hendrik Dege

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Christian Nedeß

Anschrift:

Technische Universität Hamburg

Institut für Produktionsmanagement und -technik

Denickestraße 17

21073 Hamburg

Band 53:

Christopher Mundt

Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung

1. Auflage

Hamburg 2024

ISSN 1613-8244

DOI: <https://doi.org/10.15480/882.9517>

Copyright Christopher Mundt 2024

Vorwort

Die vorliegende Dissertation habe ich während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg verfasst. Ich möchte an dieser Stelle darauf hinweisen, dass Teile der Inhalte dieser Dissertation im internationalen PPC Journal zur Veröffentlichung eingereicht und angenommen wurden. Sie wird in Kürze unter der DOI [10.1080/09537287.2024.2344066](https://doi.org/10.1080/09537287.2024.2344066) verfügbar sein.

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, um den Menschen, die mich während der Erstellung dieser Dissertation begleitet haben, meinen aufrichtigen Dank auszusprechen.

Ein besonderer Dank gebührt Professor Hermann Lödding für seine umfassende Betreuung, wertvollen Anregungen und konstruktiven Kommentare. Sein großes Engagement und stets offenes Ohr haben maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen und darüber hinaus auch meine persönliche Entwicklung unterstützt und entscheidend geprägt. Ebenso möchte ich Professor Peter Nyhuis für die Erstellung des Zweitgutachtens und sein Interesse an meiner Arbeit danken. Professor Christian Lühje danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein Dank gilt auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut, die durch ihre große Hilfsbereitschaft und die stets positive Arbeitsatmosphäre einen bedeutenden Beitrag geleistet haben. Nikolaj Meluzov und Robert Rost danke ich für die Unterstützung bei der Einstellung am Institut. Volodymyr Aliksieiev danke ich für die konstruktiven Hinweise zu meiner finalen Ausarbeitung. Besonderer Dank gilt Michael Winter und Philipp Steenwerth, die von Beginn an für alle Lebenslagen, beruflich und privat, immer ein offenes Ohr, hilfreiche Ratschläge und auch viel praktische Hilfestellung parat hatten.

Ich bin dankbar für die Freundschaften, die ich während meiner Zeit am Institut geschlossen habe, sowie für die gemeinsamen Reisen, Freizeitaktivitäten und Feiern, die diese Jahre so unvergesslich gemacht haben. Es war mir eine große Ehre, am Institut für Produktionsmanagement und -technik zu forschen. Mein Dank gilt auch all denen, die mich auf meinem Weg unterstützt und inspiriert haben. Ihre Beiträge haben dazu beigetragen, dass diese Dissertation ein Erfolg werden konnte.

Ein weiterer Dank gilt allen Studentinnen und Studenten, die mich während meiner Promotionszeit begleitet haben. Hervorzuheben ist dabei Frau Bernadette Beck, die mit ihrer freundlichen und wissbegierigen Art meine Arbeit über einen langen Zeitraum mit viel Engagement und hervorragendem Arbeitsergebnissen begleitet hat.

Mein Dank gilt insbesondere meiner Ehefrau Freya Debler, die mich insbesondere durch die stressigen Phasen der Promotionszeit mit bedingungsloser Unterstützung und Rückhalt begleitet hat. Ebenso danke ich meinen Eltern Kerstin und Jörg Mundt sowie meinem Bruder Alexander Mundt, die mich stets ermutigt und unterstützt haben, meine eigenen Ziele zu verfolgen. Ohne euch wäre diese Arbeit wahrscheinlich nicht möglich gewesen.

Hamburg, im April 2024

Christopher Mundt

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Verzeichnis der Formelzeichen	V
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit	2
2 Grundlagen	4
2.1 Auftragsfertigung	4
2.1.1 Eigenschaften der Auftragsfertigung	4
2.1.2 Auftragsdurchlauf von Auftragsfertigern	5
2.2 Einordnung der Auftragsannahme und -terminierung in die PPS.....	7
2.3 Angebotsbearbeitung	8
2.3.1 Vorgehen der Angebotsbearbeitung.....	9
2.3.2 Planungsgrößen der Lieferterminplanung.....	11
2.3.3 Terminplanung	14
2.4 Logistische Kenngrößen und Modelle.....	14
2.4.1 Logistische Zielgrößen	15
2.4.2 Trichtermodell und Durchlaufdiagramm.....	22
2.5 Grundlagen der Fertigungssteuerung	29
3 Bestehende Ansätze zur Auftragsannahme und -terminierung.....	34
3.1 Klassifizierung von Verfahren der Auftragsannahme und -terminierung	34
3.2 Kapazitätsorientierte Verfahren	38
3.2.1 Engpassterminierung	40
3.2.2 Control of Balance by Card-Based Navigation (Cobacabana)	41
3.2.3 Terminplanung mit Durchlaufkurven.....	42
3.2.4 Rechteckapproximation in der Planung mit Durchlaufkurven.....	44
3.2.5 Terminplanung mit Auftragszahlen	45
3.2.6 Input - Output Control.....	46
3.3 Forschungsbedarf	47
3.4 Zielsetzung.....	51

4	Modellierung der Auftragsannahme und -terminierung	53
4.1	Modellierung der mittleren Annahmequote des Angebotsbestands	53
4.2	Modellierung von Unsicherheiten im Plan-Abgang	56
4.3	Zwischenfazit zur Modellierung	59
5	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung	60
5.1	Stellhebel der Termin- und Kapazitätsplanung	60
5.2	Konzept der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung	65
5.2.1	Konstruktion des Durchlaufdiagramms	65
5.2.2	Planungssituationen im Durchlaufdiagramm	69
5.3	Vorgehen zur modellbasierten Terminplanung	70
5.3.1	Bestimmung der möglichen Lieferzeit	71
5.3.2	Einplanung von Angeboten	73
5.3.3	Einplanung von Aufträgen	75
5.4	Modellbasierte Gestaltung der Fertigungssteuerung	76
5.5	Zwischenfazit zur Verfahrensentwicklung	79
6	Simulative Evaluation unter regulären Bedingungen	80
6.1	Simulationsumgebung	80
6.1.1	Beschreibung der Simulationsumgebung	80
6.1.2	Verifizierung und Validierung der Simulationsumgebung	83
6.1.3	Referenzkonfiguration der Fertigungssteuerung	86
6.2	Versuchsplanung	88
6.3	Versuchsreihe 1: Referenzszenario	90
6.3.1	Referenzzustand	90
6.3.2	Einfluss der Annahmequote	96
6.3.3	Einfluss der Rückmeldezeit	97
6.4	Versuchsreihe 2: Einfluss der Fertigungssteuerung	104
6.5	Versuchsreihe 3: Einfluss von Fertigungsunsicherheiten	109
6.6	Zwischenfazit zur simulativen Evaluation	112
7	Verhalten unter irregulären Bedingungen	114
7.1	Entstehung einer systematischen Überlast	114
7.2	Rückstandsmodellierung bei einer systematischen Überlast	116
7.2.1	Fehleinschätzung der Plan-Belastung	117
7.2.2	Fehleinschätzung des Kapazitätsangebots oder -bedarfs	121
7.2.3	Gesamtmodell für den Rückstand	127

7.3 Simulative Evaluation der Modellierung	128
7.3.1 Versuchsplanung	128
7.3.2 Simulationsergebnisse	129
7.4 Zwischenfazit zum Verhalten unter irregulären Bedingungen	134
8 Zielerreichung und Limitationen	137
8.1 Zielerreichung	137
8.2 Limitationen	139
9 Schlussbetrachtung	141
9.1 Zusammenfassung	141
9.2 Ausblick	142
10 Literaturverzeichnis	144
11 Anhang	151
A 1 Monte-Carlo-Simulation der Annahmequote offener Angebote	151
A 2 Monte-Carlo-Simulation des Plan-Abgangs	157
A 3 Untersuchte Einflussgrößen der Simulationsreihen	160
A 4 Arbeitspläne der Simulationsuntersuchungen in der Evaluation	161
A 5 Evaluationsergebnisse unter gültigen Verfahrensannahmen	163
A 6 Evaluationsergebnisse unter irregulären Bedingungen	186

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Bedeutung
AS	Arbeitssystem
AV	Arbeitsvorbereitung
AVG	Arbeitsvorgang
ConWIP	Constant Work in Process
Cobacabana	Control of Balance by Card-Based Navigation
FIFO	First In – First Out
FPE	Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin
K	Kunde
Konstr.	Konstruktion
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RefS	Referenzszenario
SLZ	Planung mit Standardlieferzeiten

Verzeichnis der Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung
A	Auslastung [%]
AB	Abgang [Std.]
ABA	Abgang (in Anzahl Aufträgen) [-]
AnzAng	Anzahl Angebote [-]
AnzAuf	Anzahl Aufträge [-]
AnzS	Anzahl der Standardabweichungen für das Konfidenzintervall [-]
AQ	Annahmequote [%]
B	Bestand [Std.]
BA	Bestand (in Anzahl Aufträgen) [-]
BEL	Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]
BELA	Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [-]
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträgen) [-]
F	relativer Fehler [-]
KAP	Kapazität [Std./BKT]
KAPA	Kapazität (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
L	Leistung [Std./BKT]
LA	Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
LG	Losgröße [Stk.]
LT	Liefertreue [%]
LTA	Lieferterminabweichung [BKT]
LTE	Liefertermineinhaltung [%]
P	Betrachtungszeitraum [BKT]
PR	Prioritätsrang [Std.]
PRO	Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
PROA	Produktivität (in Anzahl Aufträgen pro Stunde) [1 /Std.]
R	Reichweite [BKT]
RA	Reihenfolgeabweichung [Std.]
Δ_{rel}	Relative Abweichung zwischen der Simulation und dem Modell [%]
RS	Rückstand [Std.]
RSA	Rückstand (in Anzahl Aufträgen) [-]
Δ_{RSA}	Rückstandssteigerung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
T	Zeitpunkt [BKT]
TAA	Abgangsterminabweichung [BKT]
TAB	Bearbeitungsanfang eines Auftrags [BKT]
TAE	Fertigstellungstermin eines Auftrags [BKT]
TAnf	Zeitpunkt des Anfrageeingangs [BKT]
TAngV	Zeitpunkt des Angebotsversands [BKT]
TAZ	Zugangsterminabweichung [BKT]
TBE	Fertigstellungstermin eines Arbeitsvorgangs [BKT]
TBe	Bestellzeitpunkt [BKT]
TBEV	Fertigstellungstermin eines Vorgängerarbeitsvorgangs [BKT]

Verzeichnis der Formelzeichen

TL	Liefertermin [BKT]
TRA	Zeitpunkt des Rüstansfangs [BKT]
TT	Termintreue [%]
t	Zeit [BKT]
t _e	Einzelzeit [min./Stk.]
t _r	Rüstzeit [min.]
ZAb	Kundenablehnungszeit [BKT]
ZAn	Kundenannahmezeit [BKT]
ZAU	Auftragszeit [Std.]
ZDF	Durchführungszeit [BKT]
ZDL	Durchlaufzeit [BKT]
ZL	Lieferzeit [BKT]
ZLP	Lieferzeitpuffer [BKT]
ZR	Kundenrückmeldezeit [BKT]
ZU	Zugang [Std.]
ZUA	Zugang (in Anzahl Aufträgen) [-]
ZUE	Übergangszeit [BKT]

Einheiten

Zeichen	Bedeutung
AnzAuf	Anzahl Aufträge
BKT	Betriebskalendertag
Std.	Stunden
Stk.	Stück
min.	Minute
%	Prozent

Indizes

Zeichen	Bedeutung
ab.	Angebotsablehnung
an.	Angebotsannahme
Anf.	Anfrage
Ang.	Angebot
AS	Arbeitssystem
Auf.	Auftrag
AVG	Arbeitsvorgang
ges.	Gesamtwert (mit Angeboten)
i, j	Zählvariable für ein Angebot / einen Auftrag
IB	Indirekte Arbeitsbereiche
Ist	Ist-Wert
k	Zählvariable für einen Arbeitsvorgang

Verzeichnis der Formelzeichen

KI	Konfidenzintervall
KR	Kundenrückmeldung
m	Mittelwert
Max.	Maximalwert
Med.	Median
mg	Mittlerer gewichteter Wert
Min.	Minimalwert
Mod.	Modellierter Wert
n	Zählvariable für einen Tag
OA	Offene Angebote
OG	Obergrenze
Per.	Periode
Plan	Plan-Wert
Prod.	Produktion
Q1	Oberes Quartil eines Boxplots
Q3	Unteres Quartil eines Boxplots
s	Standardabweichung
UG	Untergrenze
V	Variationskoeffizient
Wun.	Wunsch
Δ	Differenz/ Anstieg
μ	Mittelwert
σ	Standardabweichung

1 Einleitung

Die folgenden Abschnitte geben eine Einführung in die Themenstellung der vorliegenden Arbeit. Die Problemstellung (Abschnitt 1.1) erörtert die Herausforderungen für die Terminplanung von Auftragsfertigern. Darauf aufbauend beschreibt Abschnitt 1.2 die Zielsetzung und Abschnitt 1.3 die Forschungsmethode und den Aufbau der Arbeit.

1.1 Problemstellung

Unternehmen konkurrieren nicht nur in der Qualität ihrer Produkte, sondern auch in der logistischen Leistungsfähigkeit. Logistisch erfolgreiche Unternehmen liefern ihre Produkte mit kurzen Lieferzeiten, zum versprochenen Termin und zu wettbewerbsfähigen Kosten [JÜNE89, S. 18]. Für die Kunden von Auftragsfertigern sind die Lieferzeit und die Liefertreue entscheidende Kriterien für die Auswahl eines Lieferanten. In Befragungen von produzierenden Unternehmen aus Deutschland stufen Unternehmensvertreter die Liefertreue bzw. Termintreue als wichtigste logistische Zielgröße ein [SCHU13, S. 23; MAYE16, S. 9; BANK21, S. 25].

Die Terminplanung hat die Aufgabe, realistische und möglichst dem Kundenwunsch entsprechende Liefertermine zu bestimmen, wenn Kunden ein Angebot anfragen. Sie beeinflusst die Termintreue damit unmittelbar. In den Unternehmen bildet die Terminplanung das Bindeglied zwischen Vertrieb und Produktion. Sie beeinflusst darüber hinaus auch weitere logistische Zielgrößen, wie beispielsweise die Auslastung der Fertigung, maßgeblich mit.

Die Herausforderung der Terminplanung besteht darin, zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Auftragsprozess einen verlässlichen Liefertermin zu bestimmen. Zu diesem Zeitpunkt bestehen verschiedene Unsicherheiten, die die Planung erschweren: Zum einen ist die zukünftige Belastung ungewiss, weil unklar ist, wie viele und welche Angebote erfolgreich sein werden. Zum anderen stehen meist noch keine Arbeitspläne mit detaillierten Vorgabezeiten für eine Feinplanung zur Verfügung.

Eine unzureichende Terminplanung verursacht schwerwiegende Probleme. Unterschätzt die Terminplanung eines Unternehmens die Belastung, kommt es zu einer Überlastung der Fertigung, zum Aufbau von Rückständen und dadurch zu einer verspäteten Auslieferung. Im umgekehrten Fall, wenn die Terminplanung also die Belastung überschätzt, drohen Auslastungsverluste. Eine geeignete Terminplanung kann die Fertigung vor Überlastung schützen, indem sie Aufträge zu einem späteren Termin einplant oder sogar Aufträge ablehnt.

Gemessen an der Bedeutung der Aufgabe ist die Umsetzung der Terminplanung in vielen Unternehmen mangelhaft: Nicht selten arbeiten Unternehmen mit Standardlieferzeiten [BANK21, S. 45] oder nehmen bei guter Konjunktur systematisch mehr Aufträge an, als die Fertigung leisten kann (vgl. [MUND 20b, S. 32]). Eine mögliche Ursache dafür ist, dass viele Unternehmen Schwierigkeiten haben, komplizierte und datenintensive Planungsverfahren anzuwenden, um den Einfluss von Unsicherheiten abzuschätzen [SCHU13, S. 25]. Zudem berücksichtigen Unternehmen die offenen Angebote meist

Ergebnisse der Verfahrensentwicklung sind Verfahrensregeln, die für die Evaluierung in ein parametrisiertes Simulationsmodell integriert werden. Die Simulationsergebnisse werden mithilfe der logistischen Modelle eingeordnet und dienen gemeinsam mit eigenen Modellierungen der Verfahrensevaluation. Bei einer Weiterentwicklung des Verfahrens würde dieser Kreislauf erneut durchlaufen werden. Entsprechend diesem methodischen Vorgehen gliedert sich die vorliegende Arbeit in insgesamt neun Kapitel.

Die ersten drei Kapitel legen die Grundlage für die Verfahrensentwicklung. Kapitel 1 leitet das Thema ein, erläutert die Zielsetzung der Arbeit und beschreibt das Forschungsvorgehen. Kapitel 2 beschreibt die Grundlagen der Arbeit, die von der Auftragsfertigung über die Angebotsbearbeitung bis hin zu logistischen Modellen und Verfahren der Fertigungssteuerung reichen. Insbesondere die logistischen Modelle liefern dabei Wirkzusammenhänge der logistischen Einfluss-, Regel- und Zielgrößen, die neben weiteren Randbedingungen aus dem Grundlagenteil in die Verfahrensentwicklung eingeflossen sind. Kapitel 3 beschreibt bestehende Ansätze für die Terminplanung von Auftragsfertigern, identifiziert deren Defizite, leitet den Forschungsbedarf her und arbeitet Verfahrensziele heraus, die als Rahmenbedingung für die Verfahrensentwicklung dienen.

Kapitel 4 erweitert die Modelle der Produktionslogistik um Modelle der Auftragsannahme und -terminierung. Dafür werden die Annahmequote aus dem Angebotsbestand und die Unsicherheiten im Plan-Abgang von Angeboten abgeleitet.

Kapitel 5 ist der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung (mAAT) gewidmet und beschreibt das Verfahren mit seinen Verfahrensregeln und Verfahrensparametern, ausgehend von einem übergeordneten Konzept. Es zeigt zudem auf, wie das Verfahren mit den Aufgaben der Fertigungssteuerung kombiniert werden kann.

Kapitel 6 dient der simulativen Evaluation des Verfahrens. Dazu werden die Verfahrensregeln in einer Simulationssoftware abgebildet und auf das Simulationsmodell eines Auftragsfertigers angewendet. Die Simulationsergebnisse ermöglichen es, die Wirksamkeit des Verfahrens zu bewerten.

Kapitel 7 beleuchtet, wie sich die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung unter irregulären Bedingungen verhält. Dafür beschreibt das Kapitel die Entstehung einer systematischen Überlast durch eine fehlerhafte Parametrisierung und modelliert das Verhalten des Verfahrens. Die Modellierung wird anschließend simulativ evaluiert.

Kapitel 8 zieht ein Fazit zur Zielerreichung und den Limitationen der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung.

Abschließend fasst Kapitel 9 die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf die mögliche zukünftige Forschung. Dies betrifft unter anderem die Einführung des Verfahrens in der Industrie und die Entwicklung einer angepassten Kapazitätsplanung für Auftragsfertiger.

2 Grundlagen

Der folgende Abschnitt beschreibt die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen. Abschnitt 2.1 stellt dafür zunächst die Auftragsfertigung vor und beschreibt deren für die Auftragsannahme und -terminierung relevanten Eigenschaften. Wie sich die Auftragsannahme und -terminierung in die Produktionsplanung und -steuerung einordnet, ist Gegenstand von Abschnitt 2.2. Abschnitt 2.3 stellt das allgemeine Vorgehen und die grundlegenden Planungsgrößen der Angebotsbearbeitung vor. Anschließend erläutert Abschnitt 2.4 die logistischen Zielgrößen und Modelle der Produktionsplanung und -steuerung, die für die Modellierung und Beurteilung der Auftragsannahme und -terminierung notwendig sind. Weil auch die Fertigungssteuerung einen erheblichen Einfluss auf die logistische Zielerreichung hat, beschreibt Abschnitt 2.5 diesen Einfluss und stellt ausgewählte Verfahren der Fertigungssteuerung vor.

2.1 Auftragsfertigung

Der folgende Abschnitt beschreibt die Eigenschaften der Auftragsfertigung (Abschnitt 2.1.1) und stellt den Auftragsdurchlauf von Auftragsfertigern mit seinen Unsicherheiten dar (Abschnitt 2.1.2).

2.1.1 Eigenschaften der Auftragsfertigung

Jedes Unternehmen im produzierenden Gewerbe hat die Aufgabe, Produkte herzustellen und an die Kunden zu liefern. Je nach Bevorratungsstrategie unterscheidet sich der Kundenentkopplungspunkt, an dem ein Produkt zum ersten Mal mit einem Kundenauftrag verknüpft wird. Die Wahl dieses Punktes ist abhängig von der Produktkomplexität und von den Produktkosten auf der einen und dem Wettbewerbsdruck auf der anderen Seite [SHAR84, S. 75].

Abbildung 2-1 zeigt die Kundenentkopplungspunkte für verschiedene Bevorratungsstrategien in Anlehnung an Eidenmüller [EIDE89, S. 48]. Eidenmüller unterscheidet dabei vier Fertigungsstrategien mit unterschiedlichen Kundenentkopplungspunkten und den entsprechenden Punkten der Lagerhaltung. Grundsätzlich findet vor dem Kundenentkopplungspunkt eine Produktion kundenanonymer (Vor-)Produkte auf Lager statt. Die Produktion muss in diesem Bereich dementsprechend plan- bzw. prognosebasiert erfolgen. Nach dem Kundenentkopplungspunkt erfolgt die Fertigung und Lieferung kundenauftragsbezogener Produkte [EIDE89, S. 48; SCHU12, S. 40].

Unternehmen mit einer Lagerfertigung bedienen Kundenbestellungen aus einem Fertigwarenlager. Die Erstellung dieser Produkte erfolgt auf Grundlage einer prognosebasierten Planung. Die Auftragsmontage verfolgt eine Strategie, in der ein Unternehmen kundenspezifische Produkte auf der Grundlage von eingelagerten Standardmodulen montiert und liefert. Die Auftragsfertigung umfasst die Fertigung, Montage und Lieferung auftragspezifischer Produkte. Unternehmen, die das Produkt noch kundenspezifischer gestalten,

verfolgen die Strategie einer kundenspezifischen Einmalfertigung, welche auch die Beschaffungsprozesse umfasst [SHAR84, S. 73].

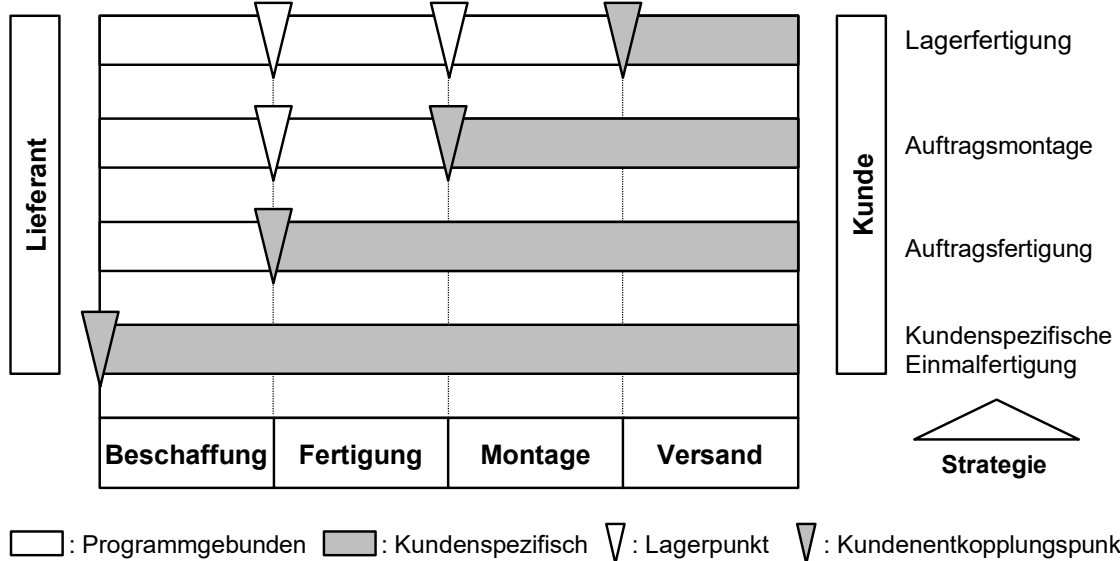


Abbildung 2-1: Bevorratungsstrategien (in Anlehnung an [EIDE89, S. 48], zitiert nach [LÖDD16, S. 23])

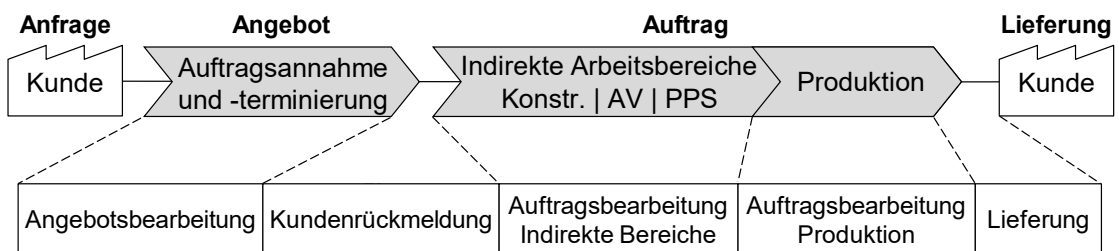
Die Erfordernisse der Produktionsplanung und -steuerung vor und nach dem Kundenentkopplungspunkt unterscheiden sich fundamental, weshalb sich an diesem Punkt vielfach zwei logistische Systeme treffen [SHAR84, S. 75].

Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Auftragsfertigung mit einem entsprechend frühen Kundenentkopplungspunkt (siehe Abbildung 2-1). Die Aufgabe der Auftragsannahme und -terminierung ist für die Auftragsfertigung entscheidend, da sie die logistische Zielerreichung eines Unternehmens dem Kunden gegenüber unmittelbar beeinflusst. Sie ist von den Rahmenbedingungen der Auftragsfertigung abhängig. Diese Rahmenbedingungen sind insbesondere der Auftragsdurchlauf und die dabei auftretenden Unsicherheiten, die folgender Abschnitt erläutert.

2.1.2 Auftragsdurchlauf von Auftragsfertigern

Der Auftragsdurchlauf von Auftragsfertigern enthält neben der Auftragsbearbeitung auch vorgelagerte Prozessschritte der Angebotsbearbeitung [HEIO82, S. 20]. Der Prozess beginnt, sobald ein Kunde eine Anfrage für einen Auftrag an ein Unternehmen richtet (siehe Abbildung 2-2). Das Unternehmen beginnt anschließend mit der Angebotsbearbeitung, welche im Folgenden detailliert beschrieben wird (Abschnitt 2.3). Die Angebotsbearbeitung erstellt ein Angebot an den Kunden, in dem ein Unternehmen den

Preis, die Qualität und vielfach¹ auch die Lieferzeit für ein Produkt zusagt. Nach der Angebotserstellung versendet das Unternehmen das Angebot an den Kunden. Die Beantwortung des Angebots durch den Kunden nimmt oftmals einige Tage, bis hin zu Wochen oder Monaten in Anspruch [BANK21, S. 49]. Ergebnis der Kundenrückmeldung ist die Annahme oder die Ablehnung des Angebots. Angenommene Angebote werden zu Kundenaufträgen, für die der Bearbeitungsprozess beginnt. Kundenaufträge durchlaufen zunächst die indirekten Arbeitsbereiche mit der Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Produktionsplanung und -steuerung. Das Ergebnis sind Fertigungsaufträge, die auf die Auftragsfreigabe für die Fertigung warten. Im Anschluss an diese Auftragsfreigabe erfolgt die Bearbeitung der Aufträge in der Produktion. Ein Lieferzeitpuffer zwischen der Fertigstellung des Auftrags und der Auslieferung an den Kunden soll Unsicherheiten im Prozess ausgleichen (vgl. [PARK99, S. 588-589; SCHU12, S. 137-154]).



AV : Arbeitsvorbereitung Konstr. : Konstruktion PPS : Produktionsplanung und -steuerung

Abbildung 2-2: Auftragsdurchlauf der Auftragsfertigung (eigene Darstellung, vgl. [PARK99, S. 589])

Im Prozess der Anfrage- und Auftragsbearbeitung von Unternehmen bestehen kapazitäts- und zeitbezogene Unsicherheiten, die die Aufgabe der Auftragsannahme und -terminierung erschweren. Diese sind in Tabelle 1 für jeden Prozessschritt dargestellt. Zum frühen Zeitpunkt der Anfrage im Auftragsdurchlauf besteht eine sehr hohe Unsicherheit über die Erteilung eines Auftrags (Auftragsrisiko) und die mögliche Belastung der Fertigung (Unsicherheiten im Auftragsdurchlauf und bei den Vorgabezeiten) [VDI99, S. 50-51]. Das Auftragsrisiko verringert sich nach der Angebots-erstellung, da zu diesem Zeitpunkt die grundsätzliche technische und wirtschaftliche Machbarkeit abgeschätzt wurde [GRAB78, S. 46-49]. Die Belastung der Fertigung kann ein Unternehmen zu diesem frühen Zeitpunkt vielfach lediglich durch Ähnlichkeitsvergleiche mit früheren Aufträgen abschätzen [REFA97, S. 276].

Bestätigte Kundenaufträge durchlaufen anschließend die Konstruktion und Arbeitsvorbereitung, so dass die Arbeitsvorbereitung einen Fertigungsauftrag erzeugen kann. In diesem Prozessschritt entstehen Arbeitspläne mit Auftragszeiten, wodurch die Arbeitsvorbereitung eine Transparenz über die zukünftige Fertigungsbelastung schafft

¹ Von den in der Angebotsbearbeitung erzeugten Angebotsformen Kontaktangebot, Richtangebot und Festangebot (vgl. Abschnitt 2.3) nennen lediglich Festangebote verbindliche Lieferzeiten [GRAB78, S. 44]. Der VDI schätzt, dass Festangebote den weitaus größten Teil aller Anfragen betreffen, da auch nach vorherigem Richt- bzw. Kontaktangebot in der Regel die Beauftragung nur auf Grundlage eines Festangebots erfolgt [VDI83, S. 29-31].

[SCHU12, S. 208-212]. Die Auftragsfreigabe kann die Fertigungsaufträge anschließend für die Fertigung freigegeben. Nach ihrer Fertigstellung kann das Unternehmen das fertige Produkt an den Kunden liefern. Erst nach der Fertigstellung eines Auftrags herrscht eine vollständige Transparenz über die entstandene Belastung.

Tabelle 1: Unsicherheiten im Auftragsdurchlauf

	Entscheidungs-träger	Auftragsstatus	Bestandsart	Auftrags-risiko	Transparenz der Belastung
↓ Prozessrichtung	Kunde	Anfrage	offene Anfragen	sehr hoch	sehr gering
	Technischer Vertrieb	Angebot	offene Angebote	hoch	Schätzung
	Kunde	Kundenauftrag	bestätigte Kundenaufträge	niedrig	Schätzung
	Konstruktion/Arbeitsvorbereitung	Fertigungsauftrag	Dispositionsbestand	niedrig	Plan-Werte
	PPS	Freigegebener Fertigungsauftrag	Umlaufbestand	niedrig	Plan-Werte/ Ist-Werte
	Fertigung	Fertiggestellter Auftrag	Fertigwarenbestand	niedrig	Ist-Werte

Die Unsicherheiten relevanter Einflussparameter der Fertigungsbelastung verändern sich damit im Laufe des Auftragsdurchlaufs von Auftragsfertigern stark. Dies erschwert die Terminplanung, da die Planung dauerhaft auf sich ändernde Rahmenbedingungen reagieren muss.

2.2 Einordnung der Auftragsannahme und -terminierung in die PPS

Die Produktionsplanung und -steuerung hat die Aufgabe, die innerbetrieblichen Prozesse termin-, kapazitäts- und mengenbezogen zu planen und zu steuern [EVER02, S. 255]. Das Handlungsfeld der PPS umfasst dabei die gesamte Produktion inklusive ihrer indirekten Arbeitsbereiche [HACK84, S. 4]. Nach Schuh ist die PPS in einem erweiterten Verständnis für die gesamte technische Auftragsabwicklung von der Angebotsverarbeitung bis zum Versand verantwortlich [SCHU12, S. 4].

Das Aachener PPS-Modell (siehe Abbildung 2-3) unterteilt die Aufgaben der PPS weitergehend in Netzwerk-, Kern- und Querschnittsaufgaben. Die Netzwerkaufgaben beschreiben alle überbetrieblichen und vielfach strategischen Aufgaben der PPS. Aufgaben, die einen direkten Fortschritt im Produkterstellungsprozess erzeugen, bezeichnet Schuh als Kernaufgaben. Querschnittsaufgaben integrieren die anderen

Tätigkeiten der PPS übergreifend und unter der Berücksichtigung des Gesamtsystems [SCHU12, S. 20-21].

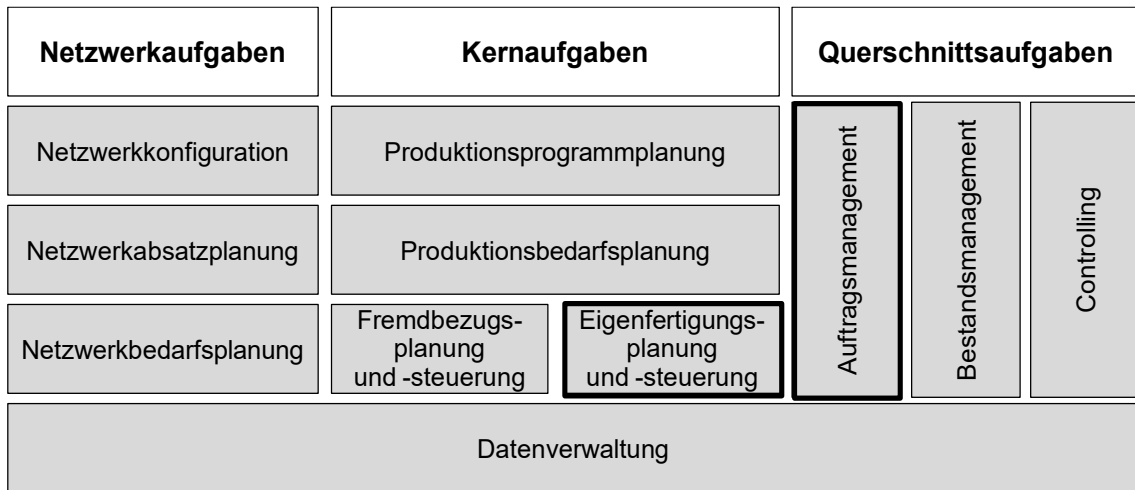


Abbildung 2-3: Aachener PPS-Modell [SCHU12, S. 20-21]

Für die vorliegende Arbeit sind insbesondere die Aufgaben der Eigenfertigungsplanung und -steuerung und das Auftragsmanagement von Relevanz. Die Eigenfertigungsplanung und -steuerung umfasst dabei auch die Fertigungssteuerung, die nach Wiendahl die Aufgabe hat, die Vorgaben des Produktionsplans auch bei Unsicherheiten, wie beispielsweise Störungen, umzusetzen [WIEN97, S. 12]. Die Fertigungssteuerung hat einen großen Einfluss auf die logistische Zielerreichung, weshalb diese Aufgabe der PPS auch für die Beurteilung der Auftragsannahme und -terminierung relevant ist. Die Auftragsannahme und -terminierung ist im Aachener PPS-Modell dem Auftragsmanagement zuzuordnen. Sie enthält die Aufgaben der Angebotsbearbeitung, Auftragsbearbeitung und Auftragskoordination [SCHU12, S. 60-61]. Der folgende Abschnitt erläutert die Angebotsbearbeitung im Detail.

2.3 Angebotsbearbeitung

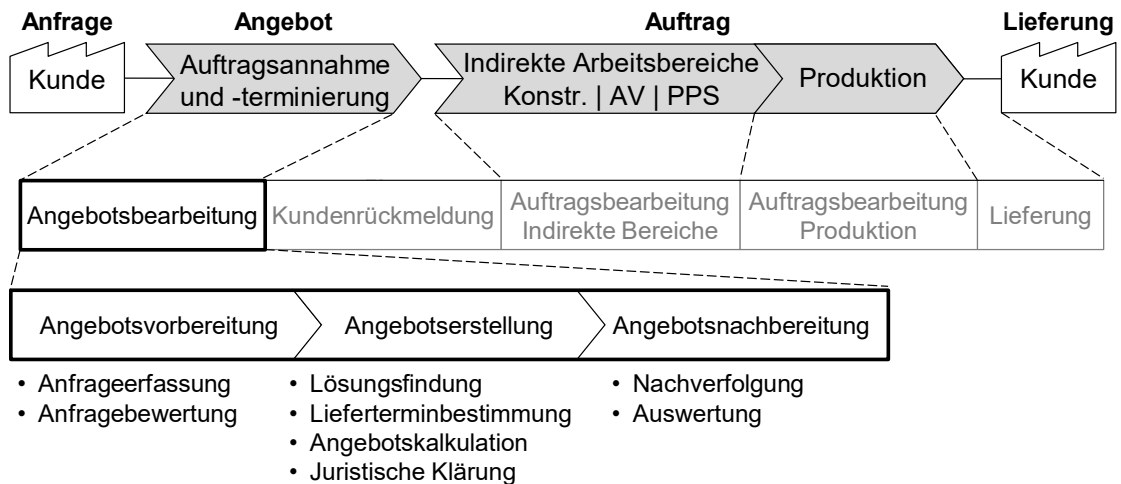
Die Angebotsbearbeitung beginnt, nachdem ein Kunde ein Produkt anfragt. Sie hat die Aufgabe, ein Angebot an den Kunden zu erstellen, das den Preis, die Qualität und die Lieferzeit eines Produkts nennt. Nach der Angebotserstellung wird dieses an den Kunden versandt [EVER96, S. 47-49].

Die Angebotsbearbeitung findet zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Auftragsdurchlauf statt, an dem die Belastung durch das Angebot aufgrund des Auftragsrisikos und der fehlenden Arbeitsplanung noch unsicher ist (vgl. Abschnitt 2.1.2). Gleichzeitig sind die Planungsressourcen für die Angebotsbearbeitung begrenzt und die Fachkompetenzen für einzelne Angebotsbestandteile im Unternehmen verteilt, was die Erstellung der Angebote zusätzlich erschwert [EVER90, S. 12-14]. Die so erstellten Angebote haben durch die festgelegten Spezifikationen jedoch einen großen Einfluss auf andere Unternehmensbereiche, weshalb die Angebotsbearbeitung eine besondere Relevanz besitzt. Insbesondere beeinflusst das Angebot an den Kunden die nachgelagerte Konstruktion, Beschaffung und Produktion.

Die folgenden Abschnitte erläutern das Vorgehen für die Angebotsbearbeitung (Abschnitt 2.3.1), stellen relevante Planungsgrößen der Angebotsbearbeitung vor (Abschnitt 2.3.2) und beschreiben das grundlegende Vorgehen für die Terminplanung (Abschnitt 2.3.3).

2.3.1 Vorgehen der Angebotsbearbeitung

Die Auftragsannahme und -terminierung lässt sich in die drei Phasen Angebotsvorbereitung, Angebotserstellung und Angebotsnachbereitung unterteilen (vgl. Abbildung 2-4).



AV : Arbeitsvorbereitung Konstr. : Konstruktion PPS : Produktionsplanung und -steuerung

Abbildung 2-4: Phasen der Angebotsbearbeitung (eigene Darstellung vgl. [SUTT92, S. 13])

Angebotsvorbereitung: Die Angebotsvorbereitung als erste Phase der Angebotsbearbeitung hat die Aufgabe, die vom Kunden geforderten Spezifikationen zu erfassen und die Anfrage hinsichtlich technischer, wirtschaftlicher und zeitlicher Kriterien zu bewerten. Die Anfrageerfassung dokumentiert die gewünschten Produktspezifikationen und weitere Informationen, wie beispielsweise die gewünschte Lieferzeit des Kunden. Darüber hinaus werden kundenbezogene Daten aufgenommen, die zur Identifikation der Anfrage, Bearbeitung des Auftrags und spätere Auswertungen dienen. Die Anfragebewertung trifft anschließend eine Entscheidung darüber, ob die Angebotserstellung ein Angebot erarbeiten soll. Im Falle einer negativen Anfragebewertung wird dem Interessenten eine Absage erteilt. Bei einer positiven Anfragebewertung wird der Prozess der Angebotserstellung angestoßen [VDI99, S. 41-42].

Angebotserstellung: In der zweiten Phase der Angebotsbearbeitung erfolgt die Angebotserstellung. In dieser Phase leitet das Unternehmen die technische Lösungsfindung in die Wege, bestimmt den Liefertermin, kalkuliert das Angebot, erarbeitet die Angebotsbedingungen und stellt diese Informationen in den Angebotsunterlagen zusammen.

Die technische Lösungsfindung findet in enger Abstimmung mit der Konstruktion statt und erarbeitet ein der Kundenanfrage entsprechendes Produkt [GRAB78, S. 16-21]. In der Auftragsfertigung handelt es sich dabei vielfach um Änderungskonstruktionen auf der Grundlage eines variantenreichen Serienproduktes. Das Ergebnis der technischen

Lösungsfindung ist ein Produkt bzw. eine Produktkonfiguration, auf deren Grundlage das Unternehmen im Folgenden einen Liefertermin ermittelt.

Für die Lieferterminbestimmung existieren verschiedene Verfahren, die in Abschnitt 3 einander gegenübergestellt werden. Die Lieferterminbestimmung hat grundsätzlich die Aufgabe, auf der Grundlage des Kapazitätsbedarfs des erarbeiteten Produkts, der verfügbaren Kapazitäten der Produktion und der Belastung durch andere Angebote einen Liefertermin zu ermitteln [VDI4504, S. 32]. Geringe Auftragswahrscheinlichkeiten und die zeitliche Differenz zwischen der Abgabe des Angebots und der Auftragserteilung erschweren die Lieferterminbestimmung [VDI83, S. 50].

Aufgabe der Angebotskalkulation ist es, einen Preis für das Angebot zu ermitteln. Dieser Preis beruht vielfach auf den Selbstkosten und einem Gewinnzuschlag, den Unternehmen anhand strategischer Überlegungen anpassen [VDI83, S. 36]. Der Preis hat dabei einen unmittelbaren Einfluss auf die Annahmquote und die Wirtschaftlichkeit des Angebots [EVER77, S. 11].

Die juristische Klärung umfasst beispielsweise Gewährleistungs- und Lieferbedingungen. Auch vereinbaren einige Unternehmen im Falle von Terminüberschreitungen Konventionalstrafen. Die Vertragskonditionen sind für alle Angebote vielfach in Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) geregelt. Abschließend erstellt das Unternehmen aus den ermittelten Daten die Angebotsunterlagen und versendet diese an den Kunden [GRAB78, S. 30-32].

Angebotsnachbereitung: Die dritte und abschließende Phase der Angebotsbearbeitung dient der Angebotsnachbereitung. In dieser Phase verfolgt der technische Vertrieb zum einen zielgerichtet die erstellten Angebote nach, beantwortet Rückfragen der Kunden, nimmt Änderungswünsche auf und bleibt über den Bearbeitungsstand des Angebots beim Kunden auf dem Laufenden. Die Nachverfolgung des Angebots kann damit auch helfen, sehr lange Kundenrückmeldezeiten zu vermeiden und die Wahrscheinlichkeit einer Auftragserteilung zu bewerten. Die gewonnenen Informationen kann ein Unternehmen pflegen und auswerten. Insbesondere sollte der technische Vertrieb eine Statistik über angenommene und abgelehnte Angebote führen, um die Auftragsumwandlungsquote bestimmen zu können. Das Ergebnis der Angebotsbearbeitung ist ein schriftliches Angebot, das einem Kunden neben der technischen Lösung auch den Preis und die Lieferzeit nennt. Darüber hinaus enthält das Angebot die geltenden Liefer- und Geschäftsbedingungen. Die Literatur unterscheidet die drei Angebotsformen Kontaktangebot, Richtangebot und Festangebot (vgl. [KAMB73, S. 47-57; GRAB78, S. 38-45; EVER96, S. 49]). Diese unterscheiden sich in ihrem Detaillierungsgrad und der Genauigkeit der Preise bzw. Lieferzeiten. Kontaktangebote enthalten vielfach standardisierte Produktbeschreibungen sowie Preis- und Lieferzeitinformatoren basierend auf Referenzwerten. Richtangebote enthalten eine im Bedarfsfall individualisierte Produktbeschreibung, einen überschlägigen Pauschalpreis und unverbindliche Informationen über die Lieferzeit. Festangebote stellen die genaueste Angebotsform dar. Sie enthalten kundenspezifische Produktbeschreibungen sowie verbindliche Preise und Lieferzeiten [GRAB78, S. 44].

Vielfach ist für die Beauftragung nach einem Kontakt- oder Richtangebot ein zusätzliches Festangebot erforderlich. Beim weitaus größten Anteil aller Angebote handelt es sich laut VDI deshalb um Festangebote [VDI83, S. 29-31]. Im Folgenden ist mit einem Angebot immer ein Festangebot mit verbindlichen Lieferzeiten gemeint.

Der nächste Abschnitt erläutert die für die Lieferterminplanung erforderlichen Planungsgrößen.

2.3.2 Planungsgrößen der Lieferterminplanung

Als Teil der Angebotsbearbeitung verwendet die Lieferterminbestimmung verschiedene logistische Kenngrößen, um den Auftragseingang vorherzusagen und die zukünftige Belastung sowie die Fertigungsauslastung zu prognostizieren.

Die *Annahmequote* (1) beschreibt das Verhältnis von angenommenen zu abgegebenen Angeboten [BRAN67, S. 54]. Sie ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit der Umwandlung eines Angebots in einen Auftrag.

$$AQ_m = \frac{\text{AnzAuf}}{\text{AnzAng}} \cdot 100 \quad (1)$$

mit

AQ_m	Mittlere Annahmequote [%]
AnzAng	Anzahl Angebote [-]
AnzAuf	Anzahl Aufträge [-]

Die Annahmequote dient vielen Verfahren der Anfragebewertung als Verfahrensgröße. Sie ist zudem für die Termin- und Kapazitätsplanung erforderlich, um die zukünftige Belastung der Fertigung frühzeitig in der Planung berücksichtigen zu können. Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei Gleichung (1) um die Annahmequote für die in einem definierten Untersuchungszeitraum positiv oder negativ beschiedenen Angebote handelt. Möchte man über die Annahmequote die Wahrscheinlichkeit abschätzen, mit der ein offenes Angebot aus dem Angebotsbestand zu einem Kundenauftrag wird, ist dies nach dieser Definition aufgrund unterschiedlicher Verweildauern im Bestand nicht ohne weiteres möglich (vgl. dazu Abschnitt 4.1).

Die Anfragebewertung entscheidet über die Annahme oder Absage einer Anfrage. Die Annahmequote ist ein wichtiges Kriterium für diese Bewertung. Vielfach ermitteln die Verfahren die Annahmequote dabei qualitativ auf der Grundlage von Schätzungen und Vergleichen (vgl. [KAMB73, S. 57-76; EVER90, S. 19-26]).

In der Termin- und Kapazitätsplanung wird die Annahmequote vielfach aus Vergangenheitsdaten bestimmt. Dies ist in der Literatur eingehend untersucht (vgl. [BRAN67, S. 54; WIED16, S. 88-99]). Brankamp verwendet die Annahmequote bereits in den 1960er Jahren für die Planung. Sein Vorschlag beruht darauf, unverplante Kapazitäten mit dem Kehrwert der Annahmequote zu multiplizieren. Dadurch kann ein Unternehmen mehr Angebote einplanen, als es die verfügbare Kapazität zulässt. Die Ablehnung von Angeboten durch den Kunden sorgt anschließend dafür, dass sich die verplante Kapazität verringert. Wiedemann bestimmt die Annahmequote gesondert für

einzelne Kunden- oder Produktgruppen. Die produktspezifische und die kundenspezifische Annahmquote verrechnet er anschließend über Gewichtungsfaktoren zu einer angebotsspezifischen Annahmquote. Diese nutzt Wiedemann anschließend in einer Monte-Carlo-Simulation, um Liefertermine und Kapazitätsauslastungen zu bestimmen. Die Annahmquote wird darüber hinaus verwendet, um die Belastung durch Angebote in der Planung entsprechend des voraussichtlichen Auftragseingangs zu korrigieren (vgl. [KING89, S. 198; HEND93, S. 64]).

Eine Befragung deutscher Unternehmen zeigt, dass in der Praxis verschiedene Annahmquoten vorkommen und dabei kein Wertebereich heraussteicht. Auffällig ist jedoch, dass in der Befragung 30% der Unternehmen keine Aussage über die Annahmquote treffen konnten [BANK21, S. 50]. Dies erschwert es diesen Unternehmen, die zukünftige Belastung durch Kundenaufträge zu prognostizieren. Zur Bestimmung der Annahmquote ist es notwendig, eine Statistik über angenommene und abgelehnte Angebote zu führen.

Neben der Annahmquote ist auch die Kundenrückmeldezeit eine wichtige Größe für die Terminplanung.

Die *Kundenrückmeldezeit* beschreibt die Zeitspanne zwischen der Abgabe eines Angebots und dessen Annahme bzw. Ablehnung durch den Kunden (2). Sie ergibt sich aus dem Mittelwert vergangener Rückmeldezeiten (vgl. [KING00, S. 81]).

$$ZR_m = \frac{\sum(T_{KR} - T_{Ang.})}{AnzAuf} \quad (2)$$

mit

AnzAuf	Anzahl Aufträge [-]
$T_{Ang.}$	Zeitpunkt der Angebotsstellung [BKT]
T_{KR}	Zeitpunkt der Kundenrückmeldung [BKT]
ZR_m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]

Kingsman et al. beschreiben diese Zeitspanne im Auftragsprozess bereits 1989 [KING89, S. 199-200]. Sie bestimmen die Kundenrückmeldezeit auf Basis von Vergangenheitsdaten oder als Schätzung für jeden Kunden gesondert [KING00, S. 81]. Andere Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Kundenrückmeldezeit vernachlässigbar ist [PARK99, S. 589].

Einer Umfrage deutscher Unternehmen zur Folge nimmt die Kundenrückmeldezeit vielfach mehrere Tage, Wochen oder sogar Monate ein [BANK21, S. 49]. Eine Vernachlässigung der Kundenrückmeldezeit verringert die Planungsqualität, weil die notwendige Kapazität für ein Angebot früher bereitgestellt wird als benötigt. Auslastungsverluste und Terminabweichungen können die Folge sein. Lange Rückmeldezeiten einzelner Kunden und nicht erfolgte Rückmeldungen können erhebliche Probleme in der Terminplanung verursachen, da für diese Angebote über einen langen Zeitraum Kapazität reserviert und die mittlere Kundenrückmeldezeit verzerrt wird. Eine Möglichkeit, diese Ausreißer zu vermeiden, ist die Festlegung einer Angebotsgültigkeit [KING00, S. 82].

Die *Kapazität* der Produktion oder einzelner Arbeitssysteme ist ein wichtiges Maß für die maximale Leistungsfähigkeit der Produktion ([HENT28, S. 673], zitiert nach

[RUBE53, S. 466]). Die Kapazität ist eine wichtige Planungsgröße in der Terminplanung, da ein Unternehmen nur durch den Vergleich des Kapazitätsbedarfs eines Angebots mit dem freien Kapazitätsangebot im Planungszeitraum die termingerechte Fertigstellung eines Auftrags sicherstellen kann.

Das Kapazitätsangebot eines Arbeitssystems wird häufig in Stunden pro Betriebskalendertag (BKT) angegeben und entspricht der für die Bearbeitung von Aufträgen zur Verfügung stehende Zeit je Arbeitstag. Verschiedene kapazitätsmindernde Faktoren, wie beispielsweise Störungen, reduzieren diese Zeit [NYHU12, S. 66-67]. Die Leistung eines Arbeitssystems liegt deshalb in der Regel unterhalb seiner Kapazität. Der Abgang ergibt sich nach Glöckner [GLÖC20, S. 120-121] aus der Kapazität, der Produktivität, in der alle kapazitätsmindernden Faktoren zusammengefasst sind, und dem Betrachtungszeitraum (3). Die Größe kann dabei beispielsweise in Anzahl Aufträgen oder Vorgabestunden gemessen werden [GLÖC20, S. 118].

$$AB_{AS} = KAP_{AS} \cdot PRO_{AS} \cdot P \quad (3)$$

mit

AB_{AS}	Abgang des Arbeitssystems [Std.]
KAP_{AS}	Kapazität des Arbeitssystems [Std./BKT]
P	Betrachtungszeitraum [BKT]
PRO_{AS}	Produktivität des Arbeitssystems (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std./Std.]

Der Kapazitätsbedarf eines Auftrags an einem Arbeitssystem entspricht dessen arbeitssystembezogenen Zeitbedarf. Die Auftragszeit (4) als Vorgabezeit eines Auftrags an einem Arbeitssystem wird vielfach zur Darstellung des Kapazitätsbedarfs genutzt [NYHU12, S. 17].

$$ZAU = \frac{LG \cdot t_e + t_r}{60} \quad (4)$$

mit

LG	Losgröße [Stk.]
t_e	Einzelzeit [min/Stk.]
t_r	Rüstzeit [min]
ZAU	Auftragszeit [Std.]

Der Variationskoeffizient der Auftragszeit ist ein Maß für die Variabilität von Auftragsinhalten (5). Diese dimensionslose Größe setzt die Standardabweichung der Auftragszeit mit ihrem Mittelwert ins Verhältnis [NYHU12, S. 19].

$$ZAU_v = \frac{ZAU_s}{ZAU_m} \quad (5)$$

mit

ZAU_m	Mittelwert der Auftragszeit [Std.]
ZAU_s	Standardabweichung der Auftragszeit [Std.]
ZAU_v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]

Die dargestellten Planungsgrößen Annahmequote, Kundenrückmeldezeit und Kapazität dienen der Lieferterminplanung als Eingangsgrößen. Der folgende Abschnitt beschreibt grundlegende Methoden der Terminplanung.

2.3.3 Terminplanung

Die Aufgabe der Terminplanung ist es, die Plan-Starttermine der Fertigungsaufträge und die Plan-Bearbeitungstermine der einzelnen Arbeitsvorgänge zu bestimmen. Die Terminplanung umfasst vielfach einen durchlauforientierten Bestandteil (Durchlaufterminierung) und kann darüber hinaus auch eine Kapazitätsabstimmung enthalten.

Die Durchlaufterminierung kann in Form einer Vorwärts-, Rückwärts- oder Mittelpunktsterminierung erfolgen und setzt häufig ausreichende Kapazitäten voraus. Die Vorwärtsterminierung bestimmt mithilfe eines gegebenen Plan-Starttermins den Plan-Endtermin eines Auftrags. Die Plan-Endtermine der einzelnen Arbeitsvorgänge und des Auftrags ergeben sich dabei aus den Plan-Startterminen und den Plan-Durchlaufzeiten der einzelnen Arbeitsvorgänge. Dieser Ansatz ermöglicht es, den frühestmöglichen Zeitpunkt zu bestimmen, zu dem ein Auftrag bei einer gegebenen Kapazität abgeschlossen werden kann. Im Gegensatz zur Vorwärtsterminierung beginnt die Rückwärtsterminierung mit dem Plan-Endtermin des Auftrags. Sie legt die Plan-Endtermine der Arbeitsvorgänge fest, indem sie die Plan-Durchlaufzeit der Arbeitsvorgänge vom Plan-Endtermin des nachfolgenden Vorgangs subtrahiert. Durch diese Methode wird der spätestmögliche Zeitpunkt ermittelt, zu dem ein Arbeitsvorgang abgeschlossen werden sollte. Die Mittelpunktsterminierung ist eine Kombination aus Vorwärts- und Rückwärtsterminierung. Vielfach wird dieses Vorgehen bei einer Engpassterminierung angewandt. Die Engpassterminierung bestimmt die Plan-Endtermine der Arbeitsvorgänge vor dem Engpass mit einer Rückwärtsterminierung und nach dem Engpass mit einer Vorwärtsterminierung [LÖDD16, S. 111-112].

Die Kapazitätsabstimmung baut auf der Durchlaufterminierung auf. Sie gleicht das Kapazitätsangebot und die Kapazitätsnachfrage miteinander ab. Bei Unterschieden kann ein Unternehmen entweder die Kapazität an den Kapazitätsbedarf (Kapazitätsanpassung) oder den Kapazitätsbedarf an das Kapazitätsangebot (Terminverschiebung) anpassen [LÖDD16, S. 112-113].

2.4 Logistische Kenngrößen und Modelle

Den logistischen Erfolg kann ein Unternehmen mithilfe logistischer Zielgrößen messen und diese Zielgrößen einander in logistischen Modellen gegenüberstellen. Wiendahl kategorisiert logistische Zielgrößen nach Zielgrößen der logistischen Qualität eines Fertigungsablaufs, also der Logistikleistung, und der wirtschaftlichen Qualität, also den Logistikkosten [WIEN97, S. 136-137]. Lödding untergliedert die logistischen Zielgrößen weiter nach ihrer Auswirkung auf den Kunden. Externe logistische Zielgrößen wirken sich direkt auf den Kunden aus. Interne logistische Zielgrößen leiten sich von den externen Zielgrößen ab und sind darüber hinaus direkt in der Fertigung mess- und

beeinflussbar [LÖDD16, S. 21-22]. Abbildung 2-5 zeigt eine Übersicht über die logistischen Zielgrößen nach Lödning [LÖDD16, S. 22].

	Logistikleistung	Logistikkosten
extern	<i>Auftragsfertigung</i> Lieferzeit Lieferterminabweichung Liefertreue	Preis
	<i>Lagerfertigung</i> Servicegrad	
intern	Durchlaufzeit Terminabweichung Termintreue	Bestand Auslastung Verzugskosten

Abbildung 2-5: Übersicht über externe und interne logistische Zielgrößen [LÖDD16, S. 22]

Bei der externen Logistikleistung unterscheiden sich die logistischen Zielgrößen von Auftrags- und Lagerfertigungen. Die Kunden von Auftragsfertigern beurteilen die logistische Leistungsfähigkeit nach der Lieferzeit, der Lieferterminabweichung und der Liefertreue von Unternehmen. Für Lagerfertiger ist der Servicegrad relevant, da diese Zielgröße angibt, ob ein Unternehmen eine Kundenanfrage direkt aus dem Lager bedienen kann. Die Logistikkosten spiegeln sich für den Kunden im Preis wider [LÖDD16, S. 21-22; 36].

Die internen logistischen Zielgrößen der Logistikleistung sind Durchlaufzeit, Terminabweichung und Termintreue. In der Auftragsfertigung wirken sich diese Zielgrößen direkt auf ihr jeweiliges Pendant der externen Zielgrößen aus. Die internen Kosten der Logistik entstehen aus hohen Beständen, geringen Auslastungen der Kapazitäten und Verzugskosten aufgrund einer verspäteten Produktion [LÖDD16, S. 21-22; 36].

Der folgende Abschnitt 2.4.1 stellt die genannten logistischen Zielgrößen vor und erläutert ihre Aussagekraft. Anschließend verdeutlicht Abschnitt 2.4.2 den Zusammenhang der logistischen Zielgrößen anhand des Trichtermodells und des Durchlaufdiagramms.

2.4.1 Logistische Zielgrößen

Im Folgenden werden die logistischen Zielgrößen der Logistikleistung (Lieferzeit, Durchlaufzeit, Lieferterminabweichung und Liefertreue, Terminabweichung und Termintreue) sowie der Logistikkosten (Bestand, Leistung und Auslastung) dargestellt. Darüber hinaus stellt der Abschnitt den Rückstand als wichtige Regelgröße der Terminabweichung vor.

Der Auftragsdurchlauf von Auftragsfertigern (siehe Abbildung 2-2) setzt sich aus verschiedenen Zeitbestandteilen zusammen, die den Durchlauf eines Auftrags durch unternehmensinterne Bereiche beschreiben (vgl. [SCHÖ20, S. 267]). Darüber hinaus definieren verschiedene Autoren auch die der Auftragsbearbeitung vorgelagerten Zeiten der Angebotsbearbeitung (vgl. [KING89, S. 200; PARK99, S. 589]). Abbildung 2-6 zeigt diese Zeitanteile der Auftragsfertigung in der Darstellungsform eines Durchlaufelements nach Heinemeyer und der REFA (vgl. [HEIN74; REFA55, S. 57]).

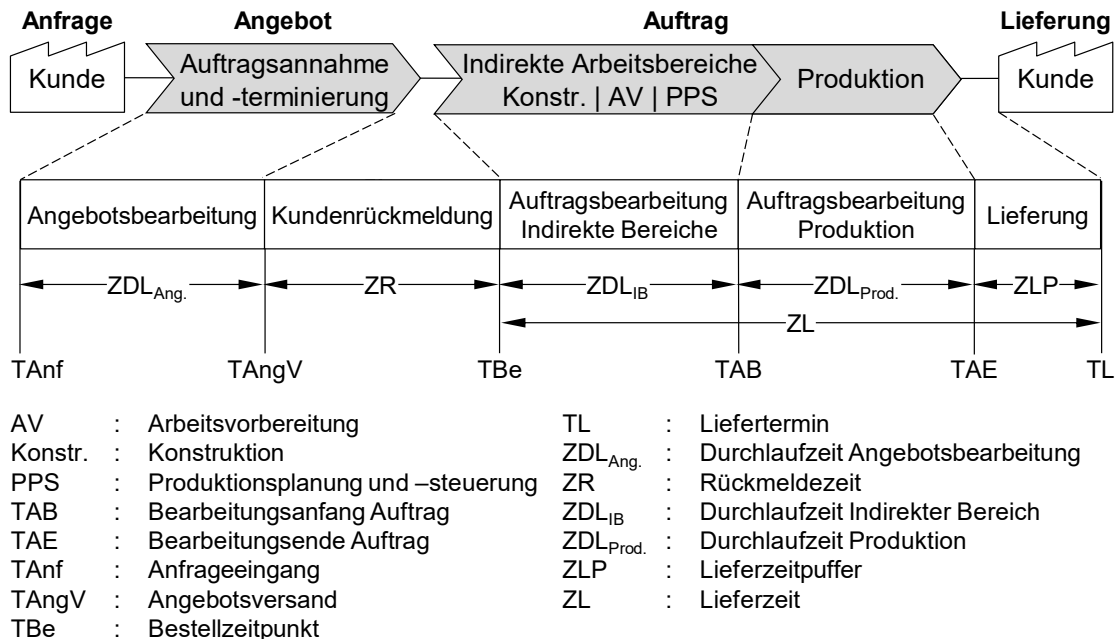


Abbildung 2-6: Durchlaufelement der Auftragsfertigung (eigene Darstellung)

Die *Lieferzeit* (6) bezeichnet die gesamte Zeit vom Auftragseingang bis zur Auslieferung eines Produktes [SCHÖ20, S. 17]. Sie wird vielfach in Betriebskalendertagen, also Arbeitstagen, gemessen [LÖDD16, S. 22].

$$ZL = TL - \text{TAufB} \quad (6)$$

mit

TAufB Auftragseingang [BKT]
 TL Liefertermin [BKT]
 ZL Lieferzeit [BKT]

Die Lieferzeit setzt sich aus verschiedenen Zeitbestandteilen zusammen, die den Durchlauf eines Auftrags durch indirekte Arbeitsbereiche wie die Konstruktion, die Produktionsplanung und -steuerung, die Arbeitsvorbereitung und die Beschaffung sowie den direkten Arbeitsbereich der Produktion definieren (vgl. [SCHÖ20, S. 267]). Darüber hinaus enthält die Lieferzeit einen Lieferzeitpuffer, der den Auftrag vor einer Verspätung aufgrund von Fertigungsunsicherheiten, wie beispielsweise Störungen, schützen soll. Der Lieferzeitpuffer verlängert auf der einen Seite die Lieferzeit aus Kundensicht und erhöht die Fertigwarenbestände. Auf der anderen Seite erhöht sich durch einen Lieferzeitpuffer

die Liefertreue, da die verspätete Fertigstellung eines Auftrags nicht automatisch eine verspätete Lieferung zur Folge hat [LÖDD16, S. 30, 45].

Die *Durchlaufzeit* der Produktion besitzt oft den größten Anteil an der Lieferzeit und setzt sich aus verschiedenen Arbeitsvorgangsdurchlaufzeiten zusammen. Abbildung 2-7 zeigt die Durchlaufzeit für einen gesamten Produktionsauftrag (siehe Abbildung 2-7a) und das Durchlaufelement für einen Arbeitsvorgang (siehe Abbildung 2-7b).

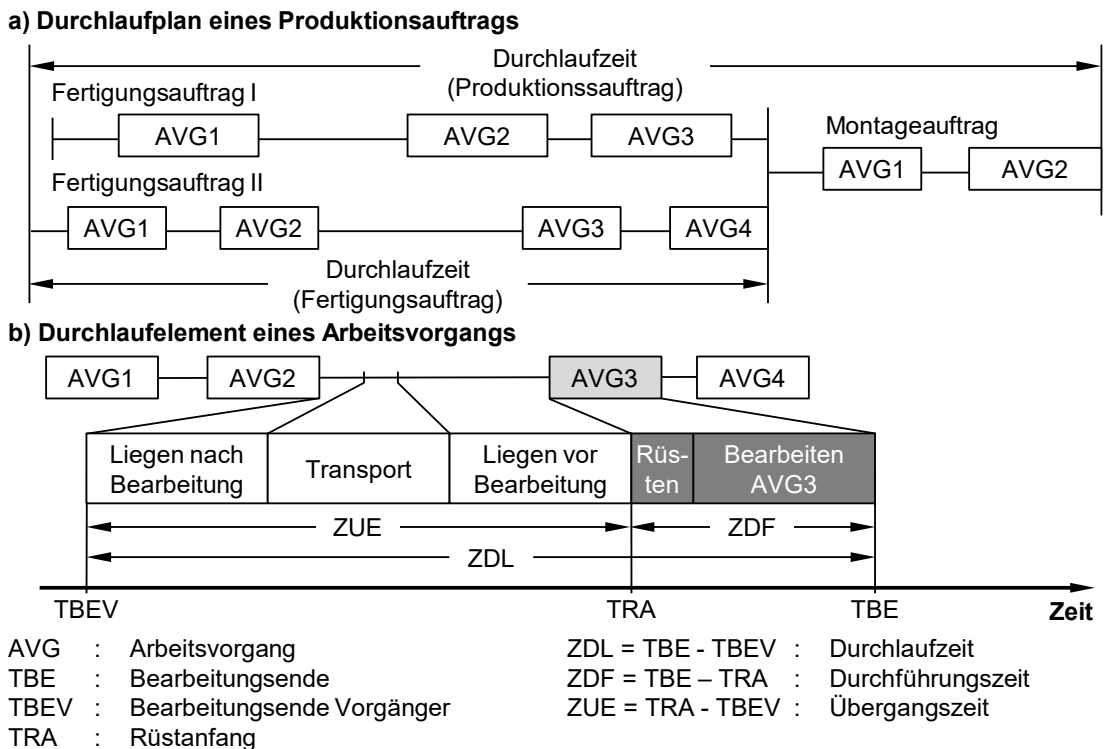


Abbildung 2-7: Durchlaufzeiten und Durchlaufelement der Produktion ([REFA55, S. 57] nach [LÖDD16, S. 59])

Die Durchlaufzeit der Produktion bildet die untere Grenze der Lieferzeit eines Auftrags und ist damit für die Auftragsfertigung von großer Bedeutung. Kurze Produktionsdurchlaufzeiten sind darüber hinaus von Vorteil, da die Auftragsfreigabe die Aufträge zur Einhaltung eines Liefertermins später freigeben kann. Eventuelle Änderungen an den Auftragspezifikationen kann ein Unternehmen dadurch einfacher umsetzen [LÖDD16, S. 10, 32].

Die *Durchlaufzeit eines Arbeitsvorgangs* (7) ist als Zeitdauer zwischen der Fertigstellung des vorangegangenen Arbeitsvorgangs bis zur Fertigstellung des aktuellen Arbeitsvorgangs definiert [HEIN74, S. 4; BECH84, S. 9].

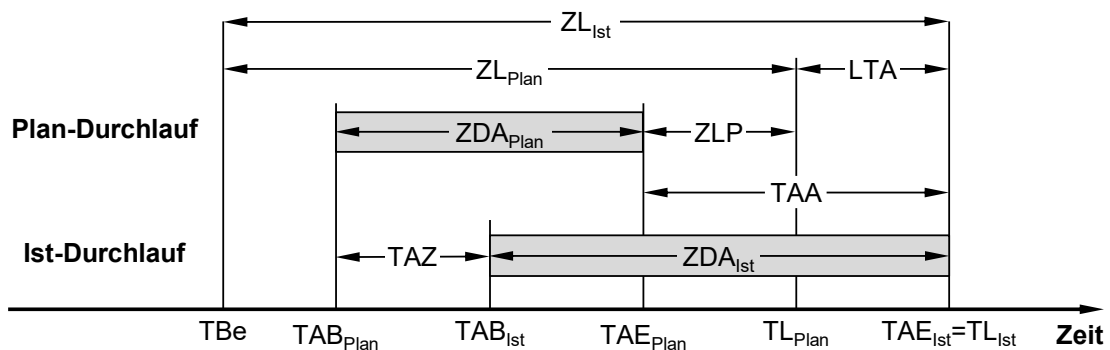
$$ZDL_{AVG} = TBE - TBEV \quad (7)$$

mit

- TBE Fertigstellung [BKT]
- TBEV Fertigstellung Vorgänger [BKT]
- ZDL_{AVG} Arbeitsvorgangsdurchlaufzeit [BKT]

Zur Durchlaufzeit eines Arbeitsvorgangs zählen zum einen das Liegen nach der Bearbeitung, der Transport und das Liegen vor der Bearbeitung, was unter dem Begriff Übergangszeit zusammengefasst ist. Zum anderen enthält die Durchlaufzeit eine Durchführungszeit, die sich aus dem Rüsten und der Bearbeitung eines Auftrags zusammensetzt [HEIN74, S. 4; BECH84, S. 9]. Wesentliche Einflussfaktoren auf die Durchlaufzeit sind die Reihenfolgeabweichung und der Bestand [LÖDD18, S. 3].

Unterscheiden sich die geplanten von den tatsächlichen Durchläufen, können Terminabweichungen entstehen. Abbildung 2-8 zeigt den Zusammenhang zwischen den Liefer- und Durchlaufzeiten sowie der Liefertermin- und Abgangsterminabweichung zwischen dem Plan- und dem Ist-Durchlauf eines Auftrags.



- LTA : Lieferterminabweichung
- TAA : Terminabweichung Abgang
- TAB : Bearbeitungsanfang Auftrag (Auftragsfreigabe)
- TAE : Bearbeitungsende Auftrag
- TAZ : Terminabweichung Zugang
- TBe : Bestellzeitpunkt
- TL : Liefertermin
- ZL : Lieferzeit
- ZDA : Durchlaufzeit
- ZLP : Lieferzeitpuffer

Abbildung 2-8: Zusammenhang zwischen Abgangsterminabweichung, Lieferzeitpuffer und Lieferterminabweichung ([DOMB88, S. 49] nach [LÖDD16, S. 48])

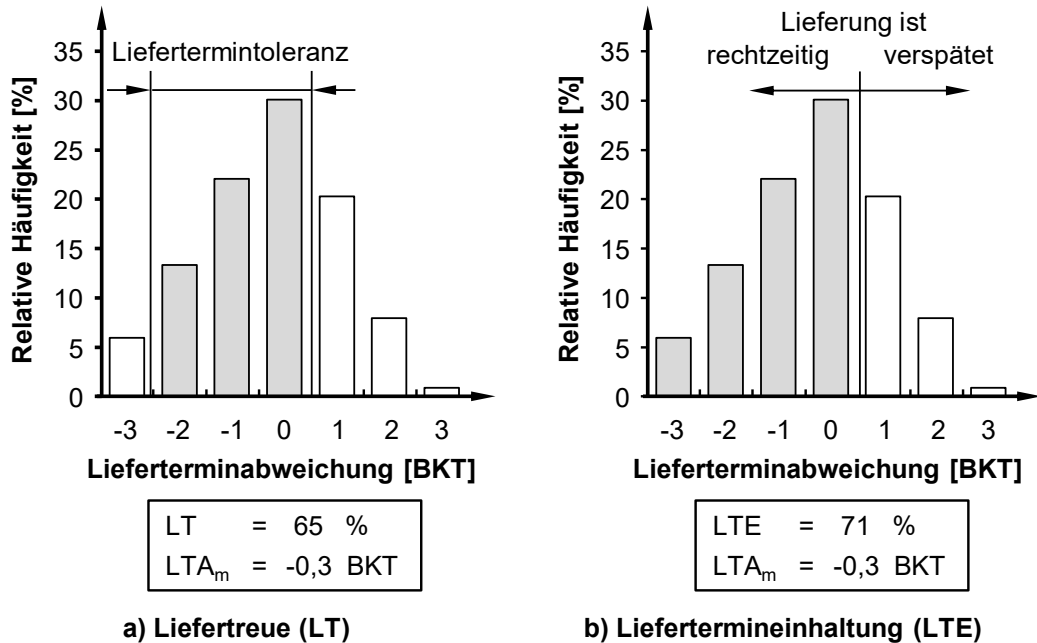
Die *Lieferterminabweichung* (8) beschreibt die zeitliche Differenz des geplanten Liefertermins vom tatsächlichen Liefertermin eines Auftrags [LÖDD16, S. 48].

$$LTA = TL_{Ist} - TL_{Plan} \quad (8)$$

mit

- LTA Lieferterminabweichung [BKT]
- TL_{Ist} Ist-Liefertermin [BKT]
- TL_{Plan} Plan-Liefertermin [BKT]

Bei einer verspäteten Lieferung eines Auftrags entsteht eine positive Lieferterminabweichung und eine verfrühte Lieferung zeigt sich in einer negativen Lieferterminabweichung. Die Liefertreue und die Liefertermineinhaltung dienen dazu, die Leistungsfähigkeit eines Unternehmens zur Einhaltung von Lieferterminen für eine größere Menge von Aufträgen zu beurteilen. Die Definition dieser Kenngrößen zeigt Abbildung 2-9.



LTA_m : Mittlere Lieferterminabweichung

Abbildung 2-9: Definition der Liefertreue und Liefertermineinhaltung [LÖDD16, S. 28]

Die *Liefertreue* (9) bezeichnet den prozentualen Anteil der innerhalb einer Liefertermin-toleranz gelieferten Aufträge in einem Betrachtungszeitraum [LÖDD16, S. 27].

$$LT = \frac{\text{AnzAuf mit } LTA_{UG} \leq LTA \leq LTA_{OG}}{\text{AnzAuf}} \cdot 100 \quad (9)$$

mit

- AnzAuf Anzahl Aufträge [-]
- LT Liefertreue [%]
- LTA Lieferterminabweichung [BKT]
- LTA_{OG} Obergrenze für die zulässige Lieferterminabweichung [BKT]
- LTA_{UG} Untergrenze für die zulässige Lieferterminabweichung [BKT]

Die Liefertermineinhaltung ist ein Sonderfall der Liefertreue ohne Untergrenze und mit einer Obergrenze für die zulässige Lieferterminabweichung von null. Diese Kenngröße beschreibt den Anteil der Lieferungen, die rechtzeitig zum geplanten Liefertermin erfolgen [LÖDD16, S. 28]. Für viele Unternehmen ist die Liefertreue eine wichtige logistische Zielgröße, da Lieferterminabweichungen zu hohen Folgekosten und zu Vertrauensverlust beim Kunden führen können [LÖDD16, S. 29].

Eine *Abgangsterminabweichung* (10) entsteht, wenn sich die internen Plan-Fertigstellungstermine der Aufträge von den tatsächlichen Ist-Fertigstellungsterminen unterscheiden [DOMB88, S. 49].

$$TAA = TAE_{Ist} - TAE_{Plan} \quad (10)$$

mit

TAA	Abgangsterminabweichung [BKT]
TAE _{Ist}	Ist-Fertigstellungstermin [BKT]
TAE _{Plan}	Plan-Fertigstellungstermin [BKT]

Die Abgangsterminabweichung gibt die logistische Prozesssicherheit wieder und hat einen großen Einfluss auf die Liefertermineinhaltung gegenüber dem Kunden. Es wird eine mittlere Abgangsterminabweichung von null und eine geringe Streuung der Abgangsterminabweichung angestrebt, damit es nicht zu einer verfrühten oder verspäteten Auslieferung von Aufträgen kommt. Falls die maximale Abgangsterminabweichung größer als der Lieferzeitpuffer ist, sind die entsprechenden Kunden auch direkt durch eine verspätete Lieferung betroffen [LÖDD16, S. 32-33]. Wesentliche Einflussfaktoren auf die Terminabweichung sind die Reihenfolgeabweichung und der Rückstand [YU01, S. 41-42; KUYU13, S. 46-50].

Die *Terminstreue* (11) ist analog zur Liefertreue als prozentualer Anteil der Aufträge in einem Betrachtungszeitraum definiert, die innerhalb einer festgelegten Termintoleranz um den Plan-Fertigstellungstermin herum fertiggestellt wurden [YU01, S. 13f; LÖDD16, S. 34].

$$TT = \frac{\text{AnzAuf mit } TAA_{UG} \leq TAA \leq TAA_{OG}}{\text{AnzAuf}} \cdot 100 \quad (11)$$

mit

AnzAuf	Anzahl Aufträge [-]
TAA	Abgangsterminabweichung [BKT]
TAA _{OG}	Obergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung [BKT]
TAA _{UG}	Untergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung [BKT]
TT	Terminstreue [%]

Durch ihre starke Kopplung mit der Liefertreue und die dadurch bedingte direkte Auswirkung auf den Kunden hat die Terminstreue einen hohen Stellenwert unter den logistischen Zielgrößen. Viele Unternehmen geben die Terminstreue deshalb als ihre wichtigste interne logistische Zielgröße an [MAYE16, S. 9].

Der *Bestand* (12) eines Unternehmens bezeichnet den im Unternehmen befindlichen Arbeitsinhalt. Üblicherweise unterscheidet die PPS zwischen dem Fertigungs- und dem Lagerbestand. Der Fertigungsbestand umfasst alle freigegebenen, aber noch nicht abgeschlossenen Aufträge. Demnach also alle Aufträge, die die Produktion bearbeiten kann. Gemessen wird der Fertigungsbestand meist in Arbeitsstunden oder in der Anzahl an Aufträgen. Der Lagerbestand hingegen wird in Mengeneinheiten gemessen und ist der Vorrat an Rohmaterialien, Halbfabrikaten und fertigen Erzeugnissen. Der Bestand einer

Fertigung lässt sich aus dem Anfangsbestand und der Differenz zwischen Ist-Zugang und Ist-Abgang berechnen [LÖDD16, S. 36-39, 61].

$$B(T_n) = \sum_{T=T_1}^{T_n} ZU(T) - \sum_{T=T_1}^{T_n} AB(T) + B_0(T_1) \quad (12)$$

mit

AB(T)	Arbeitsinhalt der an Betriebskalendertag T abgehenden Aufträge [Std.]
B(T _n)	Bestand an Betriebskalendertag T _n [Std.]
B ₀ (T ₁)	Anfangsbestand zu Beginn von Betriebskalendertag T ₁ [Std.]
T ₁	Erster Tag des Betrachtungszeitraums [BKT]
T _n	Tag, für den der Bestand berechnet wird [BKT]
ZU(T)	Arbeitsinhalt der an Betriebskalendertag T zugehenden Aufträge [Std.]

Der Bestand als Zielgröße wirkt sich durch die Kapitalbindung und das Bestandsrisiko insbesondere auf die Kosten eines Unternehmens aus. Steigende Bestände binden zum einen Kapital, das ein Unternehmen nicht mehr zur anderweitigen Unternehmensfinanzierung einsetzen kann, und erhöhen zum anderen das Risiko, einen Bestand nicht mehr verwerten zu können. Weiterhin belegt der Bestand auch Lagerflächen und verursacht dadurch einen erhöhten Platzbedarf des Unternehmens [LÖDD16, S. 36-37].

Darüber hinaus wirkt sich der Fertigungsbestand auf die Zielgrößen Durchlaufzeit und Auslastung bzw. Leistung aus. Steigende Bestände verursachen sowohl längere Durchlaufzeiten als auch eine, bis zu einem gewissen Grad, höhere Auslastung. Den genauen Zusammenhang beschreiben Produktionskennlinien (vgl. [NYHU12, S. 13]). In diesem Zusammenhang besteht ein Zielkonflikt, das sogenannte Dilemma der Ablaufplanung. Niedrige Bestände führen auf der einen Seite zu geringen Durchlaufzeiten, da sich in der Fertigung die Wartezeiten verringern. Auf der anderen Seite entsteht dadurch aber auch eine geringere Auslastung der Kapazitäten [GUTE83, S. 216].

Die mittlere *Leistung* (13) ergibt sich, indem der Abgang im Betrachtungszeitraum durch die Länge des Betrachtungszeitraums geteilt wird [WIEN97, S. 102]. Gemessen wird die Leistung meistens in Vorgabestunden pro Betriebskalendertag oder in der Anzahl fertiggestellter Aufträge pro Betriebskalendertag [LÖDD16, S. 39].

$$L_m = \frac{AB_P}{P} \quad (13)$$

mit

AB _P	Abgang im Betrachtungszeitraum [Std]
L _m	Mittlere Leistung [Std/BKT]
P	Betrachtungszeitraum [BKT]

Die mittlere *Auslastung* (14) beschreibt, wie stark ein Arbeitssystem seine verfügbare Arbeitssystemkapazität ausschöpft. Sie ist als prozentualer Anteil der tatsächlich erbrachten mittleren Leistung bezogen auf die maximal mögliche Leistung definiert [NYHU12, S. 27].

$$A_m = \frac{L_m}{L_{\max}} \cdot 100 \quad (14)$$

mit

A_m	Mittlere Auslastung eines Arbeitssystems [%]
L_m	Mittlere Leistung eines Arbeitssystems [Std/BKT]
L_{\max}	Maximal mögliche Leistung eines Arbeitssystems [Std/BKT]

Eine hohe Auslastung kann den erwirtschafteten Deckungsbeitrag eines Unternehmens erhöhen, solange das Unternehmen die produzierten Güter am Markt absetzen kann. Ist dies nicht der Fall, begrenzt die Nachfrage die Auslastung einer Fertigung. Dies ist insbesondere für die Auftragsfertigung sichtbar, da jedem Auftrag eine Kundenbestellung vorausgeht. Wenn Aufträge mehrere Arbeitssysteme durchlaufen, ist es meistens nicht möglich, die gesamte Fertigung vollständig auszulasten, da der Durchsatzengpass einer Fertigung die Leistung aller anderen Arbeitssysteme begrenzt [LÖDD16, S. 40].

Der *Rückstand* (15) eines Arbeitssystems oder der Fertigung entspricht der Differenz von Plan- und Ist-Abgang. Er ergibt sich damit rechnerisch aus dem Rückstand zu Beginn der Planungsperiode und der Differenz zwischen den Ist- und Plan-Abgängen im Betrachtungszeitraum [SCHM61, S. 19; PETE95, S. 95f.].

$$RS(T_n) = \sum_{T=T_1}^{T_n} AB_{\text{Plan}}(T) - \sum_{T=T_1}^{T_n} AB_{\text{Ist}}(T) + RS_0(T_1) \quad (15)$$

mit

$AB_{\text{Ist}}(T)$	Arbeitsinhalt der an Betriebskalendertag T erfolgten Abgänge [Std]
$AB_{\text{Plan}}(T)$	Arbeitsinhalt der an Betriebskalendertag T geplanten Abgänge [Std]
$RS(T_n)$	Rückstand an Betriebskalendertag T_n [Std]
$RS_0(T_1)$	Rückstand zu Beginn von Betriebskalendertag T_1 [Std]
T_1	Erster Tag des Betrachtungszeitraums [BKT]
T_n	Tag, für den der Rückstand berechnet wird [BKT]

Ein positiver Rückstand bedeutet, dass das Arbeitssystem oder die Fertigung den Plan-Abgang nicht erreicht hat und entsprechend mit der Fertigstellung von Aufträgen in Verzug ist. Ein negativer Rückstand bedeutet, dass das Arbeitssystem oder die Fertigung den Plan-Abgang übertroffen und Aufträge verfrüht fertiggestellt hat [LÖDD16, S. 81f.]. Der Rückstand beeinflusst als Regelgröße die Terminabweichung [LÖDD16, S. 8].

Die logistischen Regel- und Zielgrößen stehen im Rahmen von Modellen miteinander in einem mathematischen Zusammenhang. Der folgende Abschnitt erläutert ausgewählte Modelle der Produktionsplanung und -steuerung.

2.4.2 Trichtermodell und Durchlaufdiagramm

Die zuvor beschriebenen Zielgrößen der Produktionsplanung und -steuerung haben zahlreiche Wechselwirkungen. Logistische Modelle können diese Wechselwirkungen mathematisch beschreiben. Sie helfen dadurch Zielkonflikte aufzudecken, sich in diesen Zielkonflikten logistisch zu positionieren, sowie Verfahren der Produktionsplanung und -steuerung zu parametrisieren und zu bewerten.

Die folgenden Modelle und Definitionen beruhen größtenteils auf dem Hannoveraner Trichtermodell und weiteren Modellen, die am Institut für Fabrikanlagen und Logistik der Leibniz Universität Hannover entwickelt wurden (vgl. [BECH84, S. 13f.; NYHU12, S. 17f.]). Zur Modellierung der logistischen Zielgrößen beschreibt folgender Abschnitt das Trichtermodell des Auftragsdurchlaufs, das Durchlaufdiagramm sowie die Aufteilung der Terminabweichung und ihre Ursachen.

Das *Trichtermodell* (siehe Abbildung 2-10) modelliert das Durchlaufverhalten von Arbeitssystemen oder der gesamten Fertigung durch die Größen Zugang, Abgang und Bestand [BECH84, S. 13f.].

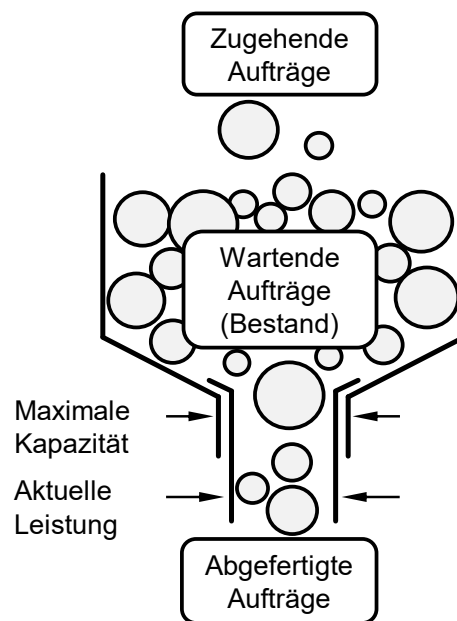


Abbildung 2-10: Trichtermodell ([BECH84, S. 51], zitiert nach [WIEN97, S. 84])

Die Idee, Fertigungsressourcen als Trichter darzustellen, geht dabei auf verschiedene Autoren zurück (vgl. [ORLI75, S. 263-267; KIVE81, S. 10f.; BECH84, S. 13f.]). Der Zugang entspricht den zugehenden Aufträgen, die der Trichter sammelt und die als Bestand auf ihre Bearbeitung warten. Nach der Fertigstellung verlassen die Aufträge den Trichter durch seine Öffnung als Abgang. Die maximal mögliche Größe der Trichteröffnung am Ausgang ist durch die verfügbare Kapazität limitiert. Die tatsächliche Größe der Trichteröffnung entspricht der aktuellen Leistung des Arbeitssystems bzw. der Fertigung. Die Größe der Aufträge repräsentiert ihre Auftragszeit und damit die Zeit, die für die Bearbeitung eines Auftrags vorgesehen ist [BECH84, S. 13f.].

Das *Durchlaufdiagramm* (siehe Abbildung 2-11) stellt Zu- und Abgänge kumulativ über der Zeit dar und lässt sich aus dem Trichtermodell ableiten [BECH84, S. 36f.]. Weitere Autoren schlagen ebenfalls die kumulative Darstellung von Zu- und Abgängen über der

Zeit zur Beurteilung von Arbeitssystemen vor (vgl. [SCHM61, S. 19f.; CONW67, S. 15f.]).

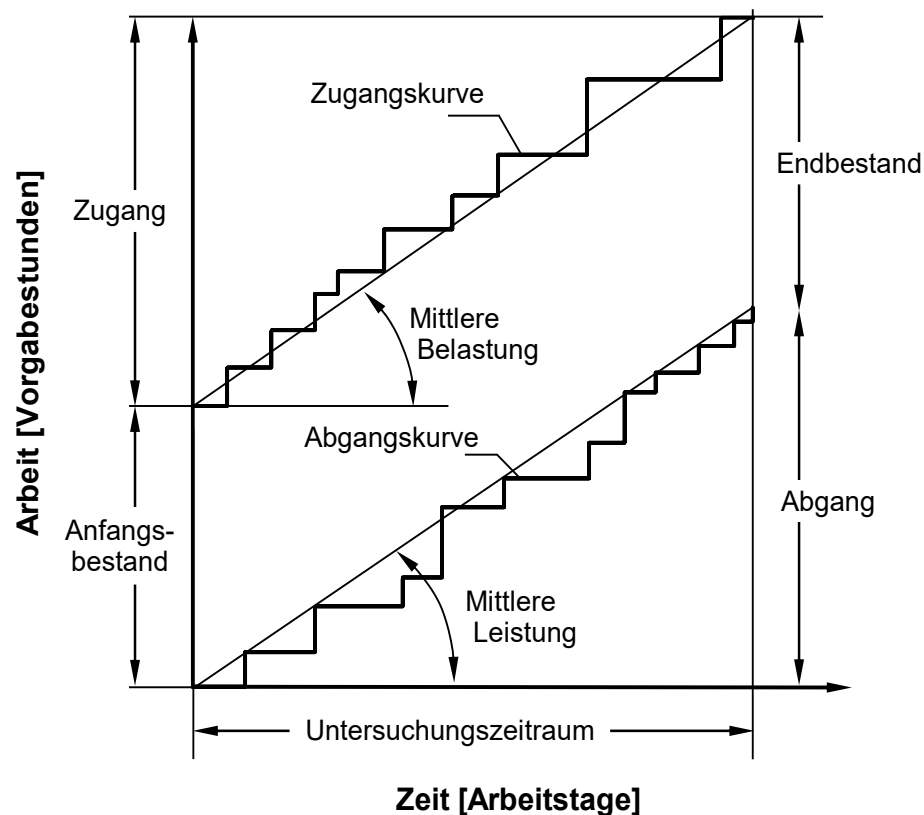


Abbildung 2-11: Durchlaufdiagramm ([BECH84, S. 51], zitiert nach [WIEN97, S. 84])

Die Zugangskurve stellt dar, zu welchen Zeitpunkten dem Arbeitssystem oder der Fertigung welcher Arbeitsinhalt zugeführt wurde. Die Abgangskurve zeigt entsprechend die Zeitpunkte, an denen der Arbeitsinhalt bei der Fertigstellung eines Auftrags aus dem System abgeht. Die bereits zuvor definierten logistischen Zielgrößen Bestand und Leistung finden sich ebenfalls im Durchlaufdiagramm wieder. Die Zugangskurve ist um den Anfangsbestand des Arbeitssystems oder der Fertigung zu Beginn des Betrachtungszeitraums nach oben versetzt. Der vertikale Abstand der Zu- und Abgangskurve beschreibt zu jedem Zeitpunkt den Bestand des Arbeitssystems bzw. in der Fertigung. Entsprechend liegt am Ende des Betrachtungszeitraums ein Endbestand vor. Die mittlere Steigung der Abgangskurve entspricht der mittleren Leistung des Arbeitssystems oder der Fertigung. In gleicher Weise entspricht die mittlere Steigung der Zugangskurve der mittleren Belastung. Darüber hinaus repräsentiert der horizontale Abstand der Zu- und Abgangskurve zu jedem Zeitpunkt die Reichweite eines Arbeitssystems bzw. der Fertigung. Die Reichweite gibt an, wie lange der Bestand ausreicht, um das Arbeitssystem bei bekannter Leistung auszulasten [BECH84, S. 36f.; WIEN97, S. 83f.]. Verschiedene Autoren setzen das Durchlaufdiagramm auch für die Darstellung der zukünftigen Entwicklung in der Produktion ein. Bakke und Nyhuis erweitern das Durchlaufdiagramm

um eine Zukunftsprognose der Kapazität und des Plan-Abgangs, um es zum Produktionscontrolling zu nutzen [BAKK92, S. 104f.]. Hopp und Spearman vergleichen in einem Durchlaufdiagramm den Plan-Abgang, Ist-Abgang und den wahrscheinlichen Abgang, um daraus Steuerungsentscheidungen abzuleiten [HOPP08, S. 505ff.].

Im Kontext der Auftragsannahme und -terminierung fällt auf, dass das Durchlaufdiagramm in seiner ursprünglichen Form nur Aufträge abbildet, nicht aber Angebote. Entsprechendes gilt auch für die aus dem Durchlaufdiagramm abgeleiteten Modelle.

Die sogenannte *Trichterformel* (16) setzt die mittlere Reichweite, den mittleren Bestand und die mittlere Leistung über trigonometrische Beziehungen im Durchlaufdiagramm miteinander in Verbindung [BECH84, S. 39].

$$R_m = \frac{B_m}{L_m} \quad (16)$$

mit

B_m	Mittlerer Bestand [Std]
L_m	Mittlere Leistung [Std/BKT]
R_m	Mittlere Reichweite [BKT]

Erfolgt die Reihenfolgebildung nach First In – First Out (FIFO), liegen die arbeitsvorgangsbezogenen Durchlaufelemente immer genau zwischen der Zugangs- und der Abgangskurve [WIEN97, S. 96]. Wenn in diesem Fall das Verhältnis zwischen Bestand und Leistung konstant bleibt, die Zu- und Abgangskurven also parallel verlaufen, entspricht die Bestandsreichweite im Durchlaufdiagramm der mittleren gewichteten Durchlaufzeit der Arbeitsvorgänge [BECH84, S. 39-40]. Gleichung (17) zeigt diese Zusammenhänge [NYHU12, S. 30].

$$R_m \cong ZDL_{mg} = \frac{\sum_{i=1}^n (ZDL_k \cdot ZAU_k)}{\sum_{i=1}^n ZAU_k} \quad (17)$$

mit

R_m	Mittlere Reichweite [BKT]
ZAU_k	Auftragszeit je Arbeitsvorgang k [Std]
ZDL_k	Durchlaufzeit je Arbeitsvorgang k [BKT]
ZDL_{mg}	Mittlere gewichtete Durchlaufzeit [BKT]

Diese Darstellung zeigt auch die Verwandtschaft der Trichterformel mit dem sogenannten Gesetz von Little (Little's Law). Dieses setzt in einer eingeschwungenen Warteschlange die Anzahl der Einheiten im System, die mittlere Ankunftsrate und die mittlere Aufenthaltsdauer einer Einheit miteinander in Verbindung [LITT61, S. 383-387].

Um das Durchlaufdiagramm für die Kapazitätsplanung zu nutzen, kann es statt dem Zu- und Abgang auch den Plan- und Ist-Abgang darstellen [WIEN97, S. 278f.]. Abbildung 2-12 zeigt ein solches Durchlaufdiagramm. Der Gedanke, die Planung mit einer kumulativen Darstellung der Kapazität durchzuführen, geht dabei auf Brankamp zurück [BRAN67, S. 44f.].

Die Ist-Abgangskurve entspricht dabei der Abgangskurve im klassischen Durchlaufdiagramm (siehe Abbildung 2-11) und zeigt dementsprechend die Zeitpunkte, zu denen

der Arbeitsinhalt bei der Fertigstellung eines Auftrags aus dem System abgeht. Die Kurve für den Plan-Abgang stellt dar, zu welchen Zeitpunkten für welchen Arbeitsinhalt der Abgang geplant ist. Die mittlere Steigung der Ist-Abgangskurve entspricht wie oben ausgeführt der mittleren Leistung des Arbeitssystems oder der Fertigung. Die mittlere Steigung der Plan-Abgangskurve beschreibt in vergleichbarer Weise die mittlere Plan-Leistung des Arbeitssystems oder der Fertigung [WIEN97, S. 278f.]. Der vertikale Abstand der mittleren Plan- und Ist-Abgänge beschreibt den mittleren Rückstand. Der horizontale Abstand der mittleren Plan- und Ist-Abgänge entspricht der mittleren (gewichteten) Terminabweichung (vgl. Abschnitt 2.4.1) eines Arbeitssystems bzw. der Fertigung (vgl. [LÖDD16, S. 80f.]).

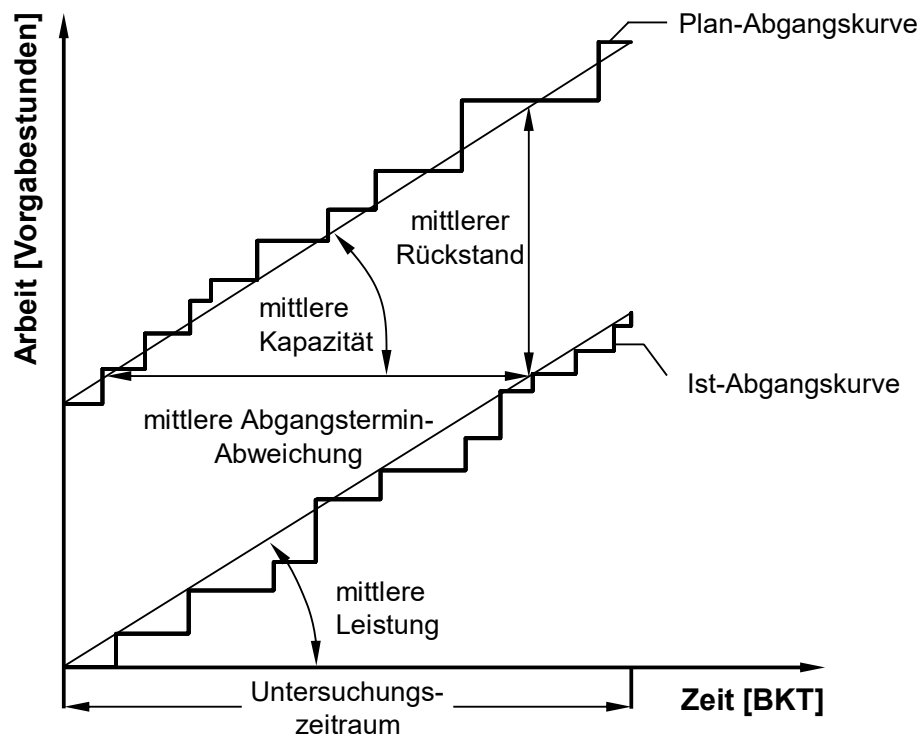


Abbildung 2-12: Durchlaufdiagramm für den Plan- und Ist-Abgang ([WIEN97, S. 278f.], zitiert nach [YU01, S. 42])

In seinem *Modell der mittleren Terminabweichung* setzt Yu analog zur Trichterformel die mittlere Terminabweichung mit den gezeigten Größen im Durchlaufdiagramm in Beziehung. Demnach ergibt sich die mittlere Terminabweichung (18) aus dem Verhältnis von mittlerem Rückstand und mittlerer Leistung [YU01, S. 42].

$$TAA_m = \frac{RSA_m}{LA_m} \quad (18)$$

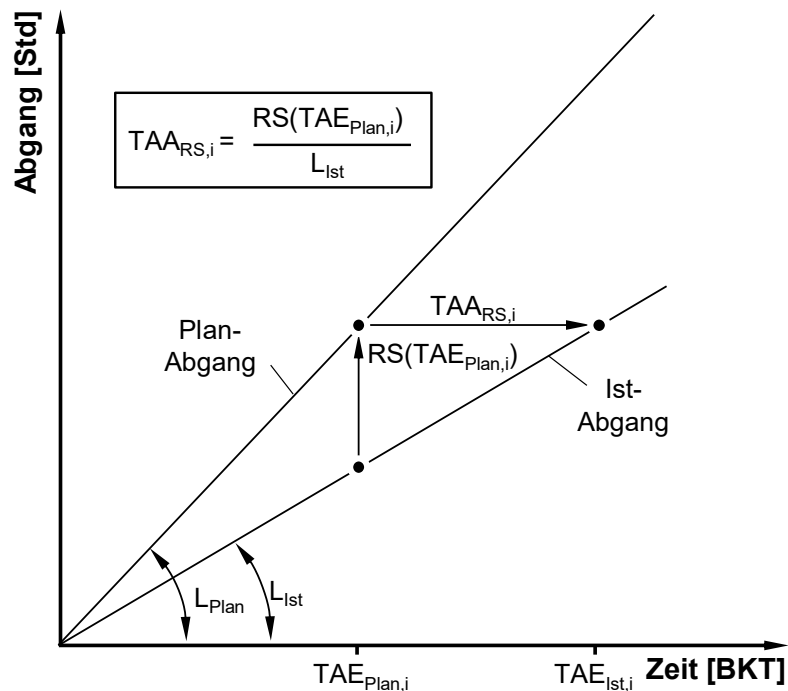
mit

- LA_m Mittlere Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
- RSA_m Mittlerer Rückstand (in Anzahl Aufträgen) [-]
- TAA_m Mittlere Terminabweichung im Abgang [BKT]

Falls der Rückstand und die Leistung in Stunden gemessen werden, ergibt sich aus dem Rückstand eine mittlere gewichtete Terminabweichung [LÖDD16, S. 83].

Kuyumcu [KUYU13] greift die von Yu beschriebene Modellierung der Terminabweichung auf, stellt sie für einzelne Aufträge dar und erweitert sie um den Einfluss der Reihenfolgeabweichung.

Zur Ermittlung der rückstandsbedingten Terminabweichung eines Auftrags gilt dafür die Annahme, dass die Fertigung die Aufträge in der geplanten Reihenfolge abarbeitet. Abbildung 2-13 zeigt die Modellierung der Terminabweichung aus dem Rückstand [KUYU13, S. 45].



- L_{Ist} : Ist-Leistung
- L_{Plan} : Plan-Leistung
- $RS(t)$: Rückstand zum Zeitpunkt t
- $TAE_{Ist,i}$: Ist-Bearbeitungsende von Auftrag i
- $TAA_{RS,i}$: Terminabweichung aus Rückstand von Auftrag i
- $TAE_{Plan,i}$: Plan-Bearbeitungsende von Auftrag i

Abbildung 2-13: Terminabweichung aus Rückstand ([KUYU13, S. 45], zitiert nach [LÖDD16, S. 82])

Um die Terminabweichung zu erhalten, die ein Auftrag durch den aktuell vorliegenden Rückstand erfährt, bestimmt Kuyumcu die Ist-Fertigstellung des Auftrags unter der Annahme, dass alle Aufträge entsprechend der geplanten Reihenfolge bearbeitet werden. Dieser Ist-Fertigstellungstermin entspricht dem Zeitpunkt, an dem der Ist-Abgang dem Plan-Abgang am Plan-Fertigstellungstermin des Auftrags entspricht. Die Differenz der beiden Termine ist die Terminabweichung, die der Auftrag aus Rückstand erfährt. Da in der gezeigten Situation Ist- und Plan-Abgang voneinander abweichen und einen positiven Rückstand ergeben, ist auch die resultierende Terminabweichung positiv. Die Terminabweichung durch Rückstand (19) für einen Auftrag lässt sich über den Rückstand zum

Zeitpunkt der geplanten Fertigstellung und die Leistung analog zu der von Yu beschriebenen Gleichung bestimmen [KUYU13, S. 45; LÖDD16, S. 61f.].

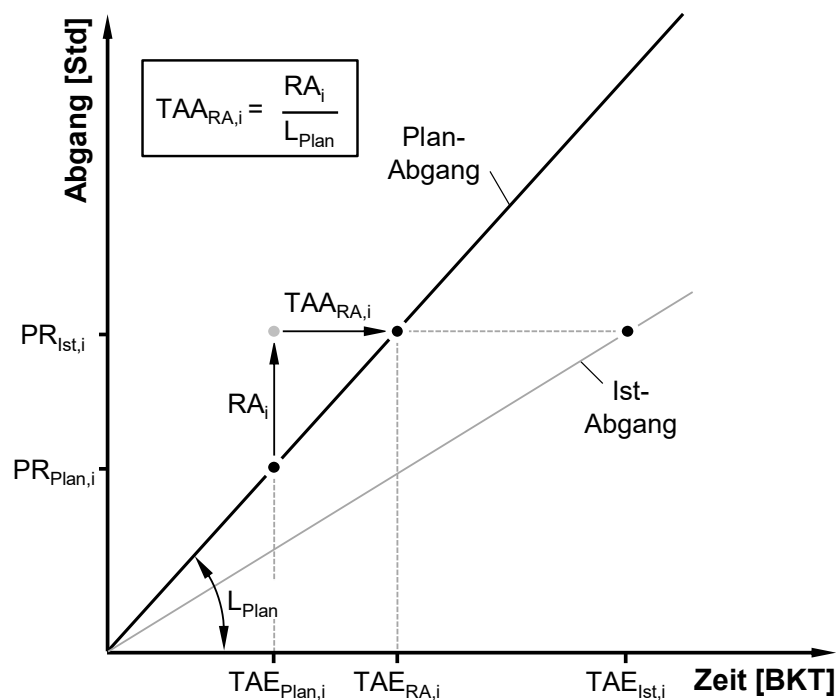
$$TAA_{RS,i} = \frac{RS(TAE_{Plan,i})}{L_{Ist}} \quad (19)$$

mit

- L_{Ist} Ist-Leistung [Std/BKT]
- RS Rückstand [Std]
- $TAA_{RS,i}$ Terminabweichung aus Rückstand von Auftrag i [BKT]
- $TAE_{Plan,i}$ Plan-Fertigstellungstermin von Auftrag i [BKT]

Diese Gleichung verdeutlicht, dass der Rückstand im Wesentlichen den Mittelwert der Terminabweichung beeinflusst [KUYU13, S. 45; LÖDD16, S. 61f.].

Um die reihenfolgebedingte Terminabweichung zu ermitteln, lässt Kuyumcu in seiner Modellierung Reihenfolgeabweichungen zu. Abbildung 2-14 zeigt, wie sich im Durchlaufdiagramm die Terminabweichung aus einer Reihenfolgeabweichung eines Auftrags ergibt.



- | | |
|---|---|
| L_{Plan} : Plan-Leistung | TAE_{Plan} : Plan-Fertigstellungstermin |
| $PR_{Ist,i}$: Ist-Prioritätsrang von Auftrag i | TAE_{RA} : Fertigstellungstermin nach Reihenfolgevertauschung |
| $PR_{Plan,i}$: Plan-Prioritätsrang von Auftrag i | TAE_{Ist} : Ist-Fertigstellungstermin |
| RA : Reihenfolgeabweichung | |
| $TAA_{RA,i}$: Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung von Auftrag | |

Abbildung 2-14: Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung ([KUYU13, S. 45], zitiert nach [LÖDD16, S. 82])

Die Reihenfolgeabweichung (20) eines Auftrags beschreibt, inwieweit die geplante und tatsächliche Bearbeitungsreihenfolge eines Auftrags voneinander abweichen. Sie entspricht der Differenz des Plan-Rangs, also der Position eines Auftrags in der geplanten Bearbeitungsreihenfolge, und des Ist-Rangs, also der Position eines Auftrags in der tatsächlichen Bearbeitungsreihenfolge. Um die Reihenfolgeabweichung in Stunden zu erhalten, werden die Ränge mit den Auftragszeiten gewichtet [KUYU13, S. 42f.; LÖDD16, S. 85f.].

$$RA_i = PR_{Ist,i} - PR_{Plan,i} \quad (20)$$

mit

$PR_{Ist,i}$ Ist-Prioritätsrang von Auftrag i [Std]
 $PR_{Plan,i}$ Plan-Prioritätsrang von Auftrag i [Std]
 RA_i Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [Std]

Die Reihenfolgeabweichung des Auftrags entspricht einer vertikalen Verschiebung des Auftrags im Abgangsverlauf. Sie verursacht eine reihenfolgebedingte Terminabweichung (21), die sich aus dem Verhältnis der Reihenfolgeabweichung zur geplanten Leistung ergibt [KUYU13, S. 43].

$$TAA_{RA,i} = \frac{RA_i}{L_{Plan}} \quad (21)$$

mit

L_{Plan} Plan-Leistung [Std/BKT]
 RA_i Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [Std]
 $TAA_{RA,i}$ Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [BKT]

Reihenfolgeabweichungen entfalten hauptsächlich einen Effekt auf die Streuung der Terminabweichung [LÖDD16, S. 62]. Die Terminabweichung eines Auftrags (22) setzt sich aus der rückstandbedingten und reihenfolgebedingten Terminabweichung zusammen [KUYU13, S. 46].

$$TAA_i = TAA_{RS,i} + TAA_{RA,i} \quad (22)$$

mit

TAA_i Terminabweichung von Auftrag i [BKT]
 $TAA_{RA,i}$ Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [BKT]
 $TAA_{RS,i}$ Terminabweichung aus Rückstand von Auftrag i [BKT]

Die Aufteilung der Terminabweichung in ihre Ursachen ermöglicht die Analyse und gezielte Verbesserung der Terminabweichung [LÖDD16, S. 91].

2.5 Grundlagen der Fertigungssteuerung

Das Ziel der Fertigungssteuerung ist es, die Vorgaben der Produktionsplanung trotz unvermeidlicher Störungen, wie Maschinen- oder Personalausfällen, umzusetzen und die logistische Zielerreichung dadurch zu sichern [WIEN97, S. 12]. Abbildung 2-15 zeigt das Modell der Fertigungssteuerung nach Lödning, das den Zusammenhang zwischen den

Aufgaben der Fertigungssteuerung und den logistischen Stell-, Regel- und Zielgrößen aufzeigt [LÖDD16, S. 8].

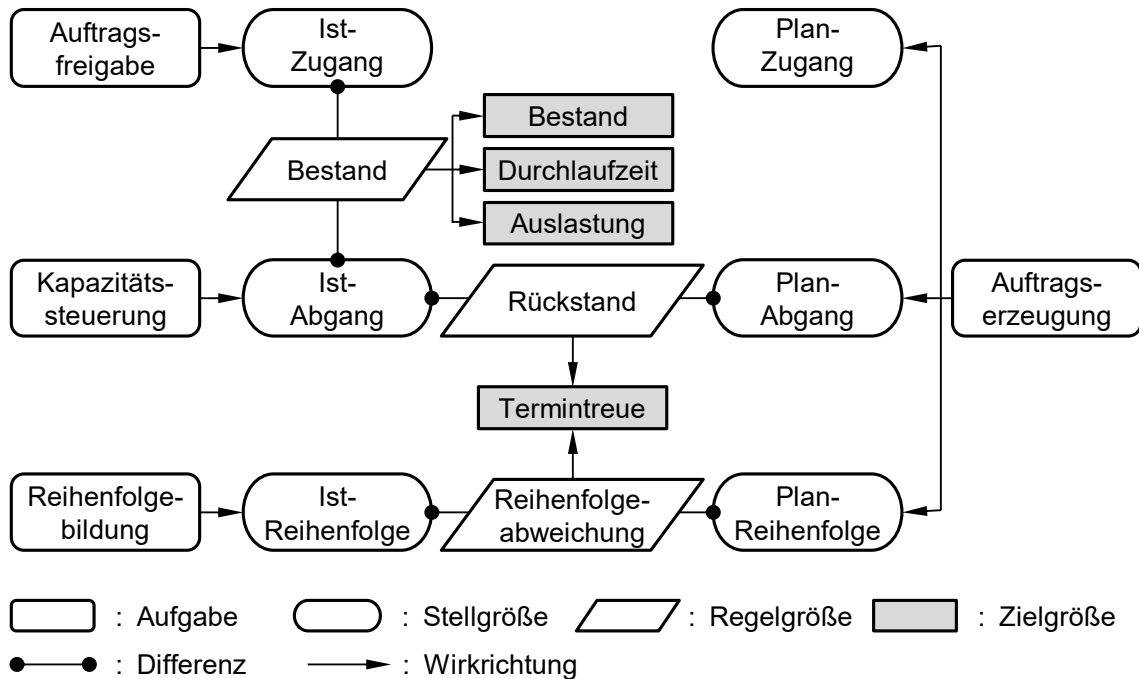


Abbildung 2-15: Modell der Fertigungssteuerung [LÖDD16, S. 8]

Die Fertigungssteuerung enthält die Aufgaben der Auftragsfreigabe, der Kapazitätssteuerung, der Reihenfolgebildung und der Auftragserzeugung. Die Ausgestaltung dieser Aufgaben wirkt auf die Stellgrößen der Fertigung. Die Auftragsfreigabe legt den Ist-Zugang, die Kapazitätssteuerung den Ist-Abgang und die Reihenfolgebildung die Ist-Reihenfolge fest. Die Auftragserzeugung als Teil der Produktionsplanung bestimmt über die Plan-Termine der Aufträge die Plan-Werte für den Zugang, den Abgang und die Reihenfolge. Die Differenz von je zwei Stellgrößen ergibt eine Regelgröße. Die Regelgröße *Bestand* ist die Differenz zwischen dem Ist-Zugang und dem Ist-Abgang. Die Differenz zwischen dem Ist-Abgang und dem Plan-Abgang ergibt den *Rückstand*. Ein Unterschied zwischen der Ist- und der Plan-Reihenfolge verursacht eine *Reihenfolgeabweichung*. Diese Regelgrößen wirken sich auf die logistischen Zielgrößen aus. Die Regelgröße *Bestand* wirkt sich auf den *Bestand* als Zielgröße sowie die Zielgrößen *Durchlaufzeit* und *Auslastung* aus. Der *Rückstand* und die *Reihenfolgeabweichung* beeinflussen vorrangig die *Termintreue* [LÖDD16, S. 8f.].

Verschiedene Verfahren können die Aufgaben der Fertigungssteuerung umsetzen. Folgende Abschnitte stellen die Grundlagen und ausgewählte Verfahren der Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung, Reihenfolgebildung und Auftragserzeugung vor.

Auftragsfreigabe

Die Auftragsfreigabe übergibt Aufträge zur Bearbeitung an die Fertigung. Damit legt sie den Ist-Zugang zur Fertigung fest und beeinflusst damit insbesondere die Regelgröße der Fertigungsbestände. Lödning unterscheidet die vier Kriterien (1) ohne Kriterium, (2)

Plan-Starttermin, (3) Bestand und (4) Belastung, nach denen die Auftragsfreigabe erfolgen kann [LÖDD16, S. 339-340].

Erfolgt die Auftragsfreigabe ohne ein Kriterium, wird von einer sofortigen Auftragsfreigabe gesprochen. Da bei dieser Form der Auftragsfreigabe keine gezielte Steuerung des Ist-Zugangs erfolgt, ist sie insbesondere für die Auftragsfertigung nachteilig. Die Folgen können unnötig hohe Fertigungsbestände und lange sowie stark streuende Durchlaufzeiten sein. Die Planbarkeit der Aufträge in der Fertigung nimmt durch die sofortige Auftragsfreigabe ab [LÖDD16, S. 340].

Die Auftragsfreigabe nach Termin gibt einen Auftrag nach Erreichen des Plan-Starttermins frei und setzt damit den Produktionsplan um. Der Ist-Zugang der Fertigung entspricht in diesem Fall dem Plan-Zugang. Dieses Verfahren ist auch deshalb so weit verbreitet, weil sie der Standard in vielen PPS-Systemen ist. Die Auftragsfreigabe nach Termin steuert den Ist-Zugang und damit die Bestände nicht aktiv. Falls es zu Störungen kommt, die den Zu- oder Abgang der Fertigung beeinflussen, weichen die Bestände und Durchlaufzeiten von der Planung ab. Darüber hinaus ist das Freigabeverfahren nicht in der Lage, eine besonders gute Produktivität durch die vorzeitige Freigabe von Aufträgen auszunutzen [LÖDD16, S. 341-343]. Dieses Freigabeverfahren bildet die Vorgaben der Planung sehr genau ab. In dieser Arbeit dient es im späteren deshalb als Teil einer Referenzkonfiguration (vgl. Abschnitt 6.1.3).

Die bestandsregelnde Auftragsfreigabe steuert den Ist-Zugang über den Ist-Abgang und erreicht dadurch ein sehr stabiles Bestandsniveau. Sie geht auf die Idee von Oliver Wight zurück, den Fertigungszugang an den Abgang zu koppeln [WIGH70, S. 17ff.]. Die bestandsregelnde Auftragsfreigabe hat unter anderem die Vorteile 1) einer großen Robustheit gegenüber Planungsfehlern und Planabweichungen, 2) einer großen Konstanz der mittleren Durchlaufzeiten und 3) eines Schutzes der Fertigung gegen eine Über- oder Unterlast. Für eine tiefgehende Erläuterung und weitere Vorteile sei auf die Arbeit von Lödding verwiesen [LÖDD16, S. 343-346]. Ein verbreitetes Verfahren zur bestandsregelnden Auftragsfreigabe ist die ConWIP-Steuerung (Constant Work in Process). Die Freigabe eines Auftrags erfolgt bei der ConWIP-Steuerung, wenn die Fertigung eine Bestandsgrenze (ConWIP-Bestand) unterschreitet. Dadurch hält das Verfahren den Fertigungsbestand und damit auch die Durchlaufzeiten konstant. Falls die Plan-Starttermine der freizugebenden Aufträge noch nicht erreicht sind, kann die ConWIP-Steuerung Aufträge innerhalb eines Vorgriffshorizonts auch vorzeitig freigeben [SPEA90, S. 883-885]. Dieses Verfahren ist, wie im späteren dargestellt, Bestandteil einer abgestimmten Konfiguration der Fertigungssteuerung (vgl. Abschnitt 5.4).

Die Auftragsfreigabe mit arbeitssystemspezifischem Belastungsabgleich gibt einen Auftrag dann frei, wenn die Belastung an allen Arbeitssystemen im Materialfluss des Auftrags unterhalb eines Grenzwertes liegt. Die Verfahren zur Auftragsfreigabe mit arbeitssystemspezifischem Belastungsabgleich benötigen Steuerungsinformationen auf Arbeitssystemebene, da sie ansonsten keinen Belastungsabgleich durchführen können. Durch den Belastungsabgleich und die damit einhergehende Verzögerung und Beschleunigung von Aufträgen verursachen diese Auftragsfreigabeverfahren Reihenfolgevertauschungen im Zugang der Fertigung. Dies kann die Termintreue der

Fertigung durch eine erhöhte Streuung der Terminabweichung gefährden [LÖDD16, S. 346f.]. Ein von mehreren Autoren unabhängig voneinander entwickeltes Verfahren zur Auftragsfreigabe mit arbeitssystemspezifischem Belastungsabgleich ist die Workload Control (vgl. [JEND78, S. 42ff.; BERT81, S. 113ff.; HEND91, S. 9ff.]). Dieses Verfahren beurteilt die Belastung eines Arbeitssystems durch dessen direkten und indirekten Bestand [LÖDD16, S. 407f.].

Kapazitätssteuerung

Die Aufgabe der Kapazitätssteuerung ist es, die logistischen Zielgrößen über den Ist-Abgang positiv zu beeinflussen. Durch das Steuern des Ist-Abgangs beeinflusst die Kapazitätssteuerung vorrangig den Rückstand und den Bestand. Dafür entscheidet sie kurzfristig über den Einsatz sowie die Ausweitung oder Reduzierung der Kapazitäten in der Produktion. Die Kapazitätssteuerung wird meistens entweder mit der Absicht durchgeführt 1) die Planungsvorgaben bzw. den Kundenbedarf zu erreichen oder 2) die Kapazitäten in der Fertigung aufeinander abzustimmen [LÖDD16, S. 531f.]. Für die Auftragsfertigung ist die erste Gruppe von Verfahren sehr relevant, da diese Verfahren die Termintreue als wichtige Zielgröße von Auftragsfertigern steuern. Weit verbreitet ist dabei insbesondere die Rückstandsregelung.

Ziel der Rückstandsregelung ist es, den geplanten Abgang auch bei Störungen umzusetzen. Das Verfahren misst dafür zunächst den Rückstand als Differenz zwischen Plan- und Ist-Abgang eines Arbeitssystems oder der Fertigung. Wenn dieser Rückstand ober- oder unterhalb eines Grenzurückstands liegt, führt die Rückstandsregelung eine Kapazitätsanpassung durch, um den Ist-Abgang zu beeinflussen. Die möglichen Kapazitätsanpassungen beschreibt eine Kapazitätshüllkurve, die für verschiedene Kapazitätsmaßnahmen die Kapazitätsveränderung über der jeweiligen Reaktionszeit abbildet. Die Rückstandsregelung kann dabei insbesondere positiv auf die Termintreue einwirken [LÖDD16, S. 551f.]. Auch dieses Verfahren ist Bestandteil der abgestimmten Konfiguration der Fertigungssteuerung (vgl. Abschnitt 5.4).

Reihenfolgebildung

Die Reihenfolgebildung hat die Aufgabe, aus der Warteschlange an einem Arbeitssystem den nächsten zu bearbeitenden Auftrag auszuwählen. Die Reihenfolgebildung beeinflusst über die resultierende Reihenfolgeabweichung insbesondere die Termintreue. In einigen Fällen kann die Reihenfolgebildung auch die Leistung beeinflussen, was in der Regel jedoch einen Zielkonflikt mit der Termintreue verursacht [LÖDD16, S. 507-509]. In der Praxis weit verbreitete Verfahren sind die Reihenfolgebildung nach First In – First Out (FIFO) und die Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin (FPE) [SEIT18, S. 19].

Bei der Reihenfolgebildung nach FIFO bearbeitet ein Arbeitssystem die Aufträge in der Reihenfolge ihrer Ankunft. Dies vermeidet Reihenfolgevertauschungen, weshalb das FIFO-Verfahren auch als natürliche Reihenfolgeregel bezeichnet wird. Die wichtigsten Vorteile dieses Verfahrens sind die niedrige Streuung der Durchlaufzeiten in der Fertigung sowie die einfache Umsetzung und Durchführung des Verfahrens [LÖDD16, S. 509]. Die Reihenfolgebildung nach FIFO vermeidet Reihenfolgevertauschungen und stellt damit

eine natürliche Referenz für die Reihenfolgebildung dar. Zu diesem Zweck wird sie auch in der Referenzkonfiguration dieser Arbeit angewandt (vgl. Abschnitt 6.1.3).

Bei der Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin bearbeitet ein Arbeitssystem immer zuerst den Auftrag mit dem frühesten Plan-Endtermin des Arbeitsvorgangs. Dies ermöglicht es, Plan-Abweichungen einzelner verspäteter Aufträge auszugleichen, indem diese Aufträge am Arbeitssystem beschleunigt werden. Die Durchlaufzeit übriger Aufträge im Bestand verlängert sich durch die Verzögerung, die sie erfahren [LÖDD16, S. 510]. Die Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin kann reihenfolgebedingte Terminabweichungen wirksam ausregeln und erreicht dabei beinahe den theoretisch maximalen Effekt der Reihenfolgebildung auf die Termintreue [LÖDD17, S. 12]. Das Verfahren ist, wie im späteren detailliert begründet, Bestandteil der abgestimmten Konfiguration der Fertigungssteuerung (vgl. Abschnitt 5.4).

Auftragserzeugung

Aufgabe der Auftragserzeugung ist es, Fertigungsaufträge zu erzeugen. Damit legt sie den Plan-Zugang, den Plan-Abgang und die Plan-Reihenfolge für die Fertigung fest. In der Auftragsfertigung ist die Auftragserzeugung Bestandteil der Produktionsplanung [LÖDD16, S. 165]. Innerhalb der Produktionsplanung erzeugt die Auftragsannahme und -terminierung die Planwerte für Angebote und Aufträge. Eine detaillierte Vorstellung bestehender Ansätze zur Auftragsannahme und -terminierung erfolgt in Abschnitt 3.

In der Auftragsfertigung löst ein Kundenauftrag die Auftragserzeugung aus, wodurch aus diesem ein oder mehrere Fertigungsaufträge erzeugt werden können. Insbesondere bei kundenindividuellen Produkten erfolgt eine direkte Umsetzung eines Kundenauftrags in einen Fertigungsauftrag. In einigen Fällen, zum Beispiel bei der Zusammenfassung mehrerer Kundenaufträge mit kundenneutralen Erzeugnissen, kann die Anzahl der Kunden- und Fertigungsaufträge auch abweichen [LÖDD16, S. 166-168]. Im Folgenden entspricht ein Kundenauftrag immer genau einem Fertigungsauftrag.

3 Bestehende Ansätze zur Auftragsannahme und -terminierung

Die Auftragsannahme und -terminierung hat die Aufgabe, dem Kunden eine Lieferzeit zu nennen, wenn er ein Angebot anfragt. Sie ist damit Bestandteil der Produktionsplanung. Wie zuvor beschrieben, legt sie als solche die Plan-Werte für die Produktion fest und hat dadurch einen großen Einfluss auf den logistischen Erfolg eines Unternehmens. Es existiert eine ganze Reihe an Verfahren für die Terminplanung von Auftragsfertigern, die nach verschiedenen Ansätzen Liefertermine bestimmen. Der erste Abschnitt (3.1) stellt Klassifizierungsmerkmale für die Auftragsannahme und -terminierung vor. Anschließend stellt Abschnitt 3.2 bestehende Ansätze der Auftragsannahme und -terminierung in der Auftragsfertigung vor und benennt die Defizite dieser Ansätze. Abschnitt 3.3 fasst die Defizite zusammen und skizziert den Forschungsbedarf der vorliegenden Arbeit. Abschnitt 3.4 leitet aus diesen Defiziten die Zielsetzung der Arbeit her.

3.1 Klassifizierung von Verfahren der Auftragsannahme und -terminierung

Die Verfahren der Lieferterminplanung bestimmen einen möglichen Liefertermin bzw. eine mögliche Lieferzeit. Damit ist die Lieferterminplanung ein wesentlicher Bestandteil der Angebotserstellung. Innerhalb dieser Grobterminierung erfolgt vielfach nur eine Planung von Meilensteinen, weil 1) noch Unsicherheiten bezüglich des Angebots bestehen, 2) noch Unsicherheiten bezüglich der Umsetzung bestehen und 3) der Planungsaufwand gering gehalten werden soll. Viele Verfahren rechnen aus diesem Grund mit verdichteten Daten und vereinfachen die bestehenden Abläufe in der Produktion [SCHU12, S. 61-62].

Es lassen sich drei grundsätzlich unterschiedliche Typen von Verfahren zur Terminplanung unterscheiden:

- Verfahren der *mathematischen Optimierung*, in der englischsprachigen Fachliteratur auch als *Scheduling* bezeichnet, versuchen die Einplanung der Aufträge einer Produktion in Bezug auf eine Zielgröße zu optimieren. Häufig geschieht dies unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Haupt- und Nebenbedingungen.
- *Machine Learning und simulationsbasierte Verfahren* versuchen auf Grundlage der wachsenden Datenverarbeitungsmöglichkeiten und unter Einbezug einer großen Datenmenge eine Terminplanung durchzuführen. Dabei führen sie in der Regel entweder einen Vergleich mit vergangenen Aufträgen durch (Machine Learning), simulieren die zukünftige Situation (simulationsbasierte Verfahren) oder kombinieren diese beiden Ansätze.
- Verfahren auf der Basis *ingenieurwissenschaftlicher Modelle* versuchen auf der Grundlage der modellierten Wirkzusammenhänge in der Produktion relevante Planungsparameter zu bestimmen und damit die Terminplanung durchzuführen.

Abbildung 3-1 zeigt einen Überblick über die Kategorisierung von Verfahren der Auftragsannahme und -terminierung. Die Verfahren aus dem Bereich der mathematischen Optimierung sowie des Machine Learnings und der Simulation werden im Folgenden abgegrenzt, jedoch nicht detailliert betrachtet. Aufgrund der Relevanz in Bezug auf die vorliegende Arbeit werden die modellbasierten Verfahren detailliert betrachtet und dabei in durchlauforientierte und kapazitätsorientierte Verfahren unterteilt. Die Analyse der

kapazitätsorientierten Verfahren als Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit erfolgt in Abschnitt 3.2.

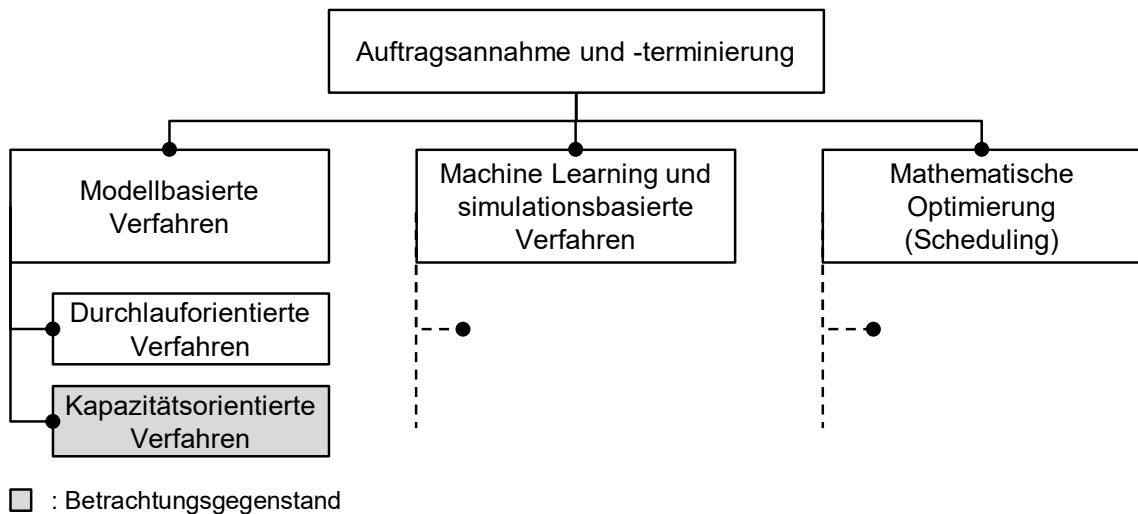


Abbildung 3-1: Kategorien von Verfahren der Auftragsannahme und -terminierung

Folgende Ausführungen stellen die unterschiedlichen Kategorien der Auftragsannahme und -terminierung dar und erläutern Vor- und Nachteile für die Anwendung in der Auftragsfertigung.

Mathematische Optimierung (Scheduling)

Die Verfahren der mathematischen Optimierung entstammen insbesondere dem Forschungsbereich des Operations Research (OR). Ein neuerer Bereich dieser Verfahren beschäftigt sich mit der Auftragsannahme aus der Sicht von Auftragsfertigern. Das Ziel dieser Verfahren ist es, mithilfe einer profitmaximierenden Optimierung die Kosten der Fertigung (z.B. Kapazitätskosten oder Strafkosten für eine verspätete Lieferung) zu minimieren und die Deckungsbeiträge der angenommenen Aufträge zu maximieren [KLEI01, S. 248-250]. Einige Autoren berücksichtigen weitere Entscheidungskriterien wie unterschiedliche Kundenwertigkeiten in der Monetarisierung von Aufträgen, um dadurch eine Annahmeentscheidung zu treffen (vgl. [MOHA13; LOHN19, S. 273f.]). Einige Verfahren, wie das Hierarchical Production Planning, schlagen ein mehrstufiges Vorgehen für die Auftragsannahme vor, indem Lieferzeiten, Preise, Lieferanten und Unterauftragnehmer für den Auftrag bestimmt werden [EBAD08, S. 354f.; EBAD09, S. 5765f.].

Hopp und Spearman charakterisieren die Verfahren der mathematischen Optimierung allgemein als stark vereinfacht und generisch, wodurch die praktische Anwendbarkeit limitiert sei. Sie kritisieren, dass die Modelle den Auftragsdurchlauf der Produktion vereinfachen, da sie nur für eine geringe Anzahl von Arbeitssystemen im Materialfluss anwendbar seien. Vor allem komplizierte Produktionssysteme könnten mit diesen Verfahren nicht beurteilt werden, weshalb sie in diesen Fällen nicht anwendbar seien. Darüber hinaus vernachlässigten die Verfahren oftmals auch Unsicherheiten in der Produktion, wie zum Beispiel Störungen, die Annahmeentscheidung des Kunden oder

schwankende Bearbeitungszeiten. Außerdem bedingten diese Verfahren, dass zum Zeitpunkt der Terminplanung alle Aufträge vorliegen [HOPP08, S. 519-520].

Die besonders für die Auftragsfertigung relevante Sicherung der Termintreue berücksichtigen die Verfahren nicht, da sie sich auf die Planung beschränken und die logistische Zielerreichung der Produktion voraussetzen. Die mathematischen Beschreibungen sind vergleichsweise kompliziert und benötigen für genaue Ergebnisse umfangreiche Eingangsdaten. Insbesondere die genauen Kapazitätsbedarfe auf der Ebene einzelner Arbeitssysteme sind zu einem frühen Zeitpunkt im Auftragsdurchlauf, an dem die Auftragsannahme und -terminierung stattfindet, vielfach noch nicht verfügbar.

Die Verfahren der mathematischen Optimierung können damit zwar eine Aussage über eine theoretische Optimierung der Auftragsannahme in Bezug auf verschiedene Zielgrößen liefern, haben sich jedoch auf Grund der starken Idealisierung, dem fehlenden Einbezug von logistischen Zielgrößen und der Vernachlässigung von Unsicherheiten in der Praxis nicht durchgesetzt.

Machine Learning und simulationsbasierte Verfahren

Die simulative Bestimmung von Lieferterminen ist ein Ansatz, der sich vor allem durch die wachsenden Simulationsmöglichkeiten herausgebildet hat. Eine Vielzahl von Autoren beschäftigt sich mit dieser Art der Lieferterminbestimmung in verschiedenen Branchen und für verschiedene Bevorratungsstrategien (vgl. [TAAL97; WIED16]). Beispielsweise ermitteln Taal und Wortmann Liefertermine mithilfe einer iterativen Vorwärtssimulation, die in eine MRP-Logik integriert ist. Sie simulieren Lieferzeiten für neue Aufträge auf Grundlage einer ersten Schätzung. Dabei variieren Taal und Wortmann den Arbeitsplan und die Losgröße, wobei die Liefertermine bereits bestehender Aufträge nicht mehr verändert werden [TAAL97, S. 249f.]. Ein weiterer Ansatz simuliert den zukünftigen Kapazitätsbedarf mit einer Monte-Carlo-Simulation, um auf dieser Basis den Liefertermin abzuleiten [WIED16, S. 99f.]. Auch Methoden mit Bezug zum Machine Learning halten Einzug in die Auftragsannahme und -terminierung. Auch dies ist bereits vielfach untersucht (vgl. [ALEN08; MOUR14; SCHU20; HILL22]). Ein Ansatz dafür ist beispielsweise die Bestimmung von Lieferzeiten über eine Ähnlichkeitsbetrachtung mit bereits abgeschlossenen Aufträgen [MOUR14, S. 501f.; SCHU20, S. 886f.]. Andere Ansätze berücksichtigen Vergangenheitsdaten der Produktion oder zusätzlich auch deren aktuelle Situation in der Ermittlung von Durchlauf- oder Lieferzeiten [ALEN08, S. 3495f.; HILL22, S. 718f.].

Sowohl die Simulationsmodelle als auch die Machine-Learning-Algorithmen sind auf genaue Eingangsdaten der zu terminierenden Aufträge angewiesen. Zu dem frühen Zeitpunkt im Auftragsdurchlauf, an dem ein Auftragsfertiger seinen Kunden Liefertermine nennen muss, sind vielfach jedoch weder Arbeitspläne noch genaue Kapazitätsbedarfe vorhanden. In der Auftragsfertigung rechnet sich aufgrund der hohen Variantenvielfalt, vielfach auch im späteren Auftragsdurchlauf, der Aufwand für eine sehr genaue Ermittlung der Kapazitätsbedarfe nicht. Der Einfluss fehlender oder ungenauer Planwerte auf die Ergebnisse der beschriebenen Methoden ist nicht untersucht. Wenn die Methoden anwendbar sind, ist jedoch eine Verschlechterung der Genauigkeit zu erwarten. Auch erfordert die Umsetzung von simulationsbasierten Methoden weiterführende Kenntnisse

und Fähigkeiten in der IT, was vor allem in kleineren Unternehmen eine eigenständige Einführung und einfache Anwendung erschwert.

Verfahren auf der Basis ingenieurwissenschaftlicher Modelle

Eine weitere Möglichkeit zur Gestaltung der Auftragsannahme und -terminierung ist die Entwicklung von Verfahren auf der Basis ingenieurwissenschaftlicher Modelle der Wirkzusammenhänge in der Produktion, wie beispielsweise des Trichtermodells (vgl. Abschnitt 2.4.2). Zu dieser Kategorie zählen beispielsweise die Balkenplantechnik, die Engpassterminierung oder die Planung mit Durchlaufkurven (vgl. [WEIN54, S. 15f.; GRAB78, S. 115]). Diese Verfahren versuchen die Planung mit einem möglichst geringen, aber zielgenauen Datenbedarf durchzuführen. Die komplizierte Terminierung soll durch die Anwendung allgemeiner Wirkzusammenhänge reduziert und für den Anwender vereinfacht werden. Ziel ist dementsprechend nicht die Optimierung, sondern die Bestimmung realistischer Liefertermine (vgl. [HOPP08, S. 549]). Einen vergleichbaren Ansatz verfolgt die vorliegende Arbeit, weshalb im Folgenden die Verfahren der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung weitergehend klassifiziert werden. Die Verfahren zur Auftragsannahme und -terminierung lassen sich nach Almenräder in zwei Hauptklassen trennen: durchlauforientierte und kapazitätsorientierte Verfahren (vgl. [ALME87, S. 55]). Verfahren mit einer Durchlauforientierung berücksichtigen bei der Terminierung lediglich die ablaufbedingten Abhängigkeiten in der Fertigung. Die Planung findet dabei ohne die Betrachtung von Kapazitätsrestriktionen statt. Im Gegensatz dazu berücksichtigen die kapazitätsorientierten Verfahren auch den Kapazitätsbedarf der Angebote und Aufträge und das Kapazitätsangebot der Fertigung (vgl. [ALME87, S. 55-57]).

Ein in der Praxis weit verbreitetes durchlauforientiertes Verfahren ist die Planung mit Standardlieferzeiten [BANK21, S. 45]. Dabei vergibt ein Unternehmen für jeden Auftrag bzw. jede Variante die gleiche Lieferzeit. Als Folge verschiebt die Terminplanung den Auftragszugang lediglich zeitlich, ohne die Plan-Kapazität der Fertigung zu berücksichtigen. Das Verfahren kann die Fertigung damit nicht wirksam vor einer Überlast schützen. Es stellt daher sehr hohe Ansprüche an die Fertigungssteuerung, um eine hohe Termintreue zu erreichen.

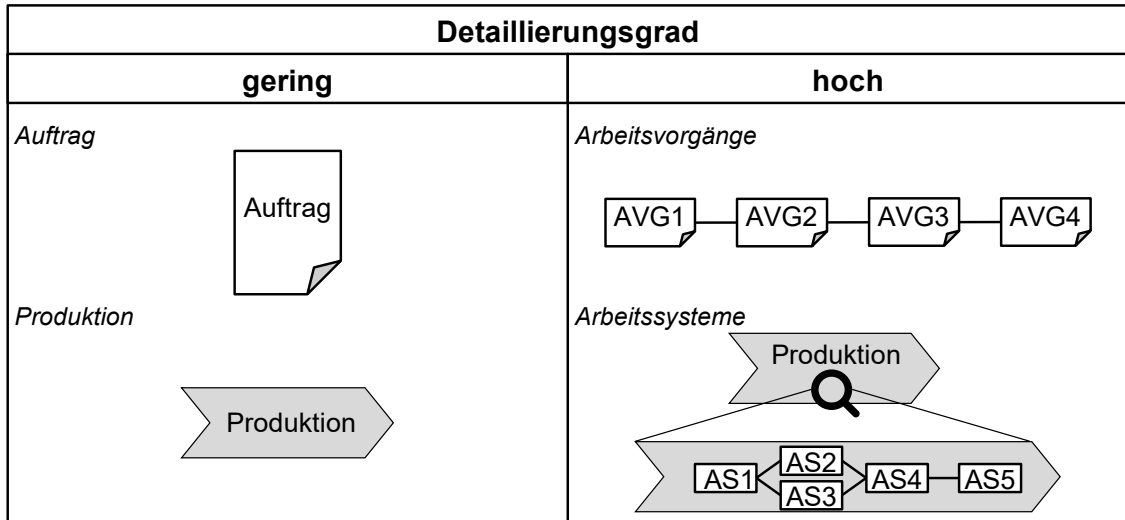
In der Anwendung für Auftragsfertiger weisen die durchlauforientierten Verfahren Defizite auf. Die Planungsergebnisse der durchlauforientierten Verfahren liefern nur realistische Werte, solange keine Kapazitätsengpässe auftreten oder ein Unternehmen diese Engpässe kurzfristig ausgleichen kann [ALME87, S. 55-56]. Aufgrund von Unsicherheiten in der Auftragsfertigung wie Belastungsschwankungen, Schwankungen im Produktionsmix oder Störungen in der Produktion, ist diese Voraussetzung in der Regel nicht gegeben. Falls Kapazitätsengpässe auftreten, verlieren die Plan-Durchlaufzeiten, die den durchlauforientierten Verfahren zugrunde liegen, ihre Gültigkeit und die bestimmten Liefertermine sind nicht länger realistisch. Aufgrund der Defizite der durchlauforientierten Ansätze zur Auftragsannahme und -terminierung bei Auftragsfertigern wird diese Verfahrensklasse im Folgenden nicht detaillierter betrachtet.

Der folgende Abschnitt klassifiziert relevante kapazitätsorientierte Verfahren und stellt ihre Verfahrensregeln vor.

3.2 Kapazitätsorientierte Verfahren

Die kapazitätsorientierten Verfahren lassen sich weiterhin nach den zwei Merkmalen *Detaillierungsgrad* und *Planungsumfang* unterscheiden.

Der *Detaillierungsgrad* der Auftragsannahme und -terminierung differenziert, ob die Planung auf der Ebene der Arbeitssysteme bzw. Arbeitsvorgänge stattfindet oder übergeordnet für die gesamte Produktion bzw. den Auftrag erfolgt. Abbildung 3-2 veranschaulicht die unterschiedliche Betrachtung des Auftragsdurchlaufs bei Verfahren der Auftragsannahme und -terminierung mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad.



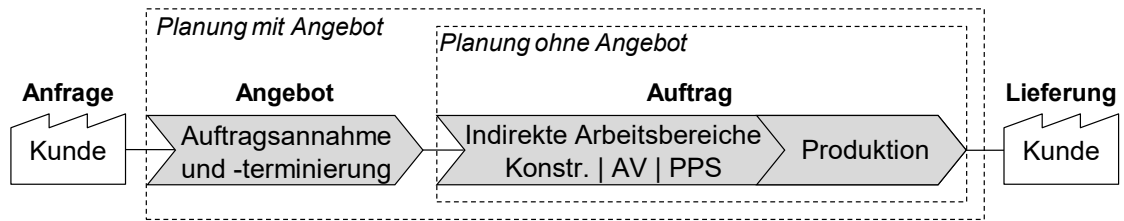
AVG: Arbeitsvorgang AS : Arbeitssystem

Abbildung 3-2: Differenzierung des Detaillierungsgrads bei der Auftragsannahme und -terminierung

Die Planung auf Ebene der Aufträge bzw. der Produktion (siehe Abbildung 3-2) verwendet aggregierte Planungsinformationen auf Ebene der gesamten Produktion. Die Planung auf Ebene der Arbeitsvorgänge bzw. Arbeitssysteme (siehe Abbildung 3-2) erfordert in der Regel einen Arbeitsplan, in dem die Arbeitsvorgänge und ihre Reihenfolge sowie die den einzelnen Arbeitsvorgängen zugeordneten Arbeitssysteme vermerkt sind. Auch die weiteren Planungsgrößen, insbesondere der Kapazitätsbedarf und das Kapazitätsangebot, sind dann auf dieser detaillierten Ebene erforderlich.

Der *Planungsumfang* in der Auftragsannahme und -terminierung differenziert den in die Planung einbezogenen Status im Auftragsdurchlauf. Es kann zwischen Verfahren mit der Betrachtung von Angeboten und Verfahren ohne die Betrachtung von Angeboten

unterschieden werden. Abbildung 3-3 zeigt die Systemgrenze für eine Planung mit Angeboten und eine Planung ohne Angebote.

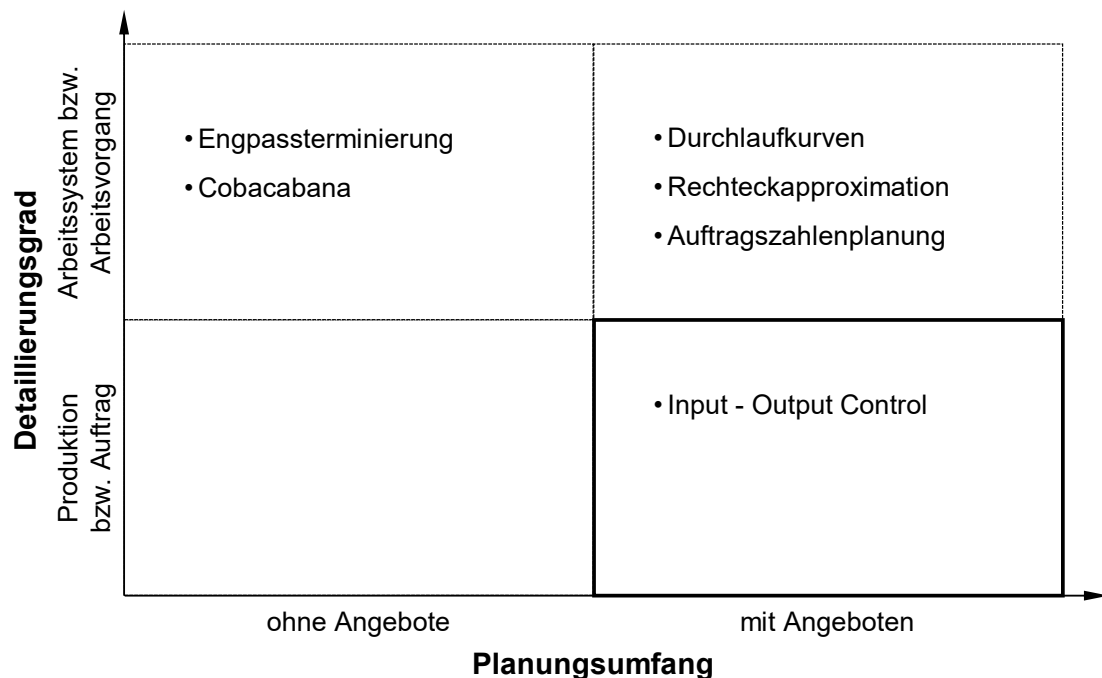


AV : Arbeitsvorbereitung Konstr. : Konstruktion PPS : Produktionsplanung und -steuerung
 □ : Systemgrenze des Planungsumfangs

Abbildung 3-3: Differenzierung des Planungsumfangs bei der Auftragsannahme und -terminierung

Einige Verfahren beziehen auch Angebote in ihre Planung mit ein, für die noch keine Kundenentscheidung vorliegt und für die demnach eine Unsicherheit über den Auftrags-eingang vorliegt. Andere Verfahren beziehen lediglich Aufträge in die Planung ein und vernachlässigen Angebote. Dies erleichtert die Planung, weil dadurch Unsicherheiten in der Planung reduziert werden.

Einen Überblick relevanter kapazitätsorientierter Verfahren der Auftragsannahme und -terminierung zeigt Abbildung 3-4. Der Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit ist eine Auftragsannahme und -terminierung unter Einbezug von Angeboten auf Ebene der gesamten Fertigung.



□ Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit

Abbildung 3-4: Klassifizierung relevanter Verfahren der kapazitätsorientierten Terminplanung

Bei der Betrachtung von Aufträgen und der Vernachlässigung von Angeboten haben sich insbesondere Verfahren auf der Ebene der Arbeitsvorgänge herausgebildet, weil diese eine sehr hohe Planungsgenauigkeit versprechen. Für die Terminierung auf Gesamfertigungsebene spricht grundsätzlich der geringere Datenbedarf, da auch ohne Arbeitspläne und Kapazitätsinformationen auf Arbeitsvorgangsebene eine Planung durchgeführt werden kann. Dies ist insbesondere relevant, wenn Angebote in die Planung einbezogen werden, da für diese in der Regel weniger Informationen verfügbar sind und der Aufwand zu diesem frühen Zeitpunkt im Auftragsdurchlauf in der Regel begrenzt werden soll. Aufgrund der geringeren Auftragsrisiken und der ohnehin notwendigen Arbeitsvorbereitung konnten keine relevanten Verfahren für die Terminierung von Aufträgen auf Fertigungsebene identifiziert werden.

Folgende Abschnitte beschreiben die oben dargestellten und als relevant eingestuften Verfahren der Engpassterminierung (Abschnitt 3.2.1), Cobacabana (Abschnitt 3.2.2), die Terminplanung mit Durchlaufkurven (Abschnitt 3.2.3), die Anwendung der Rechteckapproximation (Abschnitt 3.2.4), die Auftragszahlenplanung (Abschnitt 3.2.5) und das Verfahren der Input-Output Control (Abschnitt 3.2.6).

3.2.1 Engpassterminierung

Die Engpassterminierung orientiert sich bei der Planung an den Arbeitssystemen, die bei einer hohen Auftragsbelastung zuerst überlastet sind. Damit basiert sie auf der Idee der Theory of Constraints (TOC), wonach der Fertigungsengpass den Durchsatz eines Systems bestimmt. Demnach ist das Engpassarbeitssystem in der Produktion ausgelastet, während die anderen Arbeitssysteme noch Kapazitätsreserven besitzen. Dadurch limitiert die Leistung des Engpasses auch die Leistung der gesamten Produktion (vgl. [GOLD84]). Abbildung 3-5 zeigt den Betrachtungsgegenstand der Engpassterminierung im Auftragsdurchlauf.



AV : Arbeitsvorbereitung Konstr. : Konstruktion PPS : Produktionsplanung und -steuerung
□ : Arbeitsvorgang ■ : Engpassarbeitsvorgang □ : nicht betrachtete Prozessbausteine (transparent)

Abbildung 3-5: Betrachtungsgegenstand der Engpassterminierung (eigene Darstellung)

Die Engpassterminierung dient der Einplanung von Aufträgen und enthält keine Angebote in der Planung. Aus diesem Grund ist sie erst nach der Auftragsstellung anwendbar. Voraussetzung für den Einsatz des Verfahrens ist ein stabiler Engpass in der Fertigung, der auch über verschiedene Varianten hinweg seine Gültigkeit behält. Die Engpassterminierung geht bei der Planung in zwei Schritten vor. In einem ersten Schritt überprüft sie die Kapazitätsrestriktionen des Engpasses. Dafür prüft das Verfahren, an welchem Termin die für den Auftrag auf dem Engpasssystem benötigte Kapazität zur

Verfügung steht. Das Verfahren benötigt schon bei der Terminplanung eine möglichst genaue Kenntnis über den Kapazitätsbedarf eines Auftrags am Engpass, um den Kapazitätsabgleich auf diesem Detaillierungsgrad durchführen zu können. Von dem Termin am Engpass ausgehend werden mit einer Vorwärtsterminierung der Plan-Endtermin und mit einer Rückwärtsterminierung der Plan-Starttermin ermittelt. Die Engpassterminierung kann dementsprechend den Plan-Starttermin und den Plan-Endtermin nicht eigenständig bestimmen und wird deshalb in der Regel mit einem Verfahren der Durchlaufterminierung (siehe Abschnitt 2.3.3) kombiniert (vgl. [GRAB78, S. 115; ALME87, S. 62-63]). Ziel des Verfahrens ist eine Auslastungsoptimierung des Engpasses, was die Termintreue als Hauptzielgröße vieler Auftragsfertiger in den Hintergrund treten lässt. Eine umfangreiche Evaluation des Verfahrens, insbesondere in Bezug auf die Stabilität und Fehleranfälligkeit, existiert nicht.

3.2.2 Control of Balance by Card-Based Navigation (Cobacabana)

Die von Land entwickelte Control of Balance by Card-Based Navigation (Cobacabana) greift die grundsätzliche Logik der Workload Control (siehe Abschnitt 2.5) auf und vereinfacht sie in einem kartenbasierten System für die PPS [LAND09, S. 98ff.]. Das Verfahren wurde auch mit Hilfe weiterer Autoren erweitert (vgl. [THÜR16, S. 19ff.]). Das Verfahren ordnet den Aufträgen Karten zu, die dem Kapazitätsbedarf des Auftrags für die einzelnen Arbeitsvorgänge entsprechen. Das Verfahren setzt sich aus zwei Kartenkreisläufen für die Auftragsfreigabe und die Auftragsannahme zusammen (siehe Abbildung 3-6).

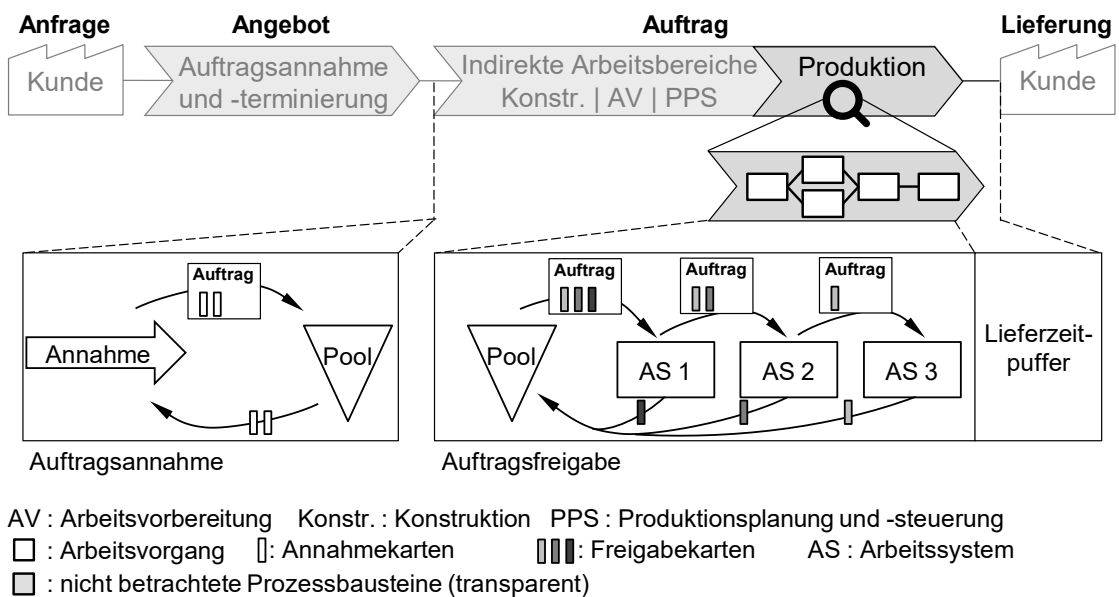


Abbildung 3-6: Kartenkreisläufe der Cobacabana für die Auftragsannahme und die Auftragsfreigabe (eigene Darstellung nach [THÜR16, S. 23])

Der Kartenkreislauf in der Fertigung regelt die Freigabe von Aufträgen. Die Freigabe eines neuen Auftrags erfordert dabei die ausreichende Anzahl an Karten der jeweiligen Arbeitssysteme. Die Karten in der Fertigung repräsentieren den direkten und indirekten

Bestand an den Arbeitssystemen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Arbeitssysteme nicht überlastet werden und die Durchlaufzeiten der Arbeitssysteme möglichst konstant sind. Nach der Bearbeitung eines Auftrags an einem Arbeitssystem wird die jeweilige Karte zum Auftragspool zurückgeführt und kann erneut für die Freigabe verwendet werden [LAND09, S. 99f.]. Die Auftragsfreigabe folgt damit der Logik einer Workload Control. Diese Logik verfolgt als Zielrichtung die Optimierung der Auslastung in der Fertigung, was Reihenfolgevertauschungen im Auftragszugang verursacht und damit insbesondere die Streuung der Terminabweichung negativ beeinflusst.

Der separate Kartenkreislauf für die Auftragsannahme regelt den Zufluss zum Auftragspool und ist insbesondere für die Terminierung der Aufträge notwendig. Jeder Auftrag erhält dem Kapazitätsbedarf entsprechend Auftragsannahmekarten für jedes zukünftig zu durchlaufende Arbeitssystem. Über die Anzahl der bereits vergebenen Auftragsannahmekarten jedes Arbeitssystems kann anschließend die Pooldurchlaufzeit bis zur Freigabe des Auftrags abgeschätzt werden. Nach der Auftragsfreigabe werden die Annahmekarten wieder frei und können erneut vergeben werden. Das Arbeitssystem mit dem größten Bestand im Auftragspool ist dabei durchlaufzeitbestimmend [LAND09, S. 100f.]. Die Cobacabana berücksichtigt keine Angebote in der Planung, weshalb das Verfahren erst nach der Auftragsstellung zum Einsatz kommen kann. Der Detaillierungsgrad des Verfahrens auf Ebene der Arbeitssysteme bzw. Arbeitsvorgänge erfordert zudem eine frühzeitige Erstellung von Arbeitsplänen, bevor eine Lieferzeit bestimmt werden kann.

Evaluationen der Cobacabana fokussieren sich auf die Durchlaufzeit und Terminabweichung (vgl. [THÜR16, S. 25f.]). Die Evaluation der Cobacabana betrachtet damit die Termintreue als die wichtigste Zielgröße von Auftragsfertigern. Sie erfolgt jedoch in einem stationären Zustand und kann deshalb bislang nicht beantworten, wie das Verfahren auf längerfristige Überlastsituationen reagiert. Außerdem ist bislang unklar, wie gut das Verfahren Unsicherheiten ausregeln kann oder wie die Cobacabana auf Fehlanwendungen reagiert.

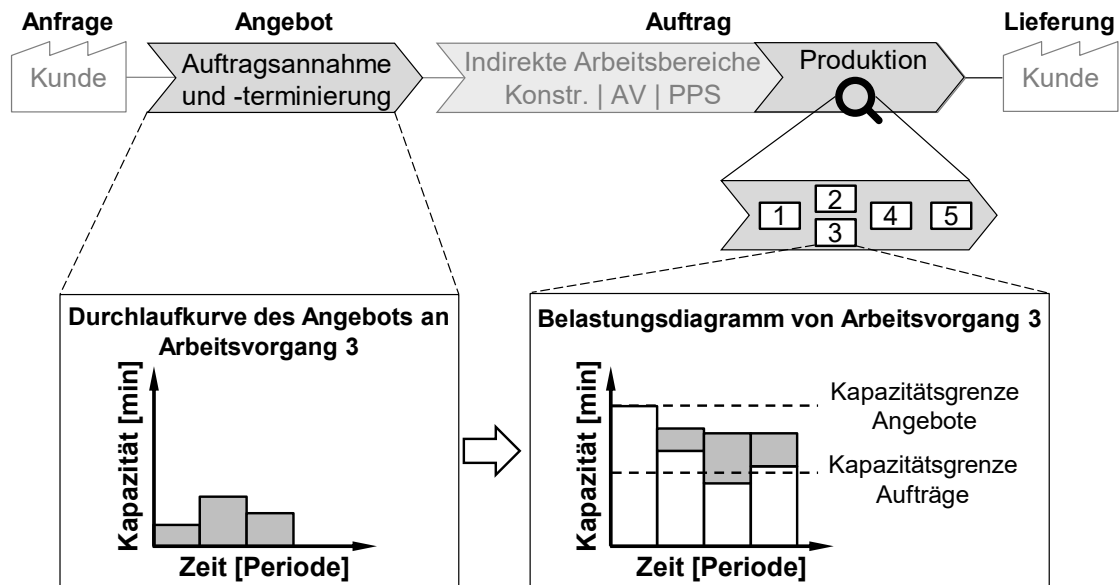
3.2.3 Terminplanung mit Durchlaufkurven

Die Planung mithilfe von Durchlaufkurven wurde bereits in den 1950er Jahren von Weinberg beschrieben [WEIN54, S. 30f.]. Brankamp erweitert das Verfahren auch für den Einsatz mit Angeboten [BRAN67, S. 53f.].

Die Autoren stellen den Verlauf des Kapazitätsbedarfs eines Auftrags an einem Arbeitssystem bei der kürzest möglichen Durchlaufzeit dar. Für jedes Arbeitssystem muss dabei eine eigene Durchlaufkurve erstellt werden. Die Belastungsdiagramme der einzelnen Arbeitssysteme überlagern die einzelnen Durchlaufkurven und stellen dadurch die Belastungssituation des jeweiligen Arbeitssystems über der Zeit dar (vgl. [WEIN54, S. 15-16; GRAB78, S. 116; ALME87, S. 64]).

Die Durchlaufkurven eines Auftrags können auf der Grundlage von Erfahrungswerten oder mit Netzplänen bestimmt werden. Die Anwendung von Erfahrungswerten ist jedoch nur bei einer vergleichbaren Belastungssituation zulässig [ALME87, S. 64-65]. Um den Aufwand bei der Ermittlung der Durchlaufkurven zu reduzieren, können bei einer großen

Anzahl gleichartiger Aufträge Standarddurchlaufkurven gebildet werden. Dabei werden entweder die Durchlaufkurven vergleichbarer Aufträge entsprechend der bestellten Stückzahl skaliert [WEIN54, S. 30-32], oder die Standarddurchlaufkurve eines Arbeitssystems über das Zusammenfassen der durchlaufenden Aufträge berechnet [ALME87, S. 65-66]. Die Erstellung der für das Verfahren notwendigen Durchlaufkurven erfordert detaillierte Daten der Arbeitssysteme bzw. Arbeitsvorgänge. Trotz der möglichen Vereinfachung mithilfe von Standarddurchlaufkurven verursacht dies einen erheblichen Aufwand und erschwert die Anwendbarkeit. Abbildung 3-7 zeigt die Durchlaufkurve eines Angebots für einen Arbeitsvorgang und das Belastungsdiagramm des Arbeitsvorgangs, in dem sich der Kapazitätsbedarf des Angebots widerspiegelt.



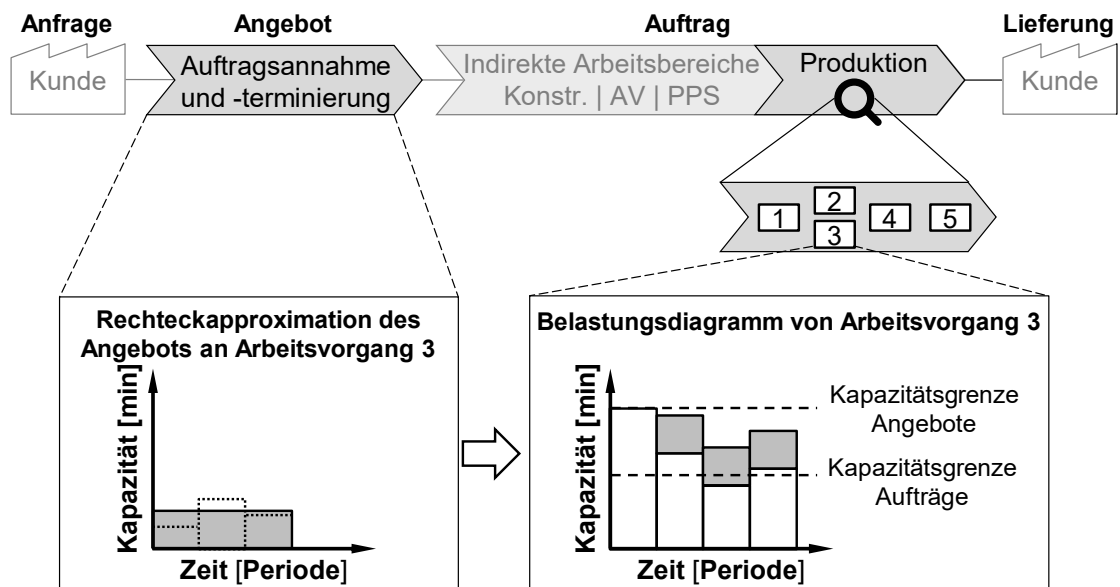
AV : Arbeitsvorbereitung Konstr. : Konstruktion PPS : Produktionsplanung und -steuerung
 □ : Arbeitsvorgang ■ : Kapazitätsbedarf des Angebots □ : Verplante Kapazität

Abbildung 3-7: Durchlaufkurve und Belastungsdiagramm eines Arbeitsvorgangs bei der Einplanung eines neuen Angebots (eigene Darstellung in Anlehnung an [ALME87, S. 65])

Die Durchlaufkurve stellt den Kapazitätsbedarf des Angebots über der Zeit dar. Diesen Kapazitätsbedarf muss der Planer zur Bestimmung des Liefertermins für jeden Arbeitsvorgang in das entsprechende Belastungsdiagramm einplanen. Brankamp berücksichtigt bei seinem Terminplanungssystem mit Durchlaufkurven auch Angebote in der Planung, indem er die Kapazitätsgrenze für Angebote im Belastungsdiagramm relativ zu deren Annahmquote erhöht. Durch die Ablehnung von Angeboten durch den Kunden soll sich die Überbelegung der Kapazitäten mit Angeboten ausgleichen [BRAN67, S. 53f.]. Die Planung mit Durchlaufkurven zielt hauptsächlich auf die Auslastung der Kapazitäten an den Arbeitssystemen ab. Die Termintreue ist nicht explizit berücksichtigt und auch nicht evaluiert. Auch existieren keine Evaluationen des Verfahrens in Bezug auf die Stabilität und Fehleranfälligkeit.

3.2.4 Rechteckapproximation in der Planung mit Durchlaufkurven

Die Rechteckapproximation vereinfacht die Planung mit Durchlaufkurven. Dabei gilt die Annahme, dass bei einer großen Anzahl gleichzeitig bearbeiteter Aufträge die genaue Form der Durchlaufkurve vernachlässigbar ist. Almenröder beziffert diesen Planungsumfang mit etwa 300 bis 400 einzuplanenden Aufträgen bzw. Angeboten [ALME87, S. 69]. Aus diesem Grund betrachtet die Rechteckapproximation nur die umschlossene Fläche der Durchlaufkurve und nähert diese Fläche durch eine konstante Belastung über der Durchlaufzeit an [WEIN54, S. 32-34]. Das Vorgehen der Durchlaufkurven ist vereinfacht, erfordert jedoch immer noch detaillierte Daten der Arbeitssysteme bzw. Arbeitsvorgänge und verursacht deshalb einen hohen Aufwand. Abbildung 3-8 zeigt das Vorgehen bei der Rechteckapproximation eines Angebots für einen Arbeitsvorgang und das Belastungsdiagramm des Arbeitsvorgangs, in dem sich der Kapazitätsbedarf des Angebots widerspiegelt.



AV : Arbeitsvorbereitung Konstr. : Konstruktion PPS : Produktionsplanung und -steuerung
 1 : Arbeitsvorgang ■ : Kapazitätsbedarf des Angebots □ : Verplante Kapazität
 □ : Durchlaufkurve ohne Rechteckapproximation

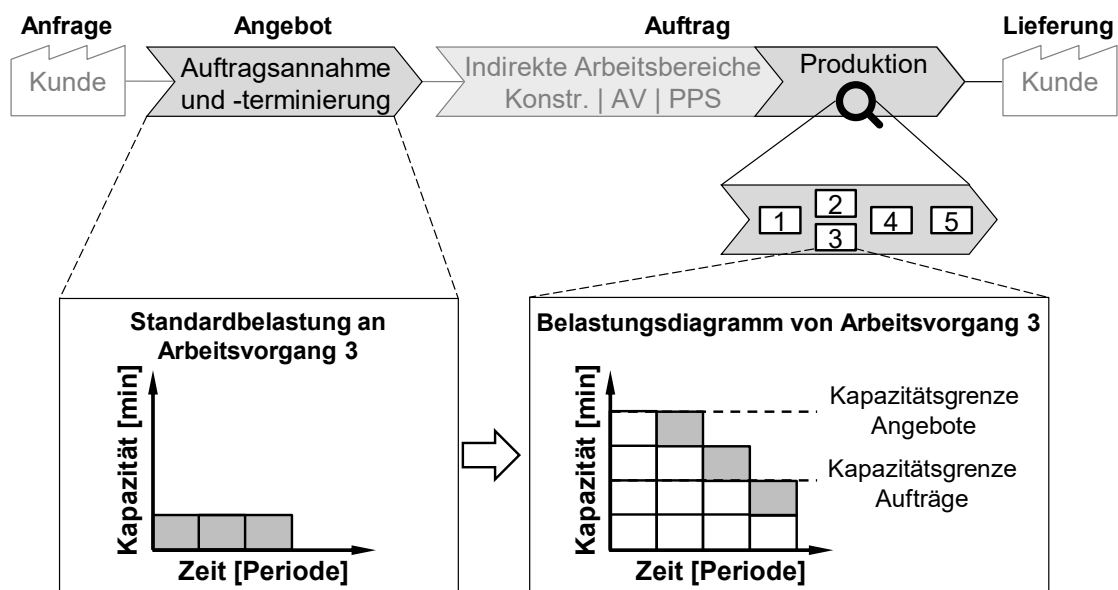
Abbildung 3-8: Rechteckapproximation und Belastungsdiagramm eines Arbeitsvorgangs bei der Einplanung eines neuen Angebots (eigene Darstellung in Anlehnung an [ALME87, S. 69])

Die Länge dieses Rechtecks entspricht der Durchlaufzeit eines Auftrags bzw. Angebots an einem Arbeitsvorgang. Die Höhe entspricht dem durchschnittlichen Kapazitätsbedarf am Arbeitsvorgang. Gestrichelt ist die Durchlaufkurve dargestellt, die durch die Rechteckapproximation vereinfacht wird. Die Einplanung in das Belastungsdiagramm und die Bestimmung der Liefertermine erfolgt analog zur Planung mit Durchlaufkurven.

Da die Rechteckapproximation auf der Planung mit Durchlaufkurven aufbaut, ist auch hier die Termintreue nicht berücksichtigt. Auch für dieses Verfahren existieren keine umfangreichen Evaluationen in Bezug auf die Stabilität und Fehleranfälligkeit.

3.2.5 Terminplanung mit Auftragszahlen

Die Planung mit Auftragszahlen ist eine weitere Vereinfachung der Planung mit Durchlaufkurven. Falls eine noch größere Anzahl an Aufträgen für die Planung vorliegt, kann demnach nicht nur die Form der Durchlaufkurve, sondern auch der genaue Kapazitätsbedarf der einzelnen Angebote vernachlässigt werden. Almenröder beziffert die notwendige Anzahl an Aufträgen bzw. Angeboten zur Anwendung der Planung mit Durchlaufzahlen mit etwa 500 bis 600 einzuplanenden Aufträgen bzw. Angeboten [ALME87, S. 73]. Die Einplanung in das Belastungsdiagramm erfolgt in diesem Fall mithilfe der Standardbelastungen durch Aufträge [WEIN54, S. 34-35]. Abbildung 3-9 zeigt das Vorgehen bei der Planung mit Auftragszahlen mithilfe der Standardbelastung eines Angebots an einem Arbeitsvorgang und das Belastungsdiagramm des Arbeitsvorgangs, in dem sich der Kapazitätsbedarf des Angebots widerspiegelt.



AV : Arbeitsvorbereitung Konstr. : Konstruktion PPS : Produktionsplanung und -steuerung
 □ : Arbeitsvorgang ■ : Kapazitätsbedarf des Angebots □ : Verplante Kapazität

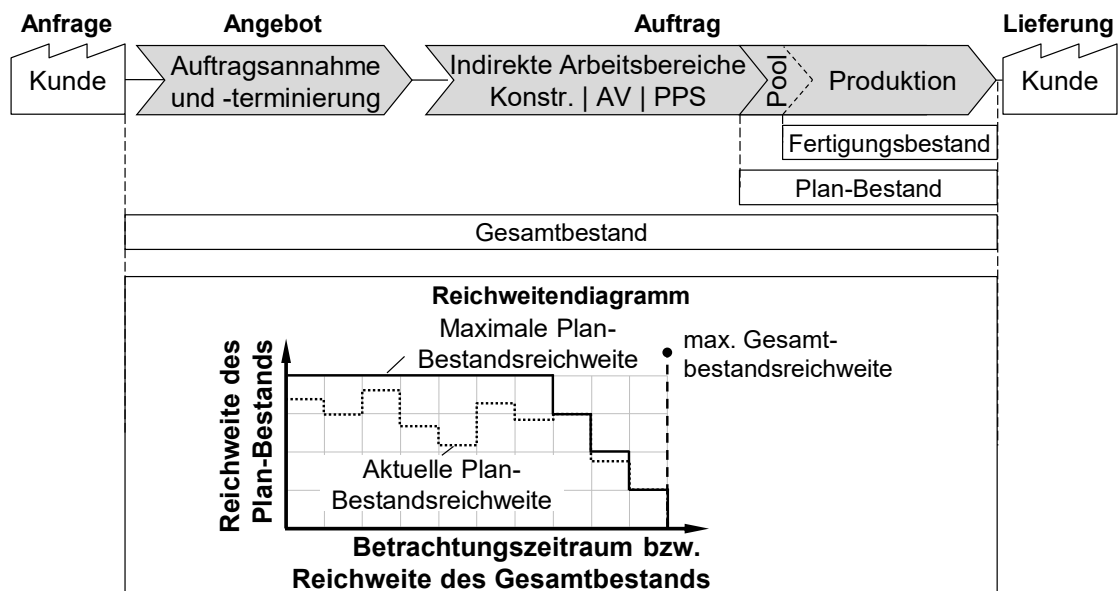
Abbildung 3-9: Auftragszahlenplanung eines Angebots an einem Arbeitsvorgang (eigene Darstellung, vgl. [ALME87, S. 73])

Der Kapazitätsbedarf eines Angebots entspricht in diesem Fall dem mittleren Kapazitätsbedarf aller vergangenen Aufträge am betrachteten Arbeitsvorgang. Das Belastungsdiagramm des Arbeitsvorgangs kann in diesem Fall durch die Multiplikation des mittleren Kapazitätsbedarfs mit dem Angebots- und Auftragsbestand in einer Planungsperiode ermittelt werden. Die Bestimmung der Liefertermine erfolgt auch hier wie bei der Planung mit Durchlaufkurven [WEIN54, S. 34-35]. Obwohl der Kapazitätsbedarf sehr stark abstrahiert ist und die Planung dadurch vereinfacht wird, werden die Arbeitspläne und darin enthaltenen Materialflüsse weiterhin für die Planung benötigt. Ansonsten weist die Planung mit Auftragszahlen ähnliche Defizite auf, wie die beiden vorherigen Verfahren.

3.2.6 Input - Output Control

Das Verfahren der Input – Output Control von Kingsman, Tatsiopoulos und Hendry stellt eine der umfassendsten Arbeiten der ingenieurwissenschaftlich geprägten Auftragsannahme und -terminierung dar (vgl. [KING89, S. 201f.; HEND93, S. 62f.; KING00, S. 75f.; KING02, S. 581f.]).

Die Autoren berücksichtigen neben der Terminplanung, mit einer Logik für die Auftragsfreigabe und Vorgaben für die Kapazitätssteuerung, wichtige Aufgaben der Fertigungssteuerung in ihrem Verfahren. Dadurch haben sie ein umfassendes System für die Planung und Steuerung von Auftragsfertigern geschaffen. Das Verfahren zur Auftragsannahme und -terminierung stellt den Bestand bzw. die Reichweite in den Mittelpunkt. Kingsman, Tatsiopoulos und Hendry betrachten dabei den gesamten Auftragsdurchlauf von der Kundenanfrage bis zur Fertigstellung. Abbildung 3-10 zeigt die betrachteten Bestände der Input-Output Control und die Darstellung der Planungssituation im Reichweitendiagramm.



AV : Arbeitsvorbereitung Konstr. : Konstruktion PPS : Produktionsplanung und -steuerung
 — : Maximale Reichweite des Plan-Bestands : Verplante Reichweite des Plan-Bestands

Abbildung 3-10: Bestände der Input-Output Control und Darstellung der Planungssituation im Reichweitendiagramm (eigene Darstellung in Anlehnung an [HEND93, S. 68])

Die Logik für die Auftragsannahme und -terminierung von Kingsman, Tatsiopoulos und Hendry basiert auf der Betrachtung des Auftragsdurchlaufs als hierarchische Kette von Beständen (siehe Abbildung 3-10). Dies umfasst neben den Aufträgen in der Produktion auch den Dispositionsbestand, also die auf die Freigabe wartenden Aufträge, und den Angebotsbestand. Diese Bestände sind durch Zugangs- und Abgangsbeziehungen miteinander verbunden [KING89, S. 199-201].

Auf Grundlage der Bestände und der Plan-Leistung der Fertigung berechnen die Autoren verschiedene Bestandsreichweiten. Angebote berücksichtigen sie dabei mit ihrer Annahmequote.

Der Plan-Bestand, also alle Aufträge im Pool vor der Fertigung oder in der Fertigung, und der Gesamtbestand, also alle Angebote und Aufträge im Unternehmen, werden mithilfe der jeweiligen Reichweite in der Auftragsannahme und -terminierung gesteuert. Dafür prüft das Verfahren für einen spezifischen Zugangszeitpunkt eines möglichen Auftrags die Einplanung im Betrachtungszeitraum. Der Zugangszeitpunkt ergibt sich dabei aus dem gewünschten Liefertermin abzüglich der Plan-Durchlaufzeit. Das Verfahren bewertet, ob die Einplanung des Auftrags die Reichweite des Plan-Bestands über die zulässige Grenze erhöhen würde. Ziel ist es, in der Terminplanung die Bestandsreichweite (aktuelle Plan-Bestandsreichweite) innerhalb der im Voraus festgelegten Grenzen (maximale Plan-Bestandsreichweite) zu halten und zu diesem Zweck die Liefertermine zu verschieben, Kapazitäten anzupassen oder Aufträge abzulehnen [KING89, S. 201-208].

Das Verfahren ist in der Praxis aufgrund der vielen Handlungsmöglichkeiten nicht einfach umzusetzen. Zum Beispiel soll der Anwender, insbesondere bei einer eingeschränkten Kapazitätsflexibilität, Anfragen aktiv ablehnen, um die Termintreue zu gewährleisten. Ob die Termintreue gefährdet ist, kann aus dem Reichweitendiagramm jedoch zumindest nicht unmittelbar abgeleitet werden. Den Fertigungsbestand steuern die Autoren über die zugehörige Auftragsfreigabe mit der Workload Control [HEND91, S. 876f.]. Dieses Verfahren verursacht Reihenfolgevertauschungen im Zugang, was die Termintreue negativ beeinflusst.

Die Verfahrensregeln und Planungsgrößen sind in den verschiedenen Veröffentlichungen nicht ganz einheitlich beschrieben. So steuert das Verfahren in [HEND93, S. 65f.] die Bestandsreichweite, in [KING00, S. 83f.] die Bestände. Die Bestände werden in [HEND93, S. 64] mit dem gesamten Kapazitätsbedarf eines Auftrags abgebildet. In [KING00, S. 83f.] bestimmt der Autor die Plan-Bestände je Arbeitssystem und aggregiert diese anschließend.

Die Evaluation des Verfahrens betrachtet die Wirkung auf Bestände, Durchlaufzeiten und Auslastungen (vgl. [KING02, S. 584ff.]). Die Termintreue wurde bei der Verfahrensevaluation genauso vernachlässigt wie die Regelungsfähigkeit des Verfahrens oder die Auswirkung von Fehlanwendungen.

Aufgrund des geringen Detaillierungsgrads der Bestände und der Möglichkeit, das Verfahren zu einem frühen Zeitpunkt ohne eine Betrachtung der Arbeitsvorgänge anzuwenden, wird es mit einem Detaillierungsgrad auf Ebene der gesamten Fertigung klassifiziert (siehe Abbildung 3-4).

3.3 Forschungsbedarf

Die zuvor beschriebenen Grundlagen der Produktionslogistik und Ansätze der Auftragsannahme und -terminierung haben den Stand der Forschung auf unterschiedliche Weise weiterentwickelt. In der Praxis ist die Auftragsannahme und -terminierung für die Unternehmen jedoch weiterhin mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. So gibt mehr

als die Hälfte der Unternehmen in einer Befragung an, ihren Kunden erst nach der Auftragsfreigabe verbindliche Liefertermine nennen zu können [BANK21, S. 48]. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass (1) bestehende Modelle der Produktionslogistik die Auftragsannahme und -terminierung nicht vollständig abbilden, (2) bestehende Verfahren zur Auftragsannahme und -terminierung nicht immer wirksam, nicht immer mit der Fertigungssteuerung abgestimmt sowie nicht immer einfach umzusetzen sind und (3) eine fehlerhafte Abwendung der Verfahren bislang nicht beurteilt werden kann. Es ergeben sich aus diesem Grund die folgenden Defizite:

Unvollständige Modellierung der Auftragsannahme und -terminierung

Die bestehenden Modelle der Produktionslogistik bilden die Auftragsannahme und -terminierung nicht vollumfänglich ab. Dies betrifft zum einen die Annahmequote und zum anderen den Plan-Abgang:

Unvollständige Modellierung der Annahmequote: Die Annahmequote wird in der Literatur aus dem Verhältnis angenommener zu abgelehnter Angebote bestimmt. Diese Betrachtungsweise ermöglicht es, die Belastung durch Angebote langfristig zu prognostizieren. Sie vernachlässigt jedoch kurzfristige Effekte auf die Belastung durch Angebote im Bestand, die aus abweichenden Rückmeldezeiten für die Annahme bzw. Ablehnung von Angeboten entstehen.

Unvollständige Modellierung des Plan-Abgangs: Bislang gibt es kein Modell, das die Unsicherheit im Plan-Abgang durch Angebote in der Terminplanung beschreibt. Dadurch ist es Planern nicht möglich, die Unsicherheit in der Planung abzuschätzen und frühzeitig Gegenmaßnahmen vorzubereiten.

Unzureichende Verfahren der Auftragsannahme und -terminierung

Bestehende Verfahren zur Auftragsannahme und -terminierung regeln die Termintreue nicht immer wirksam und berücksichtigen die Fertigungssteuerung nicht immer vollumfänglich bei der Verfahrensentwicklung. Zudem sind sie vergleichsweise schwierig praktisch umzusetzen.

Unzureichende Berücksichtigung logistischer Modelle: Die Verfahren berücksichtigen nicht die entwickelten logistischen Gesetzmäßigkeiten zur Termintreue und können diese deshalb auch nicht wirksam regeln. Den Rückstand und die Reihenfolgeabweichung als entscheidende Regelgrößen der Termintreue betrachten die Verfahren nicht explizit. Darüber hinaus verursachen insbesondere die Cobacabana und die Input-Output Control mit ihrer gesamten Konfiguration der PPS auch Zielkonflikte: Beide Verfahren schlagen eine Kombination der Auftragsannahme und -terminierung mit einer Auftragsfreigabe nach der Logik einer Workload Control vor. Diese Auftragsfreigabelogik zielt auf eine Maximierung der Auslastung ab, da Aufträge mit dem Ziel freigegeben werden, den Bestand an jedem Arbeitssystem konstant zu halten. Die Folge können Reihenfolgevertauschungen im Auftragspool vor der Freigabe sein. Beispielsweise werden Aufträge, die nicht über den Engpass laufen, tendenziell beschleunigt und andere Aufträge dementsprechend verzögert. Diese Reihenfolgevertauschungen beeinflussen die Streuung der Terminabweichung negativ (vgl. [LÖDD16, S. 85]).

Außerdem enthalten viele Verfahren keine Angebote, können deshalb den Plan-Abgang nicht prognostizieren und auch frühzeitig keine realistischen Liefertermine bestimmen. Die meisten Verfahren sind erst bei der Auftragsstellung anwendbar. Das klammert auf der einen Seite einen Großteil der Unsicherheiten aus und ermöglicht damit eine genauere Terminierung. Jedoch sind die Verfahren auf der anderen Seite für viele Unternehmen nicht anwendbar, da diese schon in den Angeboten verbindliche Liefertermine nennen müssen (vgl. [VDI83, S. 29-31]).

Unzureichende Integration der Fertigungssteuerung: Die Fertigungssteuerung wird bei der Entwicklung von Verfahren der Auftragsannahme und -terminierung nicht immer vollumfänglich mitgestaltet. Die meisten der zuvor beschriebenen Ansätze sind isoliert und unabhängig von einer konkreten Fertigungssteuerung entstanden. Die Cobacabana und die Input-Output Control haben mit der Workload Control ein Verfahren für die Auftragsfreigabe stark in die Planungslogik integriert. Als Reihenfolgebildung betrachten die Autoren unter anderem FIFO (vgl. [KING02, S. 582]), was die logistische Zielerreichung nicht explizit unterstützt. Die Notwendigkeit der Kapazitätssteuerung wird von den Autoren erwähnt und auch als wichtig eingestuft (vgl. [KING00, S. 90]), jedoch nicht mit einem detaillierten Verfahren unterstützt. Insgesamt fehlt den bestehenden Ansätzen eine vollumfängliche und abgestimmte Unterstützung der Auftragsannahme und -terminierung mit detaillierten Verfahren der Fertigungssteuerung.

Hohe Komplexität der Verfahren: Viele Verfahren erfordern komplizierte Entscheidungen und Handlungen von den Unternehmen, haben einen hohen Datenbedarf und stellen die Planungssituation nicht leicht nachvollziehbar dar. Die Planung der meisten bestehenden Verfahren erfolgt auf Ebene der Arbeitsvorgänge. Die dafür notwendigen Arbeitspläne und Vorgabezeiten der Arbeitsvorgänge sind jedoch zum frühen Zeitpunkt der Auftragsannahme nicht immer verfügbar, wie beispielsweise Hendry et al. herausstellen [HEND08, S. 463]. Dies erschwert die Umsetzung der Verfahren und verringert deren Planungsgenauigkeit, falls Schätzwerte verwendet werden. Darüber hinaus weist insbesondere die Input-Output Control komplizierte Regeln und Entscheidungsprobleme auf, die die Umsetzung des Verfahrens erschweren. Die komplizierte Umsetzung beginnt bei der Parametrisierung, die Simulationen erfordert [KING02, S. 582] und damit relativ aufwendig ist. Außerdem ist eine Eingangssteuerung durch eine Ablehnung von Aufträgen, wie Kingsman selber feststellt [KING00, S. 83], in der Praxis ein kompliziertes Entscheidungsproblem, da verschiedene weitere Unternehmensziele einfließen können. Eine Ablehnung von Aufträgen ist deshalb nicht immer umsetzbar. Wenn gleichzeitig die Kapazitäten nicht erhöht werden können, ist eine Überlastung der Fertigung unvermeidlich. Auch die Steuerung des Abgangs über Kapazitätsanpassungen ist nicht automatisiert umsetzbar, da vielfach ein Mitbestimmungsrecht der Mitarbeiter besteht und verschiedene Abteilungen eingebunden werden müssen. Es ist auch fraglich, ob immer eine Kapazitätsanpassung notwendig ist, insbesondere wenn die entstehende Terminabweichung gering ist und innerhalb des vorgesehenen Lieferzeitpuffers liegt. Zusammen mit weiteren Managemententscheidungen (vgl. [KING00, S. 88-90]) wie beispielsweise der Priorisierung einzelner Aufträge, entsteht eine Vielzahl möglicher Lösungen für das Terminierungsproblem, die gegeneinander abgewogen werden müssen. Diese Komplexität eröffnet auf der einen Seite zwar umfassende Handlungsspielräume,

erschwert auf der anderen Seite jedoch eine eindeutige Umsetzung. Außerdem sind die Planungsentscheidungen der bestehenden Verfahren sowie deren Auswirkung auf logistische Zielgrößen für den Planer häufig kaum nachvollziehbar. Dies gilt beispielsweise für das Belastungs- oder Reichweitendiagramm, das die logistischen Zielgrößen nicht direkt darstellt. Auch ermöglichen die Verfahren keine einfache Beurteilung der zukünftigen logistischen Zielerreichung. Der Kapazitätsbedarf pro Zeiteinheit (Engpass-terminierung, Durchlaufkurven, Rechteckapproximation und Auftragszahlenplanung), der Bestand (Cobacabana) oder die Reichweite (Input-Output Control) als Planungsgrößen ermöglichen keinen einfachen Rückschluss auf die Termintreue. Keines der Verfahren betrachtet den Rückstand und die Reihenfolgeabweichung als entscheidende Regelgrößen der Termintreue.

Mangelnde Beurteilung der Robustheit der Auftragsannahme und -terminierung

Die Robustheit von Verfahren der Auftragsannahme und -terminierung kann nicht immer vollumfänglich beurteilt werden. Dies betrifft insbesondere die Stabilität und Regelungsfähigkeit der Verfahren sowie die Robustheit der Verfahren gegen eine Fehlanwendung.

Mangelnde Beurteilung der Stabilität und Regelungsfähigkeit: Nicht für alle bestehenden Ansätze ist untersucht, wie gut sie in der Lage sind, die Termintreue zu gewährleisten und Unsicherheiten auszuregeln. Die Termintreue als wichtige logistische Zielgröße in der Auftragsfertigung werden für einige Verfahren nicht explizit untersucht (vgl. [KING02, S. 584f.]). Auch Autoren, die die Termintreue betrachten, nehmen keine Bewertung der Regelungsfähigkeit der Verfahren in Bezug auf die Eingangunsicherheiten vor (vgl. [THÜR16, S. 25f.]). Dies ist für den praktischen Einsatz jedoch von großer Relevanz, da Unsicherheiten, wie Störungen, zu großen kurzfristigen Verwerfungen führen können, die ein Verfahren zur Auftragsannahme und -terminierung selbstständig ausregeln sollte.

Mangelnde Beurteilung der Auswirkung von Fehlanwendungen: Bei bestehenden Ansätzen zur Auftragsannahme und -terminierung ist unklar, wie sich eine fehlerhafte Anwendung der Verfahren auf die logistische Zielerreichung auswirkt. Die bestehenden Verfahren wurden simulativ unter gültigen Modellprämissen, also mit genau den Annahmen, die bei der Verfahrensentwicklung getroffen wurden, evaluiert. Jedoch besteht auch bei gründlich entwickelten und umfassend evaluierten Verfahren der PPS die Gefahr einer Fehlanwendung im Praxiseinsatz. Dies verdeutlicht auch eine Umfrage unter deutschen Unternehmen, wonach die Mitarbeiter in vier von fünf Unternehmen die Entscheidung der PPS-Systeme nicht immer annehmen und diese manuell übersteuern [MUND 20b, S. 32]. Eine Fehlanwendung der entwickelten Verfahren in der Praxis kann demnach nicht ausgeschlossen werden. Jedoch kann für die bestehenden Ansätze nicht beantwortet werden, wie sich eine fehlerhafte Anwendung auf die Verfahren und die Ergebnisse der logistischen Zielerreichung auswirkt.

Der folgende Abschnitt beschreibt die Zielsetzung, die sich aus den vorgestellten Defiziten ergibt.

3.4 Zielsetzung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit leitet sich aus den in Abschnitt 3.3 hergeleiteten Defiziten her. Zusätzlich werden von Grabowski und Kambartel beschriebene Anforderungen an die Terminplanung von Auftragsfertigern einbezogen [GRAB78, S. 34-35]. Es ergeben sich folgende Ziele.

Modellierung der Auftragsannahme und -terminierung

Produktionslogistische Modelle ermöglichen es zum einen, valide Eingangsparameter für Verfahren der Produktionsplanung und -steuerung zu ermitteln und zum anderen, Veränderungen in der Produktion zu erklären und zielgerichtet darauf zu reagieren. Eine Modellierung der Annahmquote und der Unsicherheiten im Plan-Abgang sollen dies ermöglichen. Es ergeben sich folgende detaillierte Ziele:

Modellierung der Annahmquote: Systematische Unterschiede der Annahme- und Ablehnungszeit von Kunden für Angebote wirken sich auf den geplanten Abgang aus, da sich die Annahmquote aus dem Bestand der eingeplanten Angebote systematisch von der Annahmquote aus Vergangenheitsdaten unterscheidet. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es entsprechend, die Annahmquote aus dem Angebotsbestand zu modellieren, um systematische Fehleinschätzungen des Plan-Abgangs zu vermeiden.

Modellierung der Unsicherheiten im Plan-Abgang: Insbesondere der Plan-Abgang aus Angeboten unterliegt einer Unsicherheit. Eine Kenntnis dieser Unsicherheit ermöglicht es Unternehmen frühzeitig, mögliche Unter- oder Überschreitungen des Plan-Abgangs zu erkennen, zu bewerten und geeignete Gegenmaßnahmen vorzubereiten. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Unsicherheit im Plan-Abgang zu modellieren und Unternehmen dadurch eine frühzeitige Beurteilung dieser Unsicherheiten zu ermöglichen.

Entwicklung einer modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung

Eine modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung soll die Termintreue wirksam regeln, mit der Fertigungssteuerung abgestimmt und einfach anzuwenden sein. Es ergeben sich folgende detaillierte Ziele:

Wirksamkeit: Das Verfahren soll die Erreichung der logistischen Ziele wirksam unterstützen. Durch die Festlegung des Plan-Abgangs und der Plan-Reihenfolge wirkt es insbesondere auf die Regelgrößen der Termintreue. Über den Plan-Zugang hat das Verfahren jedoch auch Einfluss auf den Bestand, die Durchlaufzeit und die Auslastung. Entsprechend ist es Ziel der vorliegenden Arbeit, ein Verfahren zur Auftragsannahme und -terminierung zu entwickeln, das die Termintreue wirksam regeln kann, ohne andere Zielgrößen dafür aufzugeben.

Abgestimmte Konfiguration der Fertigungssteuerung: Nach der Auftragsannahme beeinflusst vor allem die Fertigungssteuerung die logistische Zielerreichung. Entsprechend ist es Ziel der vorliegenden Arbeit, die Konfiguration der Fertigungssteuerung so zu gestalten, dass sie die logistische Zielerreichung zusätzlich unterstützt.

Einfachheit: Je einfacher ein Verfahren ist, desto leichter können es Unternehmen umsetzen. Außerdem sinkt der Planungsaufwand, was den Unternehmen eine wirtschaftliche Planung ermöglicht. Dies setzt erstens einen geringen Datenbedarf des Verfahrens voraus, um die Umsetzung des Verfahrens zu begünstigen. Zweitens ist es notwendig, möglichst wenige und einfach festzulegende Verfahrensparameter zu verwenden. Die Anwendung des Verfahrens soll zudem leicht verständlich sein, indem die Verfahrenslogik einfache und nachvollziehbare Entscheidungen trifft. Darüber hinaus soll eine anschauliche Darstellung des Verfahrens dem Anwender erleichtern, Entscheidungen nachzuvollziehen und die Auswirkungen von bewussten oder unbewussten Abweichungen von der Planung beurteilen zu können. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die relevanten Verfahrensgrößen der Auftragsannahme und -terminierung anschaulich darzustellen, so dass Anwender die Terminplanung schnell und einfach beurteilen können. Darüber hinaus sollen Wirkzusammenhänge die Verfahrensgrößen mit den logistischen Zielgrößen verbinden, um frühzeitig die zukünftige logistische Zielerreichung abschätzen zu können.

Modellbasierte Bewertung der Auftragsannahme und -terminierung

Das Verfahren zur Auftragsannahme und -terminierung soll modellbasiert und möglichst vollumfänglich bewertet werden. Dafür soll zum einen die Stabilität des Verfahrens und seine Fähigkeit, Unsicherheiten auszuregeln, bewertet werden. Zum anderen sollen die Auswirkungen von Fehlanwendungen beurteilt werden. Es ergeben sich dafür folgende detaillierte Ziele:

Bewertung der Stabilität und Regelungsfähigkeit: Das Verfahren soll stabil auf Unsicherheiten reagieren und diese ausregeln können, so dass es für große Unsicherheiten anwendbar ist und die eingebrachten Unsicherheiten reduzieren kann. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Stabilität und Regelungsfähigkeit des zu entwickelnden Verfahrens zu bewerten.

Bewertung des Verhaltens unter irregulären Bedingungen: In der Praxis treten Abweichungen von Verfahrensannahmen oder die Verletzung von Verfahrensregeln regelmäßig auf. Das zu entwickelnde Verfahren zur Auftragsannahme soll daher bei irregulären Bedingungen wie einer ungenauen Parametrisierung oder manuellen Übersteuerung eingreifen und die Folgen der eingebrachten Abweichungen ausregeln können. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, die Robustheit des zu entwickelnden Verfahrens bei einer Fehlanwendung modellbasiert zu bewerten.

Die dargestellten Ziele dienen der Verfahrensentwicklung als Grundlage und sollen auch zur abschließenden Bewertung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung verwendet werden. Der folgende Abschnitt beschreibt Modelle der Auftragsannahme und -terminierung, die im Rahmen der Arbeit entstanden sind und das Verständnis für die Auftragsannahme und -terminierung erhöhen.

4 Modellierung der Auftragsannahme und -terminierung

Die Modellierung von Einfluss- und Stellgrößen ermöglicht es, zielgerichtete Verfahren der PPS zu entwickeln. Besonders relevant für die Auftragsannahme und -terminierung sind die Annahmequote und der Plan-Abgang.

Abschnitt 4.1 zeigt aus diesem Grund eine Modellierung der mittleren Annahmequote aus dem Angebotsbestand auf, die sich erheblich von der in der Literatur betrachteten Annahmequote aus Vergangenheitsdaten unterscheiden kann. In Abschnitt 4.2 wird ein Modell für die Unsicherheiten im Plan-Abgang beschrieben, das die Standardabweichung für den besonders unsicheren Plan-Abgang aus Angeboten berechnet. Abschnitt 4.3 zieht abschließend ein vorläufiges Zwischenfazit zu den Modellen und ihrem Beitrag zur Zielerreichung dieser Arbeit.

4.1 Modellierung der mittleren Annahmequote des Angebotsbestands

Die Annahmequote ist eine entscheidende Größe, um die zukünftige Belastung der Fertigung frühzeitig in der Planung berücksichtigen zu können. Wie in Abschnitt 2.3.2 bereits erläutert, wurde die Bestimmung der Annahmequote für Angebote aus Rückmeldedaten in der Literatur bereits eingehend untersucht.

Die Annahmequote offener Angebote kann bei unterschiedlichen Rückmeldezeiten der Kunden sehr stark und systematisch von der gemessenen Annahmequote aus Rückmeldedaten abweichen. Die Abweichung hängt dabei von der Rückmeldezeit der Kunden für angenommene Angebote (Kundenannahmezeit) und für abgelehnte Angebote (Kundenablehnungszeit) ab. Ist beispielsweise die Kundenablehnungszeit systematisch höher als die Kundenannahmezeit, verbleiben die abzulehnenden Angebote länger im Bestand und haben deshalb auch einen größeren Bestandsanteil. Dies kann der Fall sein, wenn viele Kunden sich beim Ablehnen von Angeboten nicht zurückmelden und dementsprechend die Gültigkeit der Angebote verstreicht. Im umgekehrten Fall einer Kundenablehnungszeit, die kleiner ist als die Kundenannahmezeit, ist der Bestandsanteil abzulehnender Angebote dementsprechend geringer als die Ablehnungsquote. Die Gleichungen (23) und (24) zeigen den Bestand für angenommene und abgelehnte Angebote in Abhängigkeit von der mittleren Annahmequote, der Kundenablehnungszeit, der Kundenannahmezeit und dem Zugang an Anfragen.

$$BA_{m,Ang.,an.} = ZUA_{m,Anf.} \cdot AQ_m \cdot ZAn_m \quad (23)$$

$$BA_{m,Ang.,ab.} = ZUA_{m,Anf.} \cdot (1 - AQ_m) \cdot ZAb_m \quad (24)$$

mit

AQ_m	Mittlere Annahmequote [%]
$BA_{m,Ang.,ab.}$	Mittlerer Bestand abzulehnender Angebote (in Anzahl Angeboten) [-]
$BA_{m,Ang.,an.}$	Mittlerer Bestand anzunehmender Angebote (in Anzahl Angeboten) [-]
ZAb_m	Mittlere Kundenablehnungszeit [BKT]
ZAn_m	Mittlere Kundenannahmezeit [BKT]
$ZUA_{m,Anf.}$	Mittlerer Zugang an Anfragen (in Anzahl Anfragen) [-]

Die unterschiedlichen Bestände und damit auch Anteile am Angebotsbestand haben zur Folge, dass sich die Annahmquote des Angebotsbestands von der mittleren Annahmquote aus Rückmeldedaten unterscheidet.

Ein Zahlenbeispiel mit einer Anfragerate von zehn Anfragen pro Tag und einer Annahmquote aus Rückmeldedaten von 50% soll den Effekt verdeutlichen. Es wird eine mittlere Kundenannahmezeit der Angebote von zwei Tagen und eine mittlere Kundenablehnungszeit der Angebote von vier Tagen angenommen. Im Angebotsbestand befinden sich in diesem Fall im Mittel doppelt so viele Angebote, die von den Kunden abgelehnt werden (20 von 30 Angebote), wie Angebote, die angenommen werden (10 von 30 Angebote). Die Annahmquote des Angebotsbestands liegt demnach nur bei einem Drittel.

Dauert die Ablehnung von Angeboten durch die Kunden systematisch länger als die Annahme, befinden sich mehr vom Kunden abzulehnende Angebote im Bestand offener Angebote, als die Annahmquote aus Rückmeldedaten suggeriert. Die Einplanung mit der mittleren Annahmquote aus Rückmeldedaten würde in diesem Fall mehr Kapazitäten für Angebote belegen, als diese benötigen. Brauchen die Kunden hingegen systematisch länger für die Annahme der Angebote als für deren Ablehnung, befinden sich im Mittel mehr erfolgreiche Angebote im Bestand. Die Folge wäre eine Unterschätzung des zukünftigen Kapazitätsbedarfs, worauf Rückstände und Terminabweichungen folgen würden. Unternehmen können diesen Effekt berücksichtigen indem sie die Annahmquote des Angebotsbestands berechnen und für die Auftragsannahme und -terminierung verwenden. Diese berücksichtigt unterschiedliche Zeiten für die Annahme bzw. Ablehnung von Angeboten (25).

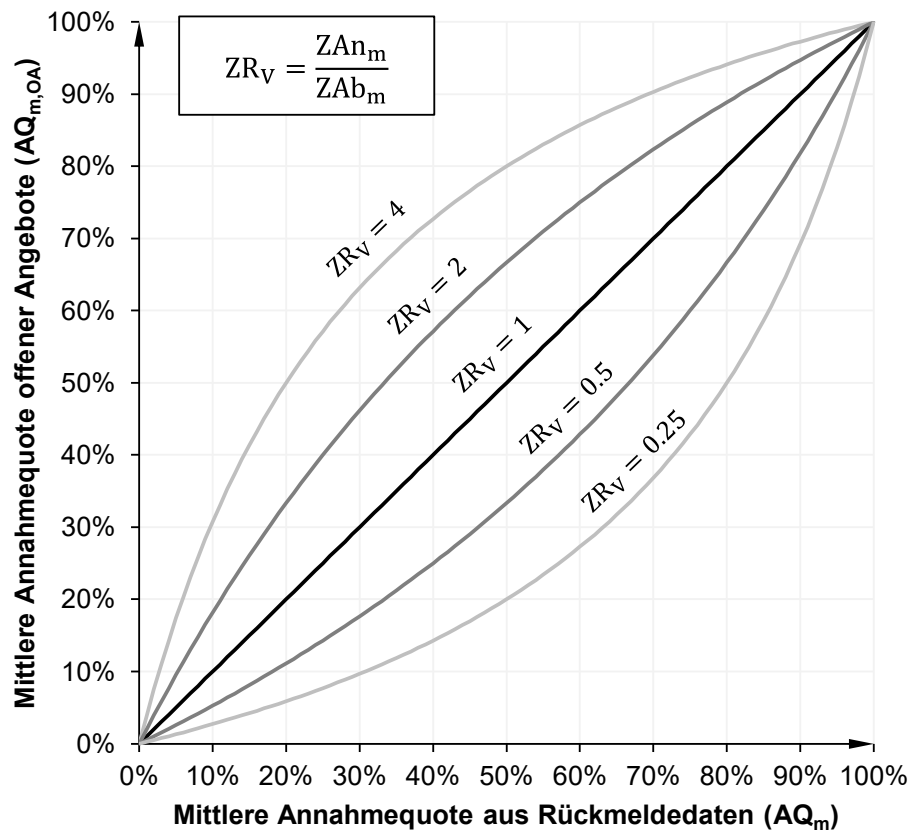
$$AQ_{m,OA} = \frac{ZAn_m \cdot AQ_m}{ZAn_m \cdot AQ_m + ZAb_m \cdot (1 - AQ_m)} \cdot 100 \quad (25)$$

mit

AQ_m	Mittlere Annahmquote [%]
$AQ_{m,OA}$	Mittlere Annahmquote offener Angebote [%]
ZAb_m	Mittlere Kundenablehnungszeit [BKT]
ZAn_m	Mittlere Kundenannahmezeit [BKT]

Die Unterschiede zwischen der Annahmquote aus Rückmeldedaten und der Annahmquote offener Angebote sind vom Rückmeldezeitverhältnis der mittleren Kundenannahmezeit zur mittleren Kundenablehnungszeit abhängig. Abbildung 4-1 zeigt die

Zusammenhänge für unterschiedliche Verhältnisse der Kundenrückmeldezeiten bei Angebotsannahmen und Angebotsablehnungen.



ZAn_m : Mittlere Kundenannahmezeit [BKT]
 ZAb_m : Mittlere Kundenablehnungszeit [BKT]
 ZR_v : Kundenrückmeldezeitverhältnis [-]

Abbildung 4-1: Zusammenhang der mittleren Annahmequote offener Angebote und der mittleren Annahmequote aus Rückmeldedaten für verschiedene Rückmeldezeitverhältnisse

Die Annahmequote offener Angebote entspricht der Annahmequote aus Rückmeldedaten, falls die mittlere Kundenannahmezeit der mittleren Kundenablehnungszeit entspricht. Wenn Kunden im Mittel mehr Zeit für die Annahme als für die Ablehnung von Angeboten benötigen, ist die Annahmequote offener Angebote größer als die mittlere Annahmequote aus Rückmeldedaten. Kunden nehmen also systematisch mehr aktuell eingeplante Angebote an, als es die Annahmequote aus Rückmeldedaten suggeriert. Gegenzug gilt, falls Kunden im Mittel länger für die Ablehnung von Aufträgen benötigen. In diesem Fall werden weniger Angebote aus dem Bestand in Aufträge umgewandelt, als es die Annahmequote aus Rückmeldedaten vermuten lässt.

Die Modellierung wurde mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation evaluiert. Die Simulationsergebnisse können Anhang A 1 entnommen werden.

4.2 Modellierung von Unsicherheiten im Plan-Abgang

Der voraussichtliche Plan-Abgang bildet die Grundlage der Terminplanung mit dem Durchlaufdiagramm. Die Plan-Abgänge, insbesondere der Plan-Abgang aus offenen Angeboten, unterliegen aufgrund der Annahmeentscheidung und der unsicheren Auftragsinhalte einer statistischen Unsicherheit. Die Varianz und die Standardabweichung können als wichtigste statistische Streumaße diese statistischen Unsicherheiten ausdrücken [FAHR16, S. 231].

Für die Kundenentscheidung über ein Angebot können nur die zwei Ereignisse Annahme oder Ablehnung eintreten. Die langfristige mittlere Annahmeentscheidung drückt die Annahmequote aus. Kurzfristig besteht jedoch eine Unsicherheit der Annahmeentscheidung jedes einzelnen Angebots, die den statistischen Gesetzmäßigkeiten der Binomialverteilung folgt (vgl. [FAHR16, S. 235f.]). Gleichung (26) stellt diesen Zusammenhang über die Standardabweichung des Plan-Abgangs aufgrund der Unsicherheit in der Annahmeentscheidung dar.

$$AB_{s,Plan,AQ}(t) = \sum_{j=1}^{AnzAng} ZAU_{Ang,j} \cdot \sqrt{AQ_{m,OA} \cdot (1 - AQ_{m,OA})} \quad \forall j \text{ mit } TAE_{Plan} \leq t \quad (26)$$

mit

$AB_{s,Plan,AQ}$	Standardabweichung des Plan-Abgangs aus offenen Angeboten aufgrund der Annahmeentscheidung [Std.]
AnzAng	Anzahl Angebote [-]
$AQ_{m,OA}$	Mittlere Annahmequote offener Angebote [%]
TAE_{Plan}	Plan-Endtermin
t	Zeit [BKT]
$ZAU_{Ang,j}$	Arbeitsinhalt von Angebot j [Std.]

Die Standardabweichung des Abgangs in Anzahl Aufträgen ergibt sich aus der Anzahl der binomialverteilten Zufallsentscheidungen und der Eintrittswahrscheinlichkeit (vgl. [FAHR16, S. 237]). Da diese Berechnung eine Standardabweichung des Plan-Abgangs in Anzahl Aufträgen ergibt, muss das Ergebnis für jeden Auftrag mit dem Arbeitsinhalt multipliziert werden.

Der Auftragsinhalt unterliegt, insbesondere zum frühen Zeitpunkt der Angebotsstellung, einer Unsicherheit, da die Auftragszeit zu diesem Zeitpunkt in der Regel nur geschätzt wird. Für die Modellierung dieser Unsicherheit wird in dieser Arbeit eine Normalverteilung der Auftragszeit angenommen, da sich bei der Ermittlung des Auftragsinhaltes viele Zufallseffekte überlagern. Dies lässt sich entsprechend des zentralen Grenzwertsatzes durch eine Normalverteilung approximieren [WALZ17, S. 451]. Die Unsicherheiten in Form der Varianz der einzelnen Arbeitsinhalte addieren sich, da die Arbeitsinhalte einzelner Angebote unabhängig voneinander sind (vgl. [WALZ17, S. 290-291]). Die Gewichtung der Arbeitsinhalte der Angebote mit der Annahmequote entspricht ihrer Einplanung in das Durchlaufdiagramm. Gleichung (27) zeigt die aus diesen Überlegungen resultierende Standardabweichung des Plan-Abgangs aus einer Unsicherheit der Auftragszeit.

$$AB_{s,Plan,ZAU}(t) = \sum_{j=1}^{AnzAng} \sqrt{AQ_{m,OA} \cdot ZAU_{s,j}^2} \quad \forall j \text{ mit } TAE_{Plan} \leq t \quad (27)$$

mit

$AB_{s,Plan,ZAU}$	Standardabweichung des Plan-Abgangs aus offenen Angeboten [Std.]
$AnzAng$	Anzahl Angebote [-]
$AQ_{m,OA}$	Mittlere Annahmequote offener Angebote [%]
TAE_{Plan}	Plan-Endtermin
t	Zeit [BKT]
$ZAU_{s,j}$	Standardabweichung der Auftragszeit für Angebot j [Std.]

Aus der Unsicherheit der Annahmeentscheidung und der Auftragszeit ergibt sich die Gesamtunsicherheit des Plan-Abgangs aus Angeboten. Auch in diesem Fall lassen sich die Varianzen addieren. Die Standardabweichung des Plan-Abgangs aus offenen Angeboten ergibt sich nach Gleichung (28).

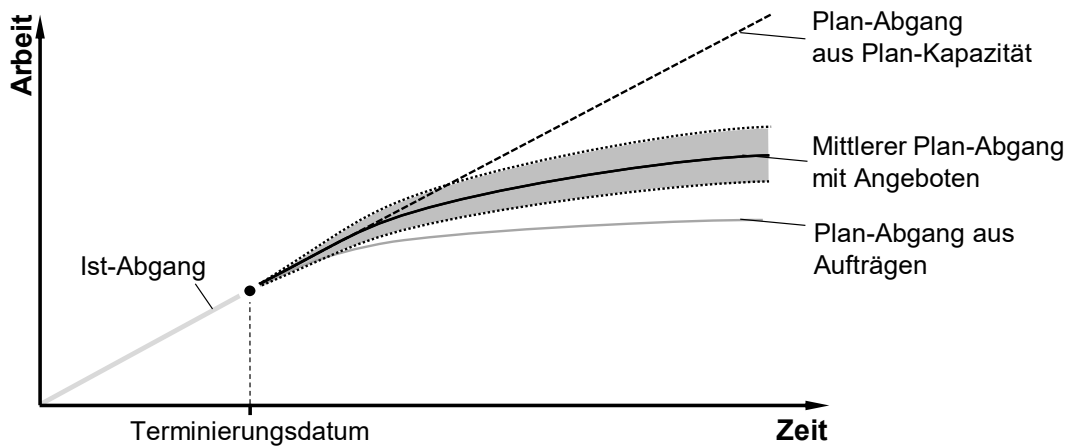
$$AB_{s,Ang,Plan}(t) = \sum_{j=1}^{AnzAng} \sqrt{AQ_{m,OA} \cdot (ZAU_{s,j}^2 + (1 - AQ_{m,OA}) \cdot ZAU_{Ang,j}^2)} \quad \forall j \text{ mit } TAE_{Plan} \leq t \quad (28)$$

mit

$AB_{s,Ang,Plan}$	Standardabweichung des Plan-Abgangs aus offenen Angeboten [Std.]
$AnzAng$	Anzahl Angebote [-]
$AQ_{m,OA}$	Mittlere Annahmequote offener Angebote [%]
TAE_{Plan}	Plan-Endtermin
t	Zeit [BKT]
$ZAU_{Ang,j}$	Arbeitsinhalt von Angebot j [Std.]
$ZAU_{s,j}$	Standardabweichung der Auftragszeit für Angebot j [Std.]

Die Modellierung dieser statistischen Unsicherheiten zeigt, wie sich Angebote auf die Auftragsannahme und -terminierung auswirken: Je mehr Angebote sich in der Planung befinden, desto höher ist die Unsicherheit des Plan-Abgangs. Ein wichtiger Stellhebel, um die Unsicherheit zu reduzieren, ist damit die Angebotsgültigkeit, mit der ein Unternehmen die Anzahl der Angebote in der Planung reduzieren kann. Die Modellierung ermöglicht es dem Anwender der Terminplanung weiterhin, kurzfristige Schwankungen besser abzuschätzen. Er kann anschließend Vorbereitungen treffen, um beispielsweise die kurzfristige Kapazitätsflexibilität anzupassen und auf die zu erwartenden Unsicherheiten einzustellen. Für diesen Zweck können die Unsicherheiten im Durchlaufdiagramm

visualisiert werden. Abbildung 4-2 zeigt diese Visualisierung der Unsicherheiten im Plan-Abgang mit Angeboten im Durchlaufdiagramm.



☐ : Unsicherheit des Plan-Abgangs mit Angeboten (z.B. 68%-Konfidenzintervall)

Abbildung 4-2: Darstellung der Unsicherheiten des Plan-Abgangs im Durchlaufdiagramm

Durch die Darstellung der Unsicherheiten kann der Anwender die Wahrscheinlichkeit und Größe einer Über- oder Unterlast der Fertigung einschätzen und entsprechende Vorkehrungen treffen. Der Unsicherheitsbereich kann dabei beispielsweise entweder ein, zwei oder drei Standardabweichungen abdecken, um entsprechend den Bereich des Plan-Abgangs mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 68%, 95% oder 99,7% abzubilden. Die Gleichungen (29) und (30) ermöglichen die Berechnung der Obergrenze bzw. Untergrenze des Unsicherheitsbereichs.

$$AB_{KI,OG}(T_n) = \sum_{T=T_1}^{T_n} AB_{ges.,Plan}(T) + AnzS \cdot AB_{s,Ang.,Plan}(T) \quad (29)$$

$$AB_{KI,UG}(T_n) = \sum_{T=T_1}^{T_n} AB_{ges.,Plan}(T) - AnzS \cdot AB_{s,Ang.,Plan}(T) \quad (30)$$

mit

$AB_{ges.,Plan}$	Plan-Abgang mit Angeboten [Std.]
$AB_{KI,OG}$	Obergrenze des Konfidenzintervalls des Abgangs [Std.]
$AB_{KI,UG}$	Untergrenze des Konfidenzintervalls des Abgangs [Std.]
$AB_{s,Ang.,Plan}$	Standardabweichung des Plan-Abgangs aus offenen Angeboten [Std.]
$AnzS$	Anzahl der Standardabweichungen für das Konfidenzintervall [-]
T_1	Erster Tag des Untersuchungszeitraums [BKT]
T_n	Tag, für den der Abgang berechnet wird [BKT]

Im dargestellten Beispiel liegt ein Teil des Unsicherheitsbereichs oberhalb des Plan-Abgangs aus Plan-Kapazität. Die Differenz der Obergrenze des Unsicherheitsbereichs für den Plan-Abgang mit Angeboten und des Plan-Abgangs aus Plan-Kapazität entspricht dem möglichen Rückstand, der aufgrund der Unsicherheiten entstehen kann. Die

Wahrscheinlichkeit, dass der Plan-Abgang oberhalb dieses Wertebereichs liegt, kann je nach Anzahl der gewählten Standardabweichung mit etwa 16%, 2,5% bzw. 0,15% angegeben werden.

Mit dem möglichen Rückstand kann der Anwender die Terminabweichung abschätzen, die sich aus der Unsicherheit der Abschätzung des Handlungsbedarfs ergibt und entsprechende Handlungen vorbereiten.

Die Modellierung wurde mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation evaluiert. Die Simulationsergebnisse können Anhang A 2 entnommen werden.

4.3 Zwischenfazit zur Modellierung

Die Modellierungen der mittleren Annahmquote aus dem Angebotsbestand und der Unsicherheiten im Plan-Abgang können die Auftragsannahme und -terminierung erheblich unterstützen.

Modellierung der Annahmquote: Die Annahmquote aus dem Angebotsbestand ermöglicht es, die systematischen Unterschiede bei einer unterschiedlichen Annahme- und Ablehnungszeit in der Auftragsannahme zu erklären und in die Terminplanung einzubeziehen. Dies ermöglicht es, den Plan-Abgang aus Angeboten genauer vorherzusagen als mit dem langfristigen Mittelwert der Annahmquote. Eine systematische Über- oder Unterbelastungen der Fertigung kann dadurch vermieden werden.

Modellierung der Unsicherheiten im Plan-Abgang: Die Unsicherheiten im Plan-Abgang von Angeboten resultieren aus der Annahmdecision sowie der Unsicherheit der Auftragsinhalte und können starke Abweichungen der Plan-Abgänge verursachen. Das Modell für die Unsicherheiten im Plan-Abgang von Angeboten erlaubt es, mögliche Unter- oder Überschreitungen des Plan-Abgangs zu berechnen. Unternehmen können so zum einen rechtzeitig Maßnahmen ergreifen, um Kapazitätsanpassungen vorzubereiten. Zum anderen hilft das Modell die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung auszulegen. Die Begrenzung des Angebotsbestands durch eine Angebotsgültigkeit kann die Unsicherheiten begrenzen. Mit Hilfe des Modells kann eine Abstimmung zwischen der Angebotsgültigkeit und der Kapazitätsflexibilität oder möglicherweise auch dem Lieferzeitpuffer erfolgen, um so möglichen Risiken zu begegnen.

Insgesamt machen die Modelle die Auftragsannahme und -terminierung nachvollziehbar. Sie fließen im Folgenden in die Entwicklung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung ein und ermöglichen damit eine zielgerichtete Entwicklung des Verfahrens.

5 Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung

Die Auftragsannahme und -terminierung hat einen großen Einfluss auf logistische Zielgrößen wie die Auslastung oder die Termintreue. Dadurch kann sie im erheblichen Maß zum logistischen Erfolg eines Unternehmens beitragen, diesen jedoch bei einer ungeeigneten Umsetzung der Aufgabe auch gefährden. Bestehende Ansätze weisen einen hohen Detaillierungsgrad auf, berücksichtigen jedoch nicht alle modellierten logistischen Gesetzmäßigkeiten. Dieses Kapitel stellt eine modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung vor, die es Auftragsfertigern ermöglicht, zu einem frühen Zeitpunkt und mit einem geringen Datenbedarf eine wirksame Terminplanung durchzuführen. Kernaspekte dieses Verfahrens wurden im Rahmen eines DFG-Forschungsprojekts entwickelt und veröffentlicht (vgl. [MUND 20a]). Eine Erweiterung des Verfahrens für Eilaufträge ist dabei ebenfalls entstanden [MUND22].

Abschnitt 5.1. ordnet das Konzept der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung in den Kontext der Produktionsplanung und -steuerung ein und verdeutlicht dabei die Stellhebel der Termin- und Kapazitätsplanung. Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung beruht auf der Gegenüberstellung des Plan-Abgangs und der Kapazität in einem Durchlaufdiagramm. Die Konstruktion dieses Durchlaufdiagramms für die Planung und verschiedene Planungssituationen zeigt Abschnitt 5.2. Die Bestimmung einer verbindlichen Lieferzeit für die Angebotsstellung mithilfe des Durchlaufdiagramms sowie die Einplanung der Angebote und der späteren Aufträge stellt Abschnitt 5.3 dar. Anschließend beschreibt Abschnitt 5.4 ein Konzept für eine Konfiguration der Fertigungssteuerung, die die entwickelte modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung integriert. Abschließend zieht Abschnitt 5.5 ein Zwischenfazit zur modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung.

5.1 Stellhebel der Termin- und Kapazitätsplanung

Eine modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung gliedert sich in die bestehenden Modelle der Produktionsplanung und -steuerung ein, um ihre Einflüsse auf die logistischen Regel-, Stell- und Zielgrößen beurteilen und Wechselwirkungen mit der Fertigungssteuerung untersuchen zu können. Das in Abschnitt 2.5 beschriebene Modell der Fertigungssteuerung stellt diese Wirkzusammenhänge bereits umfassend dar. Auf Seiten der Produktionsplanung beschränkt sich das Modell der Fertigungssteuerung auf

die Auftragserzeugung und wurde daher um die Aufgaben der Termin- und Kapazitätsplanung erweitert, damit es auch die Wirkzusammenhänge der in dieser Arbeit entwickelten Auftragsannahme und -terminierung abbilden kann (siehe Abbildung 5-1).

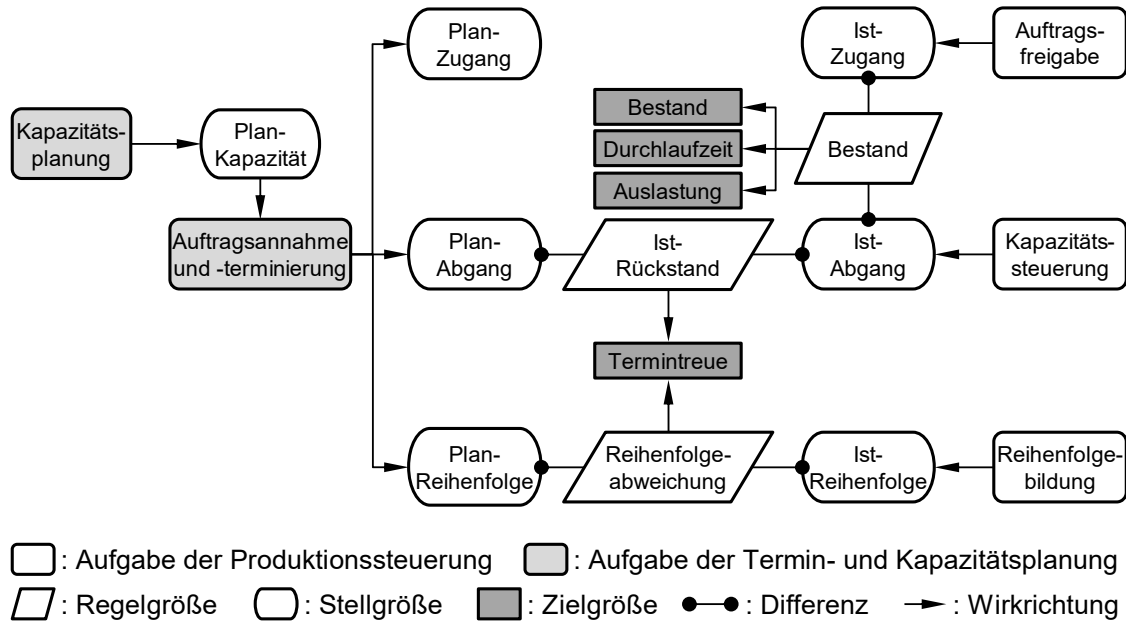


Abbildung 5-1: Um die Termin- und Kapazitätsplanung erweitertes Modell der Fertigungssteuerung (in Anlehnung an [LÖDD16, S. 8])

Die *Kapazitätsplanung* beeinflusst die Auftragsannahme und -terminierung entscheidend, da sie mit der Plan-Kapazität eine wichtige Stellgröße festlegt. Die Plan-Kapazität dient der Auftragsannahme und -terminierung als Eingangsgröße, um den Plan-Abgang festzulegen.

Die *Auftragsannahme und -terminierung* legt durch die Bestimmung der Plan-Endtermine von Angeboten und Aufträgen den Plan-Abgang fest. Aus dem Plan-Abgang ergeben sich über die Plan-Durchlaufzeiten die Plan-Termine für die Arbeitsvorgänge und der Plan-Starttermin des Auftrags. Dadurch legt die Auftragsannahme und -terminierung auch den Plan-Zugang und die Plan-Reihenfolge fest. Kann der Plan-Abgang nicht mit der vorgesehenen Plan-Kapazität realisiert werden, entsteht bereits in der Planung ein voraussichtlicher Plan-Rückstand. Dieser Plan-Rückstand wirkt sich analog zum Ist-Rückstand negativ auf die Termintreue aus. Der Plan- und Ist-Rückstand unterscheiden sich durch die Reaktionsmöglichkeiten: Auf einen bereits entstandenen Ist-Rückstand kann ein Unternehmen durch die Kapazitätssteuerung lediglich reagieren. Dahingegen kann ein Unternehmen bereits frühzeitig agieren, um einen voraussichtlichen Plan-Rückstand noch zu verhindern. Die Stellhebel dafür sind, wie von Kingsman bereits beschrieben, die Anpassung des Plan-Abgangs durch die Auftragsannahme und -terminierung sowie die Anpassung der Plan-Kapazität durch die Kapazitätsplanung [KING89, S. 201-208].

Die rechte Seite der Abbildung entspricht dem Modell der Fertigungssteuerung (siehe Abschnitt 2.5). In diesem kann die *Kapazitätssteuerung* mit einer Kapazitätsanpassung auf den Ist-Abgang einwirken und damit auf einen gemessenen Ist-Rückstand reagieren.

Die *Auftragsfreigabe* steuert den Ist-Zugang zur Fertigung und hat damit einen Einfluss auf den Bestand. Der Bestand ist wiederum selbst eine Zielgröße, wirkt sich darüber hinaus aber auch maßgeblich auf die Auslastung und die Durchlaufzeit aus. Die *Reihenfolgebildung* legt an den Arbeitssystemen die Ist-Reihenfolge fest. Die Differenz aus Ist- und Plan-Reihenfolge ergibt Reihenfolgeabweichungen, die sich negativ auf die Termintreue auswirken.

Aufgabe der Kapazitätsplanung

Die *Kapazitätsplanung* liefert mit der Plan-Kapazität eine wesentliche Eingangsgröße für die Auftragsannahme und -terminierung. Eine auf diese Aufgabe abgestimmte Kapazitätsplanung wirkt sich positiv auf die logistischen Zielgrößen aus. Eine ungünstige Konfiguration hingegen kann der Auftragsannahme und -terminierung entgegenlaufen und die logistische Zielerreichung verschlechtern. Darüber hinaus kann ein abgestimmtes Gesamtkonzept für die Produktionsplanung auch die Umsetzbarkeit des PPS-Systems in der Praxis erleichtern. Die Kapazitätsplanung wird in der vorliegenden Arbeit nicht im Detail betrachtet und implementiert. Folgende Gedanken sollen aber veranschaulichen, wie eine sinnvolle Kombination der Kapazitätsplanung mit der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung gelingen kann.

Die kumulierte Darstellung der Plan-Abgänge im Durchlaufdiagramm zeigt frühzeitig potentielle Rückstände der Produktion auf und ist damit auch für die Kapazitätsplanung nutzbar. Zeitweise Über- oder Unterbelastungen der Produktion können erkannt und mithilfe von Kapazitätsanpassungen gelöst werden. Der Vorlauf, mit der eine potentielle Kapazitätslücke erkannt wird, ist dabei größer als bei einer Kapazitätsplanung, die nur bestätigte Kundenaufträge oder Fertigungsaufträge berücksichtigt. Abbildung 5-2 zeigt das Prinzip einer solchen Kapazitätsplanung mit dem Durchlaufdiagramm.

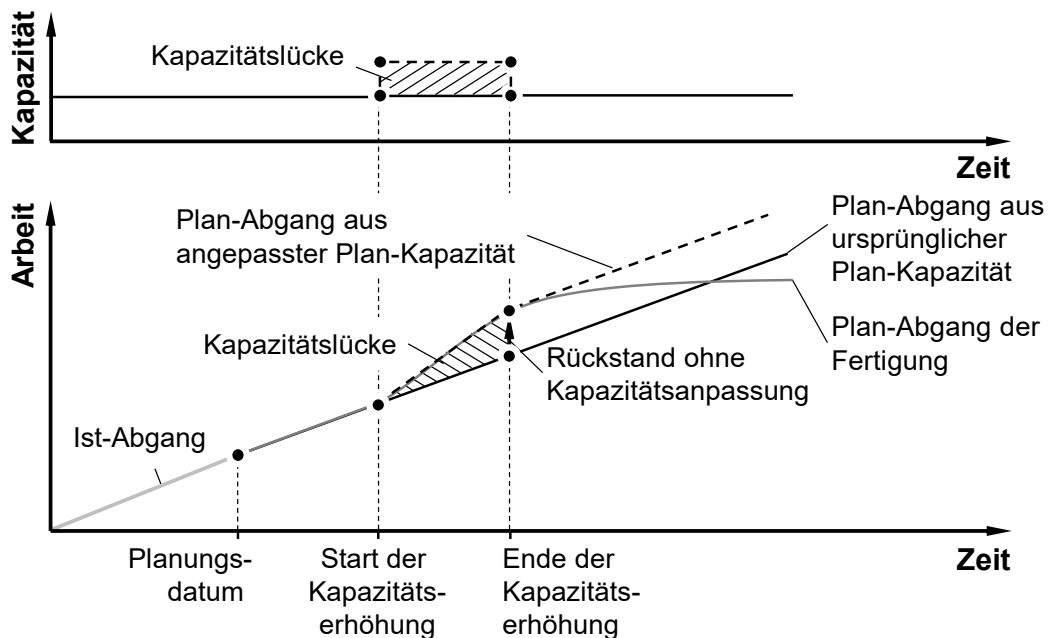


Abbildung 5-2: Prinzip der Kapazitätsplanung mit dem Durchlaufdiagramm

Im Durchlaufdiagramm (siehe Abbildung 5-2 unten) übersteigt der Plan-Abgang aus Angeboten den Plan-Abgang aus der ursprünglich geplanten Kapazität. Falls keine Anpassung der Kapazität erfolgt, ist kurzzeitig mehr Kapazität verplant als verfügbar. Diese Kapazitätslücke hätte einen Rückstand der Produktion und damit eine positive Terminabweichung der betroffenen Aufträge zur Folge. Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung würde zwar auch ohne eine Kapazitätsanpassung die Rückstände in der weiteren Planung berücksichtigen und diese durch eine verlängerte Lieferzeit neuer Angebote abbauen. Eine kurzfristige Erhöhung der Kapazität würde jedoch zu temporären Rückständen vermeiden, die bis zur Ausregelung entstehen würden. Zum anderen hätte diese Steuerung der Kapazität zur Folge, dass die Lieferzeiten nicht erhöht werden müssten. Der dafür zusätzlich notwendige kumulierte Kapazitätsbedarf entspricht der Kapazitätslücke aus dem Durchlaufdiagramm. Beispielförmig dargestellt ist zudem die Wirkung einer möglichen Kapazitätsanpassung durch eine konstante Erhöhung der Kapazität für einen festgelegten Zeitraum (siehe Abbildung 5-2 oben). Diese ist im Durchlaufdiagramm durch eine stärkere Steigung des Plan-Abgangs aus der Plan-Kapazität erkennbar. Die Kapazitätserhöhung kann in diesem Beispiel die bereits zum Planungszeitpunkt entstandene Kapazitätslücke ausgleichen und damit dazu beitragen, dass Rückstände und Terminabweichungen vermieden werden.

In vergleichbarer Weise kann der Anwender im Durchlaufdiagramm auch frühzeitig eine Unterauslastung der Produktion erkennen. Mögliche Maßnahmen in diesem Fall sind die kurzfristige Erhöhung der Vertriebsaktivitäten oder die Reduzierung der Kapazität.

Das Durchlaufdiagramm und die Planungsdaten, welche durch eine frühzeitige Auftragsannahme und -terminierung ohnehin zur Verfügung stehen, haben damit das Potential, die Durchführung einer groben Kapazitätsplanung auf Ebene der gesamten Fertigung zu unterstützen.

Aufgabe der Auftragsannahme und -terminierung

Die Auftragsannahme und -terminierung kommt bei Eingang jedes einzelnen Angebots zum Einsatz, nachdem eine Kapazitätsplanung vorliegt. Wie bereits Kingsman in seiner Arbeit umfangreich beschrieben hat, kann die Auftragsannahme und -terminierung zwei grundsätzliche Strategien verfolgen und (1) Kapazitäten oder (2) Termine anpassen, um eine realistische Planung zu gewährleisten. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Anfragen abzulehnen, was ähnlich wie bei der Terminanpassung den Plan-Abgang der Fertigung anpasst (vgl. [KING00, S. 90f.]).

Abbildung 5-3 zeigt diese Stellhebel der Auftragsannahme und -terminierung im Durchlaufdiagramm.

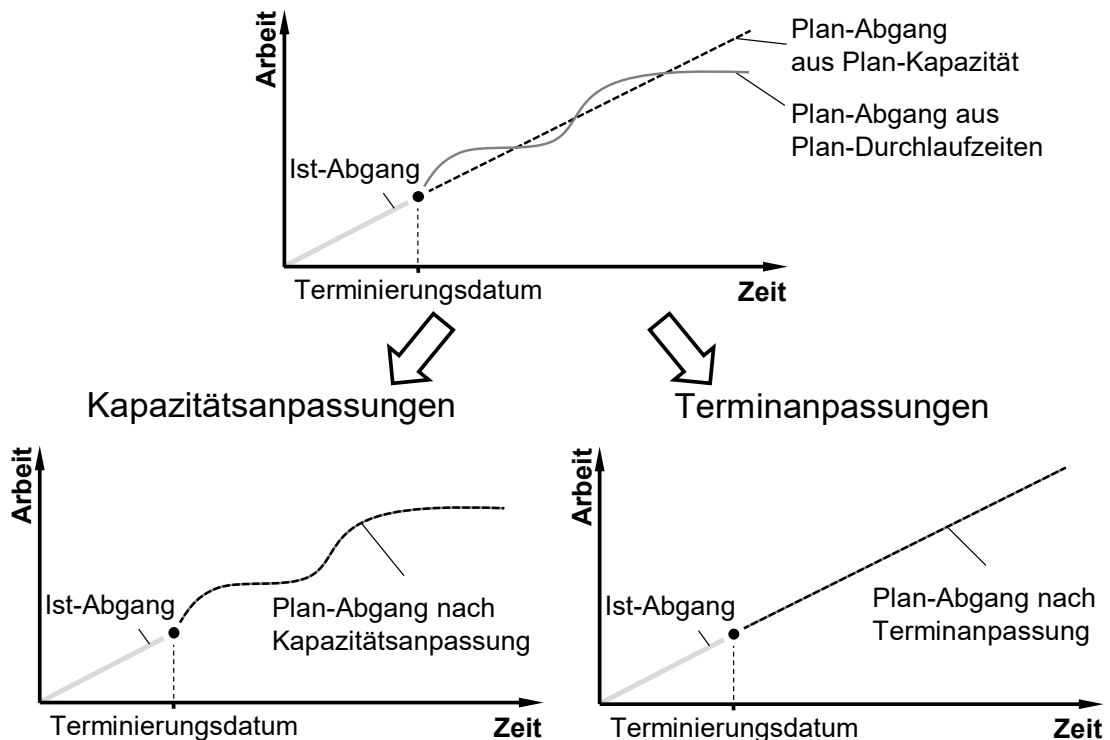


Abbildung 5-3: Stellhebel der Auftragsannahme und -terminierung

Der erste Schritt der Auftragsannahme und -terminierung ist die Ermittlung des Plan-Abgangs mithilfe der Plan-Durchlaufzeiten der Fertigung. In diesem Schritt wird die Belastung der Fertigung in die Zukunft projiziert, um den Plan-Abgang zu erhalten. Bei schwankenden Belastungen hat dies zur Folge, dass der so ermittelte Plan-Abgang und der Plan-Abgang aus der Plan-Kapazität voneinander abweichen. Dieser Schritt entspricht damit der zuvor beschriebenen Durchlaufterminierung (vgl. Abschnitt 3.1). Durchlauforientierte Verfahren der Terminplanung, wie die Planung mit Standardlieferzeiten, beenden die Planung nach diesem Schritt.

In der Auftragsannahme und -terminierung bestehen mit der Kapazitäts- und der Terminanpassung zwei Handlungsmöglichkeiten, um die Kapazität und den Plan-Abgang aufeinander abzustimmen.

Erstens kann die Auftragsannahme und -terminierung die Kapazitäten an den Plan-Abgang der Fertigung anpassen. Der Vorteil ist in diesem Fall, dass die Plan-Termine sich nicht verändern. Dieses Vorgehen hat jedoch zum einen den Nachteil, dass Kunden im Falle einer Unterauslastung der Fertigung nicht von kürzeren Lieferzeiten profitieren. Zum anderen verursachen die Kapazitätsanpassungen erheblichen organisatorischen Aufwand, da sie vielfach direkt die Arbeitszeiten der Mitarbeiter beeinflussen, was oftmals deren Zustimmung erfordert. Auch können durch Gehaltszuschläge erhebliche Mehrkosten für die Anpassung der Kapazitäten entstehen.

Zweitens kann die Auftragsannahme und -terminierung die Plan-Termine anpassen bzw. Anfragen ablehnen, um den Plan-Abgang der Fertigung an den Plan-Abgang aus der Plan-Kapazität anzugleichen. Dies hat den Vorteil, dass ein Unternehmen keine organisatorisch aufwändigen und teuren Kapazitätsanpassungen durchführen muss. Nachteilig ist, dass sich die Lieferzeiten verändern und insbesondere im Fall einer Überlast auch verlängern, was sich negativ auf die Kundenannahme auswirken kann.

Auch eine Kombination beider Strategien, wie beispielsweise von Kingsman vorgeschlagen (vgl. [KING00, S. 90f.]), ist denkbar und sinnvoll. Dieses Vorgehen eröffnet den größten Handlungsspielraum. Es geht mit dem Nachteil einher, dass der Planer die unterschiedlichen Handlungsalternativen gegeneinander abwägen muss.

Grundsätzlich gilt: Je flexibler die Kapazitäten sind, umso wichtiger wird die Kapazitätsanpassung. In der Regel können Unternehmen dem Plan-Abgang jedoch nicht so eng folgen, dass sie auf eine Terminanpassung verzichten können. Diese steht in der nachfolgend beschriebenen modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung im Mittelpunkt. Der folgende Abschnitt beschreibt ein Grobkonzept und zeigt insbesondere den Aufbau und die Nutzung des Durchlaufdiagramms als Planungsgrundlage auf.

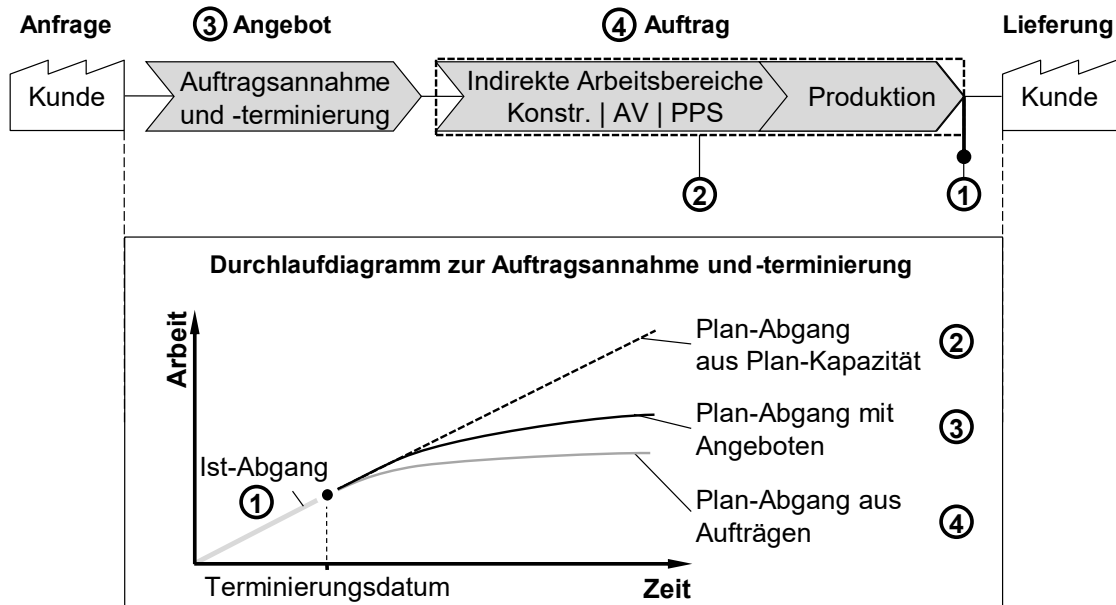
5.2 Konzept der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung beruht auf der Gegenüberstellung des Plan-Abgangs und der Kapazität in einem Durchlaufdiagramm. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Konstruktion dieses Durchlaufdiagramms (Abschnitt 5.2.1) und erklären die Nutzung des Durchlaufdiagramms anhand beispielhafter Planungssituationen (Abschnitt 5.2.2).

5.2.1 Konstruktion des Durchlaufdiagramms

Betrachtungsgegenstand des Verfahrens und damit auch des Durchlaufdiagramms ist die gesamte Produktion sowie der vollständige Angebots- und Auftragsdurchlauf. Die einzelnen Bestandteile des Angebots- und Auftragsdurchlaufs werden dabei nur als Gesamtsysteme in das Verfahren einbezogen und nicht weiter untergliedert. Für die Produktion bedeutet dies beispielsweise, Arbeitsinhalte nicht auf Arbeitssystemebene, sondern für gesamte Produktionsaufträge zu berücksichtigen. Dies ermöglicht es auch, Angebote oder Aufträge zu frühen Zeitpunkten im Auftragsdurchlauf in die Terminierung einzubeziehen, für die noch keine Arbeitspläne vorhanden sind.

Abbildung 5-4 zeigt die Betrachtungsgegenstände der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung im Durchlaufdiagramm.



AV : Arbeitsvorbereitung Konstr. : Konstruktion PPS : Produktionsplanung und -steuerung

Abbildung 5-4: Betrachtungsgegenstände der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung im Durchlaufdiagramm (in Anlehnung an [MUND 20a, S. 354])

Das Durchlaufdiagramm enthält vier Kurven, die (1) den *Ist-Abgang* bis zum Planungszeitpunkt, (2) den *Plan-Abgang aus Plan-Kapazität*, (3) den *Plan-Abgang mit Angeboten* und (4) den *Plan-Abgang aus Aufträgen* veranschaulichen.

Der *Ist-Abgang* wird am Ende der Produktion gemessen und entspricht der Größe aus dem klassischen Durchlaufdiagramm für Vergangenheitsdaten (Abschnitt 2.4.2). Unsicherheiten in der Produktion und im Auftragsdurchlauf können eine Abweichung von Ist- und Plan-Abgang und damit einen Rückstand verursachen [LÖDD16, S. 80]. Das Einbeziehen des Ist-Abgangs macht diesen Rückstand zum Planungszeitpunkt im Durchlaufdiagramm sichtbar und ermöglicht es der Auftragsannahme und -terminierung entsprechend gegenzusteuern.

Der *Plan-Abgang aus Plan-Kapazität* (31) dient dem Kapazitätsabgleich und stellt die Leistungsfähigkeit der Fertigung in der Zukunft dar. Die Kurve beginnt zum Planungszeitpunkt beim erreichten Ist-Abgang. In Anlehnung an Gleichung (3) berechnet sich der weitere Verlauf aus der Plan-Produktivität und der Plan-Kapazität. Im Gegensatz zur Literatur wird der Plan-Abgang aus Plan-Kapazität für das vorliegende Verfahren allerdings nicht auf Ebene der Arbeitsvorgänge, sondern für die gesamte Fertigung bestimmt.

$$AB_{\text{Plan,KAP}}(T_N) = AB_{\text{Ist}}(T_0) + \int_{T_0}^{T_n} KAP_{\text{Plan}}(t) \cdot PRO_{\text{m,Plan}}(t) dt \quad (31)$$

mit

AB_{Ist}	Kumulierter Ist-Abgang [Std.]
$AB_{\text{Plan,KAP}}$	Plan-Abgang aus Plan-Kapazität [Std.]
KAP_{Plan}	Plan-Kapazität [Std./BKT]
$PRO_{\text{m,Plan}}$	Mittlere Plan-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std./Std.]
T_0	Planungszeitpunkt [BKT]
T_n	Tag, für den der mögliche Abgang berechnet wird [BKT]
t	Zeit [BKT]

Der *Plan-Abgang aus Aufträgen* enthält alle bereits im Unternehmen befindlichen Aufträge. Dieser Plan-Abgang enthält damit (1) die freigegebenen Aufträge in der Produktion, (2) Aufträge, die auf ihre Freigabe warten und (3) noch nicht freigegebene Aufträge in der Konstruktion, Arbeitsvorbereitung oder PPS. Er berechnet sich in der Einheit „Anzahl Aufträge“ oder in Vorgabestunden. Für die Berechnung in Vorgabestunden lassen sich die Arbeitsinhalte aller Aufträge aufaddieren, deren Plan-Endtermin kleiner oder gleich dem betrachteten Zeitpunkt (t) ist (32). Der Plan-Abgang aus Aufträgen unterliegt nur einer geringen Unsicherheit, weil die Kunden die Annahmehentscheidung bereits getroffen haben und damit kein Auftragsrisiko mehr besteht. Gegebenenfalls muss jedoch der Auftragsinhalt abgeschätzt werden, falls die Arbeitsvorbereitung noch nicht abgeschlossen wurde.

$$AB_{\text{Plan,Auf.}}(t) = \sum_{i=1}^{\text{AnzAuf}} ZAU_{\text{Auf,i}} \quad \forall i \text{ mit } TBE_{\text{Plan}} \leq t \quad (32)$$

mit

$AB_{\text{Plan,Auf.}}$	Plan-Abgang aus Aufträgen [Std.]
AnzAuf	Anzahl Aufträge [-]
TBE_{Plan}	Plan-Endtermin [BKT]
t	Zeit [BKT]
$ZAU_{\text{Auf,i}}$	Arbeitsinhalt von Auftrag i [Std.]

Zusätzlich zu den Aufträgen sind im *Plan-Abgang mit Angeboten* auch Angebote berücksichtigt. Angebote sind dabei mit der Annahmehquote aus dem Angebotsbestand abgezinst, um der Unsicherheit durch die Annahmehentscheidung gerecht zu werden. Das Vorgehen zur Ermittlung der Annahmehquote erläutert Abschnitt 4.1. Der Plan-Abgang mit Angeboten berechnet sich mit nachfolgender Gleichung (33).

$$AB_{\text{Plan,ges.}}(t) = \sum_{i=1}^{\text{AnzAuf}} ZAU_{\text{Auf},i} + \sum_{j=1}^{\text{AnzAng}} ZAU_{\text{Ang},j} \cdot AQ_{m,OA} \quad \forall i, j \text{ mit } TAE_{\text{Plan}} \leq t \quad (33)$$

mit

$AB_{\text{Plan,ges.}}$	Plan-Abgang mit Angeboten [Std.]
$AnzAng$	Anzahl Angebote [-]
$AnzAuf$	Anzahl Aufträge [-]
$AQ_{m,OA}$	Mittlere Annahmquote offener Angebote [%]
TAE_{Plan}	Plan-Endtermin [BKT]
t	Zeit [BKT]
$ZAU_{\text{Auf},i}$	Arbeitsinhalt von Auftrag i [Std.]
$ZAU_{\text{Ang},j}$	Arbeitsinhalt von Angebot j [Std.]

Die Differenz des Plan-Abgangs aus Plan-Kapazität und des Plan-Abgangs aus Angeboten und Aufträgen zeigt die freie Kapazität für zukünftige Aufträge auf. Falls keine neuen Anfragen eingehen, repräsentiert diese Größe den zu erwartenden Rückstand der Fertigung.

Alle Angebote und Aufträge plant das Verfahren im Durchlaufdiagramm zu einem festgelegten oder vorläufigen Plan-Endtermin ein. Hierzu sind für die Angebote und für einen Teil der Aufträge Vorgabezeiten abzuschätzen, die die Arbeitsvorbereitung bzw. PPS im späteren Verlauf durch kalkulierte Planwerte ersetzt. Der so ermittelte Plan-Abgang ermöglicht es, den Kapazitätsbedarf abzuschätzen. Dies ist für die Praxis von Unternehmen bereits ein erheblicher Gewinn, da die genauere Vorhersage des Kapazitätsbedarfs die Vorlaufzeit der Kapazitätsplanung und ihre Genauigkeit erhöht. Abschnitt 5.2.2 zeigt anhand verschiedener Planungssituationen die Vorteile einer Darstellung im Durchlaufdiagramm auf.

Das Durchlaufdiagramm kann den Abgang in verschiedenen Einheiten abbilden. Neben der Angabe in Stunden sind auch andere Einheiten für die Betrachtung der Kapazität möglich, insbesondere die Einheiten Anzahl Aufträge oder Stück. Um den gesamten Kapazitätsbedarf abschätzen zu können, ist es sinnvoll, den Kapazitätsbedarf unterschiedlicher Produkte in einer übergreifenden Einheit anzugeben (vgl. [HENT28, S. 769] zitiert nach [RUBE53, S. 466]). Vorgabestunden sind oft gut geeignet, um den Kapazitätsbedarf eines Auftrags abzubilden. Allerdings ist der Aufwand für die Schätzung der Vorgabestunden zum Zeitpunkt der Angebotsbearbeitung vergleichsweise hoch. Den genauen Arbeitsinhalt eines Auftrags gemeinsam mit dessen Arbeitsplan kann für gewöhnlich erst die Arbeitsvorbereitung ermitteln. Mithilfe einer Ähnlichkeitsbetrachtung bereits abgeschlossener Projekte bei der Angebotserstellung und einer späteren genauen Ermittlung der Arbeitsinhalte in der Arbeitsvorbereitung kann das Verfahren dennoch die Einheit Vorgabestunden nutzen. Fertigt ein Unternehmen sehr viele Aufträge, gleichen sich große und kleine Auftragszeiten aus. In diesem Fall reicht es häufig aus, den Abgang in Anzahl Aufträgen zu messen. Dies vereinfacht die Berechnung des Plan-Abgangs, insbesondere für offene Angebote, falls ein Unternehmen noch keine Vorgabezeiten abschätzen kann. Alternativ kann der Anwender auch die mittlere Auftragszeit über alle Aufträge in der Vergangenheit zugrunde legen. Nach der

Arbeitsvorbereitung können Aufträge dann mit ihrer kalkulierten Auftragszeit in die Planung einfließen.

Das Durchlaufdiagramm bietet als Darstellungsform für die Planung bereits einen erheblichen Mehrwert, da es die zukünftige Belastungssituation anschaulich darstellt. Der folgende Abschnitt erläutert den Einsatz des Durchlaufdiagramms anhand verschiedener Planungssituationen.

5.2.2 Planungssituationen im Durchlaufdiagramm

Die Darstellung der Planungssituation im Durchlaufdiagramm ermöglicht es dem Anwender, frühzeitig eine Über- oder Unterbelastung der Produktion zu erkennen und geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Über- oder Unterbelastungen können durch (1) die Unsicherheiten der Planungsgrößen, (2) eine Übersteuerung durch den Anwender oder (3) eine Unterlast von Kundenanfragen entstehen.

Abbildung 5-5 zeigt, wie eine zeitweise Unterlast der Produktion durch einen negativen Rückstand zum Planungszeitpunkt im Durchlaufdiagramm sichtbar wird.

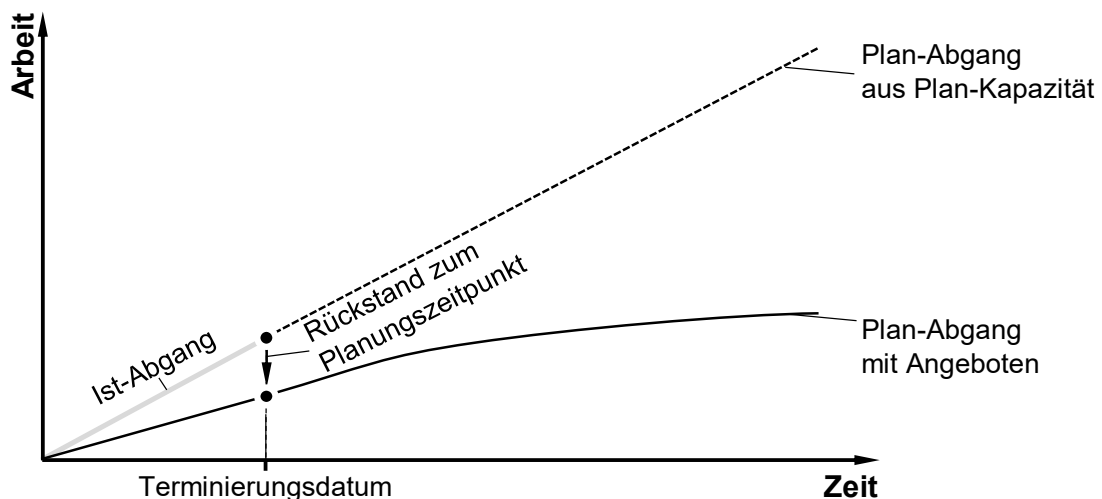


Abbildung 5-5: Planungssituation im Durchlaufdiagramm mit einem negativen Rückstand zum Planungszeitpunkt

Im Durchlaufdiagramm übersteigt zum Planungszeitpunkt der bisherige Ist-Abgang den Plan-Abgang aus Angeboten. Falls keine Anpassung der Kapazität erfolgt, ist mittelfristig mehr Kapazität verfügbar, als zu diesem Zeitpunkt verplant wurde. Durch das Vorziehen von Aufträgen kann kurzfristig die Auslastung der Fertigung erhöht werden, was allerdings negative Terminabweichungen der betroffenen Aufträge verursacht. Das Unternehmen kann auf die frühzeitig sichtbare Unterlast reagieren, indem es die Vertriebsaktivitäten erhöht. Ein positives Verkaufsargument sind dabei die kurzen Lieferzeiten in der vorliegenden Planungssituation. Alternativ sollte das Unternehmen die Kapazitäten reduzieren, um Auslastungsverluste zu vermeiden.

Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 5-6, wie eine zeitweise Überlastung der Produktion durch einen positiven Rückstand zum Planungszeitpunkt im Durchlaufdiagramm sichtbar wird.

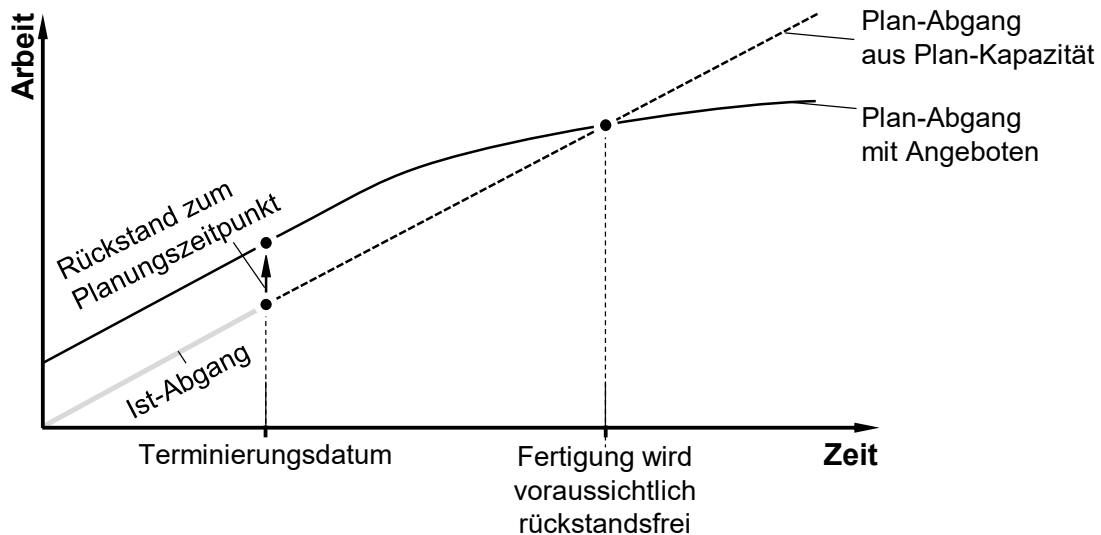


Abbildung 5-6: Planungssituation im Durchlaufdiagramm mit einem positiven Rückstand zum Planungszeitpunkt

In diesem Beispiel übersteigt der Plan-Abgang mit Angeboten zum Planungszeitpunkt den Ist-Abgang um einen positiven Rückstand. Auch mittelfristig liegt der Plan-Abgang oberhalb des Plan-Abgangs aus Plan-Kapazität. Falls keine Erhöhung der Kapazität erfolgt, ist kurzzeitig mehr Kapazität verplant als verfügbar. Eine Terminabweichung der betroffenen Aufträge ist die Folge. Die Terminplanung berücksichtigt die Rückstände und baut diese durch eine verlängerte Lieferzeit neuer Angebote ab. Falls keine weitere Überlastung der Fertigung erfolgt, ist der Rückstand in diesem Fall voraussichtlich abgebaut, wenn der Plan-Abgang aus Plan-Kapazität und der Plan-Abgang mit Angeboten sich kreuzen. Eine Erhöhung der Kapazität kann den Abbau des Rückstands zusätzlich beschleunigen.

Statistische Unsicherheiten der Plan-Abgänge wirken sich kurz- und mittelfristig auf die Planungssituation im Durchlaufdiagramm aus und können positive und negative Abweichungen der mittelwertbasierten Planungsgrößen verursachen. Der folgende Abschnitt modelliert die Unsicherheiten des Plan-Abgangs im Durchlaufdiagramm.

5.3 Vorgehen zur modellbasierten Terminplanung

Im Folgenden wird die Terminierungslogik ausführlich beschrieben. Das Verfahren zur Auftragsannahme und -terminierung bestimmt in drei Schritten zunächst die mögliche Lieferzeit für das Angebot (Abschnitt 5.3.1), plant das Angebot anschließend mit einem vorläufigen Plan-Endtermin in das Durchlaufdiagramm ein (Abschnitt 5.3.2) und bestimmt nach der Kundenrückmeldung schließlich den endgültigen Liefer- bzw. Plan-Endtermin des Auftrags (Abschnitt 5.3.3).

5.3.1 Bestimmung der möglichen Lieferzeit

Im ersten Schritt bestimmt die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung eine realistische Lieferzeit für das Angebot an den Kunden. Die bestimmte Lieferzeit dient als realistische Untergrenze für den Terminplaner unter den in der Planung abgebildeten Bedingungen. Eine Unterschreitung dieser Lieferzeit kann daher nur durch Abweichungen von den Planungsprämissen realisiert werden wie z.B. durch eine Kapazitätserhöhung oder durch eine Priorisierung in der Reihenfolgebildung. Die Lieferzeit wird dem Kunden verbindlich zugesagt und bildet damit die Grundlage für die spätere logistische Zielerreichung.

Das Verfahren ermittelt die mögliche Lieferzeit eines Angebots als Summe der möglichen Durchlaufzeit und eines Lieferzeitpuffers. Letzterer dient als Reserve gegenüber Störungen oder anderen Unsicherheiten in der Produktion (vgl. Abschnitt 2.4.1). Abbildung 5-7 zeigt, wie das Verfahren die Lieferzeit anhand von drei Bedingungen im Durchlaufdiagramm bestimmt.

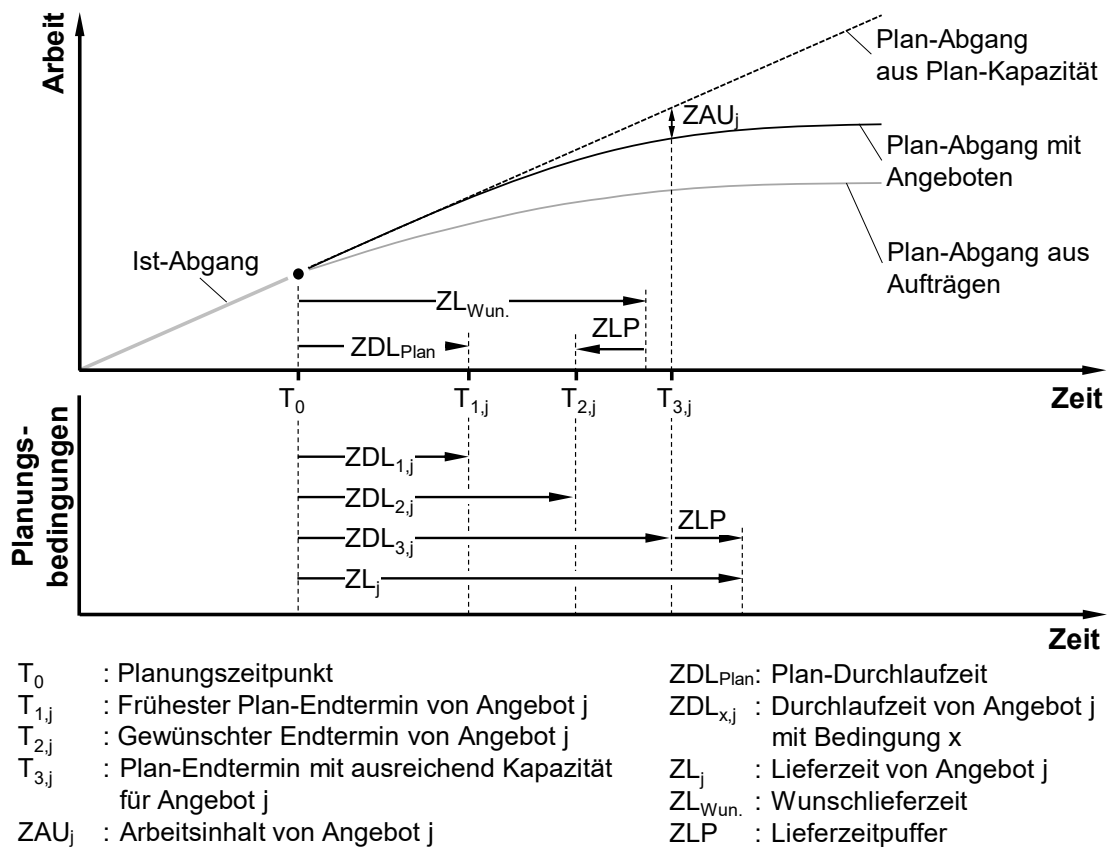


Abbildung 5-7: Lieferzeitbestimmung mit dem Durchlaufdiagramm

Bedingung 1: Jede Fertigung benötigt unabhängig vom Liefertermin eine vom Unternehmen festgelegte Durchlaufzeit, um Aufträge fertigzustellen. Diese Durchlaufzeit ergibt sich aus einer logistischen Positionierung (vgl. [NYHU12, S. 174f.]) und berücksichtigt den Zielkonflikt zwischen einer hohen Auslastung und einer niedrigen

Durchlaufzeit bzw. niedrigen Beständen. Für die Durchlaufzeit eines Angebots mit normaler Priorität gilt daher (34).

$$ZDL_{1,j} \geq ZDL_{Plan} \quad (34)$$

mit

$ZDL_{1,j}$ Durchlaufzeit von Angebot j unter Bedingung 1 [BKT]
 ZDL_{Plan} Plan-Durchlaufzeit [BKT]

Die Bedingung setzt voraus, dass alle Angebote grundsätzlich dieselbe Plan-Durchlaufzeit und damit auch Priorität genießen. Bei unterschiedlichen Prioritäten und Plan-Durchlaufzeiten, wie beim Vorhandensein von Eilaufträgen, gelten leicht abgewandelte Bedingungen.

Bedingung 2: Um erhöhte Fertigwarenbestände zu vermeiden und Kapazitäten nicht vorzeitig zu verplanen, sollten Unternehmen Angebote nicht früher einplanen als zur Erfüllung der vom Kunden gewünschten Lieferzeit erforderlich. Von dieser Kundendurchlaufzeit wird der Lieferzeitpuffer abgezogen, um den internen Plan-Endtermin ($T_{2,j}$) gegen Unsicherheiten in der Produktion abzusichern (siehe Abbildung 5-7). Für die Durchlaufzeit gilt daher zusätzlich (35).

$$ZDL_{2,j} \geq ZL_{Wun.} - ZLP \quad (35)$$

mit

$ZDL_{2,j}$ Durchlaufzeit von Angebot j unter Bedingung 2 [BKT]
 $ZL_{Wun.}$ Wunschlieferzeit [BKT]
 ZLP Lieferzeitpuffer [BKT]

Bedingung 3: Das Verfahren überprüft, zu welchem Zeitpunkt ($T_{3,j}$) in der Produktion genügend Kapazitätsreserven für das vorliegende Angebot vorhanden sind. Der verbleibende Plan-Abgang aus Plan-Kapazität sollte zu diesem Zeitpunkt mindestens dem voraussichtlichen Arbeitsinhalt des Angebots entsprechen (siehe Abbildung 5-7). Die Auftragsdurchlaufzeit aus Kapazitätsgesichtspunkten stellt (36) dar.

$$AB_{Plan,KAP}(T_0 + ZDL_{3,j}) - AB_{Plan,ges.}(T_0 + ZDL_{3,j}) \geq ZAU_{Ang.,j} \quad (36)$$

mit

$AB_{Plan,ges.}$ Plan-Abgang mit Angeboten [Std.]
 $AB_{Plan,KAP}$ Plan-Abgang aus Plan-Kapazität [Std.]
 T_0 Planungszeitpunkt [BKT]
 $ZDL_{3,j}$ Durchlaufzeit von Angebot j unter Bedingung 3 [BKT]
 $ZAU_{Ang.,j}$ Arbeitsinhalt von Angebot j [Std.]

Der Anwender sollte das Angebot nicht mit einer Durchlaufzeit einplanen, die Bedingung 3 verletzt, da ansonsten keine ausreichende Kapazität für die Bearbeitung verfügbar ist und Rückstände sowie Terminabweichungen entstehen.

Die Durchlaufzeit für die Angebotseinplanung wird als Maximum dieser drei Durchlaufzeiten bestimmt. Unter Berücksichtigung eines Lieferzeitpuffers gilt entsprechend (37):

$$ZL_j = \max\{ZDL_{1,j}; ZDL_{2,j}; ZDL_{3,j}\} + ZLP \quad (37)$$

mit

ZDL _{1,j}	Durchlaufzeit von Angebot j unter Bedingung 1 [BKT]
ZDL _{2,j}	Durchlaufzeit von Angebot j unter Bedingung 2 [BKT]
ZDL _{3,j}	Durchlaufzeit von Angebot j unter Bedingung 3 [BKT]
ZL _j	Lieferzeit von Angebot j [BKT]
ZLP	Lieferzeitpuffer [BKT]

Der Lieferzeitpuffer soll den Auftrag gegen Unsicherheiten in der Produktion und damit verbundene Verspätungen schützen (vgl. Abschnitt 2.4.1).

Die bestimmte Lieferzeit berücksichtigt sowohl die Kapazitätsrestriktionen als auch die aus der logistischen Positionierung ermittelten realistischen Durchlaufzeiten. Sie kann daher dem Kunden verbindlich zugesagt werden. Sie kann jedoch dem Kundenwunsch widersprechen, weil sie der Realisierbarkeit Vorrang gibt. Verschiedene Möglichkeiten, mit diesem Zielkonflikt umzugehen, erläutert Kingsman in seiner Arbeit (vgl. [KING00]). Ein Unternehmen hat zum Beispiel die Möglichkeit, Eilaufträge strategisch einzusetzen, um auch besonders kurze Lieferzeiten realisieren zu können (vgl. [LÖDD19, S. 453]). Alternativ kann das Unternehmen die Lieferzeit durch eine zeitweise Erhöhung der Kapazität verkürzen.

Wie bereits zuvor erläutert, hat die Kundenrückmeldezeit einen erheblichen Einfluss auf die Annahmquote und die Planungsunsicherheit (vgl. Abschnitt 2.3.2). Um eine große Unsicherheit durch eine sehr späte Kundenrückmeldung zu vermeiden, sollte das Angebot neben der Lieferzeit auch eine Gültigkeit enthalten, nach der die zugesagten Lieferkonditionen verfallen.

5.3.2 Einplanung von Angeboten

Im zweiten Schritt des Verfahrens erfolgt direkt im Anschluss an die Bestimmung der Lieferzeit die Einplanung des Angebots. Durch diesen Schritt wird auch das Durchlaufdiagramm aktualisiert. Die Einplanung von Angeboten berücksichtigt über die Lieferzeit hinaus insbesondere (1) das Rückmeldeverhalten der Kunden und (2) den mit der Annahmquote prognostizierten Arbeitsinhalt der Angebote.

Die Rückmeldung der Kunden erfolgt in der Regel nicht direkt nach dem Erhalt des Angebots (vgl. Abschnitt 2.3.2). Um einen systematischen Planungsfehler zu vermeiden, berücksichtigt die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung zusätzlich zur zugesagten Lieferzeit die mittlere Kundenannahmezeit. Dazu wird die zuvor ermittelte Lieferzeit, abzüglich des Lieferzeitpuffers, mit einer mittleren Kundenannahmezeit zum Terminierungszeitpunkt addiert (38). Dies ergibt den vorläufigen Plan-Endtermin ($T_{4,j}$) des Angebots.

$$T_{4,j} = T_0 + ZAn_m + (ZL_j - ZLP) \quad (38)$$

mit

- T_0 Planungszeitpunkt [BKT]
- $T_{4,j}$ Voraussichtlicher Plan-Endtermin von Angebot j [BKT]
- ZL_j Lieferzeit von Angebot j [BKT]
- ZLP Lieferzeitpuffer [BKT]
- ZAn_m Mittlere Kundenannahmezeit [BKT]

Der Arbeitsinhalt eines Angebots kann zum frühen Zeitpunkt der Angebotsstellung im Auftragsdurchlauf vielfach nur über Vergleiche mit anderen Aufträgen geschätzt werden. Der gesamte Arbeitsinhalt eines Angebots spiegelt jedoch nicht den Erwartungswert für den Kapazitätsbedarf wider, da die Wahrscheinlichkeit einer Ablehnung durch den Kunden besteht. Die Einplanung des gesamten Arbeitsinhaltes würde demnach zu einer systematischen Überbewertung des zukünftigen Kapazitätsbedarfs von Angeboten führen. Aus diesem Grund werden entsprechend Gleichung (39) die Arbeitsinhalte von Angeboten bei der Einplanung mit der Annahmeerquote korrigiert (vgl. Gleichung (33)).

$$ZAU_{Plan,Ang.,j} = ZAU_{Ang.,j} \cdot AQ_{m,OA} \quad (39)$$

mit

- $AQ_{m,OA}$ Mittlere Annahmeerquote offener Angebote [%]
- $ZAU_{Ang.,j}$ Arbeitsinhalt von Angebot j [Std.]
- $ZAU_{Plan,Ang.,j}$ Plan-Arbeitsinhalt von Angebot j [Std.]

Das Vorgehen zur Angebotseinplanung veranschaulicht Abbildung 5-8. Dieses bestimmt zunächst den Plan-Endtermin des Angebots und plant es anschließend mit dem korrigierten Arbeitsinhalt ein.

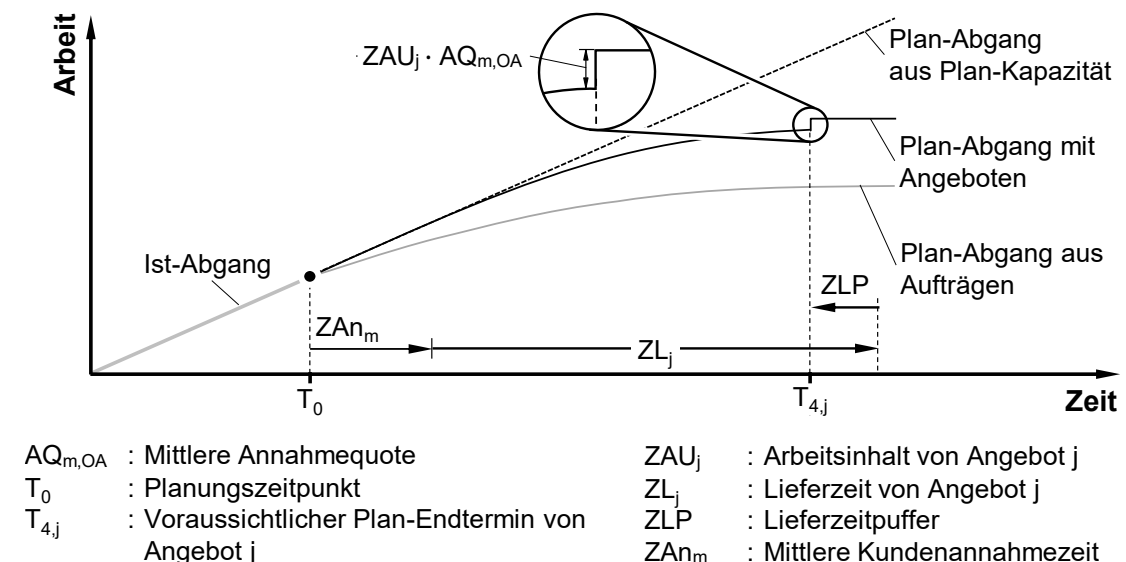


Abbildung 5-8: Einplanung von Angeboten in das Durchlaufdiagramm

Ab dem voraussichtlichen Plan-Endtermin ($T_{4,j}$) erhöht sich der Plan-Abgang folglich um den abgezinsten Arbeitsinhalt des Angebots, wodurch es einer möglichen Ablehnung von Angeboten durch den Kunden in der Planung gerecht wird.

5.3.3 Einplanung von Aufträgen

Zum Zeitpunkt der Kundenrückmeldung erfolgen die Ausplanung der Angebote und die eventuelle Einplanung der Aufträge. Vom Kunden abgelehnte Angebote entfernt die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung aus der Planung. Vom Kunden angenommene Angebote werden ebenfalls entfernt, da diese noch mit der abgezinsten Auftragszeit und zum voraussichtlichen Plan-Endtermin eingeplant sind. Diese angenommenen Angebote plant die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung anschließend zum endgültigen Plan-Endtermin als bestätigte Aufträge mit ihrem vollen Arbeitsinhalt ein (siehe Abbildung 5-9).

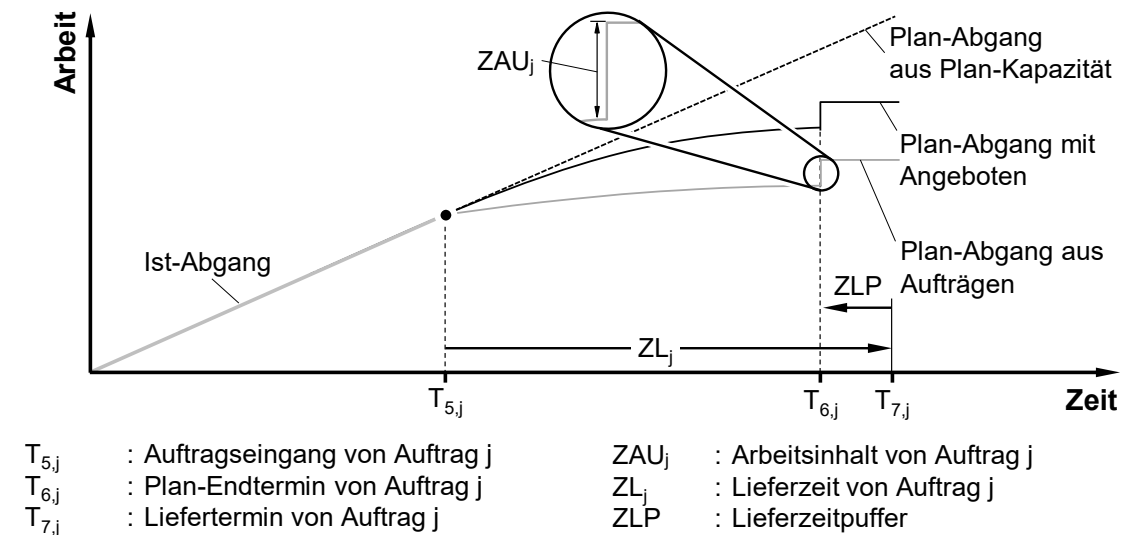


Abbildung 5-9: Einplanung von Aufträgen in das Durchlaufdiagramm

Nicht erfolgte Rückmeldungen von Kunden können den Plan-Abgang verfälschen. Wie bereits beschrieben, sollte aus diesem Grund jedes Angebot eine Angebotsgültigkeit beinhalten, nach der zum einen die zugesagten Lieferkonditionen (z.B. Lieferzeit) verfallen und zum anderen die Auftragsterminierung Angebote in der Einplanung automatisch als abgelehnt betrachtet.

Das Verfahren bestimmt im Falle einer Bestellung zum Bestellzeitpunkt den Plan-Endtermin des Auftrags und den einzuplanenden Arbeitsinhalt. Der Plan-Endtermin für bestätigte Aufträge nutzt den tatsächlichen Rückmeldezeitpunkt ($T_{5,j}$) als Ausgangswert. Die zuvor ermittelte und an den Kunden kommunizierte Lieferzeit wird addiert, um den Liefertermin ($T_{7,j}$) zu erhalten. Auch in diesem Fall wird der Lieferzeitpuffer abgezogen, da dieser in der internen Auftragsplanung nicht berücksichtigt wird. Zur Bestimmung des Plan-Endtermins ($T_{6,j}$) gilt folgender Zusammenhang (40).

$$T_{6,j} = T_{5,j} + (ZL_j - ZLP) \quad (40)$$

mit

$T_{5,j}$	Auftragseingang von Auftrag j [BKT]
$T_{6,j}$	Plan-Endtermin von Auftrag j [BKT]
ZL_j	Lieferzeit von Angebot j [BKT]
ZLP	Lieferzeitpuffer [BKT]

Bei der Bestellung wird keine neue Lieferzeit bestimmt, um den Plan-Endtermin zu bestimmen. Falls inzwischen eine Kapazitätslücke entstanden ist, sollte diese möglichst durch eine Kapazitätserhöhung ausgeglichen werden.

Der Arbeitsinhalt wird nach dem gleichen Prinzip wie bei der Einplanung von Angeboten bestimmt, da auch zum Zeitpunkt des Auftragseingangs vielfach noch keine Arbeitspläne vorliegen. Sobald der Arbeitsinhalt kalkuliert wurde, wird die Planung entsprechend aktualisiert. Im Gegensatz zu den Angeboten fließen Aufträge jedoch mit dem gesamten Arbeitsinhalt in den Plan-Abgang ein, da keine Unsicherheit über die Auftragsannahme mehr vorliegt. Gleichung (41) zeigt diesen Zusammenhang für den Arbeitsinhalt eines Auftrags (vgl. Gleichung (32)).

$$ZAU_{\text{Plan,Auf.,j}} = ZAU_{\text{Auf.,j}} \quad (41)$$

mit

$ZAU_{\text{Auf.,j}}$	Arbeitsinhalt von Auftrag j [Std.]
$ZAU_{\text{Plan,Auf.,j}}$	Plan-Arbeitsinhalt von Auftrag j [Std.]

Das vorgestellte Verfahren zur Terminplanung von Auftragsfertigern soll mit den vorgestellten Verfahrensregeln für eine Vielzahl von Rahmen- und Randbedingungen anwendbar sein. Allerdings kann es in bestimmten Situationen sinnvoll sein, das Verfahren anzupassen, um eine zielgerichtete Wirkung zu erreichen. Ein Beispiel für solche anpassungsbedürftigen Randbedingungen ist der systematische Einsatz von Eilaufträgen in der Fertigung. Die Erweiterung des Verfahrens für Eilaufträge kann einer Veröffentlichung, welche im Kontext dieser Arbeit entstanden ist, entnommen werden [MUND22]. Die dort erläuterte Erweiterung des Verfahrens um Eilaufträge verdeutlicht, dass die vorgestellte modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung durch vergleichsweise kleine Anpassungen auf verschiedene Randbedingungen zugeschnitten werden kann. Die grundsätzlichen Verfahrensprinzipien bleiben dabei unverändert.

5.4 Modellbasierte Gestaltung der Fertigungssteuerung

Die Aufgaben der Fertigungssteuerung können die logistischen Zielgrößen bei der Auftragsbearbeitung positiv beeinflussen, jedoch bei einer unzureichenden Abstimmung auch den Zielen der Planung entgegenlaufen. Aus diesem Grund ist ein mit der Planung modellbasiert abgestimmtes Konzept für die Fertigungssteuerung von hoher Relevanz für die erfolgreiche Umsetzung eines PPS-Systems. Eine abgestimmte Fertigungssteuerung kann darüber hinaus auch die Umsetzbarkeit des PPS-Systems in der Praxis erleichtern,

da bestenfalls die einzelnen Stufen der Planung und Steuerung aufeinander aufbauen und die gesamte PPS damit nachvollziehbar machen.

Die *Fertigungssteuerung* in Kombination mit der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung soll insbesondere in der Lage sein, die Risiken bzw. Unsicherheiten in der Planung auszugleichen. Die grundlegenden Unsicherheiten der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung betreffen insbesondere die Angebotsannahme, die insgesamt vorhandene Unsicherheit im Plan-Abgang und den Materialfluss einzelner Aufträge.

Zusätzlich soll die Fertigungssteuerung die Ziele der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung unterstützen. Dafür sollen die Verfahren der Fertigungssteuerung die logistische Zielerreichung wirksam unterstützen und verbessern. Die Verfahren sollen zudem robust auf Unsicherheiten reagieren, um gemeinsam mit der Auftragsannahme und -terminierung ein robustes System für die PPS zu bilden. Weiterhin sollen sie entsprechend der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung einfach anzuwenden sein. Entsprechend sollen sie möglichst wenige Verfahrensparameter enthalten und eine vergleichbare Datenbasis vorhandener oder durch die Auftragsannahme und -terminierung erzeugter Informationen verwenden. Außerdem soll die Fertigungssteuerung anschauliche und für die beteiligten Mitarbeiter in der Produktion nachvollziehbare Entscheidungen treffen, um die Akzeptanz der Produktionsplanung und -steuerung zu unterstützen.

Abbildung 5-10 zeigt die zur Verringerung der Unsicherheiten und auf Grundlage der Zielsetzung ausgewählte modellbasierte Konfiguration der Fertigungssteuerung.

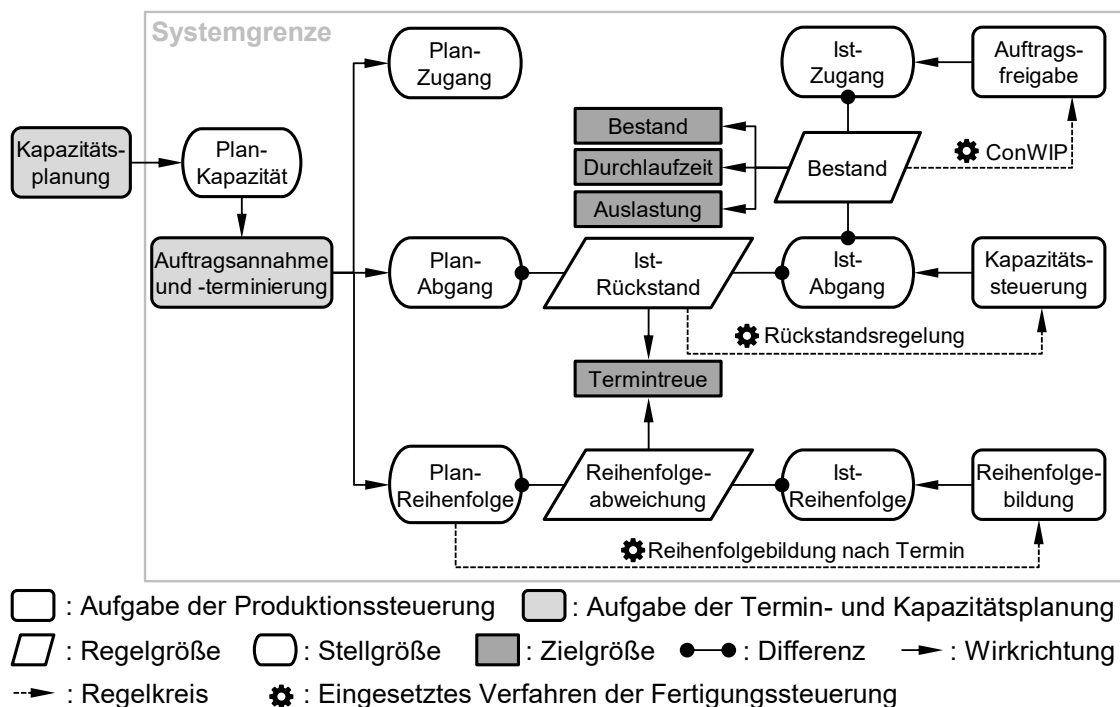


Abbildung 5-10: Modellbasierte Konfiguration der Fertigungssteuerung (in Anlehnung an [LÖDD16, S. 8])

Um insbesondere die Auswirkungen des Auftragsrisikos in der Auftragsannahme für die Fertigung zu reduzieren, wurde für die *Auftragsfreigabe* eine ConWIP-Steuerung ausgewählt. Dieses Verfahren enthält einen Vorgriffshorizont und einen ConWIP-Bestand als Verfahrensgröße [SPEA90, S. 883-885]. Der Vorgriffshorizont kann durch die Freigabe von Aufträgen vor dem Plan-Starttermin die Fertigung auch in Phasen auslasten, in denen weniger Aufträge eingehen als geplant. Der ConWIP-Bestand begrenzt dabei den zulässigen Bestand. Dies hält die Fertigungsbestände und dadurch die mittleren Durchlaufzeiten weitgehend konstant (siehe Abschnitt 2.5). Die Auftragsfreigabe nach ConWIP folgt einfachen und nachvollziehbaren Regeln und kann als kartenbasiertes System oder in einer digitalen Lösung anschaulich umgesetzt werden.

Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung enthält aufgrund der Berücksichtigung von Angeboten eine große Unsicherheit im Plan-Abgang. Zusätzlich gibt es beispielsweise durch Störungen in der Fertigung erhebliche Risiken für die Termintreue. Wenn sich solche Unsicherheiten realisieren und ein Rückstand entstanden ist, kann eine *Kapazitätssteuerung* in Form der Rückstandsregelung die logistische Zielerreichung stabilisieren [LÖDD16, S. 551f.]. Dieses Verfahren beruht, wie die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung, auf dem Rückstand. Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung kann Rückstände zwar eigenständig ausgleichen, dies geschieht jedoch nur über die spätere Einplanung neuer Angebote und beeinflusst damit nicht bereits eingeplante Aufträge. Die Rückstandsregelung kann durch Kapazitätsanpassungen hingegen auch bereits im Unternehmen befindliche Aufträge beeinflussen und insbesondere das Erreichen einer hohen Termintreue dieser Aufträge wirksam und robust unterstützen (siehe Abschnitt 2.5). Wesentliche Verfahrensparameter sind der obere und untere Grenzurückstand sowie die Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung und deren Reaktionszeit. Damit hat die Kapazitätssteuerung sehr einfache Regeln und trifft nachvollziehbare Kapazitätsentscheidungen.

Die übergeordnete Betrachtung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung auf Ebene der gesamten Fertigung ermöglicht das einfache und aufwandsarme Einbeziehen von Angeboten in die Planung. Es hat jedoch den Nachteil, dass unterschiedliche Materialflüsse nicht in der Plan-Reihenfolge berücksichtigt werden können. Darüber hinaus besteht auch in der Fertigung, zum Beispiel bei einem Nacharbeitsbedarf an einem Auftrag, das Risiko von Reihenfolgevertauschungen. Diese Reihenfolgevertauschungen können eine verspätete oder verfrühte Fertigstellung einzelner Aufträge zur Folge haben. Eine *Reihenfolgebildung* nach Plan-Endtermin setzt die in der Auftragsannahme und -terminierung festgelegten Prioritäten um und ermöglicht es, Reihenfolgevertauschungen auszugleichen, die durch diese Unsicherheiten entstanden sind (vgl. [LÖDD17, S. 12] und siehe Abschnitt 2.5). Die Plan-Endtermine werden in der Auftragsannahme und -terminierung bestimmt und bilden die Priorität eines Auftrags ab. Die Reihenfolgebildung kann die Plan-Endtermine der Arbeitsvorgänge nutzen, da die Arbeitsvorbereitung diese Termine ausgehend von den Plan-Endterminen der Aufträge ermittelt. Die Reihenfolgebildung nach dem Plan-Endtermin hat sehr einfache und nachvollziehbare Verfahrensregeln und beeinflusst die Termintreue wichtiger logistischer Zielgrößen positiv.

5.5 Zwischenfazit zur Verfahrensentwicklung

Die zuvor vorgestellte modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung soll insbesondere die Termintreue wirksam regeln, die Fertigungssteuerung integrieren und einfach anzuwenden sein. Die Zielerreichung kann zu diesem Zeitpunkt noch nicht abschließend, jedoch bereits teilweise qualitativ beurteilt werden.

Wirksamkeit: Die modellbasierte Ableitung des Verfahrens unterstützt dessen Wirksamkeit, da die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung mit dem Plan-Abgang die entscheidende Stellgröße steuert, um den Rückstand und damit die Terminabweichung zu regeln. Außerdem wird die Annahmequote aus dem Angebotsbestand als wesentlicher Eingangsparameter modellbasiert hergeleitet. Das Verfahren ist demnach in sich schlüssig. Die Wirksamkeit der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung wird in den folgenden Kapiteln durch die Evaluation abschließend bewertet.

Integrierte Konfiguration der Fertigungssteuerung: Die Konfiguration einer abgestimmten Fertigungssteuerung ist erfolgt. Die Verfahren unterstützen mit der Termintreue die gleiche logistische Zielgröße wie die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung. Darüber hinaus ist der notwendige Datenbedarf für die Fertigungssteuerung vergleichbar, da die Daten wie die Plan-Endtermine der Arbeitsvorgänge oder der Rückstand aufbauend auf der Auftragsannahme und -terminierung ermittelbar sind. Die modellbasierte Gestaltung der Fertigungssteuerung wird ebenfalls in der Evaluation bewertet.

Einfachheit: Das Verfahren zeichnet sich insbesondere durch einen geringen Datenbedarf und eine vergleichsweise einfache Parametrisierung aus. Durch die Anwendung auf Ebene der gesamten Produktion ist der Datenbedarf gering und zudem unabhängig von der Komplexität der Fertigung. Die Modellierung der Verfahrensparameter ermöglicht es zudem, sich auf verschiedene Planungsszenarien vorzubereiten. Das Verfahren kann durch die Darstellung im Durchlaufdiagramm mit dem voraussichtlichen Plan-Abgang einschließlich der Angebote die Planungssituation anschaulich abbilden, was es dem Anwender erleichtert, die Entscheidungen nachzuvollziehen. Auch bewusste oder unbewusste Abweichungen von den Verfahrensregeln spiegeln sich im Durchlaufdiagramm wider, so dass der Anwender die Auswirkungen abschätzen und Gegenmaßnahmen vorbereiten kann. Im Durchlaufdiagramm sind mögliche Rückstände frühzeitig erkennbar, so dass mögliche Terminabweichungen oder Auslastungsverluste bereits vor ihrem Auftreten vorhersagbar sind. Die Bewertung der Praxistauglichkeit des Verfahrens steht noch aus.

Die Darstellung im Durchlaufdiagramm hat einen weiteren Vorteil: Der Vergleich der Plan-Abgänge mit der Kapazität im Durchlaufdiagramm ist auch für die Kapazitätsplanung und -steuerung geeignet. Die Berücksichtigung der offenen Angebote erweitert zudem den Planungshorizont. Dies ermöglicht es Unternehmen, den gesamten Auftragsdurchlauf zu steuern, wie es bereits Kingsman in seiner Arbeit hervorhebt (vgl. [KING89]) und damit die logistische Zielerreichung insgesamt zu verbessern.

Im Folgenden findet mithilfe von Simulationsuntersuchungen eine quantitative Evaluation der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung statt.

6 Simulative Evaluation unter regulären Bedingungen

Die in Kapitel 5 beschriebene modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung soll einem Unternehmen eine wirksame und robuste Terminierung von Angeboten und Aufträgen ermöglichen. Ziel des folgenden Kapitels ist es, diese Wirksamkeit und Robustheit des Verfahrens mithilfe praxisnaher Untersuchungen zu belegen und dabei eventuell vorhandene Einschränkungen aufzuzeigen. Das Verfahren zur modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung wurde mithilfe eines ereignisgesteuerten Simulationsmodells in der Software *Plant Simulation 15.2.1* evaluiert. Die simulationsgestützte Evaluation des Verfahrens hat den Vorteil, dass sie (1) Einflussgrößen gezielt variiert, (2) Rahmenbedingungen über lange Zeiträume konstant hält und (3) sehr schnell unterschiedliche Versuche durchführen kann, ohne in den Betriebsablauf eines Unternehmens eingreifen zu müssen (vgl. [VDI3633, S. 9-10]). Damit ermöglichen Simulationsversuche es, die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung sowohl unter gleichbleibenden Bedingungen zu evaluieren als auch ihre Robustheit bei großen Eingangsunsicherheiten zu überprüfen.

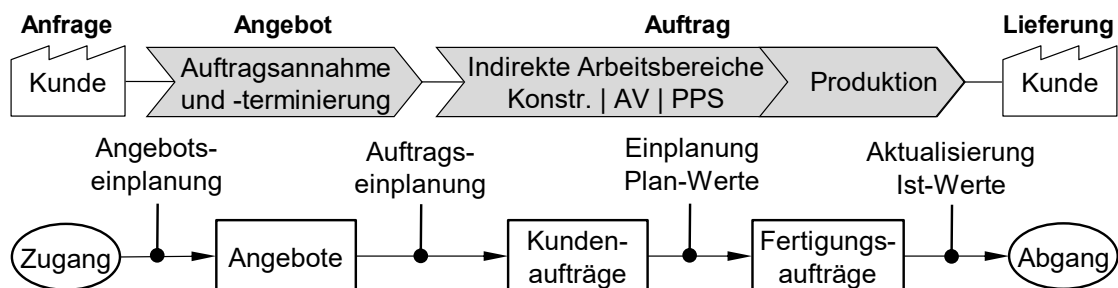
Abschnitt 6.1 beschreibt die Simulationsumgebung und Abschnitt 6.2 den Versuchsplan mit den Versuchen und den jeweils variierten Einflussgrößen. Die Simulationsergebnisse unter gültigen Verfahrensannahmen diskutieren die Abschnitte 6.3, 6.4 und 6.5. Abschnitt 6.6 zieht ein Zwischenfazit zur simulativen Evaluation.

6.1 Simulationsumgebung

Die folgenden Abschnitte beschreiben den Aufbau der Simulationsumgebung (Abschnitt 6.1.1), ihre Verifizierung und Validierung (Abschnitt 6.1.2) und eine Referenzkonfiguration für die Fertigungssteuerung (Abschnitt 6.1.3).

6.1.1 Beschreibung der Simulationsumgebung

Die Evaluationsumgebung abstrahiert das reale System eines Auftragsfertigers, muss aber dennoch eine gute Übereinstimmung mit diesem aufweisen. Als Grundlage für die Evaluationsumgebung dienen aus diesem Grund die in Abschnitt 2.1 herausgearbeiteten Eigenschaften der Auftragsfertigung und insbesondere deren Auftragsdurchlauf. Abbildung 6-1 zeigt den Ablauf der Planungsschritte im Simulationsmodell. Das Simulationsmodell umfasst neben der Fertigung auch die der Produktion vorgelagerten indirekten Arbeitsbereiche.



AV : Arbeitsvorbereitung Konstr. : Konstruktion PPS : Produktionsplanung und -steuerung

Abbildung 6-1: Schritte der Auftragsannahme und -terminierung im Simulationsmodell

Der Simulationsbaustein *Zugang* erzeugt Kundenanfragen und simuliert hierdurch das Kundenverhalten. Die Zeit zwischen der Erzeugung von zwei Anfragen kann im Simulationsmodell variiert werden, um die Belastung des Gesamtsystems einzustellen. Bei ihrer Erzeugung erhält jede Anfrage das Attribut Wunschliefzeit, die als ein Terminierungskriterium dient.

Der Simulationsbaustein *Angebotseinplanung* bestimmt die Lieferzeit anhand der Wunschliefzeit, dem mittleren Auftragsinhalt und der mittleren Plan-Durchlaufzeit. Wie beschrieben ist die Wunschliefzeit bereits in der Anfrage enthalten. Die Simulation unterscheidet zehn unterschiedliche Produkte mit einem mittleren Fertigungsanteil von jeweils 10%. Jedem Produkt ist eine produktspezifische Auftragszeit zugeordnet. Der mittlere Auftragsinhalt der Aufträge ergibt sich daher aus dem, mit dem Fertigungsanteil gewichteten Mittelwert der produktspezifischen Auftragszeiten. Die Produkte mit ihren mittleren Fertigungsanteilen und der Bearbeitungszeit je Arbeitssystem sind dem Modell vorgegeben. Rüstzeiten sind vernachlässigt, weshalb aus der Bearbeitungszeit direkt die Auftragszeit einer Variante an einem Arbeitssystem resultiert. Die mittlere Plan-Durchlaufzeit ergibt sich analog aus dem gewichteten Mittelwert der produktspezifischen Plan-Durchlaufzeiten. Die Variantentabelle mit dem Arbeitsplan und dem mittleren Fertigungsanteil für jedes Produkt wurde dem Simulationsmodell vorgegeben (siehe Tabelle A 9 und Tabelle A 10). Die Angebotseinplanung nutzt die Lieferzeit gemeinsam mit einer mittleren Plan-Annahmequote, der mittleren Kundenannahmezeit und dem mittleren Auftragsinhalt zur Einplanung der Angebote. Die mittlere Plan-Annahmequote ist dem Simulationsmodell ebenfalls vorgegeben.

Angeboten weist das Simulationsmodell mithilfe einer gleichverteilten Zufallsvariable in Abhängigkeit der mittleren Ist-Annahmequote zufällig den Status „angenommen“ oder „abgelehnt“ zu. Anschließend puffert das Modell die Angebote entsprechend der Kundenannahme- bzw. Kundenablehnungszeit. Die Kundenannahme- und Kundenablehnungszeit für jedes Angebot legt das Modell unabhängig voneinander entweder auf einen definierten Wert oder über eine Normalverteilung fest. Die Angebote enthalten zu diesem Zeitpunkt noch keine Information über das konkrete Produkt, um die in der Praxis auftretenden Unsicherheiten über den Arbeitsinhalt der Angebote abzubilden.

Die *Auftragseinplanung* aktualisiert die Planung, nachdem die Kundenannahme- bzw. Kundenablehnungszeit des jeweiligen Angebots abgelaufen ist. Das Modell entfernt dazu zunächst alle Angebote aus der Planung (vgl. Verfahrensregeln in Abschnitt 5.3). Kundenaufträgen, also angenommenen Angeboten, weist das Simulationsmodell mit einer gleichverteilten Zufallsvariable in Abhängigkeit der Fertigungsanteile aus der Variantentabelle zufällig die Variante zu. Anschließend plant das Modell die Kundenaufträge ausgehend vom tatsächlichen Kundenrückmeldedatum mit der zuvor bestimmten Lieferzeit und der mittleren Auftragszeit ein.

Für *Kundenaufträge* simuliert das Modell die Arbeitsvorbereitung. Dafür weist das Modell diesen Aufträgen eine konstante Durchlaufzeit für die Arbeitsvorbereitung zu. Die Arbeitsvorbereitung ist damit stark vereinfacht und ohne Warteschlange umgesetzt. Implizit wird also vorausgesetzt, dass für diese Aufgabe ausreichend Kapazität zur

Verfügung steht. Nach Ablauf dieser Zeit aktualisiert der Simulationsbaustein *Einplanung der Plan-Werte* die Terminplanung mit der Plan-Auftragszeit für die jeweilige Variante.

Die aus der Arbeitsvorbereitung resultierenden *Fertigungsaufträge* warten zunächst als Dispositionsbestand auf ihre Freigabe für die Fertigung. Abbildung 6-2 stellt den Aufbau der Fertigung im Simulationsmodell im Überblick dar.

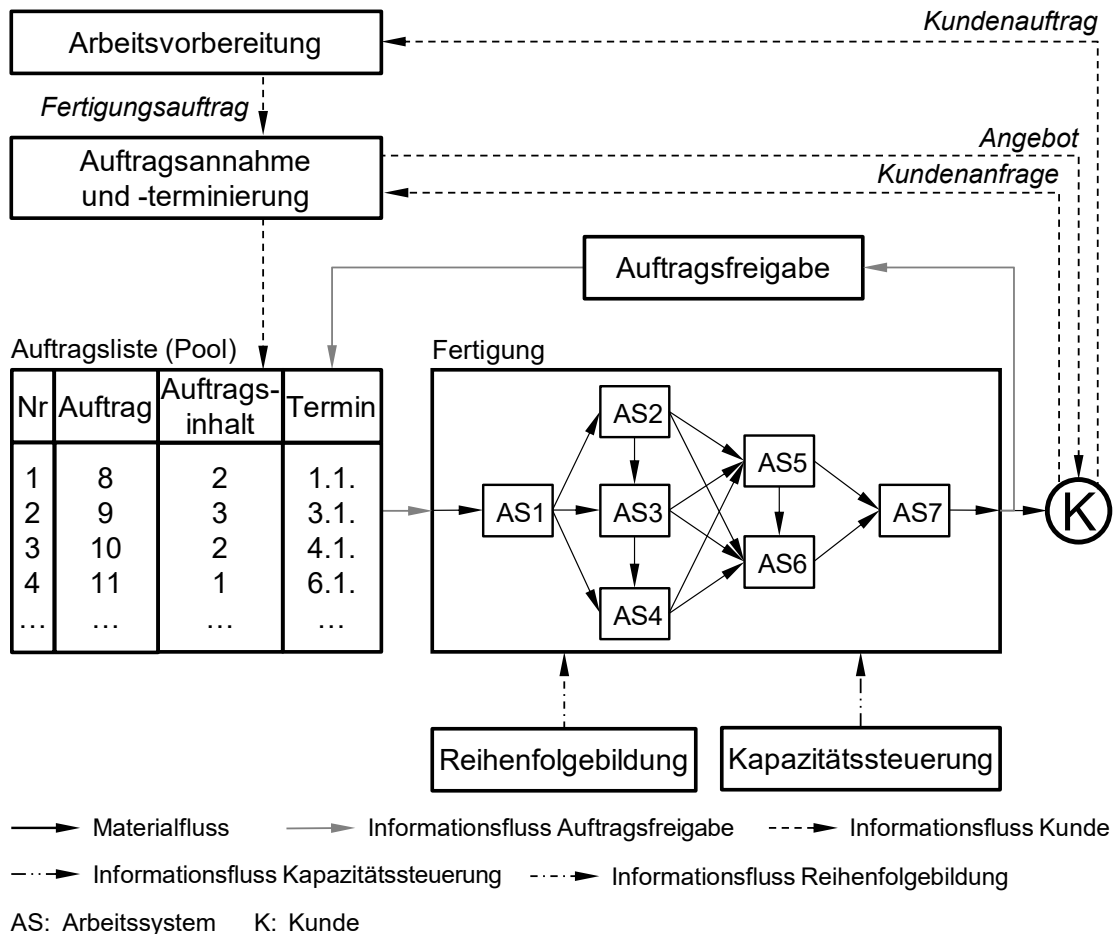


Abbildung 6-2: Informations- und Materialflüsse im Simulationsmodell

Die Fertigung besteht aus sieben Arbeitssystemen, die jeweils einen Auftrag zurzeit bearbeiten können. Wie vielfach für Auftragsfertiger typisch, sind diese Arbeitssysteme in einem sogenannten Job-Shop angeordnet, in dem sich der Fertigungsdurchlauf der Aufträge unterscheidet. Jedes Arbeitssystem führt einen einzigartigen Bearbeitungsprozess aus, weshalb andere Arbeitssysteme keine Aufträge übernehmen können. Aus diesem Grund besitzt jedes Arbeitssystem einen eigenen Arbeitsvorrat in Form einer Warteschlange. Die Verfahren der Fertigungssteuerung für die Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung können variiert werden, um verschiedene Konfigurationen der PPS zu untersuchen. Die Auftragsfreigabe kann eine sofortige Auftragsfreigabe, eine Auftragsfreigabe nach Plan-Starttermin und eine Freigabe nach Constant Work in Process (ConWIP) durchführen. Für die Reihenfolgebildung kann der Simulationsanwender zwischen FIFO und einer Reihenfolgebildung nach frühestem

Plan-Endtermin des Arbeitsvorgangs wählen. In der Kapazitätssteuerung können konstante Kapazitäten oder eine Rückstandsregelung eingestellt werden.

Nach der Fertigstellung der Aufträge werden die *Ist-Werte* in der Planung aktualisiert. Das Simulationsmodell aktualisiert das Durchlaufdiagramm dabei mit dem Ist-Abgang der Fertigung des jeweiligen Tages. Dadurch werden Rückstände in die Einplanung zukünftiger Angebote einbezogen (vgl. Abschnitt 5.2.1).

Um die Simulationsergebnisse auswerten und beurteilen zu können, erfasst das Simulationsmodell zu verschiedenen Zeitpunkten Auftragsdaten. Dies betrifft zum einen eine eindeutige Identifikationsnummer des Auftrags, die Rückmeldeentscheidung zur Annahme oder Ablehnung, die zugesagte Lieferzeit und die Variante. Zum anderen erfasst das Simulationsmodell verschiedene Zeitpunkte, wie den Anfrageeingang, den Rückmeldezeitpunkt, den im Angebot geplanten Liefertermin, den geplanten Liefertermin nach der Kundenrückmeldung, die geplante und tatsächliche Auftragsfreigabe sowie die geplante und tatsächliche Fertigstellung des Auftrags. Das Simulationsmodell exportiert die Auftragsdaten nach jedem Versuchsdurchlauf, um detaillierte Auswertungen zu ermöglichen.

Die Simulationsumgebung soll richtige und praxisrelevante Ergebnisse für die Evaluation der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung liefern. Die im folgenden Abschnitt beschriebene Verifizierung und Validierung der Simulationsumgebung soll dies gewährleisten.

6.1.2 Verifizierung und Validierung der Simulationsumgebung

Das Simulationsmodell zur Evaluation der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung wurde mithilfe der Vorgaben der VDI3633 *verifiziert* und *validiert*. Die Verifizierung prüft dabei die formale Richtigkeit des Simulationsmodells und der Simulationsergebnisse. Die Validierung soll eine hinreichende Übereinstimmung der Ergebnisse des Simulationsmodells mit realen Systemen prüfen und sicherstellen [VDI3633, S. 37-38].

Die *Verifikation* umfasst das statische und dynamische Testen einer Software (vgl. [SCHA11, S. 154-155]). Statische Tests basieren auf der Überprüfung eines Quellcodes ohne dessen Ausführung und umfassen unter anderem die Überprüfung der Syntax sowie das strukturierte Durchgehen des Quellcodes. Bei dynamischen Tests wurde der Quellcode ausgeführt, um mithilfe von Überprüfungen von Einzelfunktionen oder mit Grenzwerttests die Software zu verifizieren.

Die statische Überprüfung der Syntax erfolgt in der genutzten Software Plant Simulation automatisch. Syntaxfehler können daher ausgeschlossen werden. Ein strukturiertes Durchgehen des Quellcodes der einzelnen Funktionen verringert die Entstehung von Fehlern zusätzlich.

In dynamischen Tests wurden sowohl die Einzelfunktionen als auch die gesamte Funktionalität des Simulationsmodells umfangreich überprüft. Zum Testen der Funktionalität der Verfahren der Produktionsplanung und -steuerung wurden die in der Simulation erzeugten Ist-Werte mit den durch das Verfahren beeinflussten Soll-Werte verglichen. Beispielsweise dient für die bestandsregelnde Auftragsfreigabe nach ConWIP

der Bestand als Vergleichswert. Der gemessene Ist-Fertigungsbestand wurde beispielsweise mit dem eingestellten ConWIP-Bestand verglichen, um eine korrekte Funktionsweise der ConWIP-Steuerung zu überprüfen. In ähnlicher Weise wurde die Übereinstimmung der in Tabelle 2 dargestellten Soll-Werte von Regelgrößen der umgesetzten Verfahren der Fertigungssteuerung mit den gemessenen Ist-Werten der Simulation verglichen.

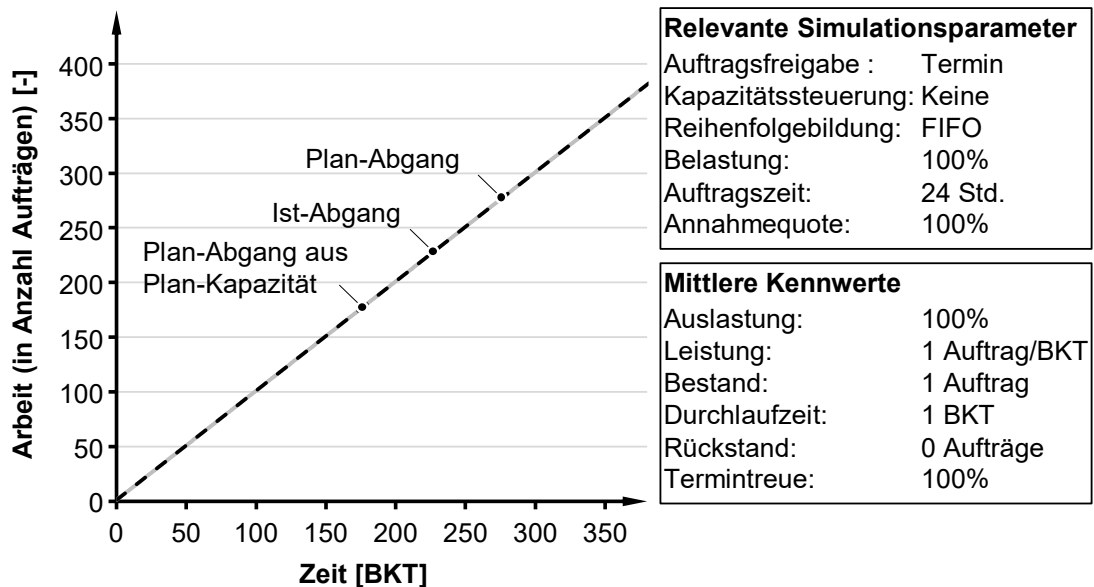
Tabelle 2: Vergleichswerte zur Verifizierung einzelner Funktionen des Simulationsmodells

Aufgabe der PPS	Einzel-funktion	Vergleichs-wert	Soll-Wert	Ist-Wert
Auftrags-freigabe	ConWIP	Bestand	ConWIP-Bestand	Ist-Bestand
	Freigabe nach Termin	Freigabe-termin	Plan-Starttermin	Ist-Starttermin
Reihenfolge-bildung	FIFO	Reihenfolge	Ist-Zugangs-reihenfolge	Ist-Abgangsreihenfolge
	Plan-Endtermin	Reihenfolge	Reihenfolge der Plan-Endtermine	Ist-Abgangsreihenfolge
Kapazitäts-steuerung	Rückstands-regelung	Rückstand	Grenzurückstand	Rückstandsverlauf

Die Prüfung der Gesamtfunktionalität, insbesondere der Auftragsannahme und -terminierung, erfolgte anhand von Einstellgrößen, deren Ergebnisse leicht vorhergesagt werden können. Insbesondere bei umfangreichen Simulationsmodellen mit einer Vielzahl an Einflussgrößen ist es dafür hilfreich, die Schwankungen der Einflussgrößen zu reduzieren und deren Grenzwerte auszuwählen. Die Simulation wurde dazu in einem idealen Szenario mit einer Annahmquote von einhundert Prozent, einer ausgeglichenen Belastung und einer Auftragszeit von genau einem Tag getestet (siehe Abbildung 6-3). Dadurch befindet sich zu jedem Zeitpunkt ein Auftrag am Arbeitssystem, und die Bearbeitung erfolgt unmittelbar nach dem Zugang. Übergangszeiten zwischen Arbeitsvorgängen existieren nicht. Das ideale Szenario folgt damit der Definition idealer Fertigungsabläufe aus der Kennlinientheorie (vgl. [WEDE89, S. 51f.], zitiert nach [NYHU12, S. 62]).

Die Betrachtung der simulierten Kennwerte zeigt, dass die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung die idealen Eingangsbedingungen in eine ideale Planung umsetzen kann. Die gemessene Auslastung erreicht mit einhundert Prozent ihren Maximalwert. Die Durchlaufzeit und der Bestand entsprechen der Auftragszeit. Das

Verfahren verursacht im idealen Prozess keinen Rückstand und erreicht eine maximale Termintreue von einhundert Prozent.



FIFO : First In – First Out BKT: Betriebskalendertag

Abbildung 6-3: Grenzwerttest zur Verifikation des Simulationsmodells

Die *Validierung* eines Simulationsmodells erfolgt problemspezifisch und enthält insbesondere die Prüfung der Eingangsdaten. Auch die Validierung durch einen Simulationsexperten während der Erstellung des Simulationsmodells mithilfe von geeigneten visuellen Ergebnisdarstellungen ist ein wichtiger Bestandteil der Validierung. Darüber hinaus muss eine ausreichende statistische Absicherung der Simulationsexperimente erfolgen und die Stabilität des Simulationsmodells überprüft werden (vgl. [VDI3633, S. 38-39]).

Zur Validierung der Funktionalitäten hat ein strukturiertes Durchgehen der Simulation mit Simulationsexperten beigetragen. Die Visualisierung von Simulationsergebnissen, zum Beispiel mit dem Durchlaufdiagramm, konnte dieses Vorgehen unterstützen und Fehler vermeiden.

Zur statistischen Absicherung der Simulationsversuche muss die Simulationsdauer ausreichend hoch gewählt und ein realistischer Anfangszustand berücksichtigt werden. Den Anfangszustand stellt ein sogenannter Simulationsvorlauf her, um die Arbeitssysteme und andere Elemente des Simulationsmodells initial zu belegen. Der Vorlauf bleibt bei der Auswertung unberücksichtigt und muss deshalb zusätzlich in der Simulationsdauer berücksichtigt werden. Darüber hinaus muss die Simulationsdauer eine ausreichende statistische Grundlage für die Auswertung der Zielgrößen bilden. Dafür wurde jeder Simulationsdurchlauf mit 5.000 Aufträgen durchgeführt. Um darüber hinaus eine Absicherung der statistischen Aussagekraft innerhalb der einzelnen Versuchsreihen und der Kombination verschiedener Eingangsparameter zu erreichen, wurden für jede einzelne Versuchskonfiguration zehn Simulationsdurchläufe durchgeführt. Die einzelnen

Simulationsdurchläufe unterscheiden sich dabei lediglich durch die Zufallszahlen, die zur Ermittlung der schwankenden Simulationsparameter dienen. Dieses Vorgehen kann die statistische Aussagekraft zusätzlich erhöhen und dient insbesondere der Beurteilung der statistischen Unsicherheit innerhalb der Simulationsexperimente.

Ein weiterer Validierungsschritt überprüft die Gesamtstabilität des Modells durch zeitlich ausgedehnte Simulationsdurchläufe. Dafür wurden ausgewählte Simulationsdurchläufe mit einer ausgedehnten Simulationsdauer durchgeführt.

Die Eingangsdaten des Simulationsmodells sind die Belastung, die Rückmeldezeit, die Annahmequote und die verwendeten Verfahren der Fertigungssteuerung. Folgende Eingangsdaten sollen eine realitätsnahe Evaluation der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung ermöglichen:

Für die Belastungssituationen der Fertigung ist charakteristisch, dass sich Belastung und Leistung langfristig die Waage halten. Andernfalls würden sich Aufträge entweder verspäten oder Kapazitäten ungenutzt bleiben. Insbesondere über kürzere und mittlere Zeiträume sind jedoch auch Situationen mit einer Überlast der Fertigung zu beobachten, weshalb auch diese Belastungssituationen in den Simulationen abgebildet wurden. Auf die Belastungssituation einzelner Arbeitssysteme wirken sich insbesondere die Varianten-zuweisung und die im Arbeitsplan dokumentierten Fertigungsabläufe aus. Die zufällige Zuordnung der Varianten und der Fertigungsablauf in einem Job-Shop verursachen schwankende Belastungen der Arbeitssysteme und wechselnde Fertigungsengpässe.

Die Festlegung der Rückmeldezeiten basiert auf einer Befragung von 48 Industrieunternehmen. Diese gaben eine sehr große Spanne von einigen Tagen bis zu mehreren Monaten für die Rückmeldezeiten der Kunden an. Die weitaus meisten Unternehmen gaben jedoch eine Rückmeldezeit von einem bis fünf Tagen an [BANK21, S. 49].

Die Auswahl der Annahmequote basiert ebenfalls auf der Industriebefragung. Die Unternehmen gaben für verschiedene Annahmequoten ähnliche Anteile an. Am häufigsten traten jedoch Annahmequoten zwischen 40% und 60% auf [BANK21, S. 50].

Eine Auswahl für die jeweiligen Simulationsziele geeigneter Verfahren der Fertigungssteuerung erfolgt modellbasiert auf Grundlage des Modells der Fertigungssteuerung [LÖDD16], das die Aufgaben der Fertigungssteuerung mit den logistischen Zielgrößen verknüpft. Eine modellbasierte Konfiguration hat Abschnitt 5.4 bereits dargelegt. Diese modellbasierte Konfiguration hat das Potential, Terminierungsfehler auszugleichen. Dies ist zumindest für einen Teil der Evaluierung unerwünscht, weil die Leistungsfähigkeit der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung beurteilt werden soll. Der folgende Abschnitt beschreibt deshalb eine für Evaluationszwecke ausgewählte Referenzkonfiguration der Fertigungssteuerung.

6.1.3 Referenzkonfiguration der Fertigungssteuerung

Die Fertigungssteuerung in einer Referenzkonfiguration soll die logistische Zielerreichung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung möglichst wenig beeinflussen, um das Verfahren eigenständig bewerten zu können. Die ausgewählten Verfahren der Fertigungssteuerung sollen zu diesem Zweck die vorgegebene Planung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung möglichst unverändert umsetzen.

Abbildung 6-4 zeigt die auf dieser Grundlage ausgewählten Verfahren der Fertigungssteuerung für die Referenzkonfiguration.

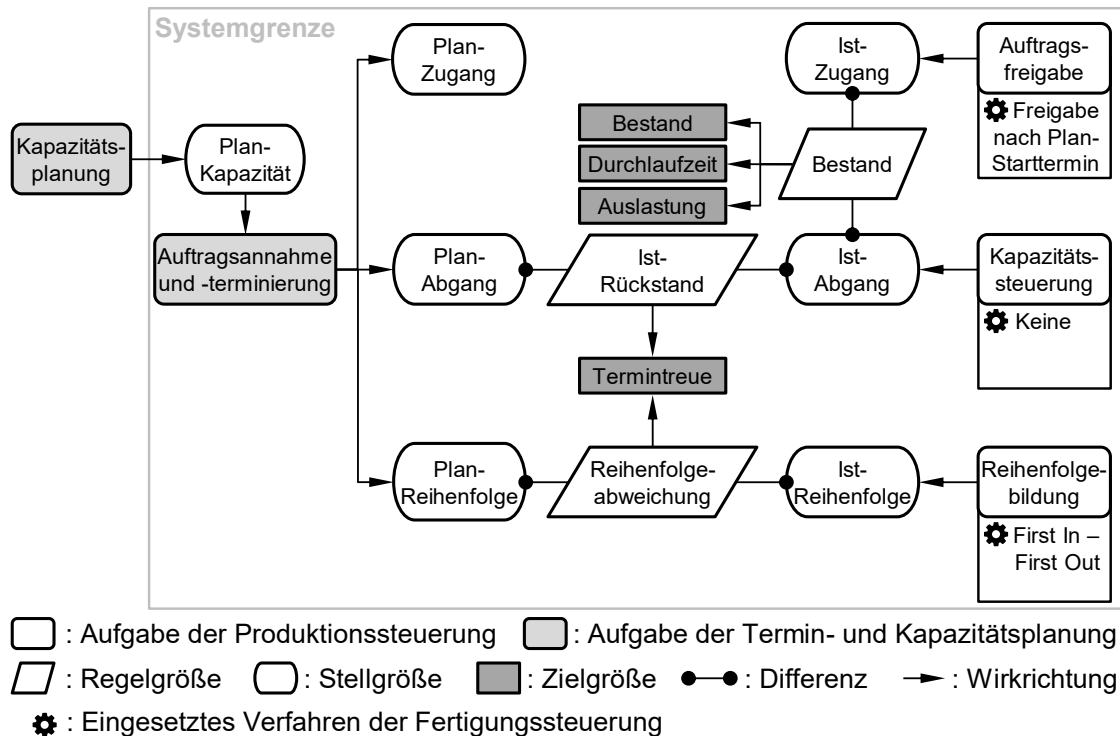


Abbildung 6-4: Referenzkonfiguration der Fertigungssteuerung (in Anlehnung an [LÖDD16, S. 8])

Für die *Auftragsfreigabe* wurde eine Freigabe nach dem Plan-Starttermin ausgewählt, welche den Plan-Zugang der Fertigung unverändert umsetzt. Von großer Relevanz für das Verfahren der Auftragsfreigabe ist die Bestimmung der Plan-Durchlaufzeiten, da der Plan-Zugang über die Plan-Durchlaufzeiten mit dem Plan-Abgang verbunden ist. Die Plan-Durchlaufzeiten beeinflussen daher über die Auftragsfreigabe nach Plan-Starttermin die Umlaufbestände der Fertigung. Dies wirkt sich insbesondere auf die logistischen Zielgrößen Auslastung, Durchlaufzeit und Bestand aus [LÖDD16, S. 341-343].

Die Referenzkonfiguration nimmt starre Kapazitäten an. Eine *Kapazitätssteuerung* kann durch die Beeinflussung des Ist-Abgangs Planungsfehler ausgleichen und die logistische Zielerreichung dadurch stark beeinflussen. Dies ist für die Evaluation im Referenzzustand nicht erwünscht, weil die modellbasierte Auftragsannahme isoliert beurteilt werden soll.

Eine *Reihenfolgebildung* nach First In – First Out (FIFO) vermeidet zusätzliche Reihenfolgevertauschungen und verhält sich bezüglich der logistischen Zielerreichung neutral [LÖDD16, S. 509]. Reihenfolgevertauschungen, die im Simulationsmodell aufgrund unterschiedlicher und verzweigter Materialflüsse entstehen, werden durch dieses Verfahren nicht ausgeglichen und beeinflussen die Termintreue negativ.

Die Referenzkonfiguration der Fertigungssteuerung eignet sich dazu, die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung möglichst unabhängig von der Fertigungssteuerung zu bewerten. Im praktischen Einsatz und zum Aufzeigen der Potentiale empfiehlt es sich jedoch, die modellbasierte Konfiguration der Fertigungssteuerung zu nutzen.

6.2 Versuchsplanung

Die Simulationsversuche haben das Ziel, die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung mit verschiedenen Kombinationen der sieben Einflussgrößen Terminplanung, Belastung, Annahmquote, Rückmeldezeit, Annahmeverhalten, Fertigungssteuerung und Fertigungsunsicherheiten zu untersuchen. Diese leiten sich aus dem Auftragsdurchlauf bzw. den Eigenschaften der Auftragsfertigung ab. Eine Übersicht der untersuchten Einflussgrößen und weitere Rahmenbedingungen zeigt Tabelle A 8.

Die *Terminplanung* erfolgt in der Praxis vielfach nicht auf Basis kundenindividuell bestimmter Lieferzeiten, sondern mit Standardlieferzeiten [BANK21, S. 45]. Diese Referenz besitzt damit eine hohe praktische Relevanz und ist auch in den Verfahrensregeln sehr klar. Aus wissenschaftlicher Perspektive ist das Verfahren ein klassischer Vertreter durchlauforientierter Verfahren. Das Verhalten dieser Referenz kann sehr einfach interpretiert werden, weil sie die Belastung zur Bestimmung des Plan-Abgangs verschiebt, ohne sie zu verändern. Dies ermöglicht es, das Verhalten der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung noch besser einzuordnen und das Regelungsverhalten zu veranschaulichen. An dieser Stelle muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die Terminplanung mit Standardlieferzeiten, trotz der weiten Verbreitung, in vielen Fällen keine gute logistische Zielerreichung ermöglicht.

Ein direkter Einfluss der Angebotsbearbeitung auf die Terminplanung ist die *Belastung* durch Kundenanfragen. Langfristig müssen Belastung und Leistung im Gleichgewicht stehen, um die Kundennachfrage bedienen zu können, ohne größere Auslastungsverluste zu erleiden. Kurz- und mittelfristig können durch eine schwankende Kundennachfrage jedoch Über- oder Unterbelastungen der Fertigung entstehen, die sich auf die Terminplanung auswirken. Aus diesem Grund wurde die Belastung als eine relevante Einflussgröße der Angebotsbearbeitung zwischen 95%, 100% und 105% der Kapazität variiert. Als Folge bilden die Simulationen insbesondere bei einer Belastung von 105% der Kapazität keinen stationären Zustand ab: Bei einer Planung mit Standardlieferzeiten nimmt der Rückstand über der Zeit kontinuierlich zu, bei einer modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung steigt hingegen die Lieferzeit. Die Simulationsversuche mit Überlast sind für die Terminplanung besonders anspruchsvoll und dienen dazu, ihre Robustheit zu prüfen.

Die mittlere *Annahmquote* wirkt sich durch die Binomialverteilung der Annahmehentscheidung auf die Unsicherheit in der Terminplanung aus. Eine Variation der mittleren Annahmquote in einigen Simulationen mit Werten von 10%, 30%, 50%, 70% und 90% zeigt, inwieweit sich die Annahmehentscheidung auf die Terminierungsgüte auswirkt.

Weiterhin beeinflusst die mittlere *Kundenrückmeldezeit* die Terminplanung, da sich mit höheren Rückmeldezeiten mehr Angebote gleichzeitig in der Planung befinden. Eine Variation dieser Zeit in einigen Simulationsversuchen zwischen zwei, fünf und zehn Betriebskalendertagen verdeutlicht diesen Einfluss. Als Sonderfall bei der Betrachtung der Rückmeldezeit kann sich die Zeit für die Annahme bzw. Ablehnung eines Angebots unterscheiden (vgl. Abschnitt 4.1). Dies wurde in einigen Simulationsuntersuchungen gesondert untersucht.

Die *Fertigungssteuerung* umfasst die Aufgaben der Auftragsfreigabe, der Reihenfolgebildung und der Kapazitätssteuerung. Entsprechend der Überlegungen in Abschnitt 6.1.2 soll es eine Referenzkonfiguration mit einer Auftragsfreigabe nach Termin, einer FIFO-Reihenfolgebildung und starren Kapazitäten erlauben, die isolierte Anwendung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung zu evaluieren. Eine modellbasiert abgestimmte Konfiguration der Fertigungssteuerung (vgl. Abschnitt 5.4) mit einer Auftragsfreigabe nach ConWIP, einer Reihenfolgebildung nach Termin und – in einzelnen Versuchen – einer Rückstandsregelung soll dagegen die Potentiale der logistischen Zielerreichung mit dem vorgestellten Verfahren aufzeigen.

Fertigungsunsicherheiten verschlechtern die logistische Zielerreichung und bergen darüber hinaus die Gefahr, die Wirkung der Auftragsannahme und -terminierung zu beeinträchtigen. Die Variation der Auftragszeit beeinflusst die Streuung des Kapazitätsbedarfs und kann somit Auslastungsverluste verursachen. Aus diesem Grund wurden die Simulationsuntersuchungen mit einer mittleren und hohen Variation der Auftragszeit ($ZAU_V = 0,5$ bzw. $ZAU_V = 1$) durchgeführt. Dies wurde mithilfe verschiedener Auftragszeiten für einzelne Varianten umgesetzt (vgl. Tabelle A 9 und Tabelle A 10). Darüber hinaus kann der Materialfluss die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung beeinflussen, da die Terminplanung auf Ebene der gesamten Fertigung durchgeführt wird. Auch Störungen können die Fertigung massiv beeinflussen. Die Untersuchung von mittleren Störzeitanteilen von 20% aller Arbeitssysteme in einigen Simulationsuntersuchungen soll diesen Einfluss berücksichtigen.

Die mittleren Auftragszeiten betragen in allen Versuchen sieben Stunden. Die Produkte durchlaufen mindestens vier und maximal sieben Arbeitssysteme. Die verfügbare Kapazität je Arbeitssystem wurde auf 24 Stunden je Betriebskalendertag eingestellt. Die Fertigungskapazität beträgt somit $7 \cdot 24 = 168$ Stunden je Betriebskalendertag.

Entsprechende Versuchsreihen untersuchen die vorgestellten Einflussgrößen. Tabelle 3 zeigt einen Überblick über den Aufbau der einzelnen Versuchsreihen.

Tabelle 3: Aufbau der Versuchsreihen zur Evaluation

		Fertigungssteuerung	
		Reihenfolgebildung: First In – First Out Auftragsfreigabe: nach Plan-Starttermin Kapazitätssteuerung: starre Kapazitäten	Reihenfolgebildung: nach Plan-Endtermin Auftragsfreigabe: Constant Work in Process Kapazitätssteuerung: Rückstandsregelung
Terminplanung	SLZ	① Referenzszenario	Einfluss von Unsicherheiten ③
	mAAT	① Referenzszenario a. Einfluss der Annahmequote b. Einfluss der Rückmeldezeit	Einfluss von Unsicherheiten ③ Einfluss der Fertigungssteuerung ②

mAAT modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
 SLZ Terminplanung mit Standardlieferzeiten
 ① Versuchsreihe

Die erste Versuchsreihe bildet ein Referenzszenario zur Beurteilung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung im Vergleich zur Planung mit Standardlieferzeiten. Ziel dieser ersten Versuchsreihe ist es, die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung möglichst isoliert zu beurteilen und dafür insbesondere die Wirkung der Fertigungssteuerung durch eine gezielte Verfahrensauswahl zu begrenzen (vgl. Abschnitt 6.1.3). Dabei wird der Einfluss der Annahmquote bzw. der Rückmeldezeit auf die Terminplanung gesondert betrachtet.

Die zweite Simulationsreihe zeigt den Einfluss der Fertigungssteuerung auf, indem modellbasiert abgestimmte Verfahren der Fertigungssteuerung mit der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung kombiniert wurden (vgl. Abschnitt 5.4). Die Rückstandsregelung wurde dabei als Sonderfall umgesetzt, da sie durch den potentiell starken Einfluss auf die logistische Zielerreichung die isolierte Beurteilung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung erschwert.

Die dritte Versuchsreihe untersucht die Robustheit der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung mit den abgestimmten Verfahren der Fertigungssteuerung. Dafür wurden Unsicherheiten in der Fertigung erhöht, indem Störungen der Arbeitssysteme eingeführt wurden und die Streuung der Auftragszeiten erhöht wurde.

Die Simulationsreihen enthalten verschiedene Simulationsexperimente, die die einzelnen Einflussfaktoren variieren. Jedes Simulationsexperiment simuliert 10.000 Anfragen und hat einen zusätzlichen Simulationsvorlauf von 100 Anfragen. Die Simulationsexperimente wurden zehnmal mit unterschiedlichen Zufallszahlen ausgeführt, um die Versuche statistisch abzusichern. Die Ergebnisse werden im Folgenden für die gesamte Fertigung und in der Einheit *Anzahl Aufträge* dargestellt, da diese Einheit die Ergebnisse für die gesamte Fertigung besonders anschaulich und nachvollziehbar repräsentiert.

6.3 Versuchsreihe 1: Referenzszenario

Folgende Abschnitte untersuchen einen Referenzzustand (Abschnitt 6.3.1), den Einfluss der Annahmquote (Abschnitt 6.3.2) und den Einfluss der Rückmeldezeiten (Abschnitt 6.3.3) für die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung.

6.3.1 Referenzzustand

Im Referenzzustand wird die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung mit einer Terminplanung mit Standardlieferzeiten von zehn Tagen verglichen. Es wurden Belastungen von 95%, 100% und 105% der Kapazität simuliert. Alle Versuche haben eine mittlere Annahmquote von 50% und eine mittlere Rückmeldezeit von fünf Betriebskalendertagen für alle Angebote. Die Fertigungssteuerung ist in der Referenzkonfiguration (vgl. Abschnitt 6.2) mit einer Auftragsfreigabe nach Termin, einer FIFO-Reihenfolgebildung und starren Kapazitäten eingestellt. Die Fertigungsunsicherheiten sind im Referenzszenario mit einem Variationskoeffizienten der Auftragszeit von 50% und ohne Störungen vergleichsweise gering. Der Lieferzeitpuffer beträgt einen Betriebskalendertag. Die Ausprägung der Einflussgrößen zeigt Tabelle A 8 und entsprechende Arbeitspläne Tabelle A 9. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse dieser Simulationsexperimente. Detaillierte Ergebnisse finden sich im Anhang in Tabelle A 12 bis Tabelle A 14.

Tabelle 4: Simulationsergebnisse des Referenzszenarios

Parameter											
Fertigungssteuerung: Referenzkonfiguration						Störungen: Keine					
ZR _m : 5 BKT				AQ _m : 50%				ZAU _v : 0,5			
Verfahren	BEL _m [%]	A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,Plan} [BKT]	LTE [%]
				μ	σ		μ	σ			
SLZ	95	94,5	68,9	2,9	2,0	-51,2	-2,3	1,6	73,9	10,0	98,6
	100	96,5	161,9	6,8	3,0	35,5	1,5	2,3	14,9	10,0	54,1
	105	95,4	282,5	11,2	4,5	150,4	5,9	4,1	2,9	10,0	15,4
mAAT	95	95,2	73,0	3,1	1,8	-39,7	-1,8	1,5	62,9	8,2	97,7
	100	95,1	94,5	4,1	2,0	-26,9	-1,2	1,7	50,8	13,4	95,3
	105	94,7	98,9	4,2	2,0	-24,8	-1,1	1,7	49,3	18,5	94,6

A _m	Mittlere Auslastung der Fertigung [%]
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
BA _m	Mittlerer Bestand der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträgen) [-]
BKT	Betriebskalendertag
LTE	Liefertermineinhaltung [%]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
RSA _m	Mittlerer Rückstand der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
SLZ	Planung mit Standardlieferzeiten
TAA	Terminabweichung im Abgang [BKT]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZDL	Durchlaufzeit der Fertigung [BKT]
ZL _{m,Plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
μ	Mittelwert
σ	Standardabweichung

Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung ist im Gegensatz zur Terminplanung mit Standardlieferzeiten in der Lage, die Liefertermineinhaltung auch bei unterschiedlichen Belastungssituationen auf einem konstant hohen Niveau zu halten. Bei einer Belastung von 95% der Kapazität (Unterlast) ist die Liefertermineinhaltung bei der Terminplanung mit Standardlieferzeiten mit 98,6% geringfügig höher (0,9 Prozentpunkte) als bei der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung (LTE = 97,7%). Der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung gelingt es im Gegenzug jedoch, um 18% kürzere Lieferzeiten anzubieten (ZL_m = 8,2 BKT). Bei Belastungen von 100% der Kapazität bzw. 105% der Kapazität (Überlast) zeigt die Terminplanung mit Standardlieferzeiten eine einbrechende Liefertermineinhaltung (LTE = 54,1% bzw. 15,4%), wohingegen die Liefertermineinhaltung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung stabil bleibt (LTE = 95,3% bzw. 94,6%). Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Verfahren Aufträge später einplant, wenn zu einem früheren Zeitpunkt keine freien Kapazitäten vorhanden sind. Bei einer systematischen oder temporären Überlastsituation, bei der die Auslastung die Kapazität übersteigt, sind daher längere Lieferzeiten notwendig, um Rückstände zu vermeiden. Im Mittel erhöhen sich die Lieferzeiten in den Simulationsexperimenten mit einer Belastung von 100% der Kapazität um

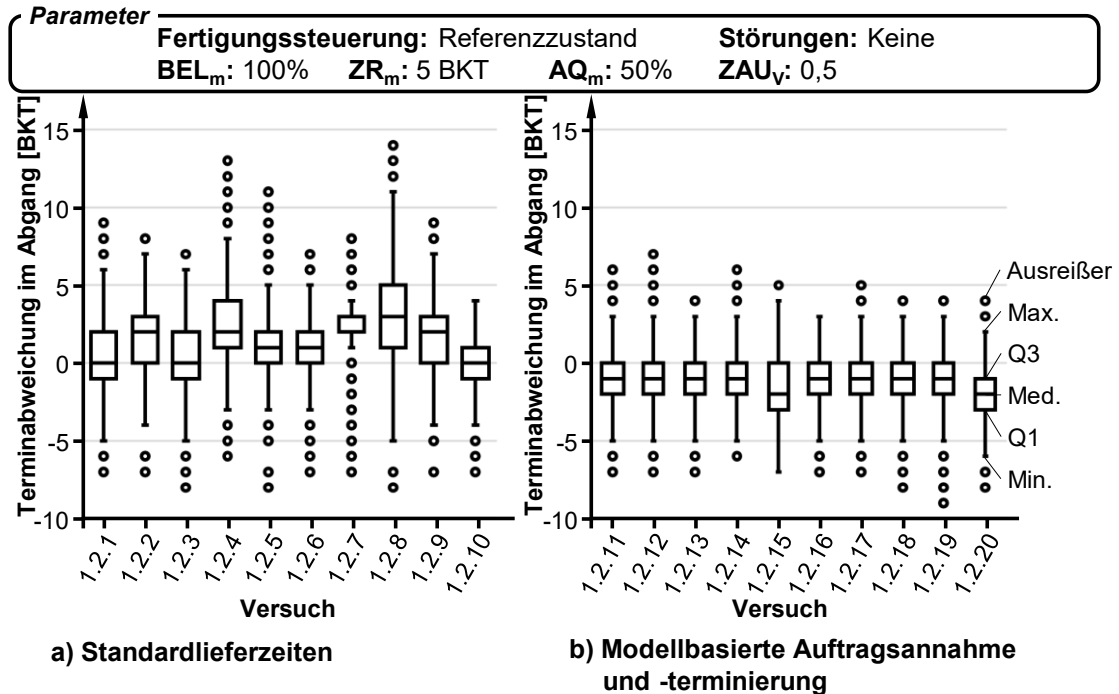
etwa 0,04 Tage pro Betriebskalendertag und mit einer Überlast von 105% der Kapazität um 0,09 Tage pro Betriebskalendertag.

Das Verhalten spiegelt sich auch in der Terminabweichung wider, die bei der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung insgesamt leicht negativ, aber über verschiedene Belastungen vergleichsweise konstant ist (-1,8 bis -1,1 BKT). Im Gegensatz dazu zeigt die Terminplanung mit Standardlieferzeiten sowohl deutlich steigende mittlere Terminabweichungen (-2,3 bis 5,9 BKT) als auch eine ansteigende Standardabweichung der Terminabweichung (1,6 bis 4,1 BKT).

Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung ist zudem in der Lage, die Durchlaufzeiten mit Mittelwerten zwischen 3,1 und 4,2 Betriebskalendertagen bei den verschiedenen Belastungen deutlich konstanter zu halten als die Referenz der Terminplanung mit Standardlieferzeiten, die eine mittlere Durchlaufzeit zwischen 2,9 und 11,2 Betriebskalendertagen aufweist.

Die Vorteile gehen mit leichten Auslastungsverlusten der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung im Vergleich zur Terminplanung mit Standardlieferzeiten einher. Die Auslastung fällt bei der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung bei einer Unterlast mit 95,2% um 0,7% höher aus als in den Referenzversuchen der Terminplanung mit Standardlieferzeiten. Bei ausgeglichener Belastung bzw. Überlast ist die Auslastung mit Werten von 95,1% und 94,7% dagegen etwas geringer als bei der Terminplanung mit Standardlieferzeiten. Die grundsätzlichen Auslastungsverluste beider Verfahren resultieren dabei aus mehreren Effekten. Zum einen ergeben sich aufgrund der eingestellten Unsicherheiten und insbesondere durch die binomialverteilte Annahmementscheidungsphasen, in denen die Belastung hinter der Kapazität zurückbleibt. Die Verfahren sind nicht immer in der Lage, entstandene Lücken in der Planung kurzfristig wieder aufzufüllen. Zum anderen resultieren jedoch auch Auslastungsverluste aus den unterschiedlichen Materialflüssen. Das Simulationsmodell weist die Produktvarianten zufällig zu. Da nicht jedes Produkt jedes Arbeitssystem durchläuft (vgl. Tabelle A 9), weisen die Zwischenankunftszeiten der Aufträge an den einzelnen Arbeitssystemen eine sehr hohe Streuung mit einer annähernden Exponentialverteilung auf. Diese Charakteristika führen zu Auslastungsverlusten der einzelnen Arbeitssysteme, was sich auch im Gesamtsystem widerspiegelt. Weitere kleinere Verluste der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung resultieren aus der aktiven Verschiebung von Aufträgen beim Auftreten einer (vorläufigen) Überlast während der Planung. Einmal verschobene Aufträge besitzen eine fest zugesagte Lieferzeit und werden deshalb nicht erneut angepasst.

Verschiedene Versuchsdurchläufe mit unterschiedlichen Zufallszahlen zeigen eine hohe Stabilität der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung im Vergleich zu den Versuchen mit der Planung durch Standardlieferzeiten (siehe Abbildung 6-5).



AQ_m : Mittlere Annahmquote *BEL_m*: Mittlere Belastung *BKT*: Betriebskalendertag
Max.: Maximalwert *Med.*: Median *Min.*: Minimalwert *Q1*: Unteres Quartil *Q3*: Oberes Quartil
ZR_m: Mittlere Rückmeldezeit *ZAU_v*: Variationskoeffizient der Auftragszeit

Abbildung 6-5: Vergleich der Terminabweichung im Abgang bei verschiedenen Versuchsdurchläufe mit unterschiedlichen Zufallszahlen

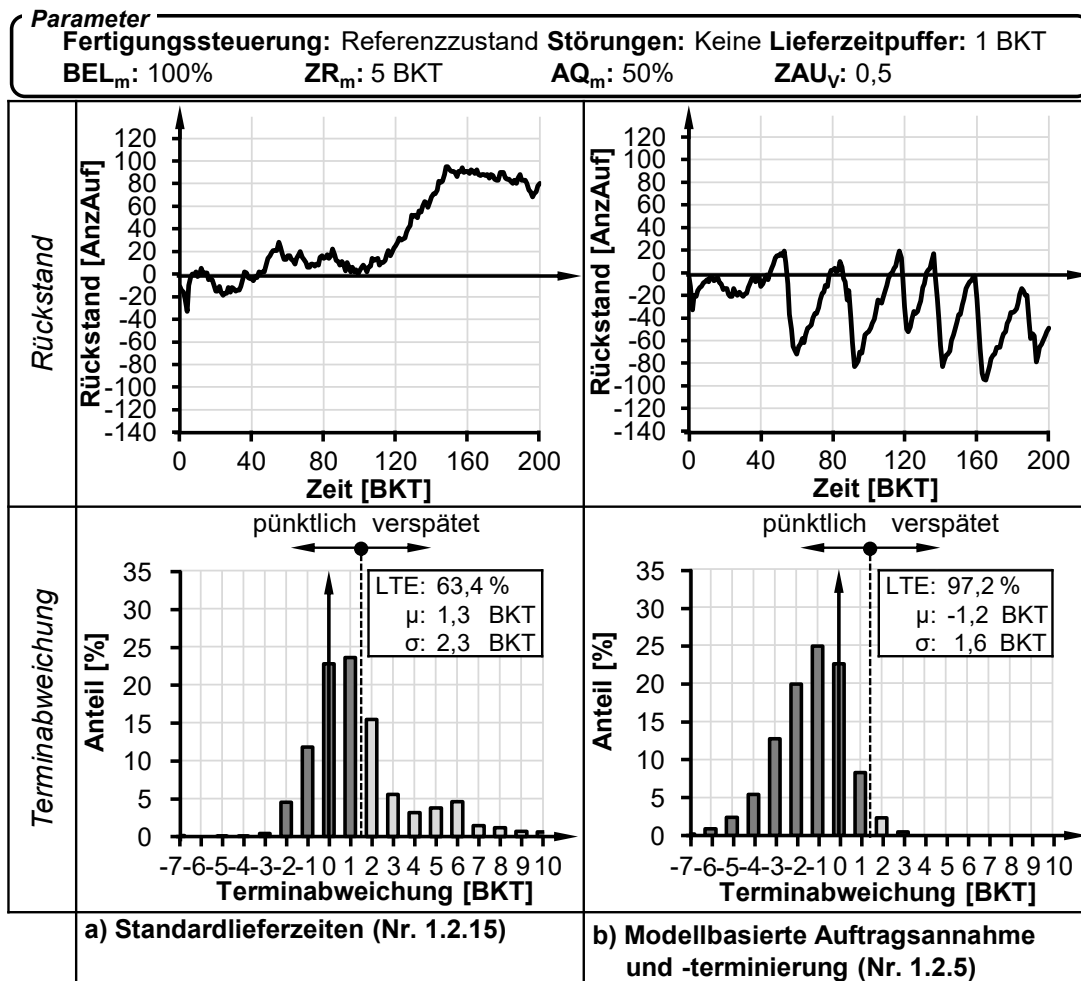
Die Diagramme stellen beispielhaft die Ergebnisse der einzelnen Versuchsdurchläufe zur Terminabweichung im Abgang als Box-Plots dar. Dabei ist der Medianwert der jeweiligen Versuchsreihe mit einem Balken markiert. Die Box spannt sich zwischen dem oberen Quartil (Q3) und dem unteren Quartil (Q1) auf. Das obere Quartil des Boxplots (Q3) legt dabei die Grenze fest, unterhalb derer 75 Prozent aller Werte für die Terminabweichung liegen. Das untere Quartil des Boxplots (Q1) legt die Grenze fest, unterhalb derer noch 25 Prozent aller Werte für die Terminabweichung aufgetreten sind. Die Spannweite der Box enthält somit 50 Prozent aller Messwerte. Der sogenannte obere und untere Whisker geben entsprechend der Definition von Tukey [TUKE77, S. 55] alle Werte an, die sich in einer Reichweite des 1,5-fachen Interquartilsabstands zwischen Q1 und Q3 befinden. Darüberhinausgehende Werte sind als Ausreißer gekennzeichnet. Jeder Punkt bildet einen oder mehrere Aufträge mit der entsprechenden Terminabweichung ab.

Die Planung mit Standardlieferzeiten (siehe Abbildung 6-5a) erzielt Medianwerte für die Terminabweichung der Aufträge zwischen null und drei Betriebskalendertagen. Die Hälfte der Werte befindet sich jeweils innerhalb von zwei bis sechs Betriebskalendertagen um den jeweiligen Median. Die Spannweite der Terminabweichungen variiert bei den einzelnen Versuchsdurchläufen zwischen zehn und zwanzig Betriebskalendertagen. Die

6 Simulative Evaluation unter regulären Bedingungen

Versuchsdurchläufe der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung (siehe Abbildung 6-5b) weisen Medianwerte von null und minus einem Betriebskalendertag auf. Die Hälfte der Werte befindet sich jeweils innerhalb von einem bis drei Betriebskalendertagen um den jeweiligen Median. Die Spannweite der Terminabweichungen variiert bei den einzelnen Versuchsdurchläufen der mAAT zwischen acht und neun Betriebskalendertagen. Im Vergleich zu der Planung durch Standardlieferzeiten weisen die Versuchsdurchläufe der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung eine hohe Konstanz der Ergebnisse auf. Gleichzeitig verdeutlichen die großen Streuungen der Ergebnisse für die Planung mit Standardlieferzeiten die großen statistischen Unsicherheiten in Simulationsdurchläufen mit unterschiedlichen Zufallszahlen.

Beispielhafte Rückstandskurven und Terminabweichungsverteilungen (Abbildung 6-6) veranschaulichen die Wirkungsweise der Verfahren (siehe Tabelle A 13 im Anhang; Experiment 1.2.5; Experiment 1.2.15).



AnzAuf: Anzahl Aufträge AQ_m: Mittlere Annahmequote BEL_m: Mittlere Belastung
 BKT: Betriebskalendertag LTE: Liefertermineinhaltung ZAU_v: Variationskoeffizient der Auftragszeit
 ZR_m: Mittlere Rückmeldezeit μ : Mittelwert σ : Standardabweichung

Abbildung 6-6: Vergleich der Terminabweichungsverteilung und des Rückstandsverlaufs der Verfahren für einen Versuchsdurchlauf

Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung steuert aktiv die Rückstände und vermeidet so den Aufbau großer positiver Rückstände. Wenn das Verfahren positive Rückstände feststellt, steuert es diesen entgegen, indem es neue Angebote unter Berücksichtigung des Rückstands später einplant. Gehen weniger Aufträge ein als erwartet, reagiert das Verfahren ebenfalls mit kürzeren Lieferzeiten für eingehende Angebotsanfragen. Das besondere Regelverhalten mit den markanten Regelbewegungen resultiert aus den Annahmen der Simulation und des Verfahrens. Durch die Festlegung des Plan-Abgangs aus Plan-Kapazität als Obergrenze des Plan-Abgangs reagiert das Verfahren auf positive Rückstände sehr viel stärker als auf negative Rückstände. Sobald in der Zukunft ein positiver Rückstand erkannt wird, verlängert die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung die Lieferzeiten neuer Angebote. Dies verursacht mit einem zeitlichen Verzug einen verringerten Plan-Abgang der Fertigung. Der Standardalgorithmus bietet jedoch keine kürzeren Lieferzeiten an, als die Kunden angefragt haben. Außerdem weist das Verfahren alleine durch die Kundenrückmeldezeit und die Plan-Durchlaufzeit einen vergleichsweise langen Regelkreis und damit auch Regelverzug auf. Diese beiden Effekte zusammen mit den Annahmen der Simulation sorgen dafür, dass kurzfristig freiwerdende Kapazitäten nicht immer umverteilt werden können, was zumindest zeitweise zu höheren negativen Rückständen führt. Im Mittel verursacht die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung deshalb negative Rückstände. Die Planung mit Standardlieferzeiten führt hingegen vor allem in Überlastphasen zu großen positiven Rückständen, die das Verfahren anschließend nicht aktiv abbaut.

Dieses Verhalten spiegelt sich auch in der Verteilung der Terminabweichungen im Abgang wider. Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung verursacht eine vergleichsweise geringe mittlere Terminabweichung im Abgang von -1,2 Betriebskalendertagen. Die Standardabweichung dieser Terminabweichung ist mit 1,6 Betriebskalendertagen moderat. Mit 97,2% erreicht das Verfahren trotz der vergleichsweise großen Unsicherheiten eine hohe Liefertermineinhaltung. Die Planung mit Standardlieferzeiten weist dagegen mit 1,3 Betriebskalendertagen eine Terminabweichung auf, die bereits über dem Lieferzeitpuffer von einem Betriebskalendertag liegt. Darüber hinaus ist auch die Standardabweichung der Terminabweichung mit 2,3 Betriebskalendertagen deutlich oberhalb des Wertes für die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung. Entsprechend ist die Liefertermineinhaltung mit 63,4% deutlich kleiner als bei der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung.

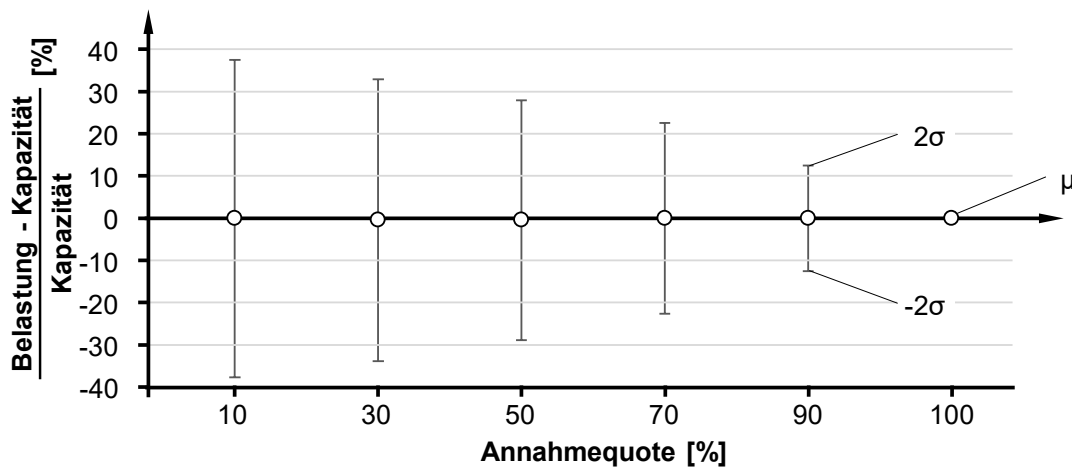
Zusammenfassend lässt sich nach den Versuchen im Referenzszenario feststellen, dass die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung in der Lage ist, durch die aktive Regelung der Lieferzeiten den Rückstand zu begrenzen und die Produktion damit vor Überlastung zu schützen. Als Nachteil sind insbesondere die aus diesem Verhalten resultierenden Auslastungsverluste zu nennen.

Wichtige Verfahrensparameter der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung sind die Annahmequote und die Rückmeldezeit. Die folgenden Abschnitte untersuchen den Einfluss dieser Verfahrensparameter auf das Verhalten und die logistische Zielerreichung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung.

6.3.2 Einfluss der Annahmequote

Um den Einfluss der Annahmequote auf die logistische Zielerreichung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung zu ermitteln, variieren einzelne Simulationsexperimente die Annahmequote. Um auch bei einer veränderten Annahmequote die Belastung zwischen den Versuchen konstant zu halten, passt die Simulation die Zwischenankunftszeit der Anfragen an. Die weiteren Einstellgrößen entsprechen dem Referenzszenario (vgl. Tabelle A 8).

Mit steigender Annahmequote konzentriert sich die Verteilung der Auftragszugänge um den Mittelwert herum, so dass sich die Streuung des relativen Kapazitätsbedarfs verringert. Abbildung 6-7 verdeutlicht dieses Phänomen anhand der Differenz zwischen dem tatsächlichen mittleren täglichen Auftragszugang in der Simulation und der Fertigungskapazität bei verschiedenen Annahmequoten.



μ : Mittelwert σ : Standardabweichung

Abbildung 6-7: Mittelwert und Streuung des Auftragszugangs relativ zur Kapazität bei verschiedenen Annahmequoten

Die mittlere Differenz zwischen Auftragszugang und Kapazität ist in der Abbildung 6-7 mit Kreisen symbolisiert. Dieser gemessene Mittelwert entspricht bei allen Annahmequoten der eingestellten Belastung. Die Streuung unterscheidet sich jedoch deutlich voneinander. In der Abbildung dargestellt ist die Streuung in Form der doppelten Standardabweichung der Differenz zwischen der täglichen Belastung und der täglichen Kapazität. Dieser Bereich deckt etwa 95% aller Werte ab. Bei einer Annahmequote von zehn Prozent kann die tägliche Auftragsbelastung um fast 40 Prozentpunkte abweichen und damit zwischen etwa 60% und 140% der Kapazität liegen. Diese Unsicherheit reduziert sich auf null bei einer Annahmequote von 100%.

Tabelle 5 zeigt die Simulationsergebnisse bei einer Variation der Annahmequote. Die Experimente enthalten eine mittlere Belastung von 100% der Kapazität, da mögliche

Effekte bei einer ausgeglichenen Belastung am deutlichsten auftreten. Die Fertigungssteuerung und weitere Einflussparameter entsprechen der Referenzkonfiguration. Detaillierte Ergebnisse zeigen Tabelle A 13 und Tabelle A 15 bis Tabelle A 18 im Anhang.

Tabelle 5: Simulationsergebnisse mit verschiedenen Annahmequoten

Parameter							
Fertigungssteuerung: Referenzkonfiguration				Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT				ZAU_v: 0,5			
Verfahren	AQ _m [%]	BEL [%]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		LTE [%]
		μ	σ		μ	σ	
mAAT	10	100	19,1	-28,6	-1,2	1,8	94,2
	30	100	17,1	-31,0	-1,3	1,7	96,2
	50	100	13,7	-26,9	-1,2	1,7	95,3
	70	100	10,8	-31,0	-1,3	1,7	96,2
	90	100	6,7	-33,4	-1,4	1,6	96,9

AQ _m	Mittlere Annahmequote [%]
BEL	Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]
BKT	Betriebskalendertag
LTE	Liefertermineinhaltung [%]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
RSA _m	Mittlerer Rückstand der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
TAA	Terminabweichung im Abgang [BKT]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
μ	Mittelwert
σ	Standardabweichung

Die logistische Zielerreichung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung wird kaum von der Annahmequote beeinflusst. Es sind allenfalls sehr kleine Unterschiede zwischen den einzelnen Simulationsreihen erkennbar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Unsicherheit der Annahmequote (siehe Abbildung 6-7) die Zielgrößen nur indirekt beeinflusst. Weitere vergleichsweise große Unsicherheiten, wie der verzweigte Materialfluss und die Variation der Auftragszeiten, überlagern sich mit der Wirkung der mittlerer Annahmequoten.

6.3.3 Einfluss der Rückmeldezeit

Der folgende Abschnitt untersucht den Einfluss der Rückmeldezeit auf die logistische Zielerreichung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung. Das Annahmeverhalten der Kunden geht zunächst von gleichen mittleren Kundenannahme- und Ablehnungszeiten aus und betrachtet anschließend den Fall unterschiedlicher Zeiten. Die weiteren Einstellgrößen entsprechen dem Referenzszenario (vgl. Tabelle A 8).

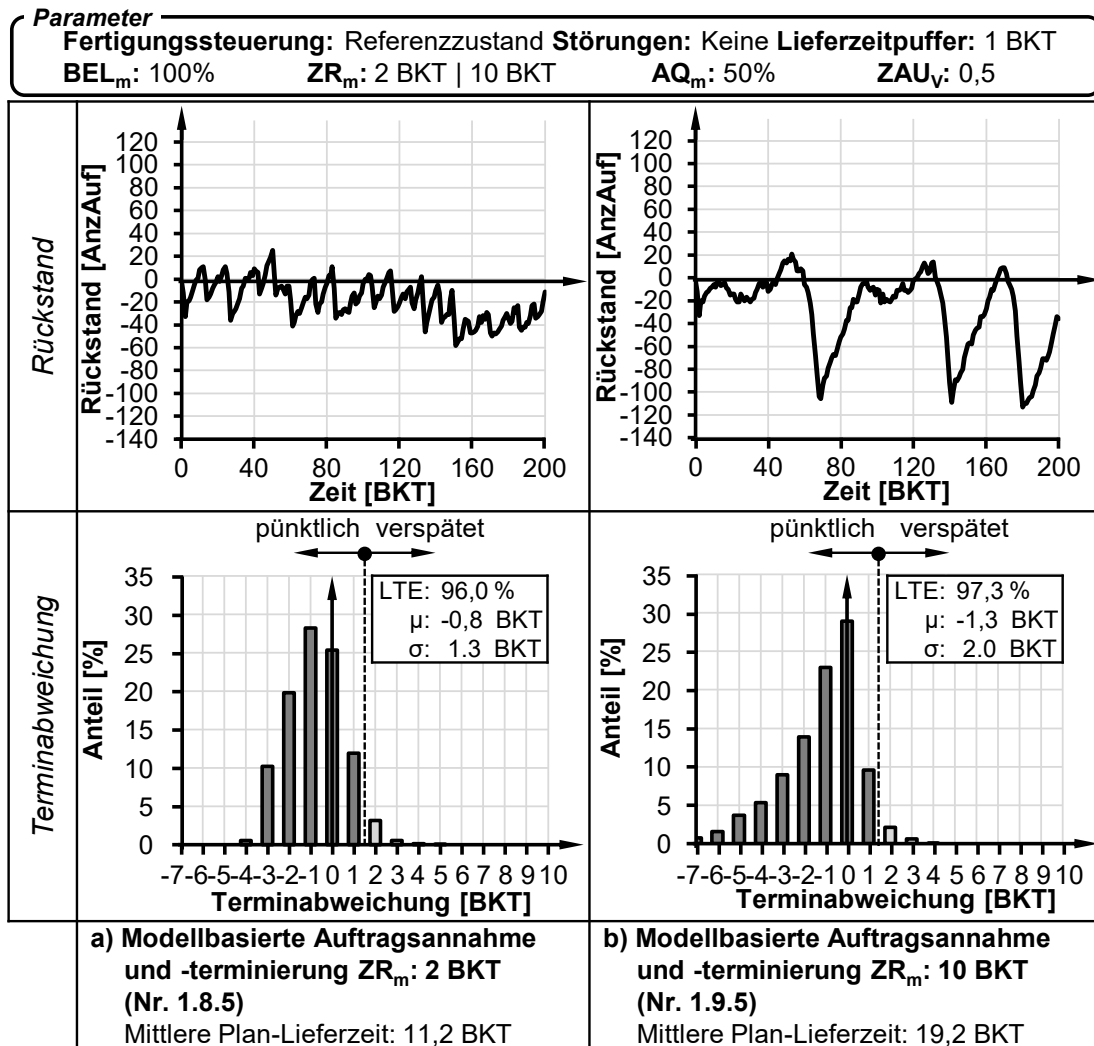
Übereinstimmung der mittleren Annahme- und Ablehnungszeiten

Tabelle 6 zeigt die Simulationsergebnisse der Simulationsexperimente mit verschiedenen mittleren Rückmeldezeiten bei einer mittleren Belastung von 100% der Kapazität. Detaillierte Ergebnisse zeigen Tabelle A 13, Tabelle A 18 und Tabelle A 19 im Anhang.

6 Simulative Evaluation unter regulären Bedingungen

Der mittlere Bestand in der Produktion und die Durchlaufzeiten erreichen vergleichbare Ergebnisse zum Referenzszenario. Etwas geringere Bestände bei längeren mittleren Rückmeldezeiten sind ebenfalls darauf zurückzuführen, dass Phasen mit einer geringeren Belastung nicht ausgeglichen werden können.

Der Vergleich der Rückstandskurven und Terminabweichungsverteilungen eines Versuchsdurchlaufs mit einer kurzen und einer langen mittleren Rückmeldezeit veranschaulicht das Regelungsverhalten in Abbildung 6-8 (siehe Tabelle A 18 und Tabelle A 19 im Anhang; Experiment 1.8.5; Experiment 1.9.5).



AnzAuf: Anzahl Aufträge AQ_m: Mittlere Annahmquote BEL_m: Mittlere Belastung
 BKT: Betriebskalendertag LTE: Liefertermineinhaltung ZAU_v: Variationskoeffizient der Auftragszeit
 ZR_m: Mittlere Rückmeldezeit μ: Mittelwert σ: Standardabweichung

Abbildung 6-8: Vergleich der Terminabweichungsverteilung und des Rückstandsverlaufs der mAAT für unterschiedliche mittlere Rückmeldezeiten

Die aktive Steuerung der Rückstände ist auch in diesen Simulationsversuchen deutlich sichtbar. Wie erwartet, ist das Regelungsverhalten bei einer kurzen Rückmeldezeit deutlich hochfrequenter als bei einer langen Rückmeldezeit. Auch die absolute Größe der

Regelbewegung ist bei einer kurzen Rückmeldezeit deutlich geringer als bei einer langen Rückmeldezeit. Dieses Verhalten ist auf den geringeren Umfang an Angeboten in der Planung und dem kürzeren Regelkreis bei der kurzen Rückmeldezeit zurückzuführen. Der maximale Rückstand beider Versuche liegt auf einem vergleichbaren Niveau.

Dieses Regelungsverhalten spiegelt sich auch in der Verteilung der Terminabweichungen im Abgang wider. Die mittlere Terminabweichung im Abgang sinkt von -0,8 Betriebskalendertagen (kurze Rückmeldezeit) auf -1,3 Betriebskalendertagen (lange Rückmeldezeit). Insbesondere große Schwankungen der Terminabweichung im negativen Bereich bei einer langen Rückmeldezeit verursachen diese Abweichung der Mittelwerte. Die Schwankung ist auf Unsicherheiten zurückzuführen, die eine große Anzahl an Angeboten verursachen. Zu einem späteren Zeitpunkt freiwerdende Kapazitäten kann die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung aufgrund des langen Regelkreises nicht mehr nutzen. Dies verursacht auf der einen Seite Auslastungsverluste und auf der anderen Seite tendenziell zu lange Plan-Lieferzeiten. Negative Terminabweichungen sind die Folge. Anstatt mit den größeren Unsicherheiten die Liefertermineinhaltung zu gefährden, überführt die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung diese Unsicherheiten in längere Lieferzeiten.

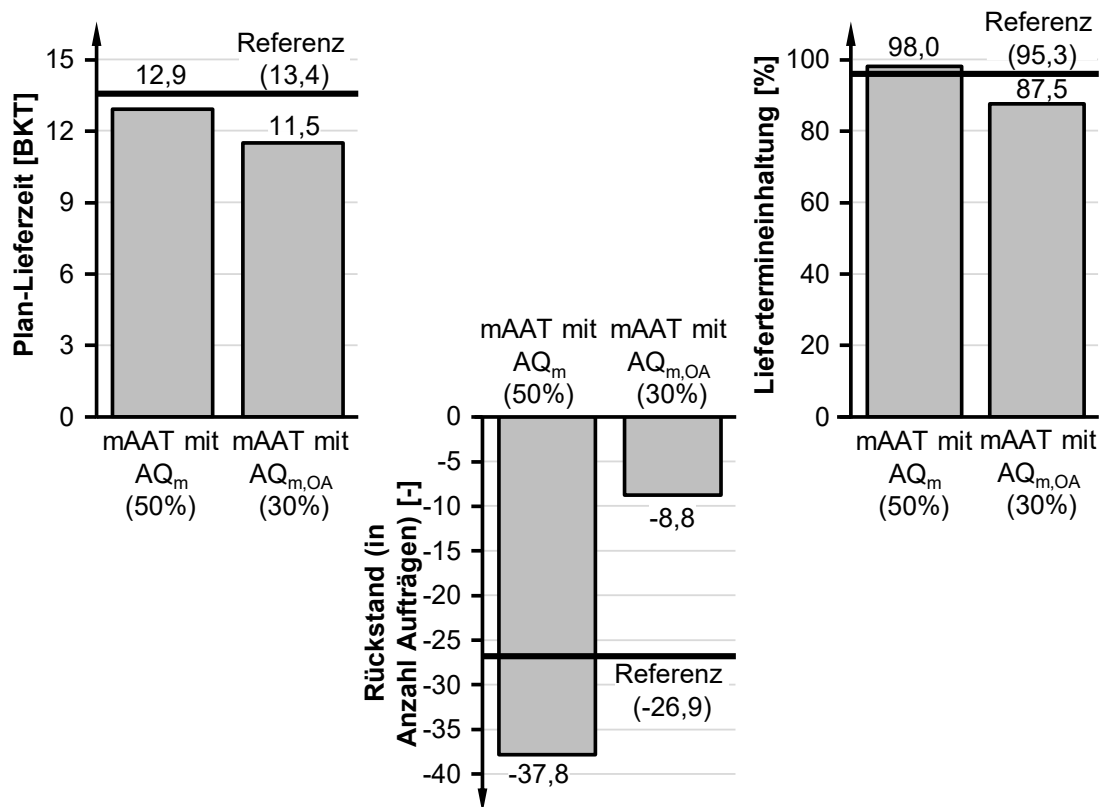
Abweichung mittlerer Annahme- und Ablehnungszeiten

Ein Sonderfall bei der Betrachtung der Kundenrückmeldezeit bilden systematische Unterschiede bei der Kundenannahme- und Kundenablehnungszeit von Angeboten. In diesem Fall entspricht die Annahmequote des Angebotsbestands nicht der Annahmequote aus Rückmeldedaten (vgl. Abschnitt 4.1). Die unterschiedlichen Kundenannahme- und Kundenablehnungszeiten wirken sich bei der Anwendung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung implizit auf die Belastung aus: Ist die Kundenannahmezeit kürzer als die -ablehnungszeit, befinden sich systematisch weniger anzunehmende als abzulehnende Angebote in der Planung. Eine Terminplanung, die dies vernachlässigt, verursacht implizit eine Unterlast, weil freiwerdende Kapazitäten nicht mehr kurzfristig verplant werden können. Im gegensätzlichen Fall, wenn die Kundenannahmezeit länger ist als die Kundenablehnungszeit, befinden sich mehr anzunehmende Angebote in der Planung. Eine Terminplanung auf Grundlage der mittleren Annahmequote verplant dann mehr Kapazitäten als vorhanden sind und sorgt damit für eine Überlastung. Diese Effekte gleicht die in Abschnitt 4.1 modellierte Annahmequote aus dem Angebotsbestand aus. Die folgenden Simulationsergebnisse zeigen die Auswirkungen systematisch abweichender Kundenannahme- und -ablehnungszeiten.

Die Experimente wurden auch für diese Untersuchung bei einer mittleren Belastung von 100% der Kapazität durchgeführt, da mögliche Effekte bei einer ausgeglichenen Belastung am deutlichsten auftreten. Die Fertigungssteuerung und weitere Einflussparameter entsprechen dem Referenzszenario. Als Vergleichswert dient eine Versuchsreihe aus dem Referenzszenario ohne eine Abweichung der Kundenannahme- und Kundenablehnungszeit. Darüber hinaus wurde die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung zum einen mit der Annahmequote aus Rückmeldedaten (siehe Gleichung (1)) und zum anderen mit der modellierten Annahmequote offener Angebote (siehe Gleichung (25)) simuliert. Hierzu wurden die Kundenannahme- und

Kundenablehnungszeiten zwischen drei und sieben Betriebskalendertagen gegenläufig variiert, ohne die mittlere Kundenrückmeldezeit von fünf Betriebskalendertagen zu verändern. Es ergeben sich die zwei unterschiedlichen Szenarien einer (1) geringeren Annahme- als Ablehnungszeit und einer (2) größeren Annahme- als Ablehnungszeit, die sich aufgrund einer impliziten Unterlast bzw. Überlast prinzipiell voneinander unterscheiden. Deshalb werden diese Szenarien zunächst einzeln dargestellt.

Die Ergebnisse einer kürzeren Kundenannahmezeit von drei Betriebskalendertagen im Vergleich zur Kundenablehnungszeit von sieben Betriebskalendertagen zeigt Abbildung 6-9.



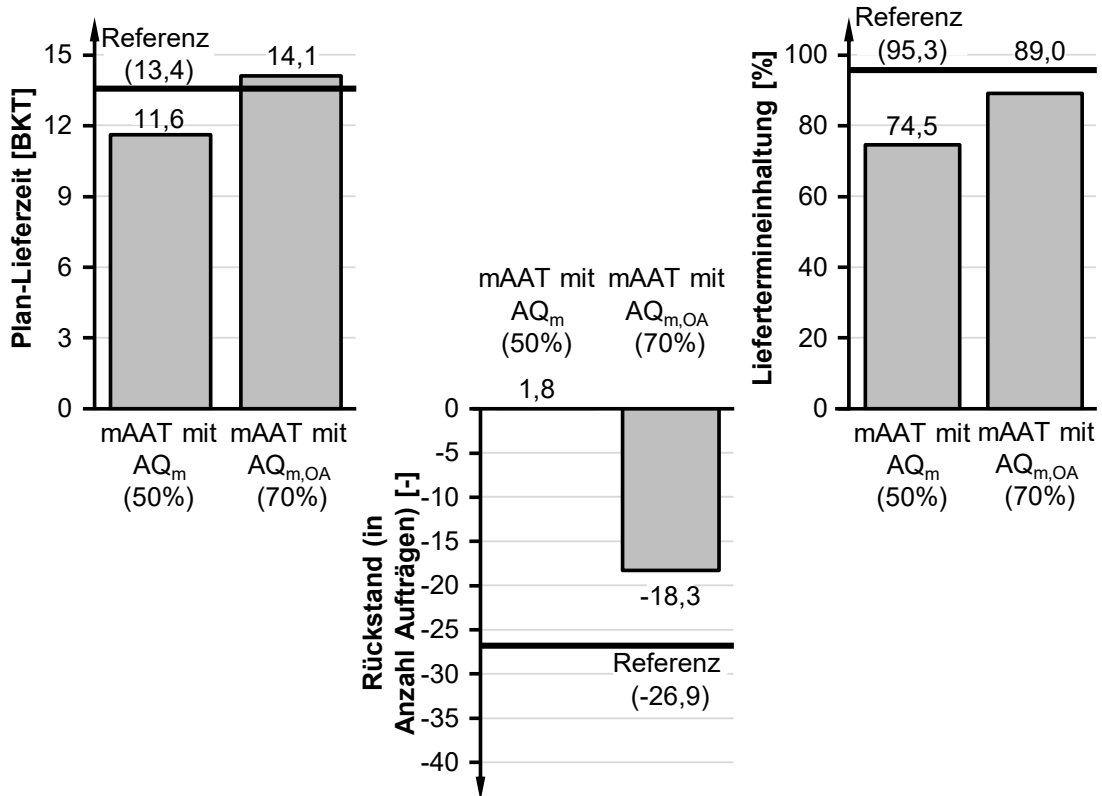
Annahmezeit: 3 BKT Ablehnungszeit: 7 BKT
 AQ_m: Mittlere Annahmequote AQ_{m,OA}: Mittlere Annahmequote offener Angebote
 BKT: Betriebskalendertage mAAT: Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung

Abbildung 6-9: Lieferzeit, Liefertermineinhaltung und Rückstand bei einer kürzeren Kundenannahmezeit (3 BKT) und längeren Kundenablehnungszeit (7 BKT)

In diesem Szenario resultiert aus dem Rückmeldezeitunterschied eine (wirksame) Annahmequote offener Angebote von 30%. Folglich kann eine Planung mit einer Annahmequote von 50% (entspricht der langfristigen Annahmequote) die Kapazitäten nicht voll auslasten, so dass daraus lange Plan-Lieferzeiten (12,9 BKT), hohe negative Rückstände (-37,8 Aufträge) und eine sehr hohe Liefertermineinhaltung von 98,0% resultieren. Im Vergleich dazu entstehen mit der korrigierten Annahmequote aus dem Angebotsbestand etwas kürzere Plan-Lieferzeiten (11,5 BKT), deutlich geringere

negative Rückstände (-8,8 Aufträge) und eine auf 87,5% reduzierte Liefertermineinhaltung.

Die Ergebnisse für das gegensätzliche Szenario mit einer längeren Kundenannahmezeit von sieben Betriebskalendertagen und einer kürzeren Kundenablehnungszeit von drei Betriebskalendertagen zeigt Abbildung 6-10.



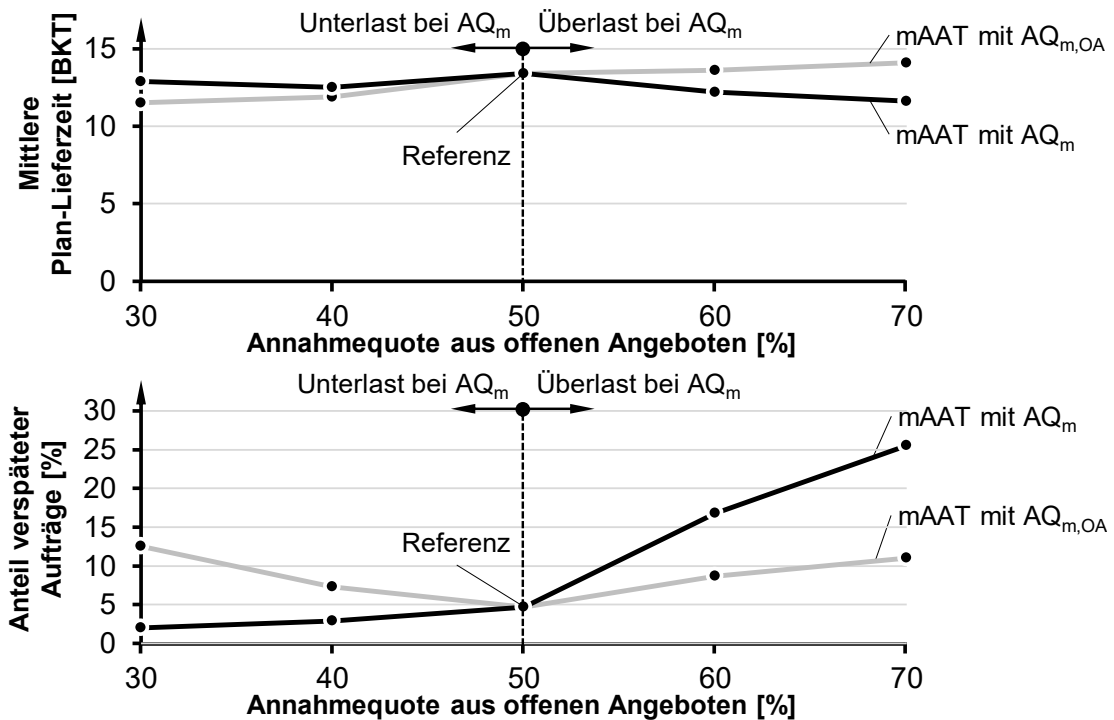
Annahmezeit: 7 BKT Ablehnungszeit: 3 BKT
 AQ_m: Mittlere Annahmequote AQ_{m,OA}: Mittlere Annahmequote offener Angebote
 BKT: Betriebskalendertage mAAT: Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung

Abbildung 6-10: Lieferzeit, Liefertermineinhaltung und Rückstand bei einer längeren Kundenannahmezeit (7 BKT) und kürzeren Kundenablehnungszeit (3 BKT)

Bei einer längeren Kundenannahme- als der Kundenablehnungszeit resultiert aus dem Rückmeldezeitunterschied eine Annahmequote offener Angebote von 70%. Demnach überlastet eine Planung mit einer Annahmequote von 50% (langfristige Annahmequote) die Kapazitäten in diesem Fall. Entsprechend ergeben sich (zu) kurze Plan-Lieferzeiten (11,6 BKT), ein leicht positiver Rückstand (1,8 Aufträge) und eine geringe Liefertermineinhaltung von 74,5%. Im Vergleich dazu entstehen mit der korrigierten Annahmequote aus dem Angebotsbestand etwas längere Plan-Lieferzeiten (14,1 BKT), weiterhin negative Rückstände (-18,3 Aufträge) und eine mit 89,0% vergleichbar hohe Liefertermineinhaltung wie zuvor.

Die Entwicklung der Zielerreichung für mehrere Faktorstufen zeigt Abbildung 6-11. Hierfür stellt die Abbildung die mittlere Plan-Lieferzeit und den Anteil verspäteter

Aufträge über der Annahmquote offener Angebote dar, um die Stabilisierungswirkung der Annahmquote aus dem Angebotsbestand zu visualisieren.



Lieferzeitpuffer: 1 BKT

AQ_m: Mittlere Annahmquote AQ_{m,OA}: Mittlere Annahmquote offener Angebote

BKT: Betriebskalendertage mAAT: Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung

Abbildung 6-11: Plan-Lieferzeiten und Auftragsverspätung bei unterschiedlichen Kundenannahme- und Kundenablehnungszeiten

Im Vergleich zum Referenzversuch erhöht sich die Unsicherheit, sobald die Kundenannahme- und Kundenablehnungszeiten voneinander abweichen, so dass die Liefertermineinhaltung sinkt. Der Einsatz der Annahmquote aus Rückmeldedaten führt zusätzlich dazu, dass die Plan-Lieferzeiten genau in den falschen Situationen gesenkt werden, was die Liefertermineinhaltung darüber hinaus beeinträchtigt. Die Annahmquote aus dem Angebotsbestand bildet die Effekte der abweichenden Rückmeldezeiten ab und kann sie dadurch ausgleichen.

Detaillierte Simulationsergebnisse mit systematisch abweichenden Kundenannahme- und -ablehnungszeiten zeigen Tabelle A 13 und Tabelle A 21 bis Tabelle A 24 im Anhang.

Fazit zum Einfluss der Rückmeldezeit

Die Simulationsergebnisse zum Einfluss der Rückmeldezeit zeigen insgesamt, dass die Variation der Rückmeldezeit eine relevante Wirkung auf die logistischen Zielgrößen in den Simulationsversuchen hat. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich mit einer steigenden mittleren Rückmeldezeit auch der Anteil der Angebote in der Einplanung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung erhöht und sich damit die Unsicherheit der Planung vergrößert. Zusätzlich wird das Regelungsverhalten des

Verfahrens eingeschränkt, da sich der Regelkreis durch eine steigende Rückmeldezeit verlängert. Die Berücksichtigung der Angebote in der Planung kann auch bei großen relativen Unsicherheiten eine gleichbleibende Terminabweichung und Liefertermineinhaltung erreichen. Die Auslastung beeinflusst eine steigende Rückmeldezeit bei einer Referenzkonfiguration der Fertigungssteuerung jedoch negativ. Der Einfluss der Kundenrückmeldezeit kann in der Praxis durch die Festlegung einer Angebotsgültigkeit begrenzt werden, nach der die zugesagte Lieferzeit verfällt und bei Angebotseingang neu bestimmt wird (vgl. Abschnitt 2.3.2). Die Versuche mit einer Abweichung zwischen der Kundenannahme- und Kundenablehnungszeit verdeutlichen, dass diese Abweichung die Unsicherheit in der Planung zusätzlich erhöht. Die Verwendung der Annahmequote offener Angebote in der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung kann die Unsicherheiten im Vergleich zu einer Annahmequote aus Vergangenheitsdaten besser abbilden und dadurch eine größere Konstanz der Ergebnisse erzielen.

6.4 Versuchsreihe 2: Einfluss der Fertigungssteuerung

Der folgende Abschnitt untersucht den Einfluss einer abgestimmten Fertigungssteuerung auf die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung. Dafür wurde die in Abschnitt 5.4 beschriebene Fertigungssteuerung mit einer Auftragsfreigabe nach ConWIP, einer Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin der Arbeitsvorgänge und einer Kapazitätssteuerung mit einer Rückstandsregelung in der Simulation angewandt. Bereits die Kombination mit einer ConWIP-Steuerung und einer Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin kann in der Praxis einfach umgesetzt werden und die logistische Zielerreichung erheblich verbessern. Deshalb wurden diese Verfahren zunächst bei einer konstanten Kapazität eingesetzt. Eine Kapazitätssteuerung kann die logistische Zielerreichung darüber hinaus verbessern. In der Praxis ist der Einsatz einer Kapazitätssteuerung deshalb, trotz aller operativen Herausforderungen bei der Umsetzung, in der Regel sinnvoll. Die eigenständige Beurteilung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung erschwert die Kapazitätssteuerung jedoch erheblich, weshalb diese Simulationsexperimente in dieser Arbeit als Sonderfall betrachtet werden. Weitere Einstellgrößen entsprechen dem Referenzszenario (vgl. Tabelle A 8).

Auftragsfreigabe nach ConWIP und Reihenfolgebildung nach Termin

Die ConWIP-Steuerung gibt Aufträge früher als geplant frei, wenn der Fertigungsbestand unter den vorgesehenen Bestand fällt. Die vorzeitige Freigabe von Aufträgen soll Auslastungsverluste vermeiden und kurzfristige Schwankungen in der Auslastung ausgleichen. Die Bestandsgrenze der ConWIP-Steuerung beruht auf einer Plan-Durchlaufzeit von fünf Betriebskalendertagen und liegt bei 119 Aufträgen. Die Reihenfolgebildung nach dem Plan-Endtermin der Arbeitsvorgänge soll Reihenfolgeabweichungen ausgleichen, die durch die unterschiedlichen Materialflüsse entstehen.

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse einer konfigurierten Auftragsfreigabe und Reihenfolgebildung im Vergleich zum Referenzszenario. Detaillierte Ergebnisse finden sich im Anhang in Tabelle A 12 bis Tabelle A 14 und Tabelle A 25 bis Tabelle A 27.

Tabelle 7: Simulationsergebnisse der modellbasierten Konfiguration ohne Kapazitätsflexibilität

Parameter Fertigungssteuerung: RefS ConWIP, Plan-Endtermin Störungen: Keine ZR _m : 5 BKT AQ _m : 50% ZAU _v : 0,5											
Verfahren	BEL _m [%]	A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,Plan} [BKT]	LTE [%]
				μ	σ		μ	σ			
RefS ²	95	95,2	73,0	3,1	1,8	-39,7	-1,8	1,5	62,9	8,2	97,7
	100	95,1	94,5	4,1	2,0	-26,9	-1,2	1,7	50,8	13,4	95,3
	105	94,7	98,9	4,2	2,0	-24,8	-1,1	1,7	49,3	18,5	94,6
mAAT	95	96,1	92,2	3,9	1,8	-51,5	-2,3	1,6	74,4	7,6	99,0
	100	97,1	118,9	5,0	2,2	-33,5	-1,4	1,8	57,4	11,9	97,4
	105	95,7	118,9	5,0	2,4	-30,7	-1,3	1,7	55,1	16,9	96,6

A _m	Mittlere Auslastung der Fertigung [%]
AQ _m	Mittlere Annahmequote [%]
BA _m	Mittlerer Bestand der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträgen) [-]
BKT	Betriebskalendertag
ConWIP	Constant Work in Process
LTE	Liefertermineinhaltung [%]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
RefS	Referenzszenario
RSA _m	Mittlerer Rückstand der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
TAA	Terminabweichung im Abgang [BKT]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZDL	Durchlaufzeit der Fertigung [BKT]
ZL _{m,Plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
μ	Mittelwert
σ	Standardabweichung

Die Kombination der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung mit einer Auftragsfreigabe nach ConWIP und einer Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin kann die Liefertermineinhaltung und die Auslastung verbessern. Zusätzlich kann die Terminplanung kürzere Lieferzeiten als im Referenzszenario realisieren.

Die Liefertermineinhaltung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung verbessert sich mit Werten zwischen 99,0% (BEL_m=95%) und 96,6% (BEL_m=105%) im Vergleich zum Referenzszenario um etwa zwei Prozentpunkte. Die Kombination mit der ConWIP-Steuerung verursacht durch den Auftragsvorriff erwartungsgemäß geringere mittlere Rückstände, was zu negativen mittleren Terminabweichungen im Abgang führt.

Der mittlere Bestand in der Produktion erreicht bei der Belastung von 100% und 105% der Kapazität etwa den Plan-Bestand der ConWIP von 119 Aufträgen und im Mittel auch die Plan-Durchlaufzeit von fünf Betriebskalendertagen. Bei einer Unterlast (BEL_m=95%) erreicht der Bestand mit etwa 92 Aufträgen den Plan-Bestand nicht. Der Vorriffshorizont der ConWIP-Steuerung verhindert dabei den vollständigen Abbau des Bestands.

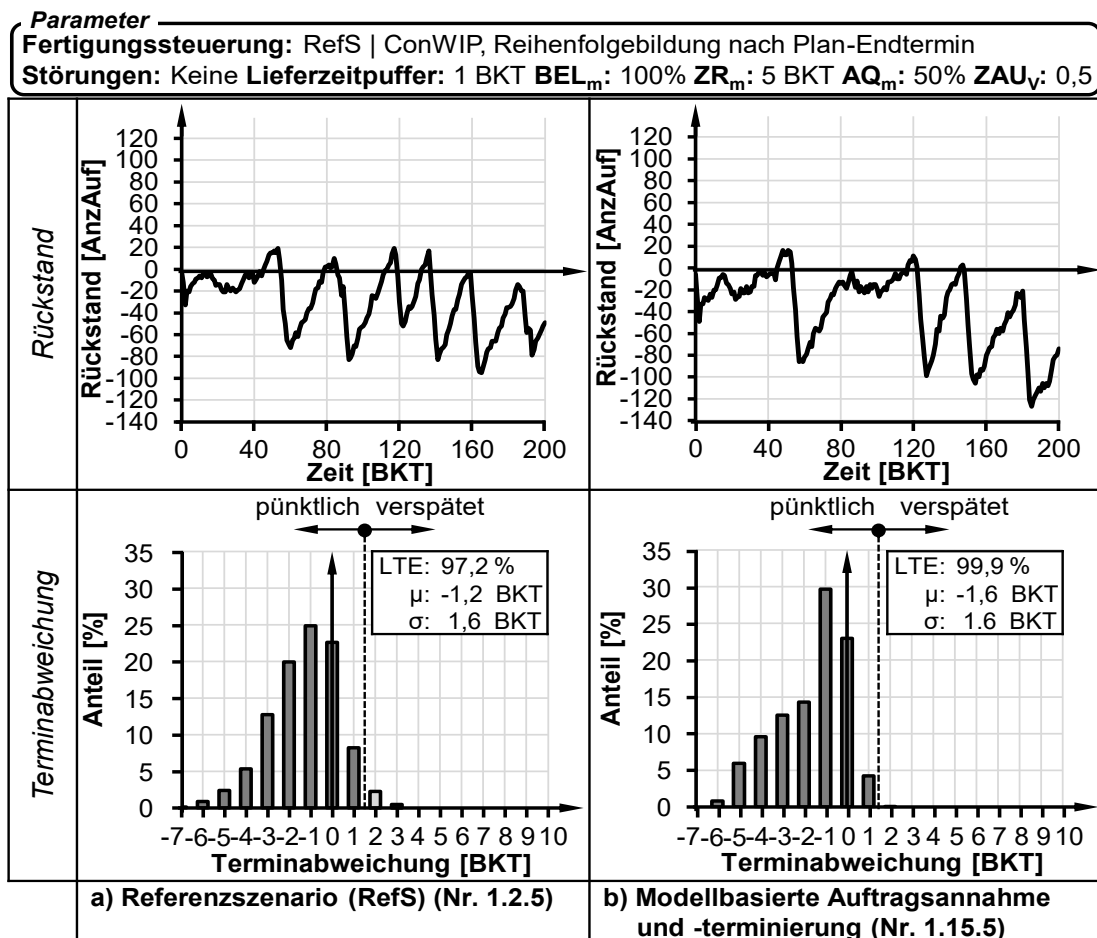
² Ergebnisse aus dem Referenzszenario (siehe Abschnitt 6.2)

6 Simulative Evaluation unter regulären Bedingungen

Die Auslastung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung verbessert sich im Vergleich zum Referenzszenario je nach Belastung um ein bis zwei Prozentpunkte.

Auch in diesen Simulationsversuchen verlängert sich die mittlere zugesagte Lieferzeit mit der Belastung. Bei den Simulationsexperimenten mit einer ausgeglichenen Belastung ist eine Verlängerung um etwa 0,02 Tage pro Betriebskalendertag und in den Simulationsexperimenten mit einer Überlast um 0,07 Tage pro Betriebskalendertag zu beobachten. Damit fällt die Verlängerung der Lieferzeit durch die höhere Auslastung jedoch geringer aus als im Referenzszenario. Je nach Belastung können die Lieferzeiten zwischen 0,6 BKT ($BEL_m = 95\%$) und 1,6 BKT ($BEL_m = 105\%$) reduziert werden.

Abbildung 6-12 zeigt anhand der Ergebnisse eines Simulationsversuchs die Auswirkung der Fertigungssteuerung bei starren Kapazitäten im Vergleich zum Referenzszenario (siehe Tabelle A 13 und Tabelle A 26 im Anhang; Experiment 1.2.5; Experiment 1.15.5).



AnzAuf: Anzahl Aufträge AQ_m: Mittlere Annahmequote BEL_m: Mittlere Belastung
 BKT: Betriebskalendertag LTE: Liefertermineinhaltung ZAU_v: Variationskoeffizient der Auftragszeit
 ZR_m: Mittlere Rückmeldezeit μ: Mittelwert σ: Standardabweichung

Abbildung 6-12: Vergleich der Terminabweichungsverteilung und des Rückstandsverlaufs der mAAT mit einer modellbasiert konfigurierten Fertigungssteuerung bei starren Kapazitäten

Der Rückstand weist einen vergleichbaren Verlauf zum Referenzszenario auf. Das Rückstandsniveau ist etwas geringer, wenn das Verfahren mit einer ConWIP-Steuerung

kombiniert wird. Dies ist auf den Vorgriffshorizont zurückzuführen, der eine vorzeitige Freigabe von Aufträgen ermöglicht und somit negative Rückstände verursachen kann.

Bei der Terminabweichung hat sich der Mittelwert verringert, die Streuung aber nicht verändert. Das Ergebnis ist eine höhere Liefertermineinhaltung.

Kapazitätssteuerung mit einer Rückstandsregelung

Eine Kapazitätssteuerung kann die logistische Zielerreichung zusätzlich verbessern. Um den isolierten Einfluss der Auftragsannahme und -terminierung zu betrachten, verwendet ein Großteil der Simulationsversuche starre Kapazitäten. Ein Einsatz der Kapazitätssteuerung in der Praxis ist jedoch oft ratsam. Um den gemeinsamen Einfluss der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung und einer Rückstandsregelung zu untersuchen, wurden die im Folgenden beschriebenen Simulationsversuche durchgeführt. Die Rückstandsregelung wurde dabei mit einer Kapazitätsflexibilität von 10% der Gesamtkapazität, einem oberen und unteren Grenzurückstand von 6 Aufträgen bzw. 42 Stunden (25% der Kapazität pro BKT) und einer sehr schnellen Reaktionszeit (1 BKT) umgesetzt. Die Kapazität wurde dabei für die gesamte Fertigung geregelt.

Tabelle 8 zeigt die Simulationsergebnisse in einem konfigurierten Zustand mit und ohne Rückstandsregelung bei verschiedenen Belastungen. Detaillierte Ergebnisse finden sich im Anhang in Tabelle A 25 bis Tabelle A 30.

Tabelle 8: Simulationsergebnisse der modellbasierten Konfiguration mit Kapazitätsflexibilität

Parameter Fertigungssteuerung: ConWIP, Plan-Endtermin, (Rückstandsregelung) Störungen: Keine ZR_m: 5 BKT AQ_m: 50% ZAU_v: 0,5							
Verfahren	BEL _m [%]	A _m [%]	RSA _m [-]	TAA [BKT]		ZL _{m,Plan} [BKT]	LTE [%]
				μ	σ		
mAAT ohne Rückstandsregelung	95	96,1	-51,5	-2,3	1,6	7,6	99,0
	100	97,1	-33,5	-1,4	1,8	11,9	97,4
	105	95,7	-30,7	-1,3	1,7	16,9	96,6
mAAT mit Rückstandsregelung	95	96,6	-41,5	-1,8	1,5	6,9	99,3
	100	97,8	-40,4	-1,7	1,8	10,5	98,9
	105	95,9	-39,7	-1,7	1,8	14,9	98,6

A _m	Mittlere Auslastung der Fertigung [%]
AQ _m	Mittlere Annahmequote [%]
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]
BKT	Betriebskalendertag
ConWIP	Constant Work in Process
LTE	Liefertermineinhaltung [%]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
RSA _m	Mittlerer Rückstand der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
TAA	Terminabweichung im Abgang [BKT]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZL _{m,Plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
μ	Mittelwert
σ	Standardabweichung

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung grundsätzlich mit einer Rückstandsregelung kompatibel ist. Im Vergleich zu den Simulationsversuchen ohne eine Kapazitätsflexibilität ergeben sich folgende Effekte:

Die Einführung der Rückstandsregelung wirkt sich positiv auf die Auslastung aus. Im Vergleich zu den Simulationsexperimenten ohne Kapazitätsflexibilität verbessert sich die Auslastung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung um 0,2 bis 0,7 Prozentpunkte. Dies ist auf eine bessere Anpassung der Kapazität auf den Plan-Abgang zurückzuführen. Außerdem weist die mittlere Terminabweichung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung mit einer Rückstandsregelung über verschiedene Situationen hinweg gleichmäßig eine mittlere Terminabweichung von etwa -1,7 BKT auf. Im Vergleich dazu weist die mittlere Terminabweichung ohne eine Rückstandsregelung bei verschiedenen Belastungssituationen größere Unterschiede auf. Die mittleren Plan-Lieferzeiten in den vorliegenden Simulationen verkürzen sich um 0,7 Betriebskalendertage bei einer Belastung von 95% der Kapazität, um 1,4 Betriebskalendertage bei einer Belastung von 100% der Kapazität und um 2,0 Betriebskalendertage bei einer Belastung von 105% der Kapazität. Zudem erhöht sich in den Simulationsversuchen mit Rückstandsregelung die Liefertermineinhaltung um weitere 0,3 Prozentpunkte ($BEL_m = 95\%$) bis 2 Prozentpunkte ($BEL_m = 105\%$) auf sehr hohe 98,6% bis 99,3%.

Herausforderungen der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung betreffen an dieser Stelle die Berücksichtigung der Kapazitätsanpassungen in der Planung. Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung berücksichtigt zum Angebotszeitpunkt die Plan-Kapazität. Mögliche höhere Plan-Abgänge durch die Kapazitätsflexibilität werden nicht frühzeitig berücksichtigt. Hier bietet eine Kapazitätsplanung auf Grundlage des Durchlaufdiagramms (vgl. Abschnitt 5.1) das Potential, diese Aufgabe noch besser in die Auftragsannahme und -terminierung zu integrieren und damit insbesondere kürzere Lieferzeiten zu ermöglichen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bereits die Kombination der Verfahren mit einer Auftragsfreigabe nach ConWIP und einer Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin die Auslastung bei konstanten Beständen und Durchlaufzeiten verbessert. Die Rückstände und Terminabweichungen werden im Mittel verringert, was die Liefertermineinhaltung positiv beeinflusst. Zusätzlich können insgesamt kürzere Lieferzeiten realisiert werden als im Referenzszenario. Der Einfluss der Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin ist in den vorliegenden Ergebnissen nicht explizit erkennbar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die vergleichsweise linearen Materialflüsse (siehe Tabelle A 9) keine großen Reihenfolgevertauschungen entstehen. Bereits diese einfach umsetzbaren Verfahren der Fertigungssteuerung schützen demnach einerseits die Produktion wirksam vor Überlastung und den daraus resultierenden Verspätungen. Andererseits sichern sie eine hohe Auslastung und erreichen kurze und beständige Durchlaufzeiten. Die Ergebnisse zur zusätzlichen Implementierung einer Rückstandsregelung lassen darauf schließen, dass die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung grundsätzlich mit dieser Form der Kapazitätssteuerung kompatibel ist. Im Vergleich mit den Ergebnissen ohne Kapazitätssteuerung erreicht die modellbasierte

Auftragsannahme und -terminierung eine höhere Auslastung bei kleineren Terminabweichungen und einer verbesserten Liefertermineinhaltung.

Allerdings ist es wichtig zu beachten, dass die Lieferzeiten eventuell länger als notwendig sind, da die Kapazitätsflexibilität nicht ausreichend in der Planung berücksichtigt wird. Eine Nutzung des Durchlaufdiagramms für die Kapazitätsplanung und Kapazitätssteuerung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht gesondert untersucht, bietet jedoch das Potential, die Vernetzung der Verfahren zu stärken und damit auch die Ergebnisse weiter zu verbessern.

6.5 Versuchsreihe 3: Einfluss von Fertigungsunsicherheiten

Der folgende Abschnitt untersucht den Einfluss größerer Unsicherheiten in den Eingangsgrößen auf die logistische Zielerreichung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung. Zu diesem Zweck kombinieren die folgenden Versuche die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung erneut mit einer Auftragsfreigabe nach ConWIP und einer Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin der Arbeitsvorgänge. Die Kapazitäten wurden zur besseren Vergleichbarkeit mit den zuvor vorgestellten Simulationsergebnissen nicht gesteuert. Die Unsicherheiten wurden durch (1) zufällig auftretende Störungen mit einem Zeitanteil pro Arbeitsplatz von 20%³ und (2) Arbeitsinhalten mit einem Variationskoeffizienten (ZAU_V) von 1 erhöht. Die übrigen Einstellgrößen entsprechen dem Referenzszenario (vgl. Tabelle A 8).

Um die Simulationsergebnisse nicht durch einen systematischen Fehler zu beeinflussen, berücksichtigt die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung Störzeitanteile mit ihrem Mittelwert. Das zufällige Auftreten der Störungen erzeugt Schwankungen des Ist-Abgangs, so dass sich die Unsicherheit für die Planung, die einen konstanten Plan-Abgang annimmt, erhöht. Die deutlich erhöhte Streuung der Auftragszeiten wirkt sich insbesondere auf die Planung aus, da die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung den Plan-Abgang und den Liefertermin in der Angebotsphase mit der mittleren Auftragszeit ermittelt. Die stärkere Streuung der Auftragszeiten erhöht zudem die idealen Mindestbestände der Arbeitssysteme in der Fertigung, so dass höhere Umlaufbestände erforderlich sind, um eine vergleichbare Auslastung zu erzielen. Für diese Versuchsreihe dient wiederum die Planung mit Standardlieferzeiten als Referenz.

Tabelle 8 zeigt Ergebnisse von den Simulationsexperimenten einer Simulationsstudie mit erhöhten Unsicherheiten der Eingangsgrößen bei einer Belastung von 95% der Kapazität, 100% der Kapazität und 105% der Kapazität. Detaillierte Ergebnisse finden sich im Anhang in Tabelle A 31 bis Tabelle A 33.

³ Mean Time To Repair (MTTR) = 30 min; Mean Time Between Failures (MTBF) = 120 min

Tabelle 9: Simulationsergebnisse bei gesteigerten Unsicherheiten in der Fertigung

Parameter											
Fertigungssteuerung: ConWIP, Plan-Endtermin											
Störungen: 20% ZR _m : 5 BKT AQ _m : 50% ZAU _v : 1											
Verfahren	BEL _m [%]	A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,Plan} [BKT]	LTE [%]
				μ	σ		μ	σ			
SLZ	95	93,7	109,8	5,7	2,1	-26,7	-1,9	2,7	46,7	10,0	90,9
	100	93,8	118,1	6,3	2,4	63,2	4,2	3,8	6,5	10,0	23,5
	105	93,9	118,1	6,3	2,5	155,3	9,7	6,4	3,5	10,0	10,8
mAAT	95	94,5	109,4	5,7	2,2	-33,2	-2,3	2,4	52,1	10,5	96,6
	100	94,7	118,6	6,4	2,4	-22,0	-1,6	2,5	42,5	16,4	90,8
	105	94,7	118,6	6,4	2,4	-18,1	-1,2	2,4	39,1	22,6	88,7

A _m	Mittlere Auslastung der Fertigung [%]
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
BA _m	Mittlerer Bestand der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträgen) [-]
BKT	Betriebskalendertag
LTE	Liefertermineinhaltung [%]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
RSA _m	Mittlerer Rückstand der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
SLZ	Planung mit Standardlieferzeiten
TAA	Terminabweichung im Abgang [BKT]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZDL	Durchlaufzeit der Fertigung [BKT]
ZL _{m,Plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
μ	Mittelwert
σ	Standardabweichung

Insgesamt kann die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung auch bei größeren Unsicherheiten die Liefertermineinhaltung vergleichsweise gut sichern. Dabei erreicht das Verfahren vergleichsweise hohe und konstante Auslastungen. Um dies zu erreichen, verlängern sich die zugesagten Plan-Lieferzeiten im Vergleich zum Referenzzustand.

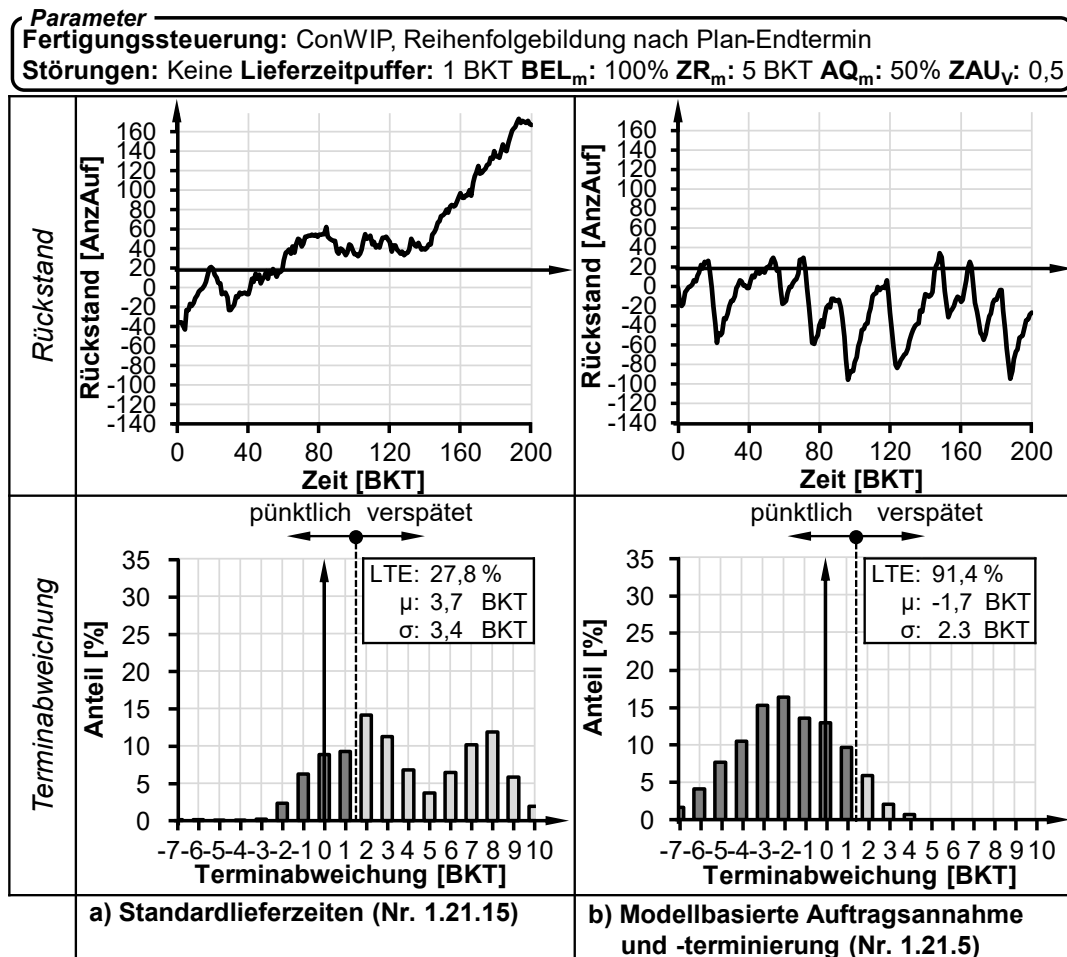
Die Liefertermineinhaltung erreicht beim Einsatz der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung Werte zwischen 88,7% und 96,6%, was angesichts der großen Unsicherheiten nach wie vor hohe Werte sind. Im Gegensatz dazu erreicht die Planung mit Standardlieferzeiten nur eine sehr niedrige Liefertermineinhaltung. Bei einer Belastung von 95% liegt diese bei 90,9%, nimmt bei einer mittleren Belastung von 100% und 105% jedoch stark ab (23,5% bzw. 10,8%). Entsprechend den vorherigen Simulationsreihen zeigt die modellbasierte Auftragsannahme negative, die Terminplanung mit Standardlieferzeiten hingegen teilweise stark positive Rückstände und Terminabweichungen.

Die Auslastung erreicht bei der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung Werte zwischen 94,5% und 94,7%. Im Vergleich dazu erreicht die Planung mit Standard-

lieferzeiten mit Auslastungen zwischen 93,7% und 93,9% Werte, die etwa 0,8 Prozentpunkte niedriger liegen. Die größeren Auslastungsverluste im Vergleich zu den vorherigen Simulationen sind auf die größeren Variationskoeffizienten der Auftragszeit und zufällig auftretende Störungen an einzelnen Arbeitssystemen zurückzuführen.

Die bessere Zielerreichung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung geht auch in diesem Fall mit einem Anstieg der Lieferzeiten einher. Die Lieferzeiten steigen stark an, um Rückstände während der Phasen, in denen eine hohe Überlast auftritt, zu vermeiden. Im Durchschnitt erhöhen sich die Lieferzeiten in den Simulationsexperimenten mit ausgeglichener Last um 0,04 Tage pro Betriebskalendertag und in den Simulationsexperimenten mit einer Überlast von 5% um 0,09 Tage pro Betriebskalendertag.

Abbildung 6-13 zeigt die Rückstandskurven und Terminabweichungsverteilung im Vergleich der mAAT und der Planung mit Standardlieferzeiten (vgl. Tabelle A 32 im Anhang; Experiment 1.21.5; Experiment 1.21.5).



AnzAuf: Anzahl Aufträge AQ_m: Mittlere Annahmquote BEL_m: Mittlere Belastung
 BKT: Betriebskalendertag LTE: Liefertermineinhaltung ZAU_v: Variationskoeffizient der Auftragszeit
 ZR_m: Mittlere Rückmeldezeit μ: Mittelwert σ: Standardabweichung

Abbildung 6-13: Vergleich der Terminabweichungsverteilung und des Rückstandsverlaufs bei größeren Unsicherheiten

Trotz der größeren Unsicherheiten ist die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung in der Lage, die Rückstände zu regulieren und zu begrenzen. Im Gegensatz dazu ist bei der Planung mit Standardlieferzeiten ein deutlicher Aufbau von Rückständen zu beobachten.

Dementsprechend zeigt die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung eine vergleichsweise geringe Standardabweichung der Terminabweichung mit einem Mittelwert von -1,7 BKT, verglichen mit +3,7 Betriebskalendertage bei einer Planung mit Standardlieferzeiten. Im Vergleich zu den vorherigen Simulationsversuchen mit einer störungsfreien Fertigung und mit einem Variationskoeffizienten der Auftragszeit von 0,5 vergrößert sich jedoch die Streuung der Terminabweichung im erheblichen Maße von 1,6 BKT im Referenzzustand auf 2,3 BKT im hier betrachteten Versuch.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung auch bei größeren Unsicherheiten sehr positiv auf die logistische Zielerreichung auswirkt. Trotz der deutlich gestiegenen Unsicherheiten sind insbesondere die Rückstände und Terminabweichungen sehr niedrig und vergleichsweise konstant. Selbst bei einer gesteigerten Unsicherheit der Eingangsgrößen kann die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung somit die Produktion wirksam vor einer Überlastung schützen, ohne große Auslastungsverluste oder hohe Terminabweichungen zu verursachen. Das Verfahren reagiert damit robust auf eine steigende Varianz der Eingangsgrößen.

6.6 Zwischenfazit zur simulativen Evaluation

Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung soll wirksam die logistische Zielerreichung unterstützen und die Fertigungssteuerung integrieren. Zusätzlich soll es stabil auf Unsicherheiten reagieren und diese ausregeln.

Wirksamkeit: Insgesamt konnte die simulative Evaluation zeigen, dass sich die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung positiv auf die logistische Zielerreichung auswirkt. Durch die aktive Regelung der Lieferzeiten können in Situationen mit einer Unterlast geringere Lieferzeiten realisiert werden. In Situationen mit einer Überlast wird der Rückstand begrenzt und damit eine hohe Termintreue erreicht. Auslastungsverluste resultieren zum großen Teil aus den großen Unsicherheiten in den Simulationsversuchen, wie der binomialverteilten Annahmeentscheidung und den unterschiedlichen Materialflüssen. Weitere geringere Auslastungsverluste im Zusammenhang mit der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung ergeben sich durch die aktive Verschiebung von Aufträgen, wenn es während der Planung zu einer (vorläufigen) Überlast kommt. Bei den Simulationsuntersuchungen hat sich gezeigt, dass die Variation der Annahmequote tendenziell einen geringen Einfluss auf die logistische Zielerreichung hat, die Variation der Rückmeldezeit hingegen einen größeren Einfluss aufweist. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Begrenzung der Gültigkeit von Angeboten einen sehr relevanten und positiven Einfluss auf die logistische Zielerreichung gegenüber dem Kunden haben kann. Weichen die mittleren Kundenannahme- und Kundenablehnungszeiten systematisch voneinander ab, erhöht sich insgesamt die Unsicherheit in der Planung. Die Verwendung der modellierten Annahmequote offener Angebote ermöglicht eine logistische Zielerreichung auf einem konstant hohen Niveau.

Integrierte Konfiguration der Fertigungssteuerung: Die Kombination der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung mit Verfahren der Fertigungssteuerung, wie der Auftragsfreigabe nach ConWIP und der Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin, trägt zur Verbesserung der Auslastung bei, reduziert Rückstände sowie Terminabweichungen und ermöglicht insgesamt kürzere Lieferzeiten im Vergleich zum Referenzszenario. Diese einfachen Fertigungssteuerungsverfahren schützen die Produktion vor Überlastung und ermöglichen gleichzeitig eine hohe Auslastung sowie kurze Durchlaufzeiten. Auch eine Kombination mit einer rückstandsregelnden Kapazitätssteuerung ist in der vorliegenden Arbeit dargestellt. Diese konnte die logistische Zielerreichung weiter verbessern. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die Lieferzeiten möglicherweise länger als nötig ausfallen, wenn die Kapazitätsflexibilität bei der Lieferterminplanung nicht explizit berücksichtigt wird. Eine Nutzung des Durchlaufdiagramms für die Terminplanung und für die Kapazitätsplanung und -steuerung bietet daher das Potential, die Zielerreichung weiter zu verbessern.

Bewertung der Stabilität und Regelungsfähigkeit: Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung zeigt sich auch bei größeren Unsicherheiten als wirksames und stabiles Verfahren. Bei gesteigerter Unsicherheit der Eingangsgrößen kann sie die Produktion vor Überlastung schützen, ohne dabei signifikante Auslastungsverluste oder hohe Terminabweichungen zu verursachen. Das Regelungsverhalten ist bei den Rückstandsverläufen deutlich sichtbar und erreicht auch bei großen Eingangsunsicherheiten eine bemerkenswerte Konstanz der Rückstände und Terminabweichungen, was auf eine gute Anpassungsfähigkeit des Verfahrens an unterschiedliche Bedingungen hinweist. Im Vergleich zur Planung mit Standardlieferzeiten erzielt die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung durchweg eine höhere Auslastung, geringere Terminabweichungen und eine verbesserte Liefertermineinhaltung.

Insgesamt zeigt sich, dass die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung eine vielversprechende Methode zur Verbesserung der Terminplanung darstellt. Die Berücksichtigung von Unsicherheiten, die Integration verschiedener Steuerungsverfahren und die Betrachtung der Kapazitätsplanung sind Schlüsselfaktoren für eine erfolgreiche Implementierung dieses Ansatzes. Im Folgenden wird untersucht, in wie weit sich eine Verletzung der Verfahrensannahmen auf die logistische Zielerreichung des Verfahrens auswirkt.

7 Verhalten unter irregulären Bedingungen

Die folgenden Abschnitte beschreiben eine Modellierung des möglichen Rückstands bei einer systematischen Überlast durch eine fehlerhafte Parametrisierung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung. Der Fokus liegt hierbei auf der Überlast, weil dies das kritische Szenario für die Liefertermineinhaltung gegenüber dem Kunden ist. Es gilt dabei zu beachten, dass die zur Modellierung genutzten Durchlaufdiagramme und insbesondere die Ist-Zugänge, Plan-Zugänge und Plan-Abgänge entgegen der Definition in Abschnitt 2.4 auch Angebote enthalten.

Abschnitt 7.1 beschreibt die Entstehung einer systematischen Überlast bei einer Verletzung der Verfahrensannahmen. Anschließend leitet Abschnitt 7.2 mathematische Modelle her, die den Einfluss einer durch die Verletzung der Verfahrensannahmen hervorgerufenen systematischen Überlast auf den Rückstand aufzeigt. Daraufhin evaluiert Abschnitt 7.3 die Modellierung mit dem zuvor bereits vorgestellten Simulationsmodell. Abschnitt 7.4 zieht abschließend ein Zwischenfazit zur Evaluation der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung bei verletzten Verfahrensannahmen.

7.1 Entstehung einer systematischen Überlast

Selbst bei gründlich entwickelten und umfassend evaluierten PPS-Verfahren besteht die Gefahr, dass die Verfahrensanwender die Verfahrensregeln verletzen oder die Verfahrensparameter falsch einschätzen. Auch unter diesen Bedingungen sollte ein Verfahren möglichst robust reagieren. Wie relevant dies ist, zeigt eine Umfrage unter 93 Unternehmen: Über 80% der befragten Unternehmen bescheinigen ihren Mitarbeitern kein hohes Verständnis der eingesetzten PPS-Systeme. Als Folge übersteuern die Mitarbeiter in diesen Unternehmen vielfach die eingesetzten Verfahren und Methoden der PPS [MUND 20b, S. 29–32]. Fehlanwendungen von PPS-Verfahren können dabei zwei grundsätzliche Ursachen haben. Zum ersten können eine mangelhafte Schulung der Mitarbeiter oder ungünstige Anreizsysteme im Unternehmen (z.B. umsatzabhängige Boni im Vertrieb) eine aktive Missachtung der Verfahrensregeln verursachen. Zum zweiten kann eine ungenaue oder fehlerhafte Verfahrensparametrisierung eine Abweichung von den Verfahrensannahmen zur Folge haben. Einer aktiven Fehlanwendung kann durch einfache und nachvollziehbare Verfahren begegnet werden, die die Folgen der Fehlanwendung verdeutlichen, so dass die Mitarbeiter mit vertretbarem Aufwand erfolgreich geschult werden können. Ungenaue oder fehlerhafte Verfahrensparameter sind jedoch aufgrund von Unsicherheiten in den Daten nicht immer zu vermeiden und bleiben vielfach auch für einen längeren Zeitraum unentdeckt. Die folgenden Ausführungen fokussieren sich deshalb darauf, das Verhalten der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung bei einer fehlerhaften Parametrisierung zu beschreiben und zu modellieren.

Die Parametrisierung von Verfahren der PPS beinhaltet verschiedene Herausforderungen, wie beispielsweise die Auswahl der Datengrundlage, die Berechnung von Parametern und das Treffen von Annahmen bei der Parametrisierung. Eine fehlerhafte Parametrisierung von Verfahren kann dabei einen erheblichen negativen Einfluss auf deren Wirkung haben. Dennoch schenken Unternehmen der Parametrisierung vielfach nicht die entsprechende Beachtung oder sind aus anderen Gründen nicht in der Lage, die eingesetzten Verfahren

in geeigneter Weise zu parametrisieren. Besonders schwerwiegend bei der Parametrisierung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung ist die systematisch fehlerhafte Einschätzung der zukünftig *geplanten Belastung* und des *Kapazitätsangebots oder Kapazitätsbedarfs*. Eine Unterschätzung dieser Größen muss zwangsläufig Rückstände und damit auch Terminabweichungen nach sich ziehen, da Plan-Abgang und Ist-Abgang als Folge der Fehleinschätzung systematisch voneinander abweichen.

Die *geplante Belastung* wird in der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung insbesondere durch eine Fehleinschätzung der Annahmquote beeinflusst. Gleichung (42) beschreibt den relativen Fehler der Annahmquote, der sich aus dieser Diskrepanz ergibt.

$$F_{AQ} = \frac{AQ_{m,Ist} - AQ_{m,Plan}}{AQ_{m,Plan}} \quad (42)$$

mit

$AQ_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Annahmquote [%]
$AQ_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Annahmquote [%]
F_{AQ}	Relativer Fehler der Annahmquote [-]

Zum Beispiel kann die geplante Annahmquote systematisch von der tatsächlichen Annahmquote abweichen, wenn abgelehnte Angebote nicht gemeldet oder nicht erfasst werden. In diesem Fall ist die geplante Annahmquote ($AQ_{m,Plan}$) höher als die tatsächliche Annahmquote ($AQ_{m,Ist}$), weil die abgelehnten Aufträge in den Rückmelde-daten unterrepräsentiert sind. Als Folge plant das Unternehmen mehr Kapazität für den Bestand an Angeboten ein, als erforderlich ist. Eine Unterschätzung der Annahmquote hat dagegen zur Folge, dass die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung den Angeboten weniger Kapazität zuordnet, als diese tatsächlich benötigen. Die Produktion ist demnach überbelastet. Der Zusammenhang zwischen der tatsächlichen und der geplanten Belastung lässt sich aus einer einfachen Gleichungsumformung ableiten. Gleichung (43) beschreibt die Belastung der Fertigung mit Aufträgen als Funktion der Angebotsbelastung, der geplanten Annahmquote und der Fehleinschätzung der Annahmquote.

$$BELA_{m,Ist} = BELA_{m,Anf} \cdot AQ_{m,Plan} \cdot (1 + F_{AQ}) = BELA_{m,Plan} \cdot (1 + F_{AQ}) \quad (43)$$

mit

$AQ_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Annahmquote [%]
$BELA_{m,Anf}$	Mittlere Ist-Belastung (in Anzahl Anfragen pro BKT) [1/BKT]
$BELA_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$BELA_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
F_{AQ}	Relativer Fehler der Annahmquote [%]

Die Abstimmung zwischen *Kapazitätsangebot und Kapazitätsbedarf* ist in der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung von der geplanten Produktivität und dem geplanten Arbeitsinhalt abhängig. Die geplante Produktivität ist fehleranfällig, da sie von unsicheren Faktoren wie Störungen abhängt. Unterschätzt ein Unternehmen z. B. den Anteil der Störungen, so übersteigt die geplante Produktivität ($PRO_{m,Plan}$) die tatsächliche

Produktivität ($PRO_{m,Ist}$). Gleichung (44) beschreibt den relativen Fehler der Produktivität bei einer solchen systematischen Abweichung.

$$F_{PRO} = \frac{PRO_{m,Plan} - PRO_{m,Ist}}{PRO_{m,Plan}} \quad (44)$$

mit

F_{PRO}	Relativer Fehler der Produktivität [-]
$PRO_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std./Std.]
$PRO_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std./Std.]

Der Arbeitsinhalt eines Auftrags basiert häufig auf Schätzungen oder Vergleichen mit den Vorgabezeiten früherer Aufträge. Auch hier kann es zu systematischen Abweichungen kommen, beispielsweise wenn Unternehmen den Arbeitsinhalt für künftige Aufträge zu gering einschätzen. In diesem Fall ist der geplante Arbeitsinhalt ($ZAU_{m,Plan}$) geringer als der tatsächliche Arbeitsinhalt ($ZAU_{m,Ist}$). Erfolgt diese Fehleinschätzung systematisch, ergibt sich der in Gleichung (45) dargestellte relative Fehler.

$$F_{ZAU} = \frac{ZAU_{m,Ist} - ZAU_{m,Plan}}{ZAU_{m,Plan}} \quad (45)$$

mit

F_{ZAU}	Relativer Fehler des Arbeitsinhaltes von Angeboten und Aufträgen [-]
$ZAU_{m,Ist}$	Mittlerer Ist-Arbeitsinhalt von Angeboten und Aufträgen [Std.]
$ZAU_{m,Plan}$	Mittlerer Plan-Arbeitsinhalt von Angeboten und Aufträgen [Std.]

Eine systematisch fehlerhafte Abstimmung zwischen Kapazitätsangebot und Kapazitätsbedarf kann demnach durch eine fehlerhafte Annahme der Produktivität (vgl. (31)) oder durch eine fehlerhafte Annahme der Arbeitsinhalte (vgl. (32)) verursacht werden. Der Einfluss des fehlerhaften Arbeitsinhaltes wird besonders deutlich, wenn die Leistung in der Einheit "Anzahl Aufträge" betrachtet wird. Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung verplant den Plan-Abgang aus Plan-Kapazität mit dem Plan-Arbeitsinhalt der Angebote und Aufträge. Ein Fehler der Arbeitsinhalte reduziert oder erhöht den tatsächlichen Arbeitsinhalt, wobei die Anzahl der geplanten Aufträge pro Zeiteinheit aufgrund der bereits frühzeitig ermittelten Lieferzeiten unverändert bleibt.

7.2 Rückstandsmodellierung bei einer systematischen Überlast

Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung ist mithilfe ihres Regelungsverhaltens in der Lage, Überlastsituationen teilweise durch eine Verlängerung der Lieferzeit auszugleichen. Folgende Ausführungen verdeutlichen, wie (1) die Regelung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung einer Überlast entgegensteuert und (2) die zuvor beschriebenen Fehleinschätzungen der Planungsgrößen die logistische Zielerreichung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung beeinflussen.

Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung prüft als zentralen Schritt der Planung zum Planungszeitpunkt, wann die Produktion kapazitiv in der Lage sein wird, ein Angebot fertigzustellen. Dazu muss die Differenz zwischen dem Plan-Abgang aus Aufträgen und Angeboten sowie dem Plan-Abgang aus Plan-Kapazität mindestens dem

Arbeitsinhalt eines Angebots entsprechen (vgl. Abschnitt 5.3). Zum jeweiligen Planungszeitpunkt wird der Ist-Abgang im Durchlaufdiagramm aktualisiert, um damit Rückstände, die zum entsprechenden Zeitpunkt bereits entstanden sind, in die Planung einzubeziehen. In einer solchen Situation plant die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung ein Angebot zu einem späteren Plan-Endtermin ein, da die Produktion zunächst den Rückstand abbauen muss, um für das Angebot ausreichend verfügbare Kapazität zu haben. Die Plan-Durchlaufzeit der Angebote verlängert sich also um die Zeit, die benötigt wird, um den Rückstand mit einem Abgang abzubauen, der den Planungsannahmen entspricht.

Die zuvor beschriebenen fehlerhaften Annahmen der Planungsparameter können zu einer systematischen Überlastung der Fertigung führen, wenn die geplanten Zu- und Abgänge systematisch von den tatsächlichen Zu- und Abgängen abweichen, so dass ein Rückstand entsteht. Vom Planungszeitpunkt aus betrachtet, entspricht dieser Rückstand der Differenz zwischen dem Plan-Abgang (und damit aus der Plan-Kapazität inkl. der systematischen Fehler) und dem Ist-Abgang. Die Planung berücksichtigt den bereits entstandenen Rückstand bei der Planung jedoch bei nachfolgenden Angeboten und kompensiert ihn durch eine längere Lieferzeit. Bei starren Kapazitäten wandelt die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung somit langfristig nur einen Teil der systematischen Überlast in Rückstand und den anderen Teil in längere Lieferzeiten um. Die systematisch fehlerhafte Einschätzung der Plan-Belastung bzw. des Kapazitätsangebots oder -bedarfs entfaltet durch ihre Wirkung auf den Zu- bzw. Abgang dabei sehr unterschiedliche Mechanismen auf die logistische Zielerreichung.

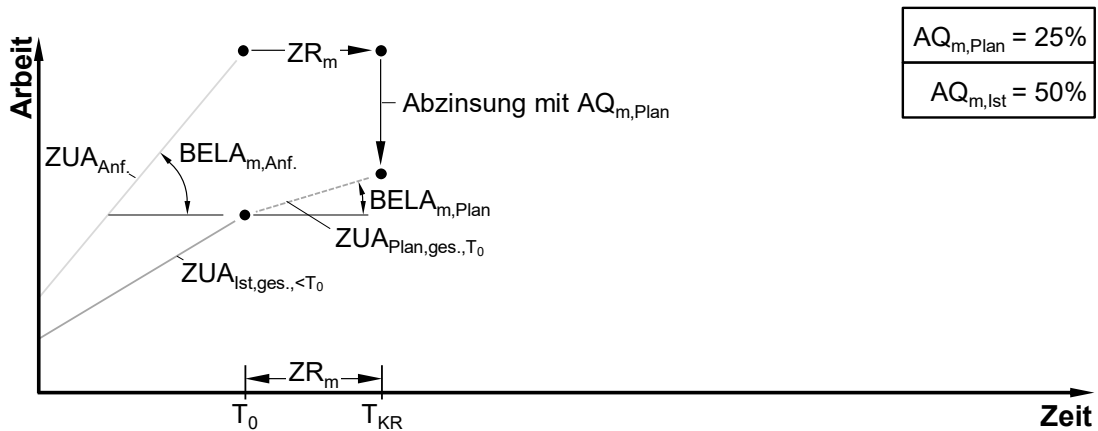
Die folgenden Abschnitte modellieren die Einflüsse einer fehlerhaften Einschätzung der Plan-Belastung (Abschnitt 7.2.1) und des Kapazitätsangebots bzw. -bedarfs (Abschnitt 7.2.2) auf den Rückstand. Abschnitt 7.2.3 vereint diese Modelle anschließend in einem Gesamtmodell. Die Grundlage dieser Modellierung bilden die trigonometrischen Beziehungen der Einflussgrößen im Durchlaufdiagramm und bereits bestehende logistische Modelle.

7.2.1 Fehleinschätzung der Plan-Belastung

Eine Fehleinschätzung der *geplanten Belastung* wirkt sich durch eine abweichende Annahmequote vorrangig auf den Bestand an offenen Angeboten aus. Übersteigt die tatsächliche Annahmequote die geplante Annahmequote, berücksichtigt die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung die Angebote mit einem zu niedrigen Anteil des Plan-Abgangs. Da die Lieferzeiten nach der Angebotsplanung verbindlich feststehen, wird die Produktion systematisch überlastet, was einen Rückstand verursacht.

Abbildung 7-1 zeigt die Planungssituation zum Planungszeitpunkt (T_0) einer solchen systematischen Abweichung der Annahmequote im Durchlaufdiagramm. Beispielhaft

stellt die Abbildung eine Plan-Annahmequote von 25% und eine Ist-Annahmequote von 50% dar.



$AQ_{m,Ist}$: Mittlere Ist-Annahmequote	ZR_m : Mittlere Rückmeldezeit
$AQ_{m,Plan}$: Mittlere Plan-Annahmequote	$ZUA_{Anf.}$: Zugang an Anfragen
$BELA_{m,Anf.}$: Mittlere Belastung mit Anfragen	$ZUA_{Plan,ges.,T_0}$: Plan-Zugang mit Angeboten an Datum T_0
$BELA_{m,Plan}$: Mittlere Plan-Belastung mit Angeboten	$ZUA_{Ist,ges.,<T_0}$: Ist-Zugang mit Angeboten vor Datum T_0
T_0 : Planungszeitpunkt	
T_{KR} : Kundenrückmeldezeitpunkt	

Abbildung 7-1: Planungssituation zum Planungszeitpunkt bei einer systematisch abweichenden Annahmequote

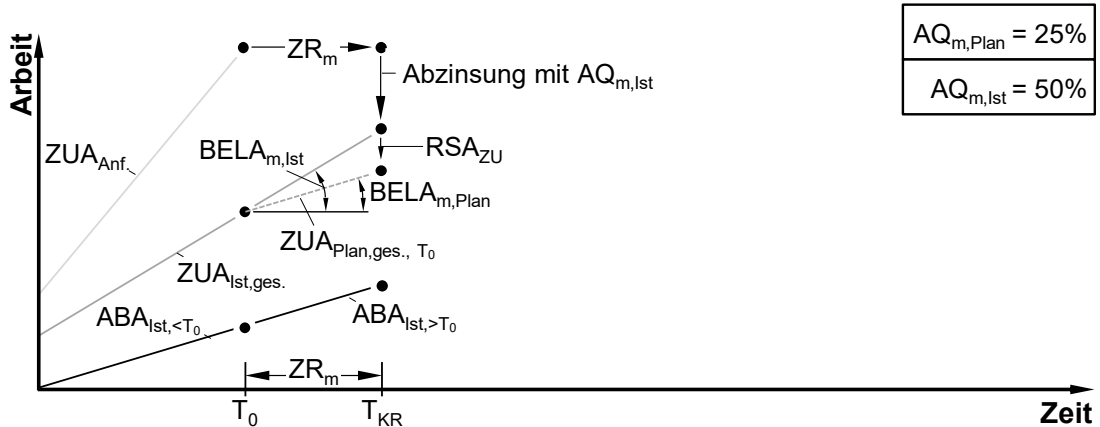
Die durchgezogenen Linien beschreiben den Ist-Zugang von Anfragen und Aufträgen bis zum Planungszeitpunkt. Der Plan-Zugang nach dem Planungszeitpunkt ist durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnet. Die Steigung des Anfrage- und Plan-Zugangs entspricht der Anfrage- bzw. Plan-Belastung. Der Plan-Zugang ergibt sich aus der Verschiebung der Belastung von Anfragen um die Kundenreaktionszeit und deren Abzinsung mit der Plan-Annahmequote von 25% (vgl. Abschnitt 5.3). Der Plan-Zugang am Rückmeldezeitpunkt (T_{KR}) setzt sich damit aus dem Ist-Zugang zum Planungszeitpunkt (T_0) und dem zusätzlichen geplanten Zugang innerhalb der Rückmeldezeit zusammen (46).

$$ZUA_{Plan,ges.,T_0}(T_{KR}) = BELA_{m,Ist} \cdot T_0 + BELA_{m,Plan} \cdot ZR_m \quad (46)$$

mit

$BELA_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$BELA_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
T_0	Planungszeitpunkt [BKT]
T_{KR}	Kundenrückmeldezeitpunkt [BKT]
ZR_m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
$ZUA_{Plan,ges.,T_0}(T_{KR})$	Plan-Zugang mit Angeboten zum Zeitpunkt T_0 am Zeitpunkt T_{KR} (in Anzahl Aufträgen) [-]

Ein systematischer Fehler in der Annahmequote beeinflusst den Auftragseingang und wirkt sich somit auf die Planung aus. Abbildung 7-2 zeigt den Zustand zum Zeitpunkt der Kundenrückmeldung T_{KR} .



- | | |
|--|--|
| $ABA_{Ist,<T_0}$: Ist-Abgang vor Datum T_0 | T_0 : Planungszeitpunkt |
| $ABA_{Ist,>T_0}$: Ist-Abgang nach Datum T_0 | T_{KR} : Kundenrückmeldezeitpunkt |
| $AQ_{m,Ist}$: Mittlere Ist-Annahmequote | ZR_m : Mittlere Rückmeldezeit |
| $AQ_{m,Plan}$: Mittlere Plan-Annahmequote | $ZUA_{Anf.}$: Zugang an Anfragen |
| $BELA_{m,Ist}$: Mittlere Ist-Belastung | $ZUA_{Ist,ges.}$: Ist-Zugang mit Angeboten |
| $BELA_{m,Plan}$: Mittlere Plan-Belastung | $ZUA_{Plan,ges.,T_0}$: Plan-Zugang mit Angeboten an Datum T_0 |
| RSA_{ZU} : Rückstand im Zugang | |

Abbildung 7-2: Ist-Situation zum Kundenrückmeldezeitpunkt bei einer systematisch abweichenden Annahmequote

Der Ist-Zugang am Kundenrückmeldezeitpunkt (T_{KR}) ist größer als der zum Planungszeitpunkt (T_0) prognostizierte Planwert und entspricht (47):

$$ZUA_{Ist,ges.}(T_{KR}) = BELA_{m,Ist} \cdot (T_0 + ZR_m) \quad (47)$$

mit

- | | |
|--------------------------|---|
| $BELA_{m,Ist}$ | Mittlere Ist-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT] |
| T_0 | Planungszeitpunkt [BKT] |
| T_{KR} | Kundenrückmeldezeitpunkt [BKT] |
| ZR_m | Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT] |
| $ZUA_{Ist,ges.}(T_{KR})$ | Ist-Zugang mit Angeboten zum Zeitpunkt T_{KR} (in Anzahl Aufträgen) [-] |

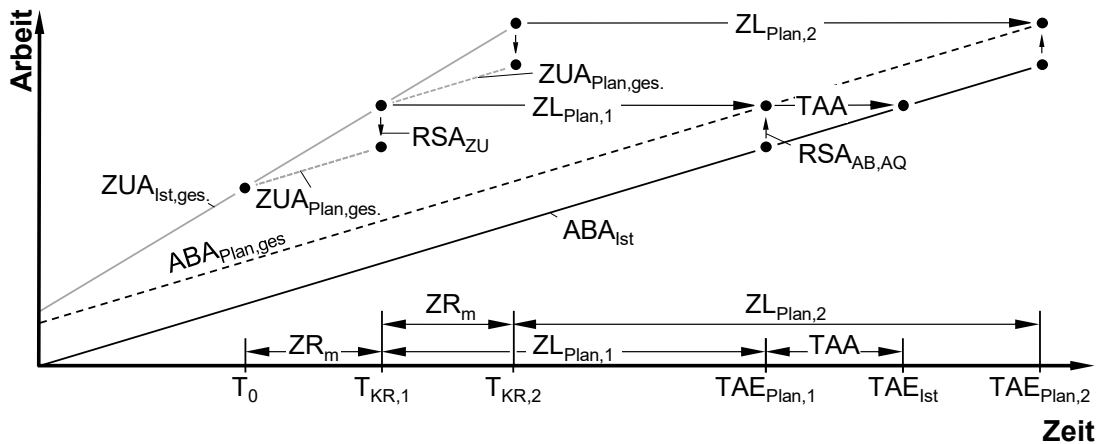
Der Rückstand im Zugang ergibt sich nach (48) dabei aus der Differenz zwischen Plan-Zugang und Ist-Zugang.

$$RSA_{ZU} = ZUA_{Plan,ges.,T_0}(T_{KR}) - ZUA_{Ist,ges.}(T_{KR}) = (BELA_{m,Plan} - BELA_{m,Ist}) \cdot ZR_m \quad (48)$$

mit

- $BELA_{m,Ist}$ Mittlere Ist-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
- $BELA_{m,Plan}$ Mittlere Plan-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
- RSA_{ZU} Rückstand im Zugang (in Anzahl Aufträgen) [-]
- T_{KR} Kundenrückmeldezeitpunkt
- $ZUA_{Ist,ges.}(T_{KR})$ Ist-Zugang mit Angeboten zum Zeitpunkt T_{KR} (in Anzahl Aufträgen) [-]
- $ZUA_{Plan,ges.,T_0}(T_{KR})$ Plan-Zugang zum Zeitpunkt T_0 am Zeitpunkt T_{KR} (in Anzahl Aufträgen) [-]
- ZR_m Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]

Der Verlauf des Plan-Abgangs entspricht aufgrund der festen Lieferzeitzusage dem Verlauf des Ist-Zugangs, verschoben um die jeweilige Plan-Lieferzeit. Abbildung 7-3 zeigt den Ist- und Plan-Abgang sowie die Terminabweichung und den Rückstand, die sich langfristig durch eine Planung mit systematisch falscher Annahmequote ergeben.



- | | |
|---|---|
| ABA_{Ist} : Ist-Abgang | TAE_{Ist} : Ist-Bearbeitungsende |
| $ABA_{Plan,ges.}$: Plan-Abgang mit Angeboten | TAE_{Plan} : Plan-Bearbeitungsende |
| RSA_{ZU} : Rückstand im Zugang | ZL_{Plan} : Plan-Lieferzeit |
| $RSA_{AB,AQ}$: Rückstand im Abgang bei abw. AQ | ZR_m : Mittlere Rückmeldezeit |
| T_0 : Planungszeitpunkt | $ZUA_{Ist,ges.}$: Ist-Zugang mit Angeboten |
| T_{KR} : Kundenrückmeldezeitpunkt | $ZUA_{Plan,ges.}$: Plan-Zugang mit Angeboten |
| TAA : Terminabweichung im Abgang | |

Abbildung 7-3: Langfristiger Plan-Abgang bei einer systematisch abweichenden Annahmequote

Die Planung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung berücksichtigt die bereits entstandenen Rückstände zum jeweiligen Planungszeitpunkt, weshalb sich die Plan-Lieferzeit verlängert. Da sich diese Fehleinschätzung der Annahmequote nach der Kundenrückmeldung materialisiert und andere Unsicherheiten an dieser Stelle nicht

betrachtet werden, entspricht der Rückstand im Zugang betragsmäßig dem Rückstand im Abgang (49).

$$RSA_{AB,AQ} = -RSA_{ZU} = (BELA_{m,Ist} - BELA_{m,Plan}) \cdot ZR_m \quad (49)$$

mit

$BELA_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$BELA_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$RSA_{AB,AQ}$	Rückstand im Abgang durch eine abweichende Annahmequote (in Anzahl Aufträgen) [-]
RSA_{ZU}	Rückstand im Zugang (in Anzahl Aufträgen) [-]
ZR_m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]

Die Gleichungen (43) und (49) ergeben zusammengefasst in Gleichung (50) den Rückstand in Abhängigkeit der geplanten Kapazität, der mittleren Rückmeldezeit und des relativen Fehlers der Annahmequote. Hierbei ist als Planungsprämisse zu beachten, dass die in Gleichungen (43) dargestellte geplante Belastung der Plan-Kapazität entspricht.

$$RSA_{AB,AQ} = LA_{m,Plan} \cdot ZR_m \cdot F_{AQ} \quad (50)$$

mit

F_{AQ}	Relativer Fehler der Annahmequote [-]
$LA_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$RSA_{AB,AQ}$	Maximaler Rückstand aus einer fehlerhaften Annahmequote (in Anzahl Aufträgen) [-]
ZR_m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]

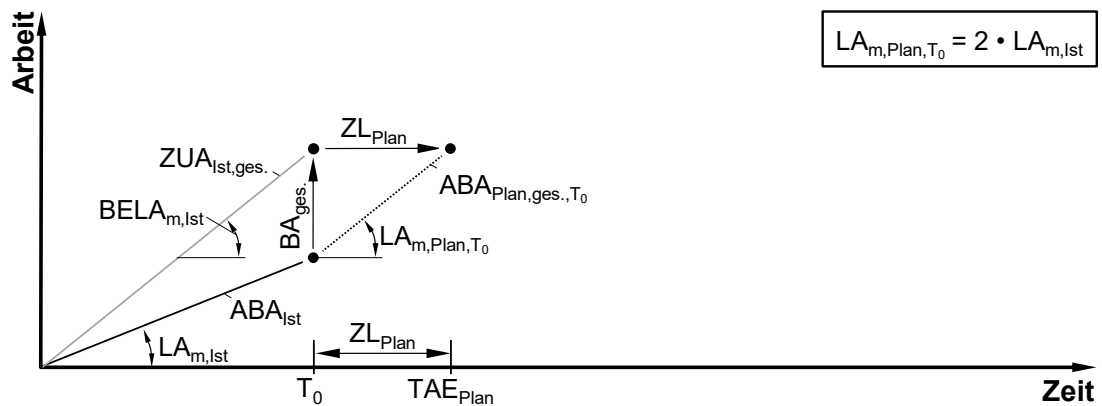
Gleichung (50) zeigt, dass eine abweichende Annahmequote nur einen begrenzten Einfluss auf das Planungsergebnis hat. Das Gleiche gilt für die Terminabweichung, die sich aus dem Rückstand und der Ist-Leistung ergibt. Diese Fehlannahme realisiert sich durch die Aktualisierung der Planung nach der Kundenentscheidung relativ früh im Auftragsdurchlauf. Dies ermöglicht es der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung dem Rückstand entgegenzusteuern. Im Vergleich zu der Situation ohne Fehleinschätzung der Annahmequote ist zum Zeitpunkt der Regelung jedoch bereits ein erhöhter Rückstand entstanden. Dieser Effekt verursacht eine Verschiebung des Rückstandsniveaus, das jedoch durch das Regelungsverhalten nicht konstant erreicht wird. Der entstehende Rückstand hängt nicht nur vom Fehler in der Annahmequote, sondern auch von der Kundenrückmeldezeit ab. Eine Angebotsgültigkeit und die damit verbundene geringere durchschnittliche Kundenrückmeldezeit könnte daher die Abweichung von der Planung wirksam begrenzen.

7.2.2 Fehleinschätzung des Kapazitätsangebots oder -bedarfs

Eine Fehleinschätzung des *Kapazitätsangebots oder des Kapazitätsbedarfs* wirkt sich im Gegensatz zur zuvor vorgestellten Modellierung auf alle eingeplanten Angebote und Aufträge aus, da in diesem Fall der Abgang beeinflusst wird. Unterschreiten die geplante Produktivität oder der geplante Auftragsinhalt die tatsächlichen Werte, plant die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung systematisch mehr Angebote ein, als

es die Kapazität zulässt. Da auch hier Lieferzeiten nach der Angebotsplanung verbindlich feststehen, wird die Produktion systematisch überlastet, so dass ein Rückstand entsteht.

Abbildung 7-4 zeigt die Planungssituation bei einer derartigen systematischen Fehleinschätzung der Produktivität oder der Arbeitsinhalte zum Planungszeitpunkt. Um die Darstellung übersichtlich zu halten, werden sowohl die Rückmeldezeit und der Lieferzeitpuffer vernachlässigt. Beide Größen sind für die Modellierung unerheblich.



ABA_{ist}	: Ist-Abgang	$LA_{m,Plan,T_0}$: Plan-Leistung zum Zeitpunkt T_0
$ABA_{Plan,ges.,T_0}$: Plan-Abgang mit Angeboten zum Zeitpunkt T_0	T_0	: Planungszeitpunkt
$BA_{ges.}$: Bestand mit Angeboten	TAE_{Plan}	: Plan-Bearbeitungsende
$BELA_{m,ist}$: Mittlere Ist-Belastung	ZL_{Plan}	: Plan-Lieferzeit
$LA_{m,ist}$: Mittlere Ist-Leistung	$ZUA_{ist,ges.}$: Ist-Zugang mit Angeboten

Abbildung 7-4: Planungssituation zum Planungszeitpunkt bei einer systematisch abweichenden Produktivität oder Auftragszeit

Die durchgezogenen Linien beschreiben den Ist-Zugang und Ist-Abgang bis zum Planungszeitpunkt (T_0). Der Plan-Abgang nach diesem Zeitpunkt ist als gepunktete Linie dargestellt. Die Steigung des Plan-Abgangs entspricht der Plan-Leistung, die sich aus der Plan-Kapazität sowie der geplanten Produktivität und den geplanten Arbeitsinhalten ergibt (51).

$$LA_{m,Plan} = \frac{KAP_{m,Plan} \cdot PRO_{m,Plan}}{ZAU_{m,Plan}} \quad (51)$$

mit

$KAP_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Kapazität [Std./BKT]
$LA_{m,Plan}$	Mittlere Ist-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$PRO_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde)[Std./Std.]
$ZAU_{m,Plan}$	Mittlerer Plan-Auftragsinhalt [Std.]

Zum Planungszeitpunkt (T_0) plant die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung ein Angebot mit einer Lieferzeit ein, die auf dem Gesamtbestand ($BA_{ges.}$) aller zu diesem Zeitpunkt eingeplanten Aufträge und Angebote basiert. Dieser Gesamtbestand ergibt sich dabei zu jedem Zeitpunkt als Differenz der Zu- und Abgänge.

Bei einem Anfangsbestand von Null lässt sich der Bestand (52) aus der Belastung, der Leistung und der Zeitdauer bestimmen:

$$BA_{ges.}(T_0) = ZUA_{Ist,ges.}(T_0) - ABA_{Ist}(T_0) = (BELA_{m,Ist} - LA_{m,Ist}) \cdot T_0 \quad (52)$$

mit

$ABA_{Ist}(T_0)$	Ist-Abgang zum Zeitpunkt T_0 (in Anzahl Aufträgen) [-]
$BA_{ges.}(T_0)$	Bestand mit Angeboten zum Zeitpunkt T_0 (in Anzahl Aufträgen) [-]
$BELA_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$LA_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
T_0	Planungszeitpunkt [BKT]
$ZUA_{Ist,ges.}(T_0)$	Ist-Zugang mit Angeboten zum Zeitpunkt T_0 (in Anzahl Aufträgen) [-]

Aus dem Bestand und der Plan-Leistung zum Planungszeitpunkt ergibt sich die Plan-Lieferzeit (53) der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung. Dies gilt unter der Annahme, dass langfristig die Kapazität das bestimmende Terminierungskriterium ist und sich bei der Einplanung eines neuen Angebots keine Aufträge mit einer längeren Lieferzeit in der Planung befinden. Darüber hinaus legt der Plan-Endtermin für alle Aufträge die Priorität fest, weshalb gemeinsam mit der vorherigen Annahme und einem einfachen Materialfluss eine Abarbeitung in der FIFO-Reihenfolge erfolgt.

$$ZL_{Plan}(T_0) = \frac{BA_{ges.}(T_0)}{LA_{m,Plan}} = \frac{(BELA_{m,Ist} - LA_{m,Ist})}{LA_{m,Plan}} \cdot T_0 \quad (53)$$

mit

$BA_{ges.}(T_0)$	Bestand mit Angeboten zum Zeitpunkt T_0 (in Anzahl Aufträgen) [-]
$BELA_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$LA_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$LA_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
T_0	Planungszeitpunkt [BKT]
$ZL_{Plan}(T_0)$	Plan-Lieferzeit zum Zeitpunkt T_0 [BKT]

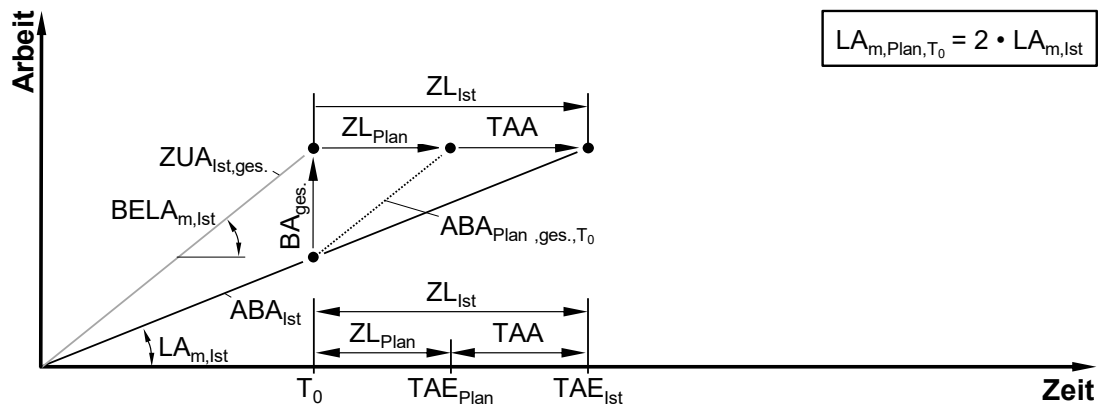
Der Plan-Abgang des Verfahrens entspricht am Plan-Endtermin (TAE_{Plan}) eines Auftrags dem Zugang zum Terminierungszeitpunkt (T_0). Gleichung (54) beschreibt diesen Zusammenhang zwischen dem Plan-Abgang und dem Ist-Zugang der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung.

$$ABA_{Plan,ges.,T_0}(TAE_{Plan}) = ZUA_{Ist,ges.}(T_0) = BELA_{m,Ist} \cdot T_0 \quad (54)$$

mit

$ABA_{Plan,ges.,T_0}(TAE_{Plan})$	Plan-Abgang mit Angeboten zum Zeitpunkt T_0 zum Zeitpunkt TAE_{Plan} (in Anzahl Aufträgen) [-]
$BELA_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
T_0	Planungszeitpunkt [BKT]
TAE_{Plan}	Plan-Bearbeitungsende [BKT]
$ZUA_{Ist,ges.}(T_0)$	Ist-Zugang mit Angeboten zum Zeitpunkt T_0 (in Anzahl Aufträgen) [-]

Abbildung 7-5 zeigt das Durchlaufdiagramm mit der tatsächlich erreichten Ist-Leistung und dem Ist-Abgang nach dem Zeitpunkt der Fertigstellung (TAE_{Ist}).



ABA_{Ist}	: Ist-Abgang	T_0	: Planungszeitpunkt
$ABA_{Plan,ges.,T_0}$: Plan-Abgang mit Angeboten zum Zeitpunkt T_0	TAA	: Terminabweichung im Abgang
$BA_{ges.}$: Bestand mit Angeboten	TAE_{Ist}	: Ist-Bearbeitungsende
$BELA_{m,Ist}$: Mittlere Ist-Belastung	TAE_{Plan}	: Plan-Bearbeitungsende
$LA_{m,Ist}$: Mittlere Ist-Leistung	ZL_{Ist}	: Ist-Lieferzeit
$LA_{m,Plan,T_0}$: Plan-Leistung zum Zeitpunkt T_0	ZL_{Plan}	: Plan-Lieferzeit
		$ZUA_{Ist,ges.}$: Ist-Zugang mit Angeboten

Abbildung 7-5: Ist-Situation am Fertigstellungstermin bei einer systematisch abweichenden Produktivität oder Auftragszeit

Bei einer systematischen Fehleinschätzung der geplanten Produktivität oder der Arbeitsinhalte weichen die Ist-Leistung und Plan-Leistung voneinander ab. Sind die Ist-Produktivität oder die Ist-Auftragszeiten größer als die Planwerte, wird die Ist-Leistung kleiner als die Plan-Leistung. Gleichung (55) ermöglicht es, die reduzierte Ist-Leistung aus der Produktivität und dem Auftragsinhalt zu berechnen und mit Gleichung (51) auf die Plan-Leistung zurückzuführen. Die mittlere Ist- und Plan-Produktivität sowie der mittlere Ist- und Plan-Auftragsinhalt bilden dabei jeweils einen Faktor, der die Veränderung der Leistung durch die entsprechende Fehleinschätzung beschreibt.

$$LA_{m,Ist} = \frac{KAP_{m,Plan} \cdot PRO_{m,Ist}}{ZAU_{m,Ist}} = LA_{m,Plan} \cdot \frac{PRO_{m,Ist}}{PRO_{m,Plan}} \cdot \frac{ZAU_{m,Plan}}{ZAU_{m,Ist}} \quad (55)$$

mit

$KAP_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Kapazität [Std./BKT]
$LA_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$LA_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$PRO_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std./Std.]
$PRO_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std./Std.]
$ZAU_{m,Ist}$	Mittlerer Ist-Auftragsinhalt [Std.]
$ZAU_{m,Plan}$	Mittlerer Plan-Auftragsinhalt [Std.]

Die veränderte Ist-Leistung wirkt sich auf die tatsächlich erreichbare Ist-Lieferzeit (56) aus. Diese lässt sich aus dem Bestand zum Planungszeitpunkt (T_0) und der Ist-Leistung berechnen:

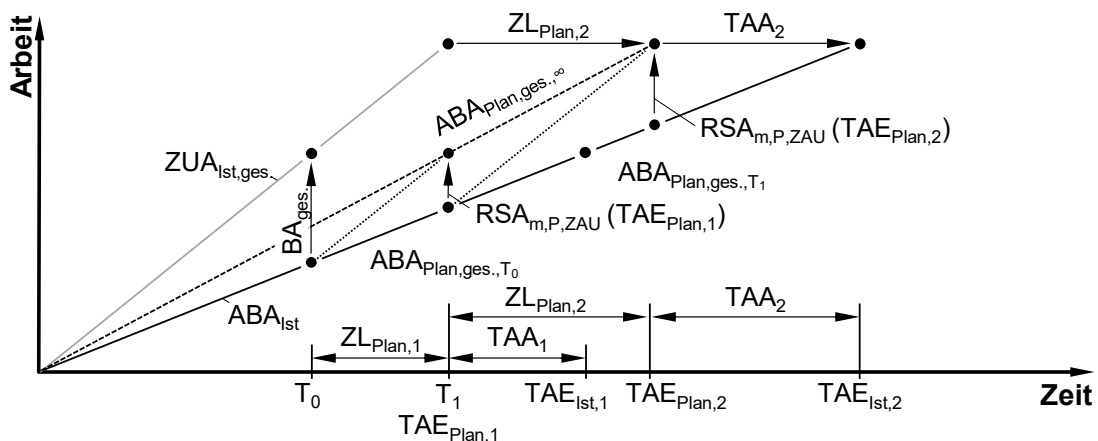
$$ZL_{Ist}(T_0) = \frac{BA(T_0)}{LA_{m,Ist}} = \frac{(BELA_{m,Ist} - LA_{m,Ist})}{LA_{m,Ist}} \cdot T_0 \quad (56)$$

mit

- BA(T₀) Bestand zum Zeitpunkt T₀ (in Anzahl Aufträgen) [1/BKT]
- BELA_{m,Ist} Mittlere Ist-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
- LA_{m,Ist} Mittlere Ist-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
- T₀ Planungszeitpunkt [BKT]
- ZL_{Ist}(T₀) Ist-Lieferzeit zum Zeitpunkt T₀ [BKT]

Da die Durchlauf- bzw. die Lieferzeit bereits zum Planungszeitpunkt festgelegt und dem Kunden verbindlich zugesagt werden, entspricht der tatsächliche Fertigstellungstermin in diesem Fall nicht mehr dem geplanten Fertigstellungstermin, so dass eine Terminabweichung (TAA) entsteht.

Abbildung 7-6 zeigt den Plan-Abgang sowie die Terminabweichung, die sich langfristig durch die Planung mit einer systematischen Fehleinschätzung der Produktivität oder der Arbeitsinhalte ergibt. Die Abbildung stellt beispielhaft die Einplanung von zwei Aufträgen dar, um den langfristigen Plan-Abgang bestimmen zu können.



- | | |
|---|---|
| ABA _{Ist} : Ist-Abgang | RSA _{m,P,ZAU} : Mittlerer Rückstand bei abw. Produktivität oder Auftragszeit |
| ABA _{Plan,ges.,∞} : Langfristiger Plan-Abgang mit Angeboten | T ₀ T ₁ : Planungszeitpunkte |
| ABA _{Plan,ges.,T₀} : Plan-Abgang mit Angeboten zum Zeitpunkt T ₀ | TAA : Terminabweichung im Abgang |
| ABA _{Plan,ges.,T₁} : Plan-Abgang mit Angeboten zum Zeitpunkt T ₁ | TAE _{Ist} : Ist-Bearbeitungsende |
| BA _{ges.} : Bestand mit Angeboten | TAE _{Plan} : Plan-Bearbeitungsende |
| | ZL _{Plan} : Plan-Lieferzeit |
| | ZUA _{Ist,ges.} : Ist-Zugang mit Angeboten |

Abbildung 7-6: Langfristiger Plan-Abgang bei einer systematisch abweichenden Produktivität oder Auftragszeit

Die langfristige Plan-Leistung (57) der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung lässt sich über den zuvor definierten Plan-Abgang und den jeweiligen Betrachtungszeitpunkt berechnen. Dabei ergibt sich die Plan-Leistung als Quotient aus dem Plan-Abgang für jeden um die Plan-Lieferzeit verschobenen Zeitpunkt und der um ebendiese verlängerten Zeitspanne. Das Einsetzen des zuvor bestimmten Plan-Abgangs

und der Plan-Lieferzeit führt die Plan-Leistung auf die Belastung, die notwendige Leistung und die Ist-Leistung zurück.

$$LA_{m,Plan,\infty}(t + ZL_{Plan}) = \frac{ABA_{Plan,ges.}(t + ZL_{Plan})}{t + ZL_{Plan}} = \frac{BELA_{m,Ist}}{1 + \frac{(BELA_{m,Ist} - LA_{m,Ist})}{LA_{m,Plan}}} \quad (57)$$

mit

$ABA_{Plan,ges.}$	Plan-Abgang mit Angeboten (in Anzahl Aufträgen) [-]
$BELA_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$LA_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$LA_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$LA_{m,Plan,\infty}$	Mittlere langfristige Plan-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
t	Zeit [BKT]
ZL_{Plan}	Plan-Lieferzeit [BKT]

Der Rückstand als Differenz von Plan- und Ist-Abgang (vgl. Abschnitt 2.4) und in Abhängigkeit der Zeit entspricht einer Differenz der Ist-Leistung aus Gleichung (55) und der langfristigen Plan-Leistung aus Gleichung (57) multipliziert mit der Zeit. Gleichung (58) zeigt diesen Rückstand in Abhängigkeit der Belastung, der Ist-Leistung, der notwendigen Leistung und der Zeit.

$$RSA_{AB,P,ZAU}(t) = (LA_{m,Plan,\infty} - LA_{m,Ist}) \cdot t = \left(\frac{BELA_{m,Ist}}{1 + \frac{(BELA_{m,Ist} - LA_{m,Ist})}{LA_{m,Plan}}} - LA_{m,Ist} \right) \cdot t \quad (58)$$

mit

$BELA_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Belastung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$LA_{m,Ist}$	Mittlere Ist-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$LA_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$LA_{m,Plan,\infty}$	Mittlere langfristige Plan-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$RSA_{AB,P,ZAU}$	Rückstand aus einer fehlerhaften Produktivität bzw. einem fehlerhaften Auftragsinhalt (in Anzahl Aufträgen) [-]
t	Zeit [BKT]

Ein systematischer Fehler bei der Ermittlung der Produktivität oder des Arbeitsinhalts wirkt sich auf alle geplanten Angebote und Aufträge aus und nimmt mit der Zeit zu. Gleichung (58) zeigt, dass sich beim Einsatz der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung mit einer systematischen Fehleinschätzung der Plan-Produktivität oder der Plan-Arbeitsinhalte der Rückstand kontinuierlich erhöht. Treten keine weiteren Abweichungen auf, kann auch der Lieferzeitpuffer diese Abweichung nicht mehr kompensieren. Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung berücksichtigt jedoch den zum Planungszeitpunkt bereits entstandenen Rückstand in der Planung, wodurch die entstehende Terminabweichung reduziert wird. Der Rückstand und die Terminabweichung nehmen im Falle systematischer Fehleinschätzungen der Planungsgrößen kontinuierlich zu. Durch die Berücksichtigung des bereits entstandenen Rückstands in der Planung kann jedoch ein Teil des systematischen Fehlers bereits in der Planung in eine verlängerte Durchlauf- und damit Lieferzeit umgewandelt werden. Bei

starrten Kapazitäten hat dies zur Folge, dass die Lieferzeiten der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung steigen.

7.2.3 Gesamtmodell für den Rückstand

Die Fehleinschätzung der Annahmquote, der Produktivität oder der Auftragszeit können auch gemeinsam auftreten. Die einzelnen Rückstandsmodelle addieren sich in diesem Fall. Ein Gesamtmodell für den Rückstand (59) lässt sich in Abhängigkeit der relativen Fehler der Annahmquote, der Produktivität und der Auftragszeit aufstellen, was den Vorteil hat, dass ein Unternehmen den möglichen Rückstand direkt aus den Fehleinschätzungen ableiten kann. Bei der Herleitung ist zu beachten, dass erneut die in Gleichungen (43) dargestellte geplante Belastung der Plan-Kapazität entspricht. Das Einsetzen der Definition der Ist-Leistung aus Gleichung (55) und der Fehlerdefinitionen aus den Gleichungen (42), (44) und (45) bezieht in Gleichung (59) den Rückstand bei einer Fehleinschätzung des Kapazitätsangebots oder -bedarfs direkt auf die relativen Fehler der Produktivität (F_{PRO}), der Auftragszeit (F_{ZAU}) und der Annahmquote (F_{AQ}). Um im gesamten Rückstand auch die Fehleinschätzung der Annahmquote zu berücksichtigen, muss der konstante Rückstandsanteil der Annahmquote (50) hinzuaddiert werden.

$$\begin{aligned} RSA_{AB,ges.}(t) &= RSA_{AB,AQ} + RSA_{AB,P,ZAU}(t) \\ &= LA_{m,plan} \cdot \left(ZR_m \cdot F_{AQ} + \left(\frac{1 + F_{AQ}}{2 + F_{AQ}} - \frac{1 - F_{PRO}}{1 + F_{ZAU}} \right) \cdot t \right) \quad (59) \end{aligned}$$

mit

F_{AQ}	Relativer Fehler der Annahmquote [-]
F_{PRO}	Relativer Fehler der Produktivität [-]
F_{ZAU}	Relativer Fehler des Arbeitsinhaltes von Angeboten und Aufträgen [-]
$LA_{m,Plan}$	Mittlere Plan-Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
$RSA_{AB,AQ}$	Maximaler Rückstand aus einer fehlerhaften Annahmquote (in Anzahl Aufträgen) [-]
$RSA_{AB,P,ZAU}$	Rückstand aus einer fehlerhaften Produktivität bzw. eines fehlerhaften Auftragsinhalts (in Anzahl Aufträgen) [-]
$RSA_{AB,ges.}$	Rückstand aus einer fehlerhaften Annahmquote, Produktivität oder eines fehlerhaften Auftragsinhalts (in Anzahl Aufträgen) [-]
t	Zeit [BKT]
ZR_m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]

Die Modellierung des Verhaltens der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung unter irregulären Bedingungen stellt den potentiellen Rückstand in Abhängigkeit von Fehleinschätzungen der Verfahrensparameter dar. Dies ermöglicht es, die Robustheit des Verfahrens bei einer Fehlanwendung modellbasiert zu bewerten. Im Folgenden wird zunächst die Modellierung simulativ evaluiert.

7.3 Simulative Evaluation der Modellierung

Die folgenden Abschnitte beschreiben die simulative Evaluation der zuvor hergeleiteten Rückstandsmodelle. Abschnitt 7.3.1 beschreibt die dafür durchgeführte Versuchsplanung. Abschnitt 7.3.2 stellt anschließend die Simulationsergebnisse dar.

7.3.1 Versuchsplanung

Die folgenden Simulationsversuche haben das Ziel, die Modellierung der Rückstände der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung bei einer systematischen Überlast durch eine Fehlannahme der Verfahrensgrößen zu evaluieren.

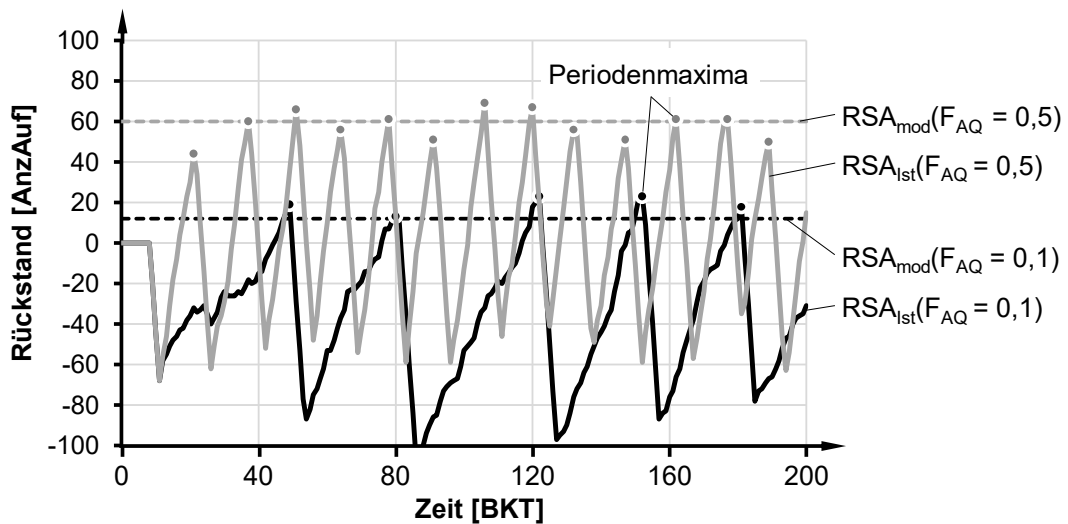
Für die Untersuchungen wurde die Simulationsumgebung aus Abschnitt 6.1 verwendet. Um die Effekte deutlicher sichtbar zu machen, wurden jedoch die Unsicherheiten deutlich reduziert. Dafür wurde (1) die Anzahl der betrachteten Arbeitssysteme auf ein Arbeitssystem verringert und (2) die Auftragszeit für alle Varianten auf eine Stunde festgelegt. Bestehen blieben hingegen insbesondere die Unsicherheiten, die sich aus der Annahmehauswahl ergaben. Tabelle 10 zeigt die untersuchten Einflussgrößen mit ihren jeweiligen Einstellwerten.

Tabelle 10: Versuchsplan für die Evaluation bei einer Verletzung der Verfahrensannahmen

Einflussgröße		Ausprägung				
Annahmequote	Ist-Annahmequote [%]	55	60	65	70	75
	Plan-Annahmequote [%]	50	50	50	50	50
	Relativer Fehler der Annahmequote	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Produktivität	Ist-Produktivität [Std./ Std.]	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
	Plan-Produktivität [Std./ Std.]	1	1	1	1	1
	Relativer Fehler der Produktivität	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Auftragsinhalt	Ist-Auftragsinhalte [Std.]	1	1	1	1	1
	Plan-Auftragsinhalte [Std.]	0,90	0,83	0,77	0,72	0,66
	Relativer Fehler der Auftragsinhalte	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5

Die jeweiligen relativen Fehlannahmen der Planungsgrößen wurden mithilfe der Ist- und Planwerte variiert. Weitere Einstellgrößen sind wie folgt gewählt worden, um die Effekte möglichst unbeeinflusst sichtbar zu machen: Für die mittlere Belastung wurde ein Wert von 100% der Kapazität festgelegt, um einen Rückstand durch eine systematische externe Über- oder Unterbelastung zu vermeiden. Die Kundenrückmeldezeit betrug fünf Betriebskalendertage sowohl für die Annahme als auch für die Ablehnung von Angeboten. Die mittlere Annahmequote von Angeboten durch den Kunden betrug 50%. Damit entsprechen diese Annahmen den Versuchen aus dem Referenzszenario. Um den

Die Modellierung für eine fehlerhaft eingeschätzte Annahmequote weist insbesondere bei sehr kleinen Fehlern eine Abweichung von den simulierten Werten auf. Im Verhältnis zum sonstigen Regelungsverhalten ist diese Abweichung vernachlässigbar gering. Dies zeigt Abbildung 7-7 mit Rückstandskurven von zwei Simulationsdurchläufen mit einem relativen Fehler der Annahmequote von 0,1 und 0,5 im Vergleich zu dem modellierten Rückstandsniveau (siehe Tabelle A 35 und Tabelle A 39 im Anhang; Experiment 2.1.5; Experiment 2.5.5).



AnzAuf: Anzahl Aufträge *BKT*: Betriebskalendertag *RSA_{ist}*: Ist-Rückstand
RSA_{mod}: Modellierter Rückstand *F_{AQ}*: Relativer Fehler der Annahmequote

Abbildung 7-7: Modellierte und simulierte Rückstandsentwicklung bei einer Fehleinschätzung der Annahmequote

Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung steuert, wie bereits zuvor gezeigt, sehr aktiv die Rückstände. Auch bei einer systematischen Fehleinschätzung der Annahmequote greift diese Regelung ein, weshalb deutlich sichtbare Rückstandsschwankungen auftreten. Wie bereits beschrieben, unterscheidet sich aufgrund der Fehleinschätzung jedoch das Niveau, ab dem die Rückstandsregelung wirkt. Trotz der zuvor beschriebenen Abweichung kann das Rückstandsmodell die Erhöhung des Rückstandsniveaus gut voraussagen. Die Abweichungen sind dabei auf die statistischen Unsicherheiten der Eingangsgrößen in der Simulation zurückzuführen.

Fehleinschätzung der Produktivität

Der folgende Abschnitt untersucht die Rückstandsmodellierung bei einer systematischen Fehleinschätzung der Produktivität. Durch die Systematik der Fehleinschätzung steigt der mittlere Rückstand über die Zeit an.

Tabelle 12 zeigt die Simulationsergebnisse der Simulationsexperimente mit systematischen Fehleinschätzungen der Produktivität. Detaillierte Ergebnisse zeigen Tabelle A 40 bis Tabelle A 44 im Anhang.

Tabelle 12: Rückstandsentwicklung bei einer Fehleinschätzung der Produktivität

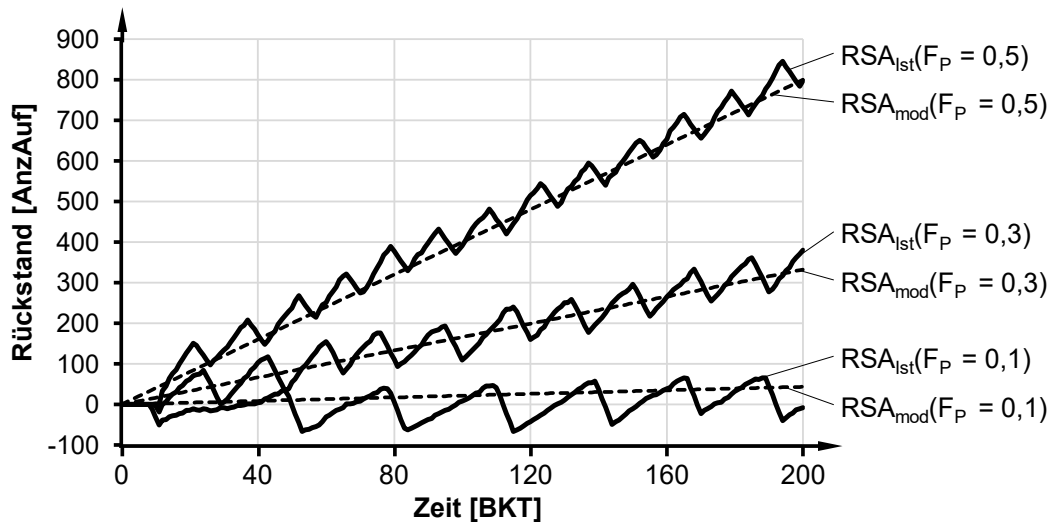
Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand ZR _m : 5 BKT			AQ _m : 50%	Störungen: Keine ZAU _v : 0		
Verfahren	PRO _{Ist} [Std./Std.]	PRO _{Plan} [Std./Std.]	F _{PRO} [-]	ΔRSA _{mod.} [1/BKT]	ΔRSA _{Ist} [1/BKT]	Δrel [%]
mAAT	0,9	1	0,1	0,22	0,21	-4,5
	0,8	1	0,2	0,80	0,80	0,0
	0,7	1	0,3	1,66	1,64	-1,2
	0,6	1	0,4	2,74	2,78	1,5
	0,5	1	0,5	4,00	4,04	-1,0

AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{PRO}	Fehleinschätzung der Produktivität [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
PRO _{Ist}	Ist-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
PRO _{Plan}	Plan-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
ΔRSA _{Ist}	Ist-Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
ΔRSA _{mod.}	Modellierte Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
Δrel	Relative Abweichung zwischen der Simulation und dem Modell [%]

Insgesamt weicht die Modellierung für eine fehlerhaft eingeschätzte Produktivität mit einer mittleren Abweichung von 1,2% nur vergleichsweise moderat von den simulierten Werten ab. Dieser relative Fehler der Modellierung im Vergleich zur Simulation nimmt mit steigendem Fehler noch ab. Die simulativ ermittelte Rückstandssteigerung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung erreicht 0,21 Aufträge pro Betriebskalendertag bei einer relativen Fehleinschätzung der Produktivität von 0,1. Dies stimmt sehr gut mit der Modellierung überein, die eine Rückstandssteigerung von 0,22 Aufträgen pro Betriebskalendertag prognostiziert. Bei der maximalen überprüften relativen Fehleinschätzung der Produktivität von 0,5 liegt die modellierte Rückstandssteigerung bei 4,0 Aufträgen pro Betriebskalendertag und weicht damit nur geringfügig von dem simulierten Wert von 4,04 Aufträgen pro Betriebskalendertag ab. Ähnliche Ergebnisse erreicht die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung auch für die dazwischenliegenden Werte der relativen Fehleinschätzung.

Abweichungen sind auf die Rückstandsschwankungen der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung zurückzuführen, die durch die Rückstandsregelung des Verfahrens auftreten. Abbildung 7-8 zeigt die Rückstandskurven von drei Simulationen durchläufen mit einem relativen Fehler der Produktivität von 0,1, 0,3 und 0,5 im Vergleich

zu dem modellierten Rückstandsverlauf (siehe Tabelle A 40, Tabelle A 42 und Tabelle A 44; Experiment 2.6.5; Experiment 2.8.5; Experiment 2.10.5).



AnzAuf: Anzahl Aufträge BKT: Betriebskalendertag RSA_{ist}: Ist-Rückstand
 RSA_{mod}: Modellierter Rückstand F_p: Relativer Fehler der Produktivität

Abbildung 7-8: Modellierte und simulierte Rückstandsentwicklung bei einer Fehleinschätzung der Produktivität

Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung steuert aktiv die Rückstände. Auch bei einer systematischen Fehleinschätzung der Produktivität greift diese Regelung ein, weshalb deutlich sichtbare Rückstandsschwankungen auftreten. Die langfristige Rückstandsentwicklung ist dennoch positiv, da aufgrund der systematischen Fehleinschätzung die Planung auf Grundlage einer zu geringen Kapazität erfolgt. Wie erkennbar ist, kann das Rückstandsmodell diese Rückstandsentwicklung trotz der kurzfristigen Schwankungen im Mittel auf Dauer vorhersagen.

Fehleinschätzung der Auftragsinhalte

Der folgende Abschnitt untersucht die Rückstandsmodellierung bei einer systematischen Fehleinschätzung der Auftragsinhalte. Dafür variieren die einzelnen Simulationsexperimente die Fehleinschätzung der Auftragsinhalte zwischen Werten von 0,1 bis 0,5. Die Fehleinschätzung der Produktivität verursacht entsprechend der zuvor aufgestellten Überlegungen einen Rückstand. Durch die Systematik der Fehleinschätzung steigt der mittlere Rückstand über die Zeit an.

Tabelle 13 zeigt die Simulationsergebnisse der Simulationsexperimente mit verschiedenen systematischen Fehleinschätzungen der Produktivität. Detaillierte Ergebnisse zeigen die Tabelle A 45 bis Tabelle A 49 im Anhang.

Tabelle 13: Rückstandsentwicklung bei einer Fehleinschätzung der Auftragsinhalte

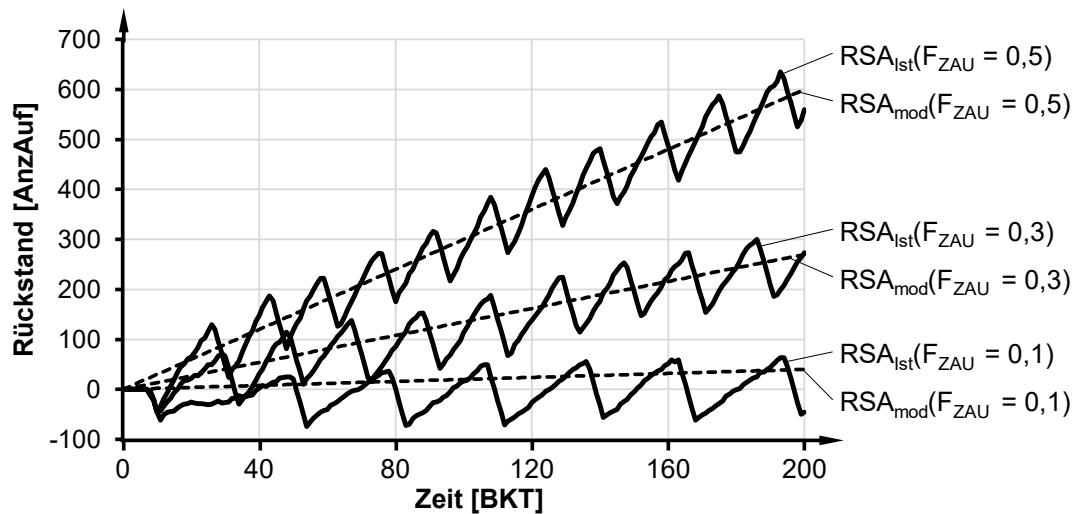
Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR _m : 5 BKT			AQ _m : 50%		ZAU _v : 0	
Verfahren	ZAU _{ist} [Std.]	ZAU _{Plan} [Std.]	F _{ZAU} [-]	ΔRSA _{mod.} [1/BKT]	ΔRSA _{ist} [1/BKT]	Δrel [%]
mAAT	1,00	0,90	0,1	0,20	0,18	-10,0
	1,00	0,83	0,2	0,69	0,68	-1,4
	1,00	0,77	0,3	1,35	1,39	2,9
	1,00	0,72	0,4	2,13	2,17	1,9
	1,00	0,66	0,5	3,00	3,02	0,6

AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{ZAU}	Fehleinschätzung der Auftragszeit [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
ZAU _{ist}	Ist-Auftragszeit [Std.]
ZAU _{Plan}	Plan-Auftragszeit [Std.]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
ΔRSA _{ist}	Ist-Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
ΔRSA _{mod.}	Modellierte Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
Δrel	Relative Abweichung zwischen der Simulation und dem Modell [%]

Insgesamt weicht auch für eine fehlerhaft eingeschätzte Auftragszeit die Modellierung mit einer mittleren Abweichung von 3,4% nur vergleichsweise moderat von den simulierten Werten ab. Dieser relative Fehler der Modellierung im Vergleich zur Simulation nimmt mit steigendem Fehler ab. Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung erreicht bei einer relativen Fehleinschätzung der Auftragsinhalte von 0,1 eine Rückstandssteigerung von 0,18 Aufträgen pro Betriebskalendertag. Dies ist erneut eine gute Übereinstimmung mit der modellierten Rückstandssteigerung von 0,2 Aufträgen pro Betriebskalendertag. Auch die relative Fehleinschätzung der Auftragsinhalte hat in den Simulationsuntersuchungen einen Maximalwert von 0,5. Für diesen Wert liegt die modellierte Rückstandssteigerung bei 3,0 Aufträgen pro Betriebskalendertag und weicht damit nur geringfügig von dem simulierten Wert von 3,02 Aufträgen pro Betriebskalendertag ab. Auch weitere simulierte Werte der relativen Fehleinschätzung erreichen vergleichbare Ergebnisse.

Abweichungen sind auf die Rückstandsschwankungen der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung zurückzuführen, die durch die Rückstandsregelung des Verfahrens auftreten. Abbildung 7-9 zeigt die Rückstandskurven von drei Simulationsdurchläufen mit einem relativen Fehler der Auftragsinhalte von 0,1, 0,3 und 0,5 im

Vergleich zu dem modellierten Rückstandsverlauf (siehe Tabelle A 45, Tabelle A 47 und Tabelle A 49; Experiment 2.11.5; Experiment 2.13.5; Experiment 2.15.5).



AnzAuf: Anzahl Aufträge *BKT*: Betriebskalendertag *RSA_{Ist}*: Ist-Rückstand
RSA_{mod}: Modellierter Rückstand *F_{ZAU}*: Relativer Fehler der Produktivität

Abbildung 7-9: Modellerte und simulierte Rückstandsentwicklung bei einer Fehleinschätzung der Auftragsinhalte

Auch für die Fehlannahme der Auftragsinhalte ist ein ähnliches Verhalten zu beobachten, welches auch schon die Fehlannahme der Produktivität gezeigt hat. Wie bereits zuvor beschrieben ist die Wirkung einer fehlerhaft angenommenen Produktivität und fehlerhaft angenommener Auftragsinhalte sehr ähnlich, da in beiden Fällen eine mangelhafte Planung der Kapazitäten erfolgt. Damit kann das Rückstandsmodell auch die Rückstandsentwicklung für eine fehlerhafte Annahme der Auftragsinhalte langfristig vorhersagen.

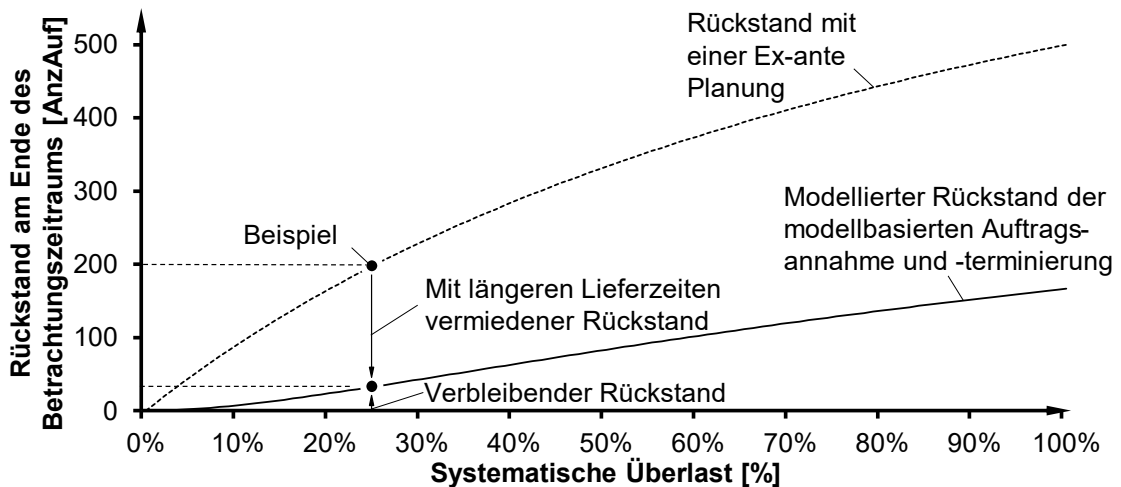
7.4 Zwischenfazit zum Verhalten unter irregulären Bedingungen

Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung soll auch unter irregulären Bedingungen die Folgen eingebrachter Abweichungen möglichst gut ausregeln. Eine Rückstandsmodellierung bei einer fehlerhaften Parametrisierung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung hat dieses Verhalten belegt.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung ähnlich den modellierten Vorhersagen auf die Fehleinschätzung der Annahmquote, der Produktivität und den Auftragszeiten mit einem Rückstand reagiert. Dieser Rückstand entspricht jedoch auch bei systematischen Fehleinschätzungen nur einem Bruchteil der eingebrachten Unsicherheit. Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung zeigt damit ihre Wirksamkeit bei der Kontrolle und Reduzierung von Rückständen, selbst in Situationen mit Fehleinschätzungen und Unsicherheiten. Die Unterschiede in der Reaktion der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung auf Fehler sind jedoch zu beachten. Während eine fehlerhafte Annahmquote zu einer Verschiebung des Rückstandsniveaus führt, verursachen Fehler bei der Produktivität und den Auftragszeiten eine mangelhafte Planung der Kapazitäten und damit kontinuierlich

steigende Rückstände. Die Rückstandsmodellierung kann die grundsätzliche Entwicklung der Rückstände vorhersagen.

Die Modellierung der Rückstände bei fehlerhaften Planungsparametern ermöglicht es, die Robustheit des Verfahrens zu beurteilen und Auswirkungen einer Fehlanwendung auf das Terminierungsergebnis abzuschätzen. Ein Zahlenbeispiel verdeutlicht dies: Ein Unternehmen überschätzt die eigene Produktivität um 20%. Die Plan-Leistung dieses Unternehmens beträgt zehn Aufträge am Tag. Die tatsächliche Ist-Leistung entspricht allerdings nur acht Aufträgen am Tag. Das Unternehmen erfährt durch den Planungsfehler eine systematische Überlast von 25%. Über einen Betrachtungszeitraum von 100 Betriebskalendertagen soll der entstehende Rückstand ermittelt werden. Für das Zahlenbeispiel ergibt die Rückstandsmodellierung für die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung einen Rückstand von etwa 33 Aufträgen am Ende des gesamten Betrachtungszeitraums, obwohl etwa 200 Aufträge außerhalb der tatsächlichen Kapazität eingeplant worden sind. Die Differenz kann durch eine Verlängerung der Lieferzeit für die einzelnen Aufträge vermieden werden. Eine vollständige Ex-Ante Planung ohne das rückstandsregelnde Verhalten der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung hätte einen deutlich höheren Rückstand von 200 Aufträgen verursacht. Das Beispiel zeigt, dass das Verfahren einen Großteil der Überlast durch realistische Terminierung in verlängerte Lieferzeiten umwandelt, während nur ein kleiner Teil der Überlast zu einem Rückstand führt. Abbildung 7-10 illustriert diese Rückstandsentwicklung in Bezug auf die systematische Überlast.



$LA_{Plan} = 10$ Aufträge/BKT
 Zeitraum = 100 BKT

AnzAuf : Anzahl Aufträge
 LA_{Plan} : Plan-Leistung
 BKT : Betriebskalendertag

Abbildung 7-10: Beispielhafter Rückstand in einer Situation mit systematischer Überlastung aufgrund Fehleinschätzung der Produktivität

Das Verfahren kann insbesondere bei kleinen Abweichungen der Planungsgrößen und einer geringen systematischen Überlast die Entstehung von Rückständen effektiv dämpfen. Selbst bei einer großen Überlast von 100% wird nur etwa ein Drittel des

systematischen Fehlers in einen Rückstand umgewandelt, so dass ausreichend Zeit bleibt, um die Kapazitäten anzupassen.

Selbst bei fehlerhaften Verfahrensparametern reduziert die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung die Entstehung von Rückständen und Terminabweichungen. Das Verfahren gleicht den größeren Teil der Abweichungen aus, indem es die aktuellen Rückstände in der Planung berücksichtigt und durch eine Verlängerung der Lieferzeit abbaut. Dadurch entstehen selbst bei einer hohen Belastung nur etwa ein Drittel der Überlast als Rückstand. Das Verfahren ist daher robust gegenüber ungenauer Parametrisierung und führt insbesondere bei geringen Abweichungen der Planungsparameter nur zu sehr geringen Rückständen.

Diese Abschätzung ermöglicht es dem Anwender, die zu erwartende Terminabweichung bei einer gewissen Unsicherheit der Planungsparameter zu beurteilen. Auf dieser Grundlage kann das Unternehmen gegebenenfalls die Bestimmung der Planungsparameter überarbeiten oder die Modellierungsergebnisse nutzen, um die Auswirkung systematischer Fehler abschätzen zu können.

8 Zielerreichung und Limitationen

Die folgenden Abschnitte befassen sich mit der Zielerreichung (Abschnitt 8.1) und den Limitationen (Abschnitt 8.2) der vorliegenden Arbeit.

8.1 Zielerreichung

Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung hat das Ziel, den Umgang mit Unsicherheiten in der Terminplanung zu verbessern und eine effektive Steuerung der Auftragsannahme und -terminierung zu ermöglichen. Dabei soll es sich insbesondere an den in Abschnitt 3.4 dargelegten Zielsetzungen messen lassen. Diese Ziele umfassen die Modellierung der Auftragsannahme und -terminierung, die Entwicklung einer modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung und die modellbasierte Bewertung des Verfahrens.

Modellierung der Auftragsannahme und -terminierung

Die produktionslogistischen Modelle für die Auftragsannahme und -terminierung sollten für die Annahmquote aus dem Angebotsbestand einen validen Eingangsparameter für die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung liefern und die Unsicherheiten im Plan-Abgang aus Angeboten beschreiben.

Modellierung der Annahmquote: Die modellierte Annahmquote aus dem Angebotsbestand berücksichtigt systematische Unterschiede unterschiedlicher Annahme- und Ablehnungszeiten in der Auftragsannahme. Die Annahmquote aus dem Angebotsbestand kann damit, mehr als 50 Jahre nach Beschreibung der Annahmquote aus Rückmeldedaten, dazu beitragen, den Plan-Abgang aus offenen Angeboten genauer vorherzusagen.

Modellierung der Unsicherheiten im Plan-Abgang: Die Modellierung der Unsicherheiten im Plan-Abgang zeigt frühzeitig potenzielle Unter- oder Überschreitungen des Plan-Abgangs auf. Dadurch kann ein Unternehmen frühzeitig Maßnahmen wie Kapazitätsanpassungen vorbereiten. Außerdem hilft das Modell, die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung auszulegen, insbesondere durch eine begrenzte Angebotsgültigkeit.

Entwicklung einer modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung

Der Fokus der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung liegt auf der Wirksamkeit des Verfahrens, der Gestaltung einer abgestimmten Fertigungssteuerung und der Einfachheit des Verfahrens. Die Wirksamkeit beantwortet die Frage, inwieweit das Verfahren dazu beiträgt, Rückstände zu reduzieren, die Auslastung zu optimieren und Terminabweichungen zu minimieren. Die Gestaltung einer abgestimmten Fertigungssteuerung ist für die Umsetzung eines Gesamtsystems für die PPS von Relevanz und misst sich an der kombinierten logistischen Zielerreichung. Die Einfachheit wird anhand der Verfahrensregeln und deren Darstellungsformen beurteilt.

Wirksamkeit: Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung schützt die Produktion vor Überlastung und kann damit Termintreue und Auslastung als Hauptzielgrößen vieler Unternehmen der Auftragsfertigung fördern. Das Verfahren zeichnet sich

durch ein hohes Maß an Konsistenz der Ergebnisse aus. Es ermöglicht Unternehmen in sich schlüssige und realistische Lieferzeiten zuzusagen.

Integrierte Konfiguration der Fertigungssteuerung: Insbesondere die Kombination des vorgestellten Planungsverfahrens mit einer bestandssteuernden Auftragsfreigabe nach ConWIP und einer Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin verbessert und stabilisiert die Erreichung der logistischen Ziele zusätzlich. Auch die Möglichkeit, das Verfahren mit einer Rückstandsregelung zu kombinieren, hat die vorliegende Arbeit untersucht und bestätigt.

Einfachheit: Das Verfahren zeichnet sich durch einen geringen Datenbedarf und eine vergleichsweise einfache Parametrisierung aus. Die Methode ermöglicht es, durch die Darstellung im Durchlaufdiagramm den voraussichtlichen Plan-Abgang einschließlich der Angebote abzubilden und dadurch mögliche Rückstände frühzeitig zu erkennen.

Modellbasierte Bewertung der Auftragsannahme und -terminierung

Die Stabilität, Regelungsfähigkeit und das Verhalten des Verfahrens unter irregulären Bedingungen zeigen simulative Untersuchungen und Modellierungen.

Bewertung der Stabilität und Regelungsfähigkeit: Die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung ist aufgrund des rückstandsregulierenden Verhaltens für einen weiten Bereich von Eingangsgrößen geeignet, ohne eine übermäßige Verschlechterung der logistischen Zielerreichung zu verursachen. Auftretende Unsicherheiten werden durch die Variation der Lieferzeit automatisch ausgeregelt.

Bewertung des Verhaltens unter irregulären Bedingungen: In vielen Unternehmen unterliegen wichtige Verfahrensparameter wie die Produktivität oder die Vorgabezeiten einem systematischen Fehler. Wie sich diese Fehler auf den (Planungs-)Rückstand auswirken, konnte in dieser Arbeit mit Hilfe von nachvollziehbaren Modellen beschrieben werden. Die Modelle zeigen, dass das Verfahren auch auf fehlerhafte Eingangsgrößen robust reagiert. Einen großen Teil des Fehlers gleicht das regelnde Verhalten des Verfahrens automatisch aus, was die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung besonders praxistauglich macht. Diese – zumindest bei der Auftragsannahme – einmalige Modellierung hat sich bewährt und könnte ein Vorbild für andere PPS-Verfahren sein, da ein Betrieb unter irregulären Bedingungen nicht nur in der Auftragsannahme und -terminierung verbreitet ist.

Insgesamt kann die vorliegende Arbeit die zuvor festgelegten Ziele erreichen und ein wirksames, einfaches und robustes Verfahren für die Auftragsannahme und -terminierung liefern. Damit hat sich auch die modellbasierte Forschungsmethodik bewährt, die eine zielgerichtete Verfahrensentwicklung und -bewertung erst ermöglicht hat. Das Verfahren kann durch seine modellbasierte Gestaltung, seine anschauliche Umsetzung und große Nachvollziehbarkeit in der Praxis wesentliche Verbesserungen erzielen. Es könnte deshalb zu einem neuen Standard für die Produktionsplanung und -steuerung von Auftragsfertigern beitragen.

Dennoch unterliegt auch die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung Limitationen, die im Folgenden diskutiert werden.

8.2 Limitationen

Die Limitationen der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung betreffen insbesondere mögliche unberücksichtigte Einflüsse auf die Annahmquote, die praktische Anwendung, die Reaktion auf Unterlasten, die Vereinfachungen des Verfahrens und die Anwendbarkeit für Mischfertiger.

Einflüsse auf die Annahmquote: Die Annahmquote wird in dieser Arbeit im Vergleich zur Literatur um den Einfluss unterschiedlicher Rückmeldezeiten ergänzt. In der Praxis sind jedoch auch weitere Einflüsse auf die Annahmeentscheidung, wie beispielsweise eine Abhängigkeit von der zugesagten Lieferzeit, denkbar. Solche Einflüsse sind in der bisherigen Modellierung der Annahmquote nicht berücksichtigt.

Praktische Anwendung: Derzeit liegen noch keine praktischen Erfahrungen mit dem Verfahren vor. Die Verfügbarkeit der erforderlichen Daten kann in der Praxis eine Herausforderung darstellen, obwohl nur wenige Eingangsdaten benötigt werden. Eine Befragung von Unternehmen deutet darauf hin, dass diese wichtige Kennzahlen, wie Annahmquoten oder Rückmeldezeiten oft nicht systematisch erfassen [BANK21]. Obwohl sich das Verfahren als ausreichend robust herausgestellt hat, um Schätzwerte zu verwenden, liefert erst die Praxisanwendung Aufschluss über die Akzeptanz und den tatsächlichen Nutzen des Verfahrens.

Reaktion auf Unterlasten: Vorrübergehende Unterlasten kann die mit der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung kombinierte Auftragsfreigabe nach ConWIP über einen Vorgriffhorizont ausgleichen. Jedoch besitzt die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung keinen Algorithmus, um selbstständig auf die Perioden mit Unterlast zu reagieren. Umso wichtiger ist eine aktive Kapazitätsplanung und -steuerung, um auch bei systematischen oder langanhaltenden Unterlasten keine Auslastungsverluste zu riskieren. Die Darstellung im Durchlaufdiagramm kann auch diese Aufgaben unterstützen. Unternehmen können bei freien Kapazitäten zudem prüfen, ob sie die Lieferzeiten von Aufträgen verkürzen können, deren Lieferterminzusage aufgrund – zwischenzeitlich aufgehobener – Kapazitätsrestriktionen nicht dem Kundenwunsch entsprechen.

Vereinfachungen des Verfahrens: Die Anwendbarkeit des Verfahrens wird potenziell durch die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen eingeschränkt. Grundsätzlich bewegt sich das Verfahren, wie andere Verfahren auch, in einem Spannungsfeld zwischen Einfachheit und Genauigkeit. Bei der Verfahrensentwicklung ist die Einfachheit des Verfahrens explizit als Zielstellung eingeflossen, weswegen das Verfahren unter anderem einen vergleichsweise groben Detaillierungsgrad auf Ebene der gesamten Fertigung besitzt. In Unternehmen mit sehr komplizierten Materialflüssen und strukturellen Engpässen könnte ein detaillierteres Vorgehen vorteilhaft sein.

Anwendbarkeit für Mischfertiger: Die Anwendbarkeit der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung bei Mischfertigern, die Auftrags- und Lagerfertigung kombinieren, wurde in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht und ist deshalb unklar. Eine solche Voraussetzung kann eine Anpassung des Verfahrens notwendig machen. Eine im Kontext dieser Arbeit entstandene und im Rahmen einer Veröffentlichung dargestellte Erweiterung des Verfahrens für Eilaufträge (siehe [MUND22]) zeigt dagegen, dass die

Anpassung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung auch auf spezielle Fertigungssituationen möglich ist.

Die Einschränkungen sind größtenteils auf den gesetzten Schwerpunkt dieser Arbeit zurückzuführen und können teilweise durch die diskutierten Ansätze, wie eine Kapazitätsplanung mit Hilfe des Durchlaufdiagramms, gelöst werden.

9 Schlussbetrachtung

Die Schlussbetrachtung fasst in Abschnitt 9.1 zunächst die Inhalte und Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammen. Abschließend gibt Abschnitt 9.2 einen Ausblick auf den möglichen weiteren Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Auftragsannahme und -terminierung.

9.1 Zusammenfassung

Die Lieferzeiten und die Liefertermineinhaltung sind für die Kunden von Auftragsfertigern wichtige Entscheidungskriterien. Umso problematischer ist es, dass es vielen Unternehmen nicht gelingt, ihren Kunden verbindliche Lieferzeiten zu nennen. Dies ist Aufgabe der Auftragsannahme und -terminierung.

Eine Analyse der Auftragsannahme und -terminierung hat gezeigt, dass (1) bestehende Modelle der Produktionslogistik die Auftragsannahme und -terminierung nicht vollständig abbilden, (2) bestehende Verfahren zur Auftragsannahme und -terminierung nicht immer wirksam, mit der Fertigungssteuerung abgestimmt sowie einfach umzusetzen sind und (3) die Auswirkungen einer fehlerhaften Umsetzung der Verfahren bislang nicht beurteilt werden können.

Ziel der Arbeit ist es daher, fehlende logistische Modelle für die Auftragsannahme und -terminierung abzuleiten, darauf aufbauend ein modellbasiertes Verfahren für die Auftragsannahme und -terminierung zu entwickeln und dieses Verfahren vollumfänglich modellbasiert und umfassend zu bewerten.

Eine Modellierung der Annahmequote aus dem Angebotsbestand und der Unsicherheiten im Plan-Abgang aus Angeboten ergänzt bestehende produktionslogistische Modelle um wichtige Wirkzusammenhänge der Auftragsannahme und -terminierung. Das Modell für die Annahmequote aus dem Angebotsbestand berücksichtigt dabei systematische Unterschiede zwischen der Annahme- und Ablehnungszeit in der Auftragsannahme. Die Modellierung der Unsicherheiten im Plan-Abgang stellt die Standardabweichung des Plan-Abgangs in Abhängigkeit der Auftragsinhalte und der Annahmequote dar.

Ein darauf aufbauendes Verfahren für eine modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung beschreibt, wie im Durchlaufdiagramm eine zielgerichtete Terminplanung erfolgen kann, wenn der Plan-Abgang um die wahrscheinlichen Arbeitsinhalte aus offenen Angeboten ergänzt wird. Das Verfahren baut dabei auf den bestehenden und in dieser Arbeit abgeleiteten Modellen zur Produktionslogistik auf. Mit dem Plan-Abgang steuert das Verfahren eine zentrale Stellgröße, um den Rückstand und damit die mittlere Terminabweichung wirksam zu begrenzen. Durch den modellbasierten Ansatz ist das Verfahren einfach bewertbar und kompatibel mit bestehenden modellbasierten Verfahren der Produktionsplanung und -steuerung.

In einer umfangreichen Evaluation wurde das Verfahren mit Hilfe von Simulationsuntersuchungen und einer Modellierung evaluiert. Ziel der Evaluation war es, die Wirksamkeit des Verfahrens unter gültigen Verfahrensannahmen und die Robustheit des Verfahrens bei einer fehlerhaften Parametrisierung zu beurteilen.

Im ersten Bestandteil der Evaluation wurde in umfangreichen Simulationsexperimenten das Verfahren im Vergleich mit einer Referenzkonfiguration mit Standardlieferzeiten beurteilt. Zentrales Ergebnis ist, dass die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung die Produktion vor Überlastung schützt und die Termintreue und Auslastung als Hauptzielgrößen vieler Unternehmen der Auftragsfertigung wirksam unterstützen kann. Das Verfahren zeichnet sich dabei durch ein hohes Maß an Konstanz der Ergebnisse aus. Insbesondere die Kombination des vorgestellten Planungsverfahrens mit einer bestandssteuernden Auftragsfreigabe nach ConWIP und einer Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin verbessert und stabilisiert die Erreichung der logistischen Ziele zusätzlich.

Im zweiten Bestandteil der Evaluation wurde das Verhalten des Verfahrens bei einer fehlerhaften Einschätzung der zentralen Eingangsparameter Annahmequote, Produktivität und Auftragsinhalt beurteilt. Dafür wurde die Rückstandsentwicklung bei fehlerhaften Verfahrensparametern modelliert und diese Modellierung mithilfe von Simulationsexperimenten evaluiert. Die Modellierung zeigt, dass die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung aufgrund des rückstandsregelnden Verhaltens auch auf fehlerhafte Eingangsgrößen robust reagiert und einen großen Teil des Fehlers ausgleicht.

9.2 Ausblick

Während der Anfertigung der vorliegenden Forschungsarbeit haben sich insbesondere in der praktischen Anwendung, der Evaluation und Anpassung für weitere Fertigungssituationen und der Entwicklung einer abgestimmten Kapazitätsplanung weitere Forschungsfragen ergeben.

Die Modellierung der Auftragsannahme und -terminierung konnte in dieser Arbeit unter anderem durch die Annahmequote aus dem Angebotsbestand erweitert werden. Allerdings kann es in der Praxis noch weitere Einflüsse auf die Annahmeentscheidung, wie beispielsweise die zugesagte Lieferzeit, geben. Es stellt sich die Frage, wie solche Einflüsse in der Annahmequote berücksichtigt werden können.

Die vorliegende Arbeit hat die modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung bislang zwar simulativ in Bezug auf verschiedene Fragestellungen untersucht, allerdings steht eine praktische Implementierung und Evaluation des Verfahrens noch aus. Bei einer solchen Untersuchung stellt sich die Frage nach der Datenverfügbarkeit in der Praxis und möglichen Vorgehen zur Datenakquise und -aufbereitung. Außerdem sollte die Akzeptanz des Verfahrens in Produktion und Vertrieb untersucht werden.

Bei der Entwicklung der modellbasierten Auftragsannahme und -terminierung wurden Vereinfachungen bezüglich der Verfahrensparameter, wie der Annahmequote, und der untersuchten Fertigungsspezifikationen getroffen. Weitere Forschungsarbeiten könnten sich deshalb mit der Anwendung und ggf. Erweiterung des Verfahrens in spezifischeren Situationen beschäftigen, wie zum Beispiel bei ausgeprägten Engpässen oder sehr komplizierten Materialflüssen. Unklar ist darüber hinaus, inwieweit das Vorgehen auch für Mischfertiger anzuwenden ist. Entsprechend ist die Evaluation und mögliche

Anpassung des Verfahrens für die Mischfertigung eine vielversprechende Forschungsfrage.

Schließlich hat sich gezeigt, dass das Durchlaufdiagramm mit dem wahrscheinlichen Arbeitsinhalt von Angeboten auch für die Kapazitätsplanung von Auftragsfertigern hilfreich ist. Entsprechend sollte untersucht werden, wie die Kapazitätsplanung dieses Potenzial nutzen kann.

10 Literaturverzeichnis

- [ALEN08] Alenezi, A.; Moses, S. A.; Trafalis, T. B.: Real-time prediction of order flowtimes using support vector regression. In: *Computers & Operations Research*. 35. Jg., 2008, Nr. 11, S. 3489–3503
- [ALME87] Almenräder, A.: PPS-Fachmann. Grundlagen, Planung, Steuerung, Düsseldorf. Rationalisierungs-Kuratorium der Deutschen Wirtschaft e.V, 1987
- [BANK21] Bank, L.; Luber, M.; Theumer, P.; Zipfel, A.; Kämpfer, T.; Hiller, T.; Heuer, T.; Demke, T.; Mundt, C.; Köster, N.; Janke, T.; Maibaum, J.; Schmidhuber, M.; Schilp, J. (Hrsg.): PPS-Report 2021. Studienergebnisse. Fraunhofer Publica, 2021
- [BECH84] Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Dissertation. Universität Hannover, 1984
- [BERT81] Bertrand, J. W.; Wortmann, J. J.: Production control and information systems for component-manufacturing shops. Elsevier Scientific Publishing Company, 1981
- [BRAN67] Brankamp, K.: Ein Terminplanungssystem für Unternehmen der Einzel- und Serienfertigung. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1967
- [CONW67] Conway, R.; Maxwell, W. L.; Miller, L. W.: Theory of scheduling, Reading, Mass. Addison-Wesley, 1967
- [DOMB88] Dombrowski, U.: Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung. Dissertation. Universität Hannover, 1988
- [EBAD08] Ebadian, M.; Rabbani, M.; Jolai, F.; Torabi, S. A.; Tavakkoli-Moghaddam, R.: A new decision-making structure for the order entry stage in make-to-order environments. In: *International Journal of Production Economics*. 111. Jg., 2008, Nr. 2, S. 351–367
- [EBAD09] Ebadian, M.; Rabbani, M.; Torabi, S. A.; Jolai, F.: Hierarchical production planning and scheduling in make-to-order environments: reaching short and reliable delivery dates. In: *International Journal of Production Research*. 47. Jg., 2009, Nr. 20, S. 5761–5789
- [EIDE89] Eidenmüller, B.: Die Produktion als Wettbewerbsfaktor. Herausforderungen an das Produktionsmanagement, Köln. Verlag TÜV Rheinland, 1989
- [EVER77] Eversheim, W.; Minolla, W.; Fischer, W.: Angebotskalkulation mit Kostenfunktion in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Bericht aus d. Laboratorium für Werkzeugmaschinen u. Betriebslehre d. Rhein.-Westfäl. Techn. Hochsch. Aachen, Lehrstuhl für Produktionssystematik, Berlin, Köln. Beuth, 1977

- [EVER90] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 2, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 1990
- [EVER96] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 1, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 1996
- [EVER02] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 3, Berlin. Springer, 2002
- [FAHR16] Fahrmeir, L.; Heumann, C.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.: Statistik, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2016
- [GLÖC20] Glöckner, R.: Entwicklung eines Gesamtmodells der Arbeitsproduktivität und der logistischen Zielgrößen. Dissertation. Technische Universität Hamburg, 2020
- [GOLD84] Goldratt, E. M.; Cox, J.: The goal: a process of ongoing improvement, Cape Town. NPI, 1984
- [GRAB78] Grabowski, H.; Kambartel, K.-H.: Rationelle Angebotsbearbeitung in Unternehmen mit Auftragsfertigung, Essen. Girardet, 1978
- [GUTE83] Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Berlin, Heidelberg. Springer, 1983
- [HACK84] Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis, Düsseldorf. VDI-Verlag, 1984
- [HEIN74] Heinemeyer, W.: Die Analyse der Fertigungsdurchlaufzeit im Industriebetrieb. Dissertation. Technische Universität Hannover, 1974
- [HEIO82] Heiob, W.: Einsatz dialogorientierter Entscheidungstabellentechnik in der Angebots- und Auftragsbearbeitung in Unternehmen mit auftragsgebundener Produktion. Dissertation. Universität Karlsruhe, 1982
- [HEND91] Hendry, L. C.; Kingsman, B.: Job Release: Part of a Hierarchical System to Manage Manufacturing Lead Times in Make-to-order Companies. In: Journal of the Operational Research Society. 42. Jg., 1991, Nr. 10, S. 871–883
- [HEND93] Hendry, L. C.; Kingsman B. G.: Customer Enquiry Management: Part of a Hierarchical System to Control Lead Times in Make-to-Order Companies. In: Journal of the Operational Research Society. 44. Jg., 1993, Nr. 1, S. 61–70
- [HEND08] Hendry, L. C.; Land, M. J.; Stevenson, M.; Gaalman, G.: Investigating implementation issues for workload control (WLC): A comparative case study analysis. In: International Journal of Production Economics. 112. Jg., 2008, Nr. 1, S. 452–469
- [HENT28] Hentzel, F.: Der Beschäftigungsgrad. In: Journal of business economics, 1928, 673 ff

- [HILL22] Hiller, T.; Deipenwisch, L.; Nyhuis, P.: Systemising Data-driven Methods for Predicting Throughput Time within Production Planning & Control. In: 2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM): IEEE, 2022, S. 716–721
- [HOPP08] Hopp, W. J.; Spearman, M. L. (Hrsg.): Factory Physics, New York. McGraw-Hill / Irwin / Irwin, 2008
- [JEND78] Jendralski, J.: Kapazitätsterminierung zur Bestandsregelung in der Werkstattfertigung. Dissertation. Technische Universität Hannover, 1978
- [JÜNE89] Jünemann, R.: Materialfluß und Logistik. Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen, Berlin, Heidelberg. Springer, 1989
- [KAMB73] Kambartel, K. H.: Systematische Angebotsplanung in Unternehmen der Auftragsfertigung. Möglichkeiten zur Rationalisierung der Angebotserstellung auf der Grundlage definierter Angebotsformen. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1973
- [KING89] Kingsman, B. G.; Tatsiopoulos I.P.; Hendry, L. C.: A structural methodology for managing manufacturing lead times in make-to-order companies. In: European Journal of Operational Research. 40. Jg., 1989, Nr. 2, S. 196–209
- [KING00] Kingsman, B. G.: Modelling input–output workload control for dynamic capacity planning in production planning systems. In: International Journal of Production Economics. 68. Jg., 2000, Nr. 1, S. 73–93
- [KING02] Kingsman, B. G.; Hendry, L. C.: The relative contributions of input and output controls on the performance of a workload control system in Make-To-Order companies. In: Production Planning & Control. 13. Jg., 2002, Nr. 7, S. 579–590
- [KIVE81] Kivenko, K.: Managing work-in-process inventory, New York. Dekker, 1981
- [KLEI01] Klein, R.: Revenue Management: Quantitative Methoden zur Erlösmaximierung in der Dienstleistungsproduktion. In: Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis, 2001
- [KUYU13] Kuyumcu, A.: Modellierung der Termintreue in der Produktion. Dissertation. Technische Universität Hamburg, 2013
- [LAND09] Land, M. J.: Cobacabana (control of balance by card-based navigation): A card-based system for job shop control. In: International Journal of Production Economics. 117. Jg., 2009, Nr. 1, S. 97–103
- [LITT61] Little, J. D. C.: A Proof for the Queuing Formula. $L = \lambda W$. In: Operations research. 9. Jg., 1961, Nr. 3, S. 383–387

- [LÖDD16] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung, Berlin, Heidelberg. Springer, 2016
- [LÖDD17] Lödding, H.; Piontek, A.: The surprising effectiveness of earliest operation due-date sequencing. In: Production Planning & Control. 28. Jg., 2017, Nr. 5, S. 459–471
- [LÖDD18] Lödding, H.; Piontek, A.: Extending Little’s Law to single order throughput times. In: Production Planning & Control. 29. Jg., 2018, Nr. 1, S. 1–8
- [LÖDD19] Lödding, H.; Engehausen, F.: Eilaufträge strategisch einsetzen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 114. Jg., 2019, 7-8, S. 449–454
- [LOHN19] Lohnert, N.; Fischer, K.: Booking Limit Based Revenue Management Approaches for Customer-Value Oriented Make-to-Order Production. In: Bierwirth, C.; Kirschstein, T.; Sackmann, D. (Hrsg.): Logistics Management. (Reihe: Lecture Notes in Logistics). Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 268–282
- [MAYE16] Mayer, J.; Pielmeier, J.; Berger, C.; Engehausen, F.; Hempel, T.; Hünnekes, P.; Nyhuis, Peter (Hrsg.): Aktuellen Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen. Studienergebnisse, Garbsen. PZH Verlag, 2016
- [MOHA13] Mohaupt, M.; Hilbert, A.: Decision Support System for Customer Value-based Revenue Management in Manufacturing. In: PACIS 2013 Proceedings, 2013, Nr. 264
- [MOUR14] Mourtzis, D.; Doukas, M.; Fragou, K.; Efthymiou, K.; Matzourou, V.: Knowledge-based Estimation of Manufacturing Lead Time for Complex Engineered-to-order Products. In: Procedia CIRP. 17. Jg., 2014, S. 499–504
- [MUND 20a] Mundt, C.; Lödding, H.: Order Acceptance and Scheduling with a Throughput Diagram. In: Lalic, B.; Majstorovic, V.; Marjanovic, U.; Cieminski, G. von; Romero, D. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. The Path to Digital Transformation and Innovation of Production Management Systems. (Reihe: IFIP Advances in Information and Communication Technology). Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 351–359
- [MUND 20b] Mundt, C.; Winter, M.; Heuer, T.; Hübner, M.; Seitz, M.; Schmidhuber, M.; Maibaum, J.; Bank, L.; Roth, S.; Scherwitz, P.; Theumer, P.; Lödding, H. (Hrsg.): PPS-Report 2019. Studienergebnisse, Garbsen. TEWISS, 2020
- [MUND22] Mundt, C.; Beck, E. B.; Lödding, H.: Determining Due Dates for Rush Orders. In: Kim, D. Y.; Cieminski, G. von; Romero, D. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing

- and Logistics Systems: Turning Ideas into Action. (Reihe: IFIP Advances in Information and Communication Technology). Cham: Springer Nature Switzerland, 2022, S. 293–301
- [NYHU12] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2012
- [ORLI75] Orlicky, J.: Material requirements planning. The new way of life in production and inventory management, New York. McGraw-Hill, 1975
- [PARK99] Park, C.; Song, J.; Kim, J.-G.; Kim, I.: Delivery date decision support system for the large scale make-to-order manufacturing companies: A Korean electric motor company case. In: Production Planning & Control. 10. Jg., 1999, Nr. 6, S. 585–597
- [PETE95] Petermann, D.: Modellbasierte Produktionsregelung. Dissertation. Universität Hannover, 1995
- [RUBE53] Ruberg, K.: Begriff der Betriebskapazität und deren Messung in Handelsbetrieben. In: Journal of business economics, 1953
- [SCHA11] Schach, S. R.: Object-oriented and classical software engineering. 8. ed., New York. McGraw-Hill, 2011
- [SCHM61] Schmitz, P.-G.: Analytische Beziehungen zwischen Produktionsverlauf, Belastung und unvollendeter Produktion in Maschinenbaubetrieben, Berlin. VEB Verlag Technik, 1961
- [SCHÖ20] Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2020
- [SCHU12] Schuh, G.; Stich, V.: Produktionsplanung und -steuerung 1, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2012
- [SCHU13] Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktion am Standort Deutschland. Ergebnisse der Untersuchung 2013. Ausg. 2013, Aachen. FIR an der RWTH Aachen, 2013
- [SCHU20] Schuh, G.; Gützlauff, A.; Sauermann, F.; Kaul, O.; Klein, N.: Databased prediction and planning of order-specific transition times. In: Procedia CIRP. 93. Jg., 2020, S. 885–890
- [SEIT18] Seitz, M.; Härtel, L.; Hübner, M.; Engehausen, F.; Rost, R.; Meluzov, N.; Schmidhuber, M.; Sauermann, F.; Hünnekes, P.; Merkel, L.; Isla, J.; Nyhuis, P. (Hrsg.): PPS-Report 2017/18. Studienergebnisse. 1. Erstausgabe, Garbsen. TEWISS, 2018
- [SHAR84] Sharman, G.: The rediscovery of logistics. In: Harvard business review. 62. Jg., 1984, Nr. 5
- [SPEA90] Spearman, M. L.; Woodruff, D. L.; Hopp, W. J.: CONWIP: a pull alternative to kanban. In: International Journal of Production Research. 28. Jg., 1990, Nr. 5, S. 879–894

- [SUTT92] Suttrop, D.: Entwicklung einer Methode zur Erstellung von expertensystemgestützten Angebotsbearbeitungssystemen für variantenreiche Produkte. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1992
- [TAAL97] Taal, M.; Wortmann, J. C.: Integrating MRP and finite capacity planning. In: Production Planning & Control. 8. Jg., 1997, Nr. 3, S. 245–254
- [THÜR16] Thüerer, M.; Land, M. J.; Stevenson, M.; Fredendall, L. D.: Card-based delivery date promising in high-variety manufacturing with order release control. In: International Journal of Production Economics. 172. Jg., 2016, S. 19–30
- [TUKE77] Tukey, J. W.: Exploratory data analysis, Reading, Mass. Addison-Wesley, 1977
- [REFA55] Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V. (REFA): Das REFA-Buch, München. Hanser, 1955
- [REFA97] Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V. (REFA): Datenermittlung, München. Carl Hanser Verlag, 1997
- [VDI83] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): Angebotserstellung in der Investitionsgüterindustrie (Reihe: Reihe Technischer Vertrieb), Düsseldorf. VDI-Verlag, 1983
- [VDI99] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.). Kleinaltenkamp, Michael: Angebotsbearbeitung - Schnittstelle zwischen Kunden und Lieferanten. Kundenorientierte Angebotsbearbeitung für Investitionsgüter und industrielle Dienstleistungen (Reihe: VDI-Praxis technischer Vertrieb), Berlin. Springer, 1999
- [VDI4504] Norm.Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 4504. Angebotsmanagement im Industriegütergeschäft. 2010
- [VDI3633] Norm.Verein Deutscher Ingenieure (VDI) VDI 3633. Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen. Grundlagen. 2014
- [WALZ17] Walz, G.: Lexikon der Mathematik: Band 5, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [WEDE89] Wedemeyer, H.-G. von: Entscheidungsunterstützung in der Fertigungssteuerung mit Hilfe der Simulation. Dissertation. Universität Hannover, 1989
- [WEIN54] Weinberg, F.: Über die Anwendung mathematischer Methoden mit spezieller Würdigung der Wahrscheinlichkeitsrechnung in der Termin-Grobplanung für differenzierte Fabrikationsprogramme bei vorwiegender Serienfertigung. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1954

- [WIED16] Wiedemann, M.: Methodik zur auslastungsorientierten Angebotsterminierung für hochvariante Produkte mit kundenindividuellen Leistungsanteilen. Dissertation. Technische Universität München, 2016
- [WIEN97] Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells : 42 Tabellen, München. Hanser, 1997
- [WIGH70] Wight, O.: Input/output control a real handle on lead time. In: Production and Inventory Management. 11. Jg., 1970, Nr. 3, S. 9–31
- [YU01] Yu, K.-W.: Terminkennlinie. Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich. Dissertation. Universität Hannover, 2001

11 Anhang

A 1 Monte-Carlo-Simulation der Annahmquote offener Angebote

Die vorgestellte Modellierung der Annahmquote (siehe Abschnitt 4.1) wurde mithilfe umfangreicher Monte-Carlo-Simulationen in der Software MATLAB evaluiert. Das Simulationsmodell erzeugt dabei Angebote mit einer konstanten täglichen Rate. Diesen Angeboten weist das Modell entsprechend der mittleren Kundenannahme- und Kundenablehnungszeit einen Rückmeldezeitpunkt zu. Die Kundenannahme- und Kundenablehnungszeit folgen dabei einer Normalverteilung mit einem Variationskoeffizienten von 0,5. Jedem Angebot weist das Simulationsmodell entsprechend der Binomialverteilung mit der jeweiligen mittleren Annahmquote zufällig den Status angenommen oder abgelehnt zu. Anhand des Rückmeldezeitpunkts und der angenommenen Angebote kann anschließend die Annahmquote für jeden Betriebskalendertag bestimmt werden. Für diese Annahmquote wurde ein Mittelwert über den Betrachtungszeitraum bestimmt. Die Simulationen basieren jeweils auf einer Stichprobe von 100.000 Aufträgen. Die Simulationsergebnisse und das Modell der mittleren Auftragsumwandlungsquote des Angebotsbestands zeigt Abbildung A 1.

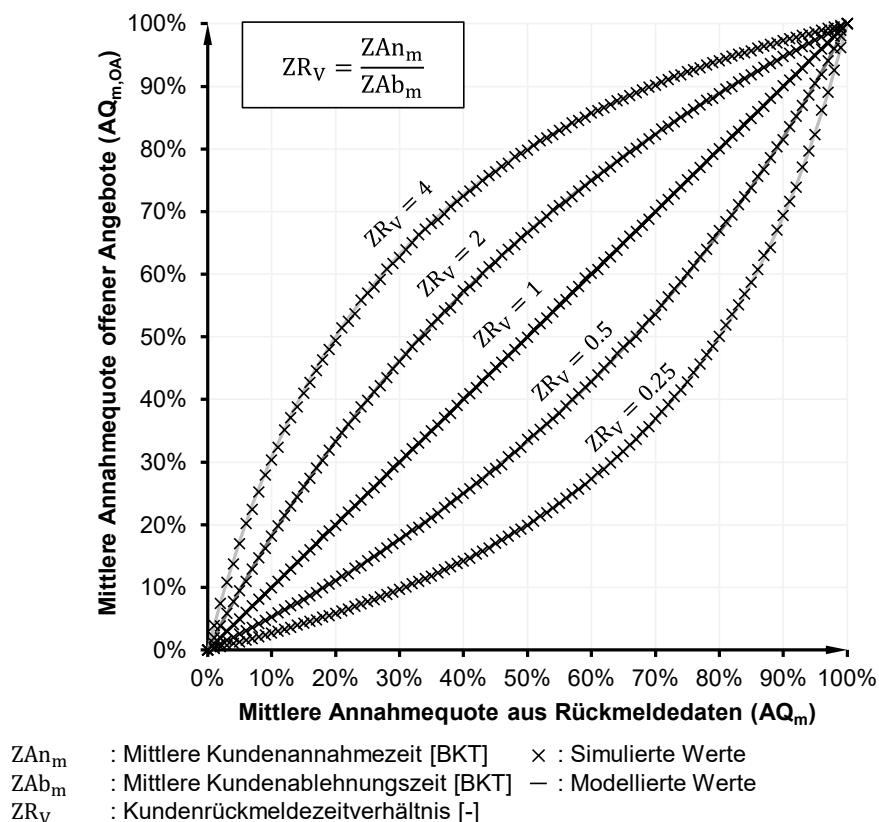


Abbildung A 1: Evaluationsergebnisse der Modellierung der mittleren Annahmquote offener Angebote für verschiedene Rückmeldezeitverhältnisse

Die simulierten Werte weichen kaum vom Modell ab. Die mittlere Abweichung mit 0,11 Prozentpunkten und die maximale Abweichung mit 0,76 Prozentpunkten sind als gering zu bewerten. Das Modell liefert bei abweichender Kundenannahme- und Kundenablehnungszeit demnach valide Ergebnisse für die mittlere Annahmquote des Angebotsbestands. Die Ergebniswerte der Evaluation können Tabelle A 1 bis Tabelle A 5 entnommen werden.

Tabelle A 1: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation zur Annahmquote offener Angebote

Parameter								
ZAn_m: 4 BKT			ZAb_m: 1 BKT			ZR_v: 4		
AQ_m	AQ_{OA,m} [%]		AQ_m	AQ_{OA,m} [%]		AQ_m	AQ_{OA,m} [%]	
[%]	Mod	Sim	[%]	Mod	Sim	[%]	Mod	Sim
0	0,00	0,00	34	67,32	67,08	68	89,47	89,43
1	3,88	3,66	35	68,29	68,01	69	89,90	89,83
2	7,54	7,13	36	69,23	69,12	70	90,32	90,18
3	11,00	10,52	37	70,14	69,93	71	90,73	90,69
4	14,28	14,03	38	71,02	71,00	72	91,13	91,18
5	17,39	16,73	39	71,88	71,98	73	91,53	91,49
6	20,33	20,09	40	72,72	72,59	74	91,92	91,86
7	23,14	22,91	41	73,54	73,28	75	92,30	92,31
8	25,80	25,31	42	74,33	74,02	76	92,68	92,67
9	28,34	28,46	43	75,10	74,8	77	93,05	92,96
10	30,76	30,30	44	75,86	75,70	78	93,41	93,39
11	33,08	32,74	45	76,59	76,62	79	93,76	93,75
12	35,29	34,68	46	77,31	76,92	80	94,11	94,05
13	37,41	36,58	47	78,00	77,84	81	94,46	94,42
14	39,43	38,76	48	78,68	78,33	82	94,79	94,74
15	41,37	40,67	49	79,35	79,24	83	95,12	95,17
16	43,24	42,94	50	80,00	79,79	84	95,45	95,41
17	45,03	44,49	51	80,63	80,44	85	95,77	95,72
18	46,75	46,12	52	81,25	81,14	86	96,08	96,15
19	48,4	47,78	53	81,85	81,65	87	96,39	96,37
20	50,00	49,65	54	82,44	82,22	88	96,70	96,72
21	51,53	51,15	55	83,01	83,01	89	97,00	96,99
22	53,01	52,88	56	83,58	83,50	90	97,29	97,31
23	54,43	53,87	57	84,13	84,09	91	97,58	97,54
24	55,81	55,50	58	84,67	84,48	92	97,87	97,89
25	57,14	56,97	59	85,19	85,15	93	98,15	98,18
26	58,42	58,02	60	85,71	85,67	94	98,42	98,45
27	59,66	59,26	61	86,21	86,01	95	98,70	98,68
28	60,86	60,53	62	86,71	86,73	96	98,96	98,95
29	62,03	61,84	63	87,19	87,21	97	99,23	99,22
30	63,15	62,83	64	87,67	87,51	98	99,49	99,48
31	64,24	64,17	65	88,13	88,18	99	99,74	99,75
32	65,30	65,23	66	88,59	88,52	100	100	100
33	66,33	66,10	67	89,03	88,85			

AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
AQ _{m,OA}	Mittlere Annahmquote offener Angebote [%]
Mod	Modellierter Wert
Sim	Simulierter Wert
ZAn _m	Mittlere Kundenannahmezeit [BKT]
ZAb _m	Mittlere Kundenablehnungszeit [BKT]
ZR _v	Kundenrückmeldezeitverhältnis

Tabelle A 2: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation zur Annahmquote offener Angebote

Parameter								
ZAn _m : 4 BKT			ZAb _m : 2 BKT			ZR _v : 2		
AQ _m [%]	AQ _{OA,m} [%]		AQ _m [%]	AQ _{OA,m} [%]		AQ _m [%]	AQ _{OA,m} [%]	
	Mod	Sim		Mod	Sim		Mod	Sim
0	0,00	0,00	34	50,74	50,54	68	80,95	80,81
1	1,98	1,94	35	51,85	51,82	69	81,65	81,59
2	3,92	3,75	36	52,94	52,83	70	82,35	82,33
3	5,82	5,79	37	54,01	54,09	71	83,04	82,87
4	7,69	7,72	38	55,07	54,92	72	83,72	83,56
5	9,52	9,41	39	56,11	56,04	73	84,39	84,42
6	11,32	11,12	40	57,14	56,88	74	85,05	85,01
7	13,08	13,12	41	58,15	58,01	75	85,71	85,78
8	14,81	14,57	42	59,15	59,41	76	86,36	86,33
9	16,51	16,36	43	60,13	60,29	77	87,00	86,89
10	18,18	17,89	44	61,11	61,37	78	87,64	87,65
11	19,81	19,64	45	62,06	62,09	79	88,26	88,18
12	21,42	21,29	46	63,01	62,80	80	88,88	88,88
13	23,00	22,89	47	63,94	63,47	81	89,50	89,57
14	24,56	24,28	48	64,86	64,69	82	90,10	90,01
15	26,08	25,78	49	65,77	65,42	83	90,71	90,66
16	27,58	27,52	50	66,66	66,88	84	91,30	91,25
17	29,05	29,14	51	67,54	67,50	85	91,89	91,94
18	30,50	30,45	52	68,42	68,09	86	92,47	92,51
19	31,93	31,60	53	69,28	69,09	87	93,04	93,13
20	33,33	33,29	54	70,12	69,98	88	93,61	93,63
21	34,71	34,27	55	70,96	70,89	89	94,17	94,20
22	36,06	36,01	56	71,79	71,61	90	94,73	94,64
23	37,39	36,56	57	72,61	72,51	91	95,28	95,28
24	38,70	38,56	58	73,41	73,15	92	95,83	95,76
25	40,00	40,09	59	74,21	74,21	93	96,37	96,30
26	41,26	41,11	60	75,00	74,98	94	96,90	96,93
27	42,51	42,13	61	75,77	75,75	95	97,43	97,41
28	43,75	43,65	62	76,54	76,34	96	97,95	97,93
29	44,96	44,88	63	77,30	77,16	97	98,47	98,49
30	46,15	46,11	64	78,04	78,17	98	98,98	98,96
31	47,32	47,20	65	78,78	78,91	99	99,49	99,51
32	48,48	48,35	66	79,51	79,46	100	100	100
33	49,62	49,61	67	80,23	80,28			

AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
AQ _{m,OA}	Mittlere Annahmquote offener Angebote [%]
Mod	Modellierter Wert
Sim	Simulierter Wert
ZAn _m	Mittlere Kundenannahmezeit [BKT]
ZAb _m	Mittlere Kundenablehnungszeit [BKT]
ZR _v	Kundenrückmeldezeitverhältnis

Tabelle A 3: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation zur Annahmquote offener Angebote

Parameter								
ZAn _m : 4 BKT			ZAb _m : 4 BKT			ZR _v : 1		
AQ _m [%]	AQ _{OA,m} [%]		AQ _m [%]	AQ _{OA,m} [%]		AQ _m [%]	AQ _{OA,m} [%]	
	Mod	Sim		Mod	Sim		Mod	Sim
0	0,00	0,00	34	34,00	33,68	68	68,00	67,81
1	1,00	1,01	35	35,00	34,92	69	69,00	68,99
2	2,00	1,96	36	36,00	35,71	70	70,00	69,94
3	3,00	2,92	37	37,00	37,26	71	71,00	71,01
4	4,00	3,96	38	38,00	38,01	72	72,00	72,00
5	5,00	4,97	39	39,00	38,86	73	73,00	72,90
6	6,00	5,92	40	40,00	40,24	74	74,00	74,18
7	7,00	6,98	41	41,00	41,35	75	75,00	75,20
8	8,00	8,00	42	42,00	41,96	76	76,00	75,78
9	9,00	9,12	43	43,00	43,05	77	77,00	77,03
10	10,00	10,06	44	44,00	44,16	78	78,00	77,90
11	11,00	10,94	45	45,00	45,09	79	79,00	79,07
12	12,00	11,86	46	46,00	46,04	80	80,00	79,91
13	13,00	13,01	47	47,00	46,81	81	81,00	81,24
14	14,00	13,98	48	48,00	48,14	82	82,00	81,90
15	15,00	15,01	49	49,00	48,97	83	83,00	82,97
16	16,00	16,00	50	50,00	49,80	84	84,00	84,08
17	17,00	16,84	51	51,00	51,01	85	85,00	84,90
18	18,00	17,98	52	52,00	52,23	86	86,00	86,17
19	19,00	18,91	53	53,00	53,17	87	87,00	87,20
20	20,00	19,98	54	54,00	54,08	88	88,00	87,75
21	21,00	20,96	55	55,00	55,11	89	89,00	89,01
22	22,00	21,78	56	56,00	56,02	90	90,00	89,98
23	23,00	22,9	57	57,00	56,98	91	91,00	90,94
24	24,00	23,89	58	58,00	58,11	92	92,00	91,97
25	25,00	24,91	59	59,00	58,79	93	93,00	93,15
26	26,00	25,93	60	60,00	59,94	94	94,00	94,10
27	27,00	27,00	61	61,00	61,14	95	95,00	95,06
28	28,00	28,06	62	62,00	61,95	96	96,00	96,01
29	29,00	28,98	63	63,00	62,93	97	97,00	97,09
30	30,00	30,16	64	64,00	63,90	98	98,00	98,05
31	31,00	30,85	65	65,00	65,14	99	99,00	99,07
32	32,00	31,97	66	66,00	66,02	100	100	100
33	33,00	33,04	67	67,00	67,25			

AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
AQ _{m,OA}	Mittlere Annahmquote offener Angebote [%]
Mod	Modellierter Wert
Sim	Simulierter Wert
ZAn _m	Mittlere Kundenannahmezeit [BKT]
ZAb _m	Mittlere Kundenablehnungszeit [BKT]
ZR _v	Kundenrückmeldezeitverhältnis

Tabelle A 4: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation zur Annahmquote offener Angebote

Parameter								
ZAn _m : 4 BKT			ZAb _m : 8 BKT			ZR _v : 0,5		
AQ _m [%]	AQ _{OA,m} [%]		AQ _m [%]	AQ _{OA,m} [%]		AQ _m [%]	AQ _{OA,m} [%]	
	Mod	Sim		Mod	Sim		Mod	Sim
0	0,00	0,00	34	20,48	20,50	68	51,51	51,68
1	0,50	0,48	35	21,21	21,22	69	52,67	53,07
2	1,01	0,98	36	21,95	21,85	70	53,84	53,79
3	1,52	1,51	37	22,69	22,70	71	55,03	54,92
4	2,04	2,01	38	23,45	23,51	72	56,25	56,49
5	2,56	2,55	39	24,22	24,21	73	57,48	57,67
6	3,09	3,18	40	25,00	25,02	74	58,73	58,66
7	3,62	3,63	41	25,78	25,86	75	60,00	59,66
8	4,16	4,19	42	26,58	26,54	76	61,29	61,13
9	4,71	4,67	43	27,38	27,41	77	62,60	62,45
10	5,26	5,24	44	28,20	28,29	78	63,93	64,03
11	5,82	5,77	45	29,03	29,28	79	65,28	65,32
12	6,38	6,34	46	29,87	29,82	80	66,66	66,40
13	6,95	6,99	47	30,71	30,90	81	68,06	68,11
14	7,52	7,50	48	31,57	31,79	82	69,49	69,56
15	8,10	8,06	49	32,45	32,53	83	70,94	71,25
16	8,69	8,77	50	33,33	33,33	84	72,41	72,34
17	9,28	9,32	51	34,22	34,18	85	73,91	73,9
18	9,89	9,78	52	35,13	35,17	86	75,43	75,38
19	10,49	10,54	53	36,05	36,11	87	76,99	77,03
20	11,11	11,15	54	36,98	37,15	88	78,57	78,24
21	11,73	11,76	55	37,93	38,04	89	80,18	80,29
22	12,35	12,30	56	38,88	38,76	90	81,81	81,64
23	12,99	13,1	57	39,86	39,80	91	83,48	83,55
24	13,63	13,58	58	40,84	40,61	92	85,18	85,40
25	14,28	14,18	59	41,84	42,03	93	86,91	86,91
26	14,94	14,92	60	42,85	43,13	94	88,67	88,98
27	15,60	15,74	61	43,88	43,81	95	90,47	90,49
28	16,27	16,20	62	44,92	44,91	96	92,30	92,26
29	16,95	16,95	63	45,98	46,04	97	94,17	94,32
30	17,64	17,66	64	47,05	47,20	98	96,07	95,96
31	18,34	18,34	65	48,14	48,62	99	98,01	97,9
32	19,04	19,03	66	49,25	49,18	100	100	100
33	19,76	19,77	67	50,37	50,64			

AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
AQ _{m,OA}	Mittlere Annahmquote offener Angebote [%]
Mod	Modellierter Wert
Sim	Simulierter Wert
ZAn _m	Mittlere Kundenannahmezeit [BKT]
ZAb _m	Mittlere Kundenablehnungszeit [BKT]
ZR _v	Kundenrückmeldezeitverhältnis

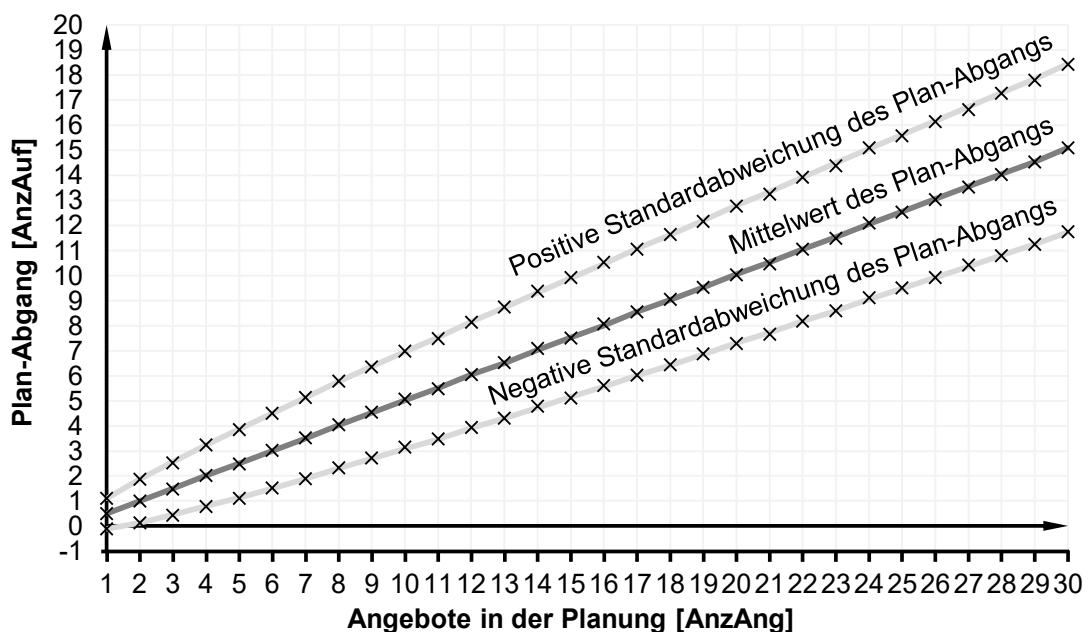
Tabelle A 5: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation zur Annahmquote offener Angebote

Parameter								
ZAn _m : 4 BKT			ZAb _m : 16 BKT			ZR _v : 0,25		
AQ _m [%]	AQ _{OA,m} [%]		AQ _m [%]	AQ _{OA,m} [%]		AQ _m [%]	AQ _{OA,m} [%]	
	Mod	Sim		Mod	Sim		Mod	Sim
0	0,00	0,00	34	11,4	11,37	68	34,69	34,80
1	0,25	0,25	35	11,86	11,90	69	35,75	35,57
2	0,5	0,49	36	12,32	12,27	70	36,84	36,68
3	0,76	0,78	37	12,80	12,77	71	37,96	37,93
4	1,03	1,03	38	13,28	13,22	72	39,13	39,20
5	1,29	1,30	39	13,78	13,67	73	40,33	40,24
6	1,57	1,55	40	14,28	14,26	74	41,57	41,64
7	1,84	1,84	41	14,80	14,77	75	42,85	43,15
8	2,12	2,12	42	15,32	15,31	76	44,18	44,30
9	2,41	2,38	43	15,86	15,74	77	45,56	45,36
10	2,70	2,69	44	16,41	16,44	78	46,98	46,90
11	2,99	2,96	45	16,98	17,04	79	48,46	48,56
12	3,29	3,29	46	17,55	17,74	80	50,00	50,28
13	3,60	3,59	47	18,14	18,18	81	51,59	51,30
14	3,91	3,90	48	18,75	18,73	82	53,24	53,32
15	4,22	4,26	49	19,36	19,45	83	54,96	54,87
16	4,54	4,65	50	20,00	20,15	84	56,75	57,26
17	4,87	4,94	51	20,64	20,74	85	58,62	58,71
18	5,20	5,19	52	21,31	21,41	86	60,56	61,18
19	5,53	5,55	53	21,99	21,92	87	62,58	62,74
20	5,88	5,93	54	22,68	22,71	88	64,70	64,56
21	6,23	6,16	55	23,40	23,59	89	66,91	67,04
22	6,58	6,58	56	24,13	24,27	90	69,23	69,25
23	6,94	6,98	57	24,89	24,93	91	71,65	71,77
24	7,31	7,30	58	25,66	25,90	92	74,19	74,25
25	7,69	7,72	59	26,45	26,36	93	76,85	76,62
26	8,07	8,09	60	27,27	27,46	94	79,66	79,84
27	8,46	8,50	61	28,11	28,32	95	82,60	82,70
28	8,86	8,85	62	28,97	28,87	96	85,71	85,63
29	9,26	9,24	63	29,85	30,05	97	88,99	88,85
30	9,67	9,69	64	30,76	30,74	98	92,45	92,69
31	10,09	10,17	65	31,70	31,73	99	96,11	96,01
32	10,52	10,47	66	32,67	32,50	100	100	100
33	10,96	11,01	67	33,66	33,90			

AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
AQ _{m,OA}	Mittlere Annahmquote offener Angebote [%]
Mod	Modellierter Wert
Sim	Simulierter Wert
ZAn _m	Mittlere Kundenannahmezeit [BKT]
ZAb _m	Mittlere Kundenablehnungszeit [BKT]
ZR _v	Kundenrückmeldezeitverhältnis

A 2 Monte-Carlo-Simulation des Plan-Abgangs

Die vorgestellte Modellierung des Plan-Abgangs (siehe Abschnitt 4.2) wurde ebenfalls mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen in der Software MATLAB evaluiert. Das dafür entwickelte Simulationsmodell erzeugt einen konstanten Angebotsbestand, den der Anwender frei wählen kann. Der Auftragsinhalt der Angebote folgt einer Normalverteilung mit einem Variationskoeffizienten von 0,5. Jedem Angebot weist das Simulationsmodell entsprechend der Binomialverteilung mit der jeweiligen mittleren Annahmquote zufällig den Status angenommen oder abgelehnt zu. Anhand der angenommenen Angebote und der Auftragsinhalte kann anschließend der Plan-Abgang für jeden Bestand bestimmt werden. Für diesen Plan-Abgang wurde über der Stichprobenanzahl der Mittelwert und die Varianz bestimmt. Die Simulationen basieren jeweils auf einer Stichprobe von 5.000 Angebotsbeständen. Die Simulationsergebnisse und das Modell des Plan-Abgangs zeigt Abbildung A 2.



Mittlere Annahmquote = 50%

× : Simulierte Werte

Variationskoeffizient der Auftragszeit = 0,5

- : Modellierte Werte

Abbildung A 2: Evaluationsergebnisse der Modellierung des Plan-Abgangs für eine Annahmquote von 50%

Die simulierten Werte weichen nur in geringem Maße von dem Modell ab. Die mittlere Abweichung von 0,91% und die maximale Abweichung von 4,32% sind als gering zu bewerten. Das Modell liefert demnach valide Ergebnisse für die Unsicherheit des Plan-Abgangs aus Angeboten. Die detaillierten Simulationsergebnisse können dem Anhang entnommen werden. Die Ergebniswerte der Evaluation können Tabelle A 6 und Tabelle A 7 entnommen werden.

Tabelle A 6: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für den mittleren Plan-Abgang
 Mittlerer Plan-Abgang [AnzAuf] für verschiedene Annahmeprozentagen [%]

Angebote in der Planung	10%		20%		30%		40%		50%		60%		70%		80%		90%			
	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim		
1	0,10	0,10	0,20	0,19	0,30	0,30	0,40	0,42	0,51	0,51	0,60	0,59	0,71	0,72	0,80	0,82	0,89	0,90		
2	0,20	0,19	0,40	0,42	0,60	0,60	0,80	0,79	1,00	1,01	1,20	1,21	1,39	1,37	1,60	1,60	1,82	1,83		
3	0,30	0,31	0,60	0,60	0,90	0,89	1,20	1,23	1,51	1,49	1,81	1,82	2,12	2,12	2,42	2,42	2,71	2,71		
4	0,40	0,40	0,81	0,81	1,21	1,21	1,61	1,62	2,02	2,03	2,39	2,38	2,81	2,80	3,23	3,21	3,60	3,61		
5	0,50	0,52	1,01	1,01	1,51	1,50	2,01	2,02	2,51	2,49	3,01	3,00	3,53	3,51	4,02	4,01	4,53	4,52		
6	0,60	0,59	1,21	1,18	1,81	1,84	2,41	2,40	3,01	3,03	3,61	3,60	4,21	4,21	4,80	4,81	5,44	5,41		
7	0,70	0,70	1,40	1,39	2,11	2,10	2,80	2,83	3,51	3,53	4,21	4,18	4,91	4,93	5,64	5,63	6,32	6,34		
8	0,80	0,79	1,60	1,63	2,41	2,44	3,22	3,24	4,03	4,07	4,81	4,84	5,63	5,66	6,44	6,46	7,25	7,23		
9	0,90	0,88	1,81	1,83	2,71	2,69	3,62	3,63	4,53	4,55	5,42	5,45	6,31	6,33	7,21	7,22	8,11	8,11		
10	1,00	1,00	2,01	2,04	3,01	3,03	4,01	4,04	5,02	5,08	6,04	6,00	7,02	7,03	8,04	8,06	9,04	9,05		
11	1,11	1,12	2,21	2,21	3,32	3,29	4,41	4,40	5,50	5,49	6,61	6,59	7,74	7,77	8,83	8,84	9,96	9,96		
12	1,20	1,19	2,41	2,39	3,61	3,60	4,82	4,86	6,04	6,05	7,26	7,26	8,45	8,41	9,64	9,62	10,86	10,88		
13	1,31	1,32	2,61	2,63	3,91	3,92	5,24	5,21	6,51	6,53	7,85	7,85	9,14	9,09	10,44	10,42	11,74	11,75		
14	1,41	1,42	2,81	2,81	4,22	4,20	5,63	5,58	7,02	7,09	8,45	8,46	9,85	9,86	11,23	11,23	12,68	12,70		
15	1,50	1,48	3,02	2,98	4,52	4,54	6,00	6,01	7,53	7,53	9,06	9,07	10,56	10,55	12,04	12,05	13,56	13,56		
16	1,60	1,62	3,22	3,20	4,81	4,80	6,42	6,47	8,01	8,07	9,62	9,67	11,26	11,26	12,85	12,84	14,43	14,44		
17	1,70	1,70	3,43	3,38	5,12	5,09	6,83	6,80	8,54	8,56	10,23	10,18	11,93	11,91	13,65	13,63	15,35	15,39		
18	1,81	1,83	3,61	3,59	5,41	5,43	7,21	7,19	9,02	9,05	10,86	10,85	12,64	12,66	14,44	14,48	16,28	16,29		
19	1,91	1,91	3,82	3,85	5,74	5,72	7,63	7,61	9,53	9,53	11,44	11,44	13,33	13,37	15,28	15,26	17,19	17,18		
20	2,01	1,98	4,02	4,05	6,02	5,98	8,04	8,08	10,04	10,04	12,04	12,04	14,04	14,06	16,06	16,06	18,05	18,07		
21	2,11	2,08	4,22	4,19	6,33	6,31	8,43	8,47	10,53	10,47	12,64	12,64	14,75	14,73	16,83	16,84	18,99	19,00		
22	2,21	2,20	4,41	4,40	6,63	6,63	8,83	8,84	11,06	11,06	13,25	13,25	15,45	15,45	17,66	17,64	19,89	19,90		
23	2,31	2,31	4,63	4,60	6,94	6,98	9,24	9,25	11,54	11,50	13,87	13,88	16,20	16,25	18,47	18,49	20,78	20,78		
24	2,41	2,41	4,82	4,84	7,23	7,19	9,64	9,64	12,05	12,12	14,44	14,47	16,86	16,79	19,29	19,28	21,68	21,68		
25	2,51	2,49	5,02	4,97	7,51	7,46	10,04	10,07	12,55	12,55	15,03	15,03	17,61	17,60	20,13	20,07	22,54	22,51		
26	2,61	2,58	5,22	5,35	7,84	7,85	10,46	10,42	13,05	13,04	15,65	15,70	18,23	18,19	20,89	20,87	23,52	23,52		
27	2,71	2,68	5,42	5,49	8,13	8,14	10,83	10,84	13,55	13,54	16,29	16,31	18,97	18,97	21,63	21,63	24,40	24,42		
28	2,81	2,84	5,62	5,63	8,44	8,51	11,24	11,22	14,06	14,05	16,88	16,89	19,66	19,69	22,53	22,56	25,34	25,37		
29	2,91	2,96	5,83	5,76	8,75	8,80	11,66	11,58	14,54	14,53	17,50	17,49	20,39	20,42	23,28	23,28	26,15	26,16		
30	3,02	3,03	6,02	6,03	9,04	9,00	12,07	12,02	15,09	15,10	18,05	18,05	21,07	21,13	24,11	24,11	27,09	27,11		
Mod	Modellierter Wert		Modellierter Wert		Modellierter Wert		Modellierter Wert		Modellierter Wert		Modellierter Wert		Modellierter Wert		Modellierter Wert		Modellierter Wert		Modellierter Wert	
Sim	Sim		Sim		Sim		Sim		Sim		Sim		Sim		Sim		Sim		Sim	

Tabelle A 7: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Standardabweichung des Plan-Abgangs
Standardabweichung des Plan-Abgangs [AnzAuf] für verschiedene Annahmekquoten [%]

Angebote in der Planung	10%		20%		30%		40%		50%		60%		70%		80%		90%	
	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim	Mod	Sim
1	0,34	0,34	0,46	0,45	0,53	0,53	0,58	0,59	0,61	0,61	0,62	0,61	0,62	0,62	0,60	0,59	0,56	0,54
2	0,48	0,46	0,65	0,65	0,76	0,75	0,82	0,83	0,87	0,86	0,88	0,88	0,88	0,87	0,85	0,84	0,79	0,77
3	0,59	0,59	0,79	0,79	0,92	0,93	1,01	1,01	1,06	1,05	1,08	1,07	1,08	1,08	1,04	1,03	0,97	0,95
4	0,68	0,69	0,92	0,92	1,07	1,09	1,17	1,17	1,23	1,23	1,25	1,22	1,24	1,22	1,20	1,19	1,12	1,10
5	0,76	0,78	1,02	1,02	1,19	1,18	1,30	1,32	1,37	1,37	1,40	1,39	1,39	1,37	1,34	1,32	1,26	1,23
6	0,83	0,82	1,12	1,11	1,31	1,31	1,43	1,40	1,50	1,49	1,53	1,55	1,52	1,52	1,47	1,46	1,38	1,36
7	0,90	0,89	1,21	1,21	1,41	1,41	1,40	1,53	1,62	1,62	1,65	1,61	1,64	1,62	1,59	1,59	1,49	1,46
8	0,96	0,95	1,30	1,30	1,51	1,49	1,65	1,63	1,73	1,74	1,77	1,75	1,76	1,73	1,70	1,69	1,59	1,55
9	1,02	1,00	1,38	1,38	1,60	1,60	1,75	1,75	1,84	1,81	1,88	1,84	1,86	1,87	1,80	1,78	1,69	1,64
10	1,07	1,06	1,45	1,47	1,69	1,69	1,84	1,80	1,94	1,91	1,98	1,96	1,96	1,95	1,90	1,88	1,78	1,72
11	1,12	1,15	1,52	1,50	1,77	1,80	1,93	1,93	2,03	2,00	2,07	2,04	2,06	2,04	1,99	1,98	1,87	1,86
12	1,17	1,17	1,59	1,59	1,85	1,84	2,02	2,08	2,12	2,10	2,17	2,21	2,15	2,16	2,08	2,07	1,95	1,90
13	1,22	1,21	1,65	1,65	1,93	1,88	2,10	2,08	2,21	2,22	2,25	2,23	2,24	2,21	2,17	2,14	2,03	2,02
14	1,27	1,27	1,72	1,71	2,00	2,00	2,18	2,19	2,29	2,29	2,34	2,32	2,33	2,32	2,25	2,24	2,11	2,07
15	1,31	1,27	1,78	1,80	2,07	2,06	2,26	2,28	2,37	2,41	2,42	2,42	2,41	2,39	2,33	2,29	2,18	2,13
16	1,36	1,35	1,83	1,85	2,14	2,15	2,33	2,31	2,45	2,46	2,50	2,48	2,49	2,47	2,41	2,40	2,25	2,20
17	1,40	1,41	1,89	1,88	2,20	2,22	2,41	2,41	2,53	2,52	2,58	2,56	2,56	2,55	2,48	2,44	2,32	2,31
18	1,44	1,45	1,94	1,94	2,27	2,26	2,48	2,47	2,60	2,59	2,65	2,62	2,64	2,62	2,55	2,49	2,39	2,34
19	1,48	1,49	2,00	2,02	2,33	2,33	2,54	2,54	2,67	2,64	2,73	2,74	2,71	2,73	2,62	2,59	2,46	2,43
20	1,52	1,50	2,05	2,02	2,39	2,38	2,61	2,59	2,74	2,74	2,80	2,75	2,78	2,76	2,69	2,63	2,52	2,49
21	1,55	1,53	2,10	2,08	2,45	2,44	2,67	2,66	2,81	2,79	2,87	2,79	2,85	2,79	2,76	2,75	2,59	2,50
22	1,59	1,57	2,15	2,11	2,51	2,48	2,74	2,74	2,88	2,88	2,94	2,92	2,92	2,88	2,83	2,78	2,65	2,61
23	1,63	1,63	2,20	2,21	2,56	2,59	2,80	2,78	2,94	2,90	3,00	2,96	2,98	2,94	2,89	2,84	2,71	2,62
24	1,66	1,66	2,25	2,24	2,62	2,64	2,86	2,87	3,00	2,99	3,07	3,06	3,05	3,03	2,95	2,95	2,77	2,71
25	1,70	1,69	2,29	2,28	2,67	2,62	2,92	2,88	3,07	3,04	3,13	3,09	3,11	3,08	3,01	2,95	2,82	2,74
26	1,73	1,71	2,34	2,35	2,72	2,71	2,98	2,99	3,13	3,11	3,19	3,16	3,17	3,10	3,07	3,06	2,88	2,84
27	1,76	1,73	2,38	2,41	2,78	2,75	3,03	3,01	3,19	3,10	3,25	3,26	3,24	3,25	3,13	3,10	2,94	2,87
28	1,79	1,82	2,43	2,42	2,83	2,85	3,09	3,08	3,25	3,25	3,31	3,29	3,29	3,21	3,19	3,14	2,99	2,92
29	1,83	1,86	2,47	2,43	2,88	2,91	3,14	3,16	3,30	3,28	3,37	3,29	3,35	3,29	3,25	3,20	3,04	3,00
30	1,86	1,88	2,51	2,52	2,93	2,89	3,20	3,19	3,36	3,34	3,43	3,39	3,41	3,42	3,30	3,29	3,10	3,02
Mod	Modellierter Wert																	
Sim	Simulierter Wert																	

A 3 Untersuchte Einflussgrößen der Simulationsreihen

Tabelle A 8: Ausprägung der Versuchsparameter für das Referenzszenario

Einflussgröße		Versuchsreihe												
		1			2			3						
Terminplanung		mAAT			SLZ			mAAT			mAAT		SLZ	
Belastung		95%	100%	105%	95%	100%	105%	95%	100%	105%				
Annahmquote		10%	30%	50%	70%	90%	50%							
Rückmeldezeit		2 BKT		5 BKT		10 BKT		5 BKT						
Annahmeverhalten		ZAn _m = ZAb _m			ZAn _m ≠ ZAb _m			ZAn _m = ZAb _m						
Fertigungs- steuerung	Auftrags- freigabe	Plan-Startermin					ConWIP							
	Reihenfolge- bildung	FIFO					Reihenfolgebildung nach Plan- Endtermin							
	Kapazitäts- steuerung	starre Kapazitäten					starre Kapazitäten							
Unsicherheiten	ZAU _v	50%					100%							
	Störzeitanteil	0%					20%							

Rahmenbedingungen

Simulationsumfang pro Experiment	10.000 Anfragen
Simulationsvorlauf	100 Anfragen
Produktions- kapazität	168 Stunden pro Betriebskalendertag
Zwischenankunfts- zeit der Anfragen	$1 \text{ Stunde} \cdot \text{mittlere Annahmquote} \cdot \frac{1}{1 - \text{Störzeitanteil}} \cdot \frac{1}{\text{Belastung}}$
Lieferzeitpuffer	1 Betriebskalendertag

BKT	Betriebskalendertag
ConWIP	Constant Work in Process
FIFO	First In – First Out
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
SLZ	Terminplanung mit Standardlieferzeiten
ZAb _m	Mittlere Kundenablehnungszeit [BKT]
ZAn _m	Mittlere Kundenannahmezeit [BKT]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]

11 Anhang

A 4 Arbeitspläne der Simulationsuntersuchungen in der Evaluation

Tabelle A 9: Arbeitspläne aller Varianten für einen Variationskoeffizienten der Auftragszeit von 0,5

$ZAU_{m,ges} = 7,0 \text{ Std.}$ $ZAU_{s,ges} = 3,5 \text{ Std.}$ $ZAU_{v,ges} = 0,5$									
Variante	Anteil	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6	AS7	ZAU _m
1	10%	0,5 Std.	4,0 Std.	-	-	3,0 Std.	-	1,0 Std.	8,5 Std.
2	10%	1,0 Std.	1,5 Std.	-	-	-	3,0 Std.	1,0 Std.	6,5 Std.
3	10%	1,5 Std.	-	3,0 Std.	2,0 Std.	-	2,0 Std.	2,0 Std.	10,5 Std.
4	10%	1,5 Std.	-	-	1,0 Std.	1,5 Std.	-	0,5 Std.	4,5 Std.
5	10%	1,5 Std.	-	2,5 Std.	2,0 Std.	2,0 Std.	-	2,0 Std.	10,0 Std.
6	10%	0,5 Std.	2,5 Std.	-	-	-	2,5 Std.	0,5 Std.	6,0 Std.
7	10%	0,5 Std.	-	-	1,5 Std.	0,5 Std.	-	1,0 Std.	3,5 Std.
8	10%	1,0 Std.	2,0 Std.	4,5 Std.	2,0 Std.	2,0 Std.	1,0 Std.	1,0 Std.	13,5 Std.
9	10%	1,0 Std.	-	-	1,0 Std.	-	1,5 Std.	0,5 Std.	4,0 Std.
10	10%	1,0 Std.	-	-	0,5 Std.	1,0 Std.	-	0,5 Std.	3,0 Std.

$ZAU_{m,ges}$ Mittelwert der gesamten Auftragszeit [Std.]
 $ZAU_{s,ges}$ Standardabweichung der gesamten Auftragszeit [Std.]
 $ZAU_{v,ges}$ Variationskoeffizient der gesamten Auftragszeit []
 AS Arbeitssystem
 Std. Stunden

11 Anhang

Tabelle A 10: Arbeitspläne aller Varianten für einen Variationskoeffizienten der Auftragszeit von 1

<div style="display: flex; justify-content: space-around; font-weight: bold;"> ZAU_{m,ges} = 7,0 Std. ZAU_{s,ges} = 7,0 Std. ZAU_{v,ges} = 1 </div>									
Variante	Anteil	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6	AS7	ZAU _m
1	10%	0,5 Std.	2,0 Std.	-	-	0,5 Std.	-	0,5 Std.	3,5 Std.
2	10%	0,5 Std.	1,0 Std.	-	-	-	1,0 Std.	0,5 Std.	3,0 Std.
3	10%	1,5 Std.	-	4,0 Std.	4,0 Std.	-	4,0 Std.	2,0 Std.	15,5 Std.
4	10%	1,5 Std.	-	-	0,5 Std.	0,5 Std.	-	0,5 Std.	3,0 Std.
5	10%	1,5 Std.	-	2,0 Std.	1,5 Std.	4,0 Std.	-	2,0 Std.	11,0 Std.
6	10%	0,5 Std.	2,0 Std.	-	-	-	0,5 Std.	0,5 Std.	3,5 Std.
7	10%	0,5 Std.	-	-	0,5 Std.	0,5 Std.	-	1,0 Std.	2,5 Std.
8	10%	1,5 Std.	5,0 Std.	4,0 Std.	2,5 Std.	4,0 Std.	3,5 Std.	2,0 Std.	22,5 Std.
9	10%	1,0 Std.	-	-	0,5 Std.	-	1,0 Std.	0,5 Std.	3,0 Std.
10	10%	1,0 Std.	-	-	0,5 Std.	0,5 Std.	-	0,5 Std.	2,5 Std.

ZAU_{m,ges} Mittelwert der gesamten Auftragszeit [Std.]
 ZAU_{s,ges} Standardabweichung der gesamten Auftragszeit [Std.]
 ZAU_{v,ges} Variationskoeffizient der gesamten Auftragszeit []
 AS Arbeitssystem
 Std. Stunden

11 Anhang

A 5 Evaluationsergebnisse unter gültigen Verfahrensannahmen

Tabelle A 11: Übersicht über die Parameter der Versuchsreihen 1.1 - 1.22

Versuchsreihe	Verfahren	BEL _m [%]	AQ _m [%]	ZR _m [BKT]	Annahmeverhalten	Fertigungssteuerung	Fertigungsunsicherheit
1.1	mAAT SLZ	95	50	5	ZAn _m = ZAb _m	RefS	gering
1.2	mAAT SLZ	100	50	5	ZAn _m = ZAb _m	RefS	gering
1.3	mAAT SLZ	105	50	5	ZAn _m = ZAb _m	RefS	gering
1.4	mAAT SLZ	100	10	5	ZAn _m = ZAb _m	RefS	gering
1.5	mAAT SLZ	100	30	5	ZAn _m = ZAb _m	RefS	gering
1.6	mAAT SLZ	100	70	5	ZAn _m = ZAb _m	RefS	gering
1.7	mAAT SLZ	100	90	5	ZAn _m = ZAb _m	RefS	gering
1.8	mAAT SLZ	100	50	2	ZAn _m = ZAb _m	RefS	gering
1.9	mAAT SLZ	100	50	10	ZAn _m = ZAb _m	RefS	gering
1.10	mAAT mit AQ _m bzw. AQ _{m,OA}	100	50	5	ZAn _m ≠ ZAb _m 3 BKT 7BKT	RefS	gering
1.11	mAAT mit AQ _m bzw. AQ _{m,OA}	100	50	5	ZAn _m ≠ ZAb _m 4 BKT 6BKT	RefS	gering
1.12	mAAT mit AQ _m bzw. AQ _{m,OA}	100	50	5	ZAn _m ≠ ZAb _m 6 BKT 4BKT	RefS	gering
1.13	mAAT mit AQ _m bzw. AQ _{m,OA}	100	50	5	ZAn _m ≠ ZAb _m 7 BKT 3BKT	RefS	gering
1.14	mAAT SLZ	95	50	5	ZAn _m = ZAb _m	ModK ohne Kapaflex	gering
1.15	mAAT SLZ	100	50	5	ZAn _m = ZAb _m	ModK ohne Kapaflex	gering
1.16	mAAT SLZ	105	50	5	ZAn _m = ZAb _m	ModK ohne Kapaflex	gering
1.17	mAAT SLZ	95	50	5	ZAn _m = ZAb _m	ModK mit Kapaflex	gering
1.18	mAAT SLZ	100	50	5	ZAn _m = ZAb _m	ModK mit Kapaflex	gering
1.19	mAAT SLZ	105	50	5	ZAn _m = ZAb _m	ModK mit Kapaflex	gering
1.20	mAAT SLZ	95	50	5	ZAn _m = ZAb _m	ModK ohne Kapaflex	hoch
1.21	mAAT SLZ	100	50	5	ZAn _m = ZAb _m	ModK ohne Kapaflex	hoch
1.22	mAAT SLZ	105	50	5	ZAn _m = ZAb _m	ModK ohne Kapaflex	hoch

AQ _m	Mittlere Annahmequote [%]
AQ _{m,OA}	Mittlere Annahmequote offener Angebote [%]
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]
BKT	Betriebskalendertag
Kapaflex	Kapazitätsflexibilität
ModK	Modellbasierte Konfiguration
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
RefS	Referenzszenario
SLZ	Planung mit Standardlieferzeiten
ZAb _m	Mittlere Kundenablehnungszeit [BKT]
ZAn _m	Mittlere Kundenannahmezeit [BKT]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]

Tabelle A 12: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.1

Parameter		Fertigungssteuerung: Referenzkonfiguration															Störungen: keine		BEL _m : 95%		ZR _m : 5 BKT		AQ _m : 50%		ZAU _v : 0,5	
Verfahren	Versuchsnummer	BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{Δ,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]										
		μ	σ			μ	σ		μ	σ																
mAAT	1.1.1	22,3	3,4	94,8	68,2	2,9	2,0	-42,2	-1,9	1,6	66,2	4,2	-0,02	7,1	0,00	96,3										
	1.1.2	22,8	3,4	96,7	73,7	3,1	1,7	-39,0	-1,7	1,5	62,7	4,5	-0,01	7,2	0,00	97,8										
	1.1.3	22,8	3,1	96,6	70,0	2,9	1,6	-38,1	-1,7	1,3	61,3	3,6	-0,01	6,3	0,00	98,6										
	1.1.4	23,0	3,4	91,8	76,9	3,4	2,0	-41,1	-1,9	1,8	63,2	9,4	0,02	12,9	0,04	97,9										
	1.1.5	22,7	2,9	96,1	68,6	2,9	1,7	-43,2	-1,9	1,4	66,6	4,3	0,00	7,3	0,00	97,7										
	1.1.6	22,7	3,3	96,3	81,9	3,4	1,8	-29,1	-1,3	1,5	53,0	4,8	-0,02	7,1	-0,01	96,4										
	1.1.7	22,6	3,4	96,7	75,6	3,2	1,8	-40,8	-1,8	1,5	64,0	5,5	-0,02	8,3	-0,01	98,0										
	1.1.8	22,9	3,5	93,5	83,4	3,6	1,9	-34,1	-1,6	1,5	56,6	7,8	0,01	10,7	0,03	98,4										
	1.1.9	22,8	3,3	94,7	69,9	3,0	1,8	-42,1	-1,9	1,5	65,0	4,9	0,00	7,9	0,01	97,6										
	1.1.10	22,4	3,2	95,0	62,1	2,7	1,7	-47,8	-2,1	1,4	70,6	3,9	-0,02	7,0	-0,01	98,7										
	1.1.11	22,3	3,4	93,3	59,8	2,6	1,9	-58,9	-2,7	1,5	80,8	6,2	-0,01	10,0	0,00	100,0										
	1.1.12	22,8	3,4	95,2	63,2	2,7	1,6	-56,9	-2,6	1,5	79,1	6,3	-0,01	10,0	0,00	100,0										
	1.1.13	22,8	3,1	94,9	57,5	2,4	1,5	-62,9	-2,8	1,3	85,2	6,1	0,00	10,0	0,00	100,0										
	1.1.14	23,0	3,4	94,6	90,1	3,9	2,6	-32,0	-1,4	1,7	56,4	7,5	-0,01	10,0	0,00	93,6										
	1.1.15	22,7	2,9	94,9	65,3	2,8	1,8	-55,0	-2,5	1,5	77,4	6,4	0,00	10,0	0,00	99,8										
	1.1.16	22,7	3,3	94,6	61,2	2,6	1,6	-58,3	-2,6	1,5	80,6	6,3	-0,01	10,0	0,00	99,5										
	1.1.17	22,6	3,4	95,0	79,6	3,3	2,3	-39,8	-1,9	2,1	63,8	7,0	-0,02	10,0	0,00	94,4										
	1.1.18	22,9	3,5	94,3	92,1	4,0	2,1	-29,3	-1,3	1,3	52,0	7,6	0,00	10,0	0,00	98,7										
	1.1.19	22,8	3,3	94,6	65,7	2,8	1,8	-55,0	-2,4	1,2	77,4	6,5	0,00	10,0	0,00	100,0										
	1.1.20	22,4	3,2	93,3	54,4	2,3	1,7	-63,9	-2,9	1,5	85,9	6,0	-0,01	10,0	0,00	100,0										
∅	∅	22,7	3,3	95,2	73,0	3,1	1,8	-39,7	-1,8	1,5	62,9	5,3	0,00	8,2	0,00	97,7										
∅	∅	22,7	3,3	94,5	68,9	2,9	2,0	-51,2	-2,3	1,6	73,9	6,6	-0,01	10,0	0,00	98,6										
A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT															ZL _{m,plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]								
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]	-terminierung															ZL _{Δ,ist}	Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])								
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	RSA _m															ZL _{Δ,Plan}	Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])								
BEL	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	SLZ															ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]								
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	TAA															μ	Mittelwert								
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)	ZAU _v															σ	Standardabweichung								
BKT	Betriebskalendertage	ZDL																								
LTE	Liefertermineinhaltung [%]	ZL _{m,ist}																								

Tabelle A 13: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.2

Parameter		Fertigungssteuerung: Referenzkonfiguration Störungen: keine BEL _m : 100% ZR _m : 5 BKT AQ _m : 50% ZAU _v : 0,5														
Verfahren	Versuchsnummer	BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{Δ,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]
		μ	σ			μ	σ		μ	σ						
mAAT	1.2.1	23,5	3,4	94,6	96,1	4,2	2,0	-25,7	-1,1	1,5	49,4	10,4	0,02	12,8	0,03	96,0
	1.2.2	24,0	3,2	94,8	95,3	4,1	1,9	-26,2	-1,1	1,7	50,4	11,2	0,05	13,9	0,05	94,9
	1.2.3	24,0	3,3	97,8	110,0	4,6	2,0	-12,7	-0,5	1,4	38,5	7,9	0,01	9,7	0,01	91,7
	1.2.4	24,2	3,3	92,7	82,4	3,7	2,1	-37,0	-1,7	1,8	59,5	14,0	0,07	17,9	0,07	97,3
	1.2.5	23,9	3,0	95,6	92,7	4,0	1,7	-29,0	-1,2	1,6	52,4	10,2	0,04	12,9	0,05	97,2
	1.2.6	23,9	3,2	96,8	105,9	4,5	1,9	-17,5	-0,7	1,6	43,5	9,5	0,02	11,5	0,02	90,6
	1.2.7	23,7	3,5	95,8	92,8	4,0	1,8	-30,8	-1,3	1,8	54,8	12,0	0,03	14,3	0,02	95,9
	1.2.8	24,1	3,6	93,5	91,5	4,0	2,1	-28,3	-1,3	1,6	51,5	12,5	0,06	16,0	0,07	95,4
	1.2.9	24,0	3,3	93,9	82,3	3,6	2,0	-37,3	-1,7	1,6	60,3	11,1	0,06	14,6	0,07	97,2
	1.2.10	23,7	3,2	95,9	96,4	4,1	1,9	-24,2	-1,1	1,6	47,8	8,5	0,01	11,0	0,02	96,6
SLZ	1.2.11	23,5	3,4	96,8	135,9	5,7	2,9	11,0	0,4	2,0	24,8	9,4	0,00	10,0	0,00	73,7
	1.2.12	24,0	3,2	96,6	164,8	6,9	2,7	38,4	1,6	2,0	12,4	10,6	0,02	10,0	0,00	49,8
	1.2.13	24,0	3,3	96,9	141,2	5,9	2,3	14,4	0,6	1,8	21,4	9,6	0,01	10,0	0,00	72,8
	1.2.14	24,2	3,3	96,2	192,3	8,0	4,0	64,1	2,6	2,9	7,3	11,6	0,01	10,0	0,00	42,0
	1.2.15	23,9	3,0	96,3	159,0	6,6	3,1	32,6	1,3	2,3	14,9	10,3	0,02	10,0	0,00	63,4
	1.2.16	23,9	3,2	97,0	156,4	6,5	2,1	30,6	1,3	1,6	11,3	10,3	0,01	10,0	0,00	56,5
	1.2.17	23,7	3,5	97,4	182,7	7,7	2,1	57,4	2,4	1,4	2,3	11,4	0,00	10,0	0,00	21,5
	1.2.18	24,1	3,6	95,6	203,3	8,5	3,5	75,5	3,2	2,8	6,4	12,2	0,03	10,0	0,00	25,4
	1.2.19	24,0	3,3	96,0	163,8	6,8	3,1	36,8	1,5	2,3	16,6	10,5	0,03	10,0	0,00	47,3
	1.2.20	23,7	3,2	96,6	119,4	5,0	2,5	-5,2	-0,2	1,4	31,8	8,7	0,00	10,0	0,00	88,2
mAAT	∅	23,9	3,3	95,1	94,5	4,1	2,0	-26,9	-1,2	1,7	50,8	10,7	0,04	13,4	0,04	95,3
SLZ	∅	23,9	3,3	96,5	161,9	6,8	3,0	35,5	1,5	2,3	14,9	10,5	0,01	10,0	0,00	54,1
A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung														
AQ _m	Mittlere Annahmehquote [%]	ZL _{m,plan} Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]														
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	ZL _{Δ,ist} Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])														
BEL	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	ZL _{Δ,Plan} Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])														
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	ZR _m Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]														
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)	μ Mittelwert														
BKT	Betriebskalendertage	σ Standardabweichung														
LTE	Liefertermineinhaltung [%]	ZL _{m,ist} Mittlere Ist-Lieferzeit [BKT]														

Tabelle A 14: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.3

Verfahren		Fertigungssteuerung: Referenzkonfiguration Störungen: keine BEL _m : 105% ZR _m : 5 BKT AQ _m : 50% ZAU _v : 0,5															
		Versuchsnummer		BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{Δ,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]
		μ	σ			μ	σ		μ	σ							
mAAT	1.3.1	24,7	3,6	93,8	99,9	4,3	1,9	-23,2	-1,0	1,6	47,3	14,7	0,08	17,9	0,08	0,08	96,1
	1.3.2	25,2	3,3	95,2	96,7	4,1	1,9	-27,5	-1,2	1,7	51,3	15,0	0,09	18,4	0,09	0,09	95,9
	1.3.3	25,2	3,3	95,8	109,6	4,6	1,8	-16,2	-0,7	1,6	42,1	13,3	0,07	16,1	0,08	0,08	91,8
	1.3.4	25,3	3,6	93,5	90,6	4,0	2,3	-30,5	-1,3	1,7	54,1	17,7	0,11	22,5	0,12	0,12	95,7
	1.3.5	25,1	3,4	95,2	93,9	4,0	1,9	-29,6	-1,3	1,7	53,3	14,2	0,09	17,7	0,09	0,09	96,6
	1.3.6	25,2	3,5	95,3	107,0	4,5	2,2	-17,0	-0,7	1,8	43,7	14,8	0,08	17,5	0,07	0,07	89,4
	1.3.7	24,8	3,7	95,4	99,1	4,1	1,8	-26,6	-1,2	1,7	51,7	15,7	0,07	18,3	0,05	0,05	95,5
	1.3.8	25,3	3,6	94,0	97,8	4,2	2,1	-25,3	-1,1	1,7	49,4	16,7	0,11	21,0	0,12	0,12	94,3
	1.3.9	25,2	3,4	94,1	92,3	4,0	2,1	-29,7	-1,3	1,7	53,6	15,6	0,12	19,6	0,11	0,11	95,4
	1.3.10	24,9	3,3	95,0	101,5	4,3	2,0	-22,5	-1,0	1,6	46,6	12,6	0,06	15,5	0,06	0,06	95,2
SLZ	1.3.11	24,7	3,6	95,0	248,2	10,0	3,9	118,3	4,7	3,2	2,7	13,7	0,04	10,0	0,00	0,00	16,2
	1.3.12	25,2	3,3	95,7	285,8	11,4	4,4	153,2	6,1	4,1	3,3	15,1	0,07	10,0	0,00	0,00	15,3
	1.3.13	25,2	3,3	95,9	265,1	10,4	3,9	132,6	5,1	3,7	3,5	14,1	0,06	10,0	0,00	0,00	20,4
	1.3.14	25,3	3,6	95,7	315,2	12,4	5,2	180,6	7,1	4,5	1,7	16,1	0,06	10,0	0,00	0,00	10,9
	1.3.15	25,1	3,4	95,4	279,7	11,1	4,8	147,4	5,8	4,4	3,4	14,8	0,07	10,0	0,00	0,00	15,5
	1.3.16	25,2	3,5	95,8	277,6	11,0	3,9	146,0	5,8	3,6	2,0	14,8	0,06	10,0	0,00	0,00	16,2
	1.3.17	24,8	3,7	95,5	303,1	12,3	3,6	172,6	7,0	3,3	1,1	16,0	0,05	10,0	0,00	0,00	4,3
	1.3.18	25,3	3,6	95,2	324,4	12,9	5,2	190,4	7,6	4,8	3,7	16,6	0,08	10,0	0,00	0,00	13,6
1.3.19	25,2	3,4	95,2	287,4	11,4	5,0	154,8	6,1	4,6	5,1	15,1	0,08	10,0	0,00	0,00	24,7	
1.3.20	24,9	3,3	94,9	238,2	9,5	3,3	107,9	4,2	2,7	2,2	13,2	0,04	10,0	0,00	0,00	16,7	
mAAT	∅	25,1	3,5	94,7	98,9	4,2	2,0	-24,8	-1,1	1,7	49,3	15,0	0,09	18,5	0,09	0,09	94,6
SLZ	∅	25,1	3,5	95,4	282,5	11,2	4,5	150,4	5,9	4,1	2,9	14,9	0,06	10,0	0,00	0,00	15,4
A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT													ZL _{m,plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]	
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]	-terminierung													ZL _{Δ,ist}	Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])	
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	RSA _m													ZL _{Δ,Plan}	Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])	
BEL _m	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	SLZ													ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]	
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	TAA													μ	Mittelwert	
BFW _m	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)	ZAU _v													σ	Standardabweichung	
BKT	Betriebskalendertage	ZDL															
LTE	Liefertermineinhaltung [%]	ZL _{m,ist}															

Tabelle A 15: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.4

Parameter		Fertigungssteuerung: Referenzkonfiguration												Störungen: keine		BEL _m : 100%		ZR _m : 5 BKT		AQ _m : 10%		ZAU _v : 0,5	
Verfahren	Versuchsnummer	BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{Δ,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]							
		μ	σ			μ	σ		μ	σ													
mAAT	1.4.1	24,3	4,7	94,8	101,8	4,3	2,2	-21,3	-0,9	1,6	46,4	12,0	0,06	14,6	0,06	92,8							
	1.4.2	23,9	4,3	93,9	89,1	3,9	1,9	-31,1	-1,4	1,8	54,9	11,3	0,05	14,2	0,05	95,9							
	1.4.3	23,8	4,7	95,1	101,3	4,3	1,9	-21,9	-0,9	1,7	46,3	10,4	0,01	12,5	0,01	94,5							
	1.4.4	24,0	4,5	92,0	84,8	3,8	2,2	-33,4	-1,5	1,8	57,2	14,5	0,07	18,3	0,07	95,0							
	1.4.5	23,7	4,8	94,2	74,4	3,3	1,7	-43,8	-1,9	1,5	66,5	7,5	0,02	11,0	0,03	98,8							
	1.4.6	24,2	4,6	95,1	107,7	4,6	2,2	-13,9	-0,6	1,9	41,1	11,2	0,04	13,3	0,03	87,2							
	1.4.7	24,0	4,6	95,7	96,8	4,1	1,8	-25,4	-1,1	1,6	50,7	9,0	0,03	11,3	0,02	93,1							
	1.4.8	24,0	4,8	93,1	96,2	4,2	2,2	-25,8	-1,1	1,8	50,6	13,3	0,05	16,6	0,07	91,9							
	1.4.9	24,2	4,9	92,9	82,7	3,7	2,1	-36,2	-1,6	1,9	59,5	12,2	0,06	15,9	0,07	96,1							
	1.4.10	23,6	4,6	95,3	87,8	3,8	1,8	-32,8	-1,4	1,5	56,5	8,3	0,02	10,9	0,02	96,4							
SLZ	1.4.11	24,3	4,7	96,3	202,3	8,3	3,9	73,2	3,0	3,2	10,1	12,0	0,04	10,0	0,00	39,3							
	1.4.12	23,9	4,3	95,8	165,7	6,9	2,8	39,4	1,6	2,1	12,9	10,6	0,01	10,0	0,00	49,0							
	1.4.13	23,8	4,7	96,0	158,2	6,6	2,2	32,9	1,3	1,8	12,5	10,3	0,00	10,0	0,00	47,2							
	1.4.14	24,0	4,5	95,5	202,0	8,3	3,9	74,1	3,0	2,8	3,5	12,0	0,01	10,0	0,00	36,1							
	1.4.15	23,7	4,8	95,2	115,1	4,8	2,2	-10,2	-0,4	1,6	37,5	8,5	0,00	10,0	0,00	90,1							
	1.4.16	24,2	4,6	96,1	175,1	7,2	2,4	48,0	1,9	2,0	8,4	10,9	0,02	10,0	0,00	40,4							
	1.4.17	24,0	4,6	96,3	140,1	5,8	2,1	14,5	0,5	1,4	17,6	9,5	0,00	10,0	0,00	78,6							
	1.4.18	24,0	4,8	94,9	232,7	9,5	3,2	103,6	4,2	2,5	1,6	13,2	0,02	10,0	0,00	8,3							
1.4.19	24,2	4,9	95,3	176,2	7,2	2,8	48,4	1,9	2,0	9,0	10,9	0,02	10,0	0,00	41,1								
1.4.20	23,6	4,6	95,6	127,2	5,4	2,5	3,4	0,1	1,6	26,8	9,1	0,00	10,0	0,00	83,9								
mAAT	∅	24,0	4,6	94,2	92,2	4,0	2,0	-28,6	-1,2	1,8	53,0	11,0	0,04	13,9	0,04	94,2							
SLZ	∅	24,0	4,6	95,7	169,4	7,0	3,2	42,7	1,7	2,6	14,0	10,7	0,01	10,0	0,00	51,4							
A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT												ZL _{m,plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]								
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]	-terminierung												ZL _{Δ,ist}	Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])								
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	RSA _m												ZL _{Δ,Plan}	Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])								
BEL _m	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	SLZ												ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]								
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	TAA												μ	Mittelwert								
BFW _m	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)	ZAU _v												σ	Standardabweichung								
BKT	Betriebskalendertage	ZDL																					
LTE	Liefertermineinhaltung [%]	ZL _{m,ist}																					

Tabelle A 16: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.5

Parameter		Fertigungssteuerung: Referenzkonfiguration Störungen: keine BEL _m : 100% ZR _m : 5 BKT AQ _m : 30% ZAU _v : 0,5														
Verfahren	Versuchsnummer	BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{Δ,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]
		μ	σ			μ	σ		μ	σ						
mAAT	1.5.1	23,4	3,9	95,6	93,8	4,0	2,0	-28,8	-1,2	1,5	52,6	8,5	0,01	11,0	0,02	96,4
	1.5.2	24,2	4,0	94,7	91,7	4,0	1,9	-29,6	-1,3	1,8	53,2	12,3	0,06	15,2	0,06	95,3
	1.5.3	24,1	3,8	96,3	104,1	4,5	1,9	-17,3	-0,7	1,7	42,0	10,0	0,04	12,2	0,04	93,0
	1.5.4	24,1	4,2	92,5	82,0	3,6	2,1	-38,1	-1,7	1,7	60,8	14,3	0,08	18,3	0,08	97,0
	1.5.5	23,4	4,2	94,9	86,6	3,8	1,9	-33,1	-1,4	1,7	56,1	9,5	0,03	12,3	0,04	97,1
	1.5.6	23,6	3,6	96,7	79,9	3,3	1,8	-42,0	-1,8	1,5	66,1	6,5	0,00	9,4	0,00	97,3
	1.5.7	24,2	4,3	96,9	96,7	4,1	1,9	-27,3	-1,1	1,6	51,5	10,5	0,01	12,9	0,02	96,0
	1.5.8	24,1	4,3	93,2	93,1	4,1	1,9	-27,9	-1,2	1,7	50,9	12,1	0,06	15,5	0,07	97,1
	1.5.9	23,9	4,1	92,9	77,7	3,5	2,0	-41,1	-1,8	1,8	63,9	11,8	0,07	15,6	0,07	97,5
	1.5.10	23,9	4,1	96,1	97,8	4,2	2,0	-24,9	-1,0	1,6	49,3	10,1	0,03	12,7	0,03	94,7
SLZ	1.5.11	23,4	3,9	96,3	122,7	5,2	2,7	-1,3	0,0	1,7	31,2	8,9	0,00	10,0	0,00	80,3
	1.5.12	24,2	4,0	96,6	190,1	7,9	2,9	63,1	2,6	2,3	6,5	11,6	0,02	10,0	0,00	35,6
	1.5.13	24,1	3,8	96,9	174,1	7,2	2,4	46,9	1,9	2,0	10,0	10,9	0,02	10,0	0,00	39,0
	1.5.14	24,1	4,2	96,3	204,5	8,4	4,2	76,0	3,1	3,2	5,4	12,1	0,02	10,0	0,00	34,1
	1.5.15	23,4	4,2	96,1	149,5	6,4	2,9	25,6	1,1	2,1	17,5	10,1	0,01	10,0	0,00	64,7
	1.5.16	23,6	3,6	96,6	94,7	4,0	1,8	-29,0	-1,2	1,5	52,9	7,7	0,00	10,0	0,00	97,0
	1.5.17	24,2	4,3	97,4	185,3	7,7	2,2	58,2	2,4	1,6	2,9	11,4	0,00	10,0	0,00	25,5
	1.5.18	24,1	4,3	95,7	186,6	7,7	3,1	58,8	2,4	2,4	5,1	11,4	0,02	10,0	0,00	38,3
1.5.19	23,9	4,1	96,0	161,2	6,7	3,0	34,7	1,4	2,1	14,7	10,4	0,02	10,0	0,00	53,7	
1.5.20	23,9	4,1	96,9	163,7	6,8	2,7	37,2	1,5	1,7	8,4	10,5	0,01	10,0	0,00	57,0	
mAAT	∅	23,9	4,1	95,0	90,4	3,9	2,0	-31,0	-1,3	1,7	54,6	10,6	0,04	13,5	0,04	96,2
SLZ	∅	23,9	4,1	96,5	163,3	6,8	3,1	37,0	1,5	2,5	15,5	10,5	0,01	10,0	0,00	52,5
A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT														
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]	-terminierung														
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	ZL _{m,plan}														
BEL _m	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	ZL _{Δ,ist}														
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]														
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)	Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])														
BKT	Betriebskalendertage	ZL _{Δ,Plan}														
LTE	Liefertermineinhaltung [%]	Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])														
		Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]														
		Mittelwert														
		Standardabweichung														

Tabelle A 17: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.6

Verfahren		Fertigungssteuerung: Referenzkonfiguration Störungen: keine BEL _m : 100% ZR _m : 5 BKT AQ _m : 70% ZAU _v : 0,5															
		Versuchsnummer		BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]
		μ	σ			μ	σ		μ	σ							
mAAT	1.6.1	23,8	2,7	95,6	93,8	4,0	1,9	-30,4	-1,3	1,5	54,0	10,1	0,03	12,8	0,03	97,0	
	1.6.2	23,8	2,5	94,9	89,8	3,9	1,8	-32,1	-1,4	1,7	55,5	10,6	0,04	13,4	0,04	96,8	
	1.6.3	24,1	2,6	96,6	99,8	4,2	1,8	-24,3	-1,0	1,7	49,2	9,7	0,02	11,9	0,02	93,0	
	1.6.4	23,9	2,5	92,5	81,7	3,6	2,2	-38,2	-1,7	1,6	60,8	13,6	0,06	17,5	0,07	96,8	
	1.6.5	24,1	2,8	94,8	86,4	3,7	1,7	-34,2	-1,5	1,6	56,9	11,0	0,05	14,3	0,06	98,5	
	1.6.6	24,2	2,5	96,7	105,7	4,5	2,0	-17,1	-0,7	1,7	43,3	10,1	0,04	12,2	0,03	91,4	
	1.6.7	24,1	2,7	95,8	90,3	3,9	1,8	-32,5	-1,4	1,8	56,2	11,6	0,03	14,3	0,03	96,3	
	1.6.8	24,3	2,5	93,8	89,3	3,9	1,9	-32,4	-1,4	1,6	55,3	12,3	0,07	16,0	0,08	97,5	
	1.6.9	23,9	2,6	93,0	81,6	3,6	1,9	-39,0	-1,6	1,7	61,7	12,2	0,07	15,8	0,07	97,5	
	1.6.10	23,9	2,8	95,8	93,9	4,0	1,8	-29,5	-1,2	1,5	53,1	10,3	0,04	13,0	0,04	96,7	
SLZ	1.6.11	23,8	2,7	97,0	148,2	6,2	3,2	22,1	0,9	2,2	20,7	9,9	0,00	10,0	0,00	68,8	
	1.6.12	23,8	2,5	96,6	148,2	6,2	2,5	22,3	0,9	1,7	16,1	9,9	0,00	10,0	0,00	64,4	
	1.6.13	24,1	2,6	96,9	159,6	6,6	2,1	32,6	1,4	1,7	10,1	10,4	0,01	10,0	0,00	55,2	
	1.6.14	23,9	2,5	96,3	179,4	7,5	4,0	52,5	2,2	2,9	10,4	11,2	0,01	10,0	0,00	51,6	
	1.6.15	24,1	2,8	96,4	170,0	7,1	3,0	42,6	1,8	2,3	11,1	10,8	0,02	10,0	0,00	51,2	
	1.6.16	24,2	2,5	97,1	174,0	7,3	2,5	47,0	2,0	2,1	9,6	11,0	0,02	10,0	0,00	42,3	
	1.6.17	24,1	2,7	97,3	179,3	7,5	2,1	52,6	2,2	1,4	2,4	11,2	0,00	10,0	0,00	25,1	
	1.6.18	24,3	2,5	95,5	204,9	8,6	3,8	75,5	3,3	3,1	5,8	12,3	0,04	10,0	0,00	27,5	
1.6.19	23,9	2,6	96,1	170,1	7,2	2,9	43,3	1,8	2,0	10,2	10,8	0,02	10,0	0,00	46,1		
1.6.20	23,9	2,8	96,9	156,4	6,5	2,7	30,2	1,2	1,8	12,0	10,2	0,01	10,0	0,00	61,9		
mAAT	∅	24,0	2,6	95,0	91,2	3,9	1,9	-31,0	-1,3	1,7	54,6	11,2	0,05	14,1	0,05	96,2	
SLZ	∅	24,0	2,6	96,6	169,0	7,1	3,0	42,1	1,8	2,3	10,8	10,8	0,01	10,0	0,00	49,4	
A _m	Mittlere Auslastung [%]																
AQ _m	mAAT Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung																
BA _m	Mittlere Annahmehquote [%]																
BEL	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]																
BEL _m	Mittlerer Rückstand (in Anzahl Aufträge)																
BKT	SLZ Planung mit Standardlieferzeiten																
LTE	Terminabweichung im Abgang [BKT]																
	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]																
	Durchlaufzeit (der Fertigung) [BKT]																
	Mittlere Ist-Lieferzeit [BKT]																
	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]																
	Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])																
	Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])																
	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]																
	Mittelwert																
	Standardabweichung																

Tabelle A 19: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.8

Parameter		Fertigungssteuerung: Referenzkonfiguration Störungen: keine BEL _m : 100% ZR _m : 2 BKT AQ _m : 50% ZAU _v : 0,5														
		Versuchsnummer	BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]
		μ	σ			μ	σ		μ	σ						
mAAT	1.8.1	23,5	3,4	96,7	111,1	4,7	2,3	-12,1	-0,5	1,4	37,7	8,6	0,00	10,2	0,01	92,0
	1.8.2	24,0	3,2	97,1	110,4	4,6	2,0	-13,7	-0,5	1,3	38,6	9,4	0,02	11,1	0,02	94,8
	1.8.3	24,0	3,3	97,5	120,6	5,0	2,0	-1,6	0,0	1,5	29,6	8,0	0,01	9,2	0,02	85,0
	1.8.4	24,2	3,3	94,4	97,1	4,2	2,8	-25,5	-1,1	1,7	50,0	12,2	0,04	15,1	0,05	92,5
	1.8.5	23,9	3,0	96,7	104,9	4,4	2,2	-18,5	-0,7	1,3	42,7	9,2	0,03	11,1	0,03	96,0
	1.8.6	23,9	3,2	97,7	121,2	5,1	2,1	-3,1	-0,1	1,4	31,1	8,6	0,01	9,8	0,01	88,1
	1.8.7	23,7	3,5	98,2	114,1	4,7	1,8	-12,4	-0,5	1,2	37,5	9,7	0,01	11,1	0,00	95,0
	1.8.8	24,1	3,6	95,2	109,6	4,7	2,4	-13,7	-0,6	1,3	37,8	11,1	0,04	13,3	0,05	95,0
	1.8.9	24,0	3,3	96,0	95,9	4,1	2,4	-26,9	-1,1	1,5	51,6	9,5	0,04	11,9	0,04	93,9
	1.8.10	23,7	3,2	97,5	108,4	4,6	2,2	-12,7	-0,5	1,3	38,2	7,2	0,00	8,9	0,00	93,0
SLZ	1.8.11	23,5	3,4	96,8	135,9	5,7	2,9	11,0	0,4	2,0	24,8	9,4	0,00	10,0	0,00	73,7
	1.8.12	24,0	3,2	96,6	164,8	6,9	2,7	38,4	1,6	2,0	12,4	10,6	0,02	10,0	0,00	49,8
	1.8.13	24,0	3,3	96,9	141,2	5,9	2,3	14,4	0,6	1,8	21,4	9,6	0,01	10,0	0,00	72,8
	1.8.14	24,2	3,3	96,2	192,3	8,0	4,0	64,1	2,6	2,9	7,3	11,6	0,01	10,0	0,00	42,0
	1.8.15	23,9	3,0	96,3	159,0	6,6	3,1	32,6	1,3	2,3	14,9	10,3	0,02	10,0	0,00	63,4
	1.8.16	23,9	3,2	97,0	156,4	6,5	2,1	30,6	1,3	1,6	11,3	10,3	0,01	10,0	0,00	56,5
	1.8.17	23,7	3,5	97,4	182,7	7,7	2,1	57,4	2,4	1,4	2,3	11,4	0,00	10,0	0,00	21,5
	1.8.18	24,1	3,6	95,6	203,3	8,5	3,5	75,5	3,2	2,8	6,4	12,2	0,03	10,0	0,00	25,4
1.8.19	24,0	3,3	96,0	163,8	6,8	3,1	36,8	1,5	2,3	16,6	10,5	0,03	10,0	0,00	47,3	
1.8.20	23,7	3,2	96,6	119,4	5,0	2,5	-5,2	-0,2	1,4	31,8	8,7	0,00	10,0	0,00	88,2	
mAAT	∅	23,9	3,3	96,7	109,3	4,6	2,3	-14,0	-0,6	1,4	39,5	9,3	0,02	11,2	0,02	92,5
SLZ	∅	23,9	3,3	96,5	161,9	6,8	3,0	35,5	1,5	2,3	14,9	10,5	0,01	10,0	0,00	54,1
A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT														
AQ _m	Mittlere Annahmekote [%]	mAAAT														
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	-terminierung														
BEL	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	Mittlerer Rückstand (in Anzahl Aufträge)														
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	RSA _m														
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)	SLZ														
BKT	Betriebskalendertage	TAA														
LTE	Liefertermineinhaltung [%]	ZDL														
		ZL _{m,ist}														
		ZL _{m,plan}														
		ZL _{Δ,ist}														
		ZL _{Δ,Plan}														
		Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]														
		Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])														
		Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])														
		Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]														
		Mittelwert														
		Standardabweichung														

Tabelle A 20: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.9

Verfahren		BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{Δ,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]	
		μ	σ			μ	σ		μ	σ							
Parameter Fertigungssteuerung: Referenzkonfiguration Störungen: keine BEL _m : 100% ZR _m : 10 BKT AQ _m : 50% ZAU _v : 0,5																	
mAAT		1.9.1	23,5	3,4	92,2	89,1	4,0	2,3	-31,7	-1,3	2,0	56,0	12,1	0,06	16,0	0,07	92,8
		1.9.2	24,0	3,2	89,0	88,8	4,0	2,1	-22,9	-1,2	2,3	46,3	16,0	0,12	20,3	0,12	91,9
		1.9.3	24,0	3,3	95,1	99,9	4,3	1,8	-20,7	-0,8	1,5	44,5	8,6	0,03	11,5	0,05	95,5
		1.9.4	24,2	3,3	88,7	82,9	3,9	1,9	-33,2	-1,4	1,9	54,9	17,0	0,12	22,5	0,13	97,8
		1.9.5	23,9	3,0	90,1	87,1	4,0	1,9	-28,6	-1,3	2,0	50,7	14,3	0,11	18,9	0,12	97,2
		1.9.6	23,9	3,2	89,3	95,0	4,3	2,3	-17,5	-1,0	2,5	44,4	16,9	0,10	20,6	0,09	85,1
		1.9.7	23,7	3,5	89,9	89,3	4,1	2,1	-28,0	-1,1	2,4	52,0	18,8	0,10	22,7	0,09	88,0
		1.9.8	24,1	3,6	87,8	85,2	3,9	2,1	-27,3	-1,3	2,3	49,7	17,8	0,14	23,4	0,15	93,3
		1.9.9	24,0	3,3	88,7	82,0	3,7	2,1	-29,9	-1,5	2,2	53,5	15,5	0,14	21,1	0,14	91,5
		1.9.10	23,7	3,2	93,8	95,4	4,2	1,9	-23,1	-1,1	1,9	47,0	11,3	0,04	14,7	0,05	94,6
SLZ		1.9.11	23,5	3,4	96,8	135,9	5,7	2,9	11,0	0,4	2,0	24,8	9,4	0,00	10,0	0,00	73,7
		1.9.12	24,0	3,2	96,6	164,8	6,9	2,7	38,4	1,6	2,0	12,4	10,6	0,02	10,0	0,00	49,8
		1.9.13	24,0	3,3	96,9	141,2	5,9	2,3	14,4	0,6	1,8	21,4	9,6	0,01	10,0	0,00	72,8
		1.9.14	24,2	3,3	96,2	192,3	8,0	4,0	64,1	2,6	2,9	7,3	11,6	0,01	10,0	0,00	42,0
		1.9.15	23,9	3,0	96,3	159,0	6,6	3,1	32,6	1,3	2,3	14,9	10,3	0,02	10,0	0,00	63,4
		1.9.16	23,9	3,2	97,0	156,4	6,5	2,1	30,6	1,3	1,6	11,3	10,3	0,01	10,0	0,00	56,5
		1.9.17	23,7	3,5	97,4	182,7	7,7	2,1	57,4	2,4	1,4	2,3	11,4	0,00	10,0	0,00	21,5
		1.9.18	24,1	3,6	95,6	203,3	8,5	3,5	75,5	3,2	2,8	6,4	12,2	0,03	10,0	0,00	25,4
mAAT		1.9.19	24,0	3,3	96,0	163,8	6,8	3,1	36,8	1,5	2,3	16,6	10,5	0,03	10,0	0,00	47,3
		1.9.20	23,7	3,2	96,6	119,4	5,0	2,5	-5,2	-0,2	1,4	31,8	8,7	0,00	10,0	0,00	88,2
SLZ		Ø	23,9	3,3	90,5	89,5	4,0	2,1	-26,3	-1,2	2,1	49,9	14,8	0,10	19,2	0,10	92,8
SLZ		Ø	23,9	3,3	96,5	161,9	6,8	3,0	35,5	1,5	2,3	14,9	10,5	0,01	10,0	0,00	54,1
mAAT		Mittlere Auslastung [%] mAAT Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung ZL _{m,plan} Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT] Mittlere Annahmehquote [%] mAAT -terminierung ZL _{Δ,ist} Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT]) Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-] RSA _m Mittlerer Rückstand (in Anzahl Aufträge) ZL _{Δ,Plan} Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT]) Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-] SLZ Planung mit Standardlieferzeiten ZL _{m,ist} Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT]) Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%] TAA Terminabweichung im Abgang [BKT] ZR _m Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT] Fertigenbestand (in Anzahl Aufträge) ZAU _v Variationskoeffizient der Auftragszeit [-] μ Mittelwert Betriebskalendertage ZDL Durchlaufzeit (der Fertigung) [BKT] σ Standardabweichung Liefertermineinhaltung [%] ZL _{m,ist} Mittlere Ist-Lieferzeit [BKT]															

Tabelle A 22: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.11

Parameter		Fertigungssteuerung: Referenzkonfiguration														Störungen: keine		BEL _m : 100%		ZR _m : 5 BKT		AQ _m : 50%		ZAU _v : 0,5	
Verfahren	Versuchsnummer	ZAN _m [BKT]	ZAB _m [BKT]	AQ _{m,OA} [BKT]	A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{Δ,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]								
							μ	σ		μ	σ							μ	σ						
mAAT mit AQ _m	1.11.1	4	6	40	96,5	97,8	4,1	2,0	-25,0	-1,1	1,4	49,3	8,6	0,00	10,8	0,00	96,3								
	1.11.2	4	6	40	96,2	90,1	3,8	1,8	-33,9	-1,4	1,4	57,3	9,9	0,03	12,7	0,03	98,5								
	1.11.3	4	6	40	97,6	99,8	4,2	1,8	-24,0	-1,0	1,3	48,1	8,1	0,02	10,2	0,02	96,7								
	1.11.4	4	6	40	93,1	82,8	3,7	2,2	-38,0	-1,7	1,6	61,0	13,4	0,06	17,3	0,07	96,8								
	1.11.5	4	6	40	96,1	87,3	3,7	1,9	-33,6	-1,5	1,5	56,7	9,4	0,03	12,3	0,04	98,6								
	1.11.6	4	6	40	97,6	106,9	4,5	2,0	-16,7	-0,7	1,5	42,5	8,8	0,01	10,6	0,01	92,6								
	1.11.7	4	6	40	98,1	94,8	4,0	1,8	-29,8	-1,2	1,3	53,6	9,7	0,01	12,0	0,01	97,8								
	1.11.8	4	6	40	94,7	92,5	4,0	2,1	-30,0	-1,3	1,4	53,3	11,7	0,05	14,7	0,06	96,9								
	1.11.9	4	6	40	94,4	77,3	3,4	1,9	-43,8	-1,9	1,6	66,6	11,0	0,06	14,6	0,06	98,6								
	1.11.10	4	6	40	97,2	95,8	4,1	2,1	-25,2	-1,1	1,3	48,8	7,4	0,00	9,7	0,00	98,0								
	1.11.11	4	6	40	95,8	103,8	4,4	2,2	-18,9	-0,8	1,5	44,0	9,2	0,01	11,1	0,01	93,8								
	1.11.12	4	6	40	96,5	102,6	4,4	1,9	-20,8	-0,9	1,4	44,9	9,9	0,03	12,0	0,03	95,5								
	1.11.13	4	6	40	97,2	113,7	4,8	2,0	-9,8	-0,4	1,4	35,8	8,4	0,02	10,0	0,02	91,0								
	1.11.14	4	6	40	93,7	95,1	4,2	2,6	-27,2	-1,2	1,7	52,1	12,5	0,05	15,7	0,06	92,4								
	1.11.15	4	6	40	96,0	97,8	4,2	2,0	-22,9	-1,0	1,5	46,7	9,5	0,03	11,8	0,04	96,2								
	1.11.16	4	6	40	97,6	116,3	4,9	2,2	-7,5	-0,3	1,6	35,7	8,8	0,01	10,2	0,01	87,0								
	1.11.17	4	6	40	97,3	115,2	4,8	1,9	-10,0	-0,4	1,5	36,1	10,3	0,02	11,7	0,01	91,1								
	1.11.18	4	6	40	94,5	108,2	4,7	2,3	-14,1	-0,6	1,5	39,3	11,9	0,05	14,3	0,06	91,6								
	1.11.19	4	6	40	95,2	91,7	4,0	2,2	-30,4	-1,3	1,5	54,4	10,1	0,05	12,9	0,05	95,4								
	1.11.20	4	6	40	96,6	105,7	4,5	2,1	-15,7	-0,6	1,4	41,0	7,9	0,00	9,7	0,01	92,8								
mAAT mit AQ _m	∅	4	6	40	96,1	92,5	3,9	2,0	-30,0	-1,3	1,5	53,7	9,8	0,03	12,5	0,03	97,1								
mAAT mit AQ _{m,OA}	∅	4	6	40	96,0	105,0	4,5	2,2	-17,7	-0,7	1,6	43,0	9,8	0,03	11,9	0,03	92,7								
A _m	Mittlere Auslastung [%]															ZL _{Δ,ist}	Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung [BKT/BKT]								
AQ _m	Mittlere Annahmequote [%]															ZL _{Δ,Plan}	Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung [BKT/BKT]								
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]															ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]								
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]															ZU	Auftragszugang								
BFW _m	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)															μ	Mittelwert								
BKT	Betriebskalendertage															σ	Standardabweichung								
LTE	Liefertermineinhaltung [%]																								
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und-terminierung																								

Tabelle A 23: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.12

Parameter		Fertigungssteuerung: Referenzkonfiguration Störungen: keine BEL _m : 100% ZR _m : 5 BKT AQ _m : 50% ZAU _v : 0,5																
		Versuchsnummer	ZAN _m [BKT]	ZAB _m [BKT]	AQ _{m,OA} [BKT]	A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]	RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{Δ,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]	
Verfahren							μ	σ		μ	σ		μ	σ				
																		mAAT mit AQ _m
	1.12.2	6	4	60	95,1	111,4	4,8	2,1	-11,0	-0,4	1,9	39,2	10,6	0,05	12,5	0,05	84,9	
	1.12.3	6	4	60	97,4	119,6	5,0	1,9	-2,2	-0,1	1,6	31,7	8,0	0,02	9,4	0,01	82,9	
	1.12.4	6	4	60	92,6	108,9	4,8	2,5	-12,3	-0,5	2,2	40,6	13,8	0,07	16,6	0,07	83,0	
	1.12.5	6	4	60	95,2	107,4	4,6	2,2	-14,3	-0,6	2,0	41,4	10,2	0,05	12,3	0,05	87,4	
	1.12.6	6	4	60	96,5	122,4	5,2	2,0	-0,6	0,0	1,8	31,2	9,1	0,03	10,5	0,02	81,7	
	1.12.7	6	4	60	96,0	117,1	5,0	2,3	-5,0	-0,2	2,2	36,2	11,4	0,03	12,7	0,02	76,3	
	1.12.8	6	4	60	94,1	115,8	5,0	2,3	-5,9	-0,2	1,9	35,3	12,1	0,06	14,4	0,07	80,3	
	1.12.9	6	4	60	94,3	102,4	4,4	2,4	-17,4	-0,8	2,0	45,7	10,4	0,06	12,9	0,06	84,1	
	1.12.10	6	4	60	95,8	113,1	4,8	2,0	-7,9	-0,3	1,6	35,1	8,0	0,01	9,7	0,01	87,2	
	1.12.11	6	4	60	94,3	103,1	4,4	2,2	-18,5	-0,8	1,8	44,4	9,9	0,03	12,3	0,04	90,4	
	1.12.12	6	4	60	94,1	96,2	4,2	1,9	-25,3	-1,0	1,9	49,7	11,5	0,06	14,3	0,06	93,4	
	1.12.13	6	4	60	96,7	106,6	4,5	1,8	-16,4	-0,6	1,7	42,0	8,6	0,02	10,7	0,02	91,8	
	1.12.14	6	4	60	91,3	91,1	4,1	2,1	-26,4	-1,2	2,1	50,0	15,4	0,08	19,2	0,09	93,0	
	1.12.15	6	4	60	94,3	94,2	4,1	1,9	-26,8	-1,1	1,8	50,9	10,5	0,06	13,5	0,06	94,5	
	1.12.16	6	4	60	96,5	109,7	4,7	1,8	-12,0	-0,5	1,7	38,6	9,0	0,02	10,7	0,02	89,6	
	1.12.17	6	4	60	95,6	99,6	4,3	2,0	-22,4	-1,0	2,1	49,2	12,3	0,04	14,6	0,03	87,2	
	1.12.18	6	4	60	93,4	97,5	4,3	2,1	-22,0	-1,0	2,0	46,8	12,4	0,07	15,6	0,07	90,2	
	1.12.19	6	4	60	92,6	89,9	4,0	2,2	-27,4	-1,3	2,0	53,0	12,1	0,08	15,6	0,08	88,5	
	1.12.20	6	4	60	97,2	103,1	4,3	2,1	-17,6	-0,7	1,4	42,8	7,3	0,00	9,2	0,00	94,3	
mAAT mit AQ _m	∅	6	4	60	95,2	113,2	4,9	2,2	-8,4	-0,3	1,9	37,3	10,3	0,04	12,2	0,04	83,2	
mAAT mit AQ _{m,OA}	∅	6	4	60	94,6	99,1	4,3	2,0	-21,5	-0,9	1,9	46,8	10,9	0,05	13,6	0,05	91,3	
A _m	Mittlere Auslastung [%]				RSA _m	Mittlerer Rückstand (in Anzahl Aufträge)	ZL _{Δ,ist}											Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung [BKT/BKT]
AQ _m	Mittlere Annahmekote [%]				SLZ	Planung mit Standardlieferzeiten	ZL _{Δ,Plan}											Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung [BKT/BKT]
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]				TAA	Terminabweichung im Abgang [BKT]	ZR _m											Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]				ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]	ZU											Auftragszugang
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)				ZDL	Durchlaufzeit (der Fertigung) [BKT]	μ											Mittelwert
BKT	Betriebskalendertage				ZL _{m,ist}	Mittlere Ist-Lieferzeit [BKT]	σ											Standardabweichung
LTE	Liefertermineinhaltung [%]				ZL _{m,plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]												
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und-terminierung																	

Tabelle A 24: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.13

Parameter		Fertigungssteuerung: Referenzkonfiguration Störungen: keine BEL _m : 100% ZR _m : 5 BKT AQ _m : 50% ZAU _v : 0,5																
		Versuchsnummer	ZAN _m [BKT]	ZAB _m [BKT]	AQ _{m,OA} [BKT]	A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]	RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{Δ,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]	
Verfahren							μ	σ		μ	σ		μ	σ				
																		μ
mAAT mit AQ _m	1.13.1	7	3	70	94,8	123,6	5,4	2,5	3,9	0,1	2,3	31,1	9,9	0,03	11,0	0,02	72,2	
	1.13.2	7	3	70	95,2	124,9	5,4	2,4	4,9	0,1	2,3	30,5	10,5	0,05	11,8	0,04	73,0	
	1.13.3	7	3	70	97,1	125,4	5,3	2,0	6,5	0,2	1,7	25,7	8,0	0,02	9,1	0,02	76,9	
	1.13.4	7	3	70	92,9	121,5	5,3	2,8	-1,0	0,0	2,5	36,4	13,8	0,06	16,1	0,07	72,0	
	1.13.5	7	3	70	95,6	115,7	4,9	2,3	-5,1	-0,2	2,1	35,4	9,6	0,04	11,3	0,04	81,1	
	1.13.6	7	3	70	96,9	126,0	5,4	2,2	6,0	0,2	2,0	27,9	8,9	0,02	9,8	0,01	73,5	
	1.13.7	7	3	70	95,9	127,8	5,5	2,5	5,8	0,2	2,5	33,5	11,4	0,04	12,3	0,02	65,5	
	1.13.8	7	3	70	93,8	126,2	5,5	2,7	6,3	0,2	2,4	30,5	12,1	0,06	13,9	0,06	68,6	
	1.13.9	7	3	70	94,3	115,1	4,9	2,6	-7,0	-0,2	2,3	40,4	10,5	0,06	12,5	0,05	75,9	
	1.13.10	7	3	70	97,0	116,9	4,9	2,3	-2,2	-0,1	1,6	30,9	7,1	0,00	8,3	0,00	85,8	
	1.13.11	7	3	70	93,3	98,1	4,3	2,1	-21,4	-0,9	2,1	47,1	11,1	0,04	13,7	0,04	88,1	
	1.13.12	7	3	70	93,3	100,2	4,4	2,1	-17,6	-0,8	2,1	44,0	12,0	0,07	14,9	0,07	87,8	
	1.13.13	7	3	70	96,6	111,1	4,7	2,0	-7,6	-0,3	1,8	35,0	8,0	0,02	10,0	0,03	86,3	
	1.13.14	7	3	70	90,8	92,8	4,2	2,2	-26,6	-1,1	2,3	51,2	16,1	0,09	20,0	0,09	89,6	
	1.13.15	7	3	70	93,0	95,2	4,2	2,0	-21,4	-1,0	2,0	45,7	11,0	0,07	14,2	0,08	92,5	
	1.13.16	7	3	70	96,1	109,1	4,7	1,9	-10,9	-0,5	1,8	37,9	9,2	0,02	11,2	0,03	88,8	
	1.13.17	7	3	70	94,6	100,2	4,3	2,0	-22,3	-0,9	2,1	48,3	12,3	0,05	14,6	0,04	89,2	
	1.13.18	7	3	70	92,7	105,4	4,6	2,2	-13,6	-0,6	2,1	40,3	13,1	0,08	16,4	0,09	87,1	
	1.13.19	7	3	70	92,1	92,4	4,1	2,1	-25,0	-1,1	2,1	51,0	12,6	0,09	16,3	0,09	87,7	
	1.13.20	7	3	70	96,6	104,6	4,4	2,0	-16,8	-0,7	1,5	42,2	7,7	0,00	9,8	0,01	93,3	
mAAT mit AQ _m	∅	7	3	70	95,3	122,3	5,3	2,4	1,8	0,0	2,2	32,2	10,2	0,04	11,6	0,03	74,5	
mAAT mit AQ _{m,OA}	∅	7	3	70	93,9	100,9	4,4	2,1	-18,3	-0,8	2,0	44,3	11,3	0,05	14,1	0,06	89,0	
A _m	Mittlere Auslastung [%]				RSA _m	Mittlerer Rückstand (in Anzahl Aufträge)	ZL _{Δ,ist}											Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung [BKT/BKT]
AQ _m	Mittlere Annahmehquote [%]				SLZ	Planung mit Standardlieferzeiten	ZL _{Δ,Plan}											Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung [BK T/BKT]
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]				TAA	Terminabweichung im Abgang [BKT]	ZR _m											Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]				ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]	ZU											Auftragszugang
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)				ZDL	Durchlaufzeit (der Fertigung) [BKT]	μ											Mittelwert
BKT	Betriebskalenderentage				ZL _{m,ist}	Mittlere Ist-Lieferzeit [BKT]	σ											Standardabweichung
LTE	Lieferterminieinhaltung [%]				ZL _{m,plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]												
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und-terminierung																	

Tabelle A 25: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.14

Parameter		Fertigungssteuerung: ConWIP, Plan-Endtermin Störungen: keine BEL _m : 95% ZR _m : 5 BKT AQ _m : 50% ZAU _v : 0,5														
		Versuchsnummer		BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]
Verfahren	Versuchsnummer	μ	σ	A _m [%]	BA _m [-]	μ	σ	RSA _m [-]	μ	σ	BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]	
		mAAT	1.14.1			22,3	3,4		95,2	87,8						3,8
	1.14.2	22,8	3,4	96,9	90,3	3,8	1,6	-43,2	-1,9	1,2	66,0	3,9	-0,02	6,8	0,00	100,0
	1.14.3	22,8	3,1	96,7	83,7	3,5	1,3	-38,0	-1,7	1,1	60,8	3,6	-0,01	6,3	0,00	100,0
	1.14.4	23,0	3,4	96,0	109,7	4,7	2,5	-55,8	-2,5	2,5	79,8	5,5	-0,02	9,0	0,00	95,6
	1.14.5	22,7	2,9	96,8	90,8	3,8	1,4	-55,0	-2,4	1,4	77,8	3,9	-0,01	7,3	0,00	100,0
	1.14.6	22,7	3,3	96,6	85,0	3,6	1,6	-51,7	-2,3	1,1	74,4	3,7	-0,02	7,0	-0,01	100,0
	1.14.7	22,6	3,4	96,8	93,8	3,9	1,9	-56,1	-2,5	1,6	78,9	4,5	-0,03	8,0	-0,01	99,7
	1.14.8	22,9	3,5	95,3	116,5	5,0	1,6	-41,6	-1,9	1,7	64,3	6,0	0,00	9,0	0,00	99,6
	1.14.9	22,8	3,3	96,0	91,3	3,9	1,5	-55,5	-2,5	1,8	78,5	4,0	0,00	7,6	0,00	97,2
	1.14.10	22,4	3,2	95,0	72,9	3,2	1,7	-56,4	-2,5	1,3	78,9	3,2	-0,02	6,7	0,00	99,3
	1.14.11	22,3	3,4	94,3	87,4	3,7	1,9	-107,4	-4,9	2,1	129,3	4,0	-0,02	10,0	0,00	100,0
	1.14.12	22,8	3,4	96,4	89,6	3,8	1,5	-112,4	-5,0	1,6	134,7	3,9	-0,02	10,0	0,00	100,0
	1.14.13	22,8	3,1	95,9	85,0	3,6	1,3	-118,6	-5,3	1,4	141,0	3,6	-0,01	10,0	0,00	100,0
	1.14.14	23,0	3,4	95,2	108,7	4,6	2,4	-81,1	-3,6	2,5	103,7	5,3	-0,01	10,0	0,00	99,4
	1.14.15	22,7	2,9	96,1	90,7	3,8	1,3	-111,4	-5,0	1,4	133,7	3,9	-0,01	10,0	0,00	100,0
	1.14.16	22,7	3,3	95,8	83,9	3,5	1,5	-117,5	-5,3	1,6	139,8	3,6	-0,02	10,0	0,00	100,0
	1.14.17	22,6	3,4	96,2	91,7	3,8	1,8	-101,2	-4,6	2,1	123,5	4,3	-0,03	10,0	0,00	100,0
	1.14.18	22,9	3,5	94,7	115,6	5,0	1,6	-68,0	-3,0	1,5	90,4	5,9	0,00	10,0	0,00	100,0
	1.14.19	22,8	3,3	95,3	90,9	3,9	1,4	-113,5	-5,0	1,4	135,9	3,9	0,00	10,0	0,00	100,0
	1.14.20	22,4	3,2	94,5	73,0	3,1	1,7	-127,1	-5,7	1,7	149,1	3,2	-0,02	10,0	0,00	100,0
mAAT	∅	22,7	3,3	96,1	92,2	3,9	1,8	-51,5	-2,3	1,6	74,4	4,2	-0,02	7,6	0,00	99,0
SLZ	∅	22,7	3,3	95,4	91,6	3,9	1,7	-105,8	-4,7	1,9	128,1	4,2	-0,01	10,0	0,00	99,9
A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT														
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]	-terminierung														
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	ZL _{m,plan}														
BEL	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	ZL _{Δ,ist}														
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]														
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)	Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])														
BKT	Betriebskalendertage	ZL _{Δ,Plan}														
LTE	Liefertermineinhaltung [%]	Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])														
		Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]														
		Mittelwert														
		Standardabweichung														

Tabelle A 26: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.15

Fertigungssteuerung: ConWIP, Plan-Endtermin													Störungen: keine			BEL _m : 100%		ZR _m : 5 BKT		AQ _m : 50%		ZAU _v : 0,5	
Verfahren	Versuchsnummer	BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{Δ,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]							
		μ	σ			μ	σ		μ	σ													
mAAT	1.15.1	23,5	3,4	96,8	118,9	5,0	2,2	-31,6	-1,4	1,8	55,0	8,8	0,01	11,4	0,02	96,9							
	1.15.2	24,0	3,2	97,3	118,9	5,0	1,9	-34,6	-1,4	1,4	58,1	9,2	0,02	11,8	0,02	98,9							
	1.15.3	24,0	3,3	97,8	118,9	5,0	1,7	-23,6	-1,0	1,2	46,5	8,2	0,02	10,5	0,02	99,5							
	1.15.4	24,2	3,3	96,4	118,8	5,0	3,6	-53,1	-2,4	2,7	79,2	10,5	0,02	14,4	0,03	93,3							
	1.15.5	23,9	3,0	97,0	118,9	5,0	1,9	-37,5	-1,6	1,6	60,3	9,0	0,03	11,8	0,04	99,9							
	1.15.6	23,9	3,2	97,4	118,9	5,0	2,1	-14,8	-0,6	1,6	40,2	8,7	0,01	10,5	0,01	93,5							
	1.15.7	23,7	3,5	98,3	118,9	5,0	2,0	-34,5	-1,4	1,6	58,4	9,5	0,01	11,8	0,00	98,2							
	1.15.8	24,1	3,6	95,5	118,9	5,1	2,4	-38,7	-1,7	2,0	61,5	11,0	0,04	14,4	0,06	98,5							
	1.15.9	24,0	3,3	96,8	118,8	5,1	2,4	-43,0	-1,8	1,7	67,0	8,9	0,03	12,2	0,04	96,9							
	1.15.10	23,7	3,2	97,2	118,9	5,0	1,8	-23,8	-1,0	1,2	47,3	7,5	0,00	9,6	0,00	98,8							
	1.15.11	23,5	3,4	96,0	118,6	5,0	2,2	-4,8	-0,2	1,7	31,3	8,7	0,01	10,0	0,00	88,1							
	1.15.12	24,0	3,2	96,9	118,7	5,0	1,8	2,3	0,0	1,8	28,4	9,0	0,02	10,0	0,00	69,9							
	1.15.13	24,0	3,3	96,9	118,7	5,0	1,7	-15,0	-0,6	1,7	42,4	8,3	0,02	10,0	0,00	85,2							
	1.15.14	24,2	3,3	95,8	118,5	5,0	3,5	35,5	1,4	2,8	15,2	10,4	0,02	10,0	0,00	59,4							
	1.15.15	23,9	3,0	96,3	118,6	5,0	1,9	4,8	0,1	2,2	33,4	9,1	0,03	10,0	0,00	66,1							
	1.15.16	23,9	3,2	96,6	118,6	5,0	2,2	-7,7	-0,3	1,8	36,4	8,6	0,02	10,0	0,00	87,6							
	1.15.17	23,7	3,5	97,7	118,5	4,9	2,0	8,2	0,3	1,5	23,0	9,3	0,01	10,0	0,00	72,6							
	1.15.18	24,1	3,6	94,5	118,5	5,1	2,5	49,8	2,1	3,0	16,6	11,1	0,04	10,0	0,00	38,2							
	1.15.19	24,0	3,3	96,1	118,6	5,0	2,3	-2,5	-0,1	2,5	37,4	8,8	0,03	10,0	0,00	66,6							
	1.15.20	23,7	3,2	96,6	118,7	5,0	1,9	-34,1	-1,4	1,4	57,3	7,5	0,00	10,0	0,00	99,8							
mAAT	∅	23,9	3,3	97,1	118,9	5,0	2,2	-33,5	-1,4	1,8	57,4	9,1	0,02	11,9	0,02	97,4							
SLZ	∅	23,9	3,3	96,3	118,6	5,0	2,3	3,6	0,1	2,3	32,1	9,1	0,02	10,0	0,00	73,4							

A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung	ZL _{m,plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]			ZL _{Δ,ist}	Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	RSA _m	Mittlerer Rückstand (in Anzahl Aufträge) Planung mit Standardlieferzeiten	ZL _{Δ,Plan}	Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])
BEL	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	SLZ	Terminabweichung im Abgang [BKT]	ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	TAA	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]	μ	Mittelwert
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)	ZAU _v	Durchlaufzeit (der Fertigung) [BKT]	σ	Standardabweichung
BKT	Betriebskalendertage	ZDL	Mittlere Ist-Lieferzeit [BKT]		
LTE	Liefertermineinhaltung [%]	ZL _{m,ist}			

Tabelle A 27: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.16

Parameter		Fertigungssteuerung: ConWIP, Plan-Endtermin Störungen: keine BEL _m : 105% ZR _m : 5 BKT AQ _m : 50% ZAU _v : 0,5														
		Versuchsnummer	BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]
μ	σ		μ	σ			μ	σ		μ	σ					
mAAT	1.16.1	24,7	3,6	94,9	118,9	5,1	2,3	-22,2	-1,0	1,5	46,3	13,4	0,06	16,1	0,06	97,5
	1.16.2	25,2	3,3	96,2	118,9	5,0	2,0	-24,4	-1,0	1,2	48,3	13,6	0,07	16,4	0,07	99,5
	1.16.3	25,2	3,3	96,2	118,9	5,0	2,1	-16,3	-0,7	1,4	41,3	12,7	0,07	15,4	0,07	92,2
	1.16.4	25,3	3,6	95,8	118,8	5,0	3,3	-47,6	-2,1	2,4	72,1	15,3	0,07	19,9	0,09	95,7
	1.16.5	25,1	3,4	95,6	118,9	5,1	2,2	-38,0	-1,6	1,6	61,0	13,4	0,08	16,9	0,08	99,5
	1.16.6	25,2	3,5	96,2	118,9	5,0	2,3	-24,0	-1,1	1,7	50,5	13,2	0,06	15,9	0,06	93,3
	1.16.7	24,8	3,7	96,0	118,9	5,0	2,1	-31,3	-1,4	1,7	56,9	14,0	0,06	16,7	0,04	97,4
	1.16.8	25,3	3,6	95,2	118,9	5,1	2,4	-28,5	-1,2	1,7	52,0	15,5	0,09	19,5	0,10	97,7
	1.16.9	25,2	3,4	95,7	118,9	5,1	2,7	-45,1	-1,9	1,8	69,0	13,3	0,08	17,4	0,09	96,3
	1.16.10	24,9	3,3	95,5	118,9	5,0	2,3	-29,9	-1,3	1,6	53,5	12,0	0,05	15,0	0,05	97,0
	1.16.11	24,7	3,6	94,0	118,6	5,0	2,4	106,3	4,3	3,8	12,0	13,3	0,06	10,0	0,00	25,1
	1.16.12	25,2	3,3	95,5	118,7	5,0	2,0	113,7	4,6	4,2	11,6	13,6	0,07	10,0	0,00	29,5
	1.16.13	25,2	3,3	95,5	118,7	5,0	2,1	90,7	3,6	4,1	14,0	12,6	0,07	10,0	0,00	29,0
	1.16.14	25,3	3,6	95,1	118,5	4,9	3,6	145,0	5,9	4,7	8,1	14,9	0,07	10,0	0,00	15,9
	1.16.15	25,1	3,4	94,8	118,6	5,0	2,2	113,6	4,6	4,7	12,7	13,6	0,08	10,0	0,00	27,8
	1.16.16	25,2	3,5	95,2	118,6	5,0	2,3	104,3	4,2	4,0	11,8	13,2	0,07	10,0	0,00	31,8
	1.16.17	24,8	3,7	95,4	118,5	4,9	2,1	114,8	4,7	3,7	7,4	13,7	0,06	10,0	0,00	25,3
	1.16.18	25,3	3,6	94,5	118,5	5,1	2,5	154,9	6,4	5,3	10,6	15,4	0,09	10,0	0,00	18,8
	1.16.19	25,2	3,4	94,9	118,6	5,0	2,6	110,1	4,4	4,9	18,3	13,4	0,09	10,0	0,00	33,2
	1.16.20	24,9	3,3	94,7	118,6	5,0	2,3	75,4	3,0	3,2	15,3	12,0	0,05	10,0	0,00	27,7
mAAT	∅	25,1	3,5	95,7	118,9	5,0	2,4	-30,7	-1,3	1,7	55,1	13,6	0,07	16,9	0,07	96,6
SLZ	∅	25,1	3,5	95,0	118,6	5,0	2,4	112,9	4,6	4,4	12,2	13,6	0,07	10,0	0,00	26,4
A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT														
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]	-terminierung														
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	Mittlerer Rückstand (in Anzahl Aufträge)														
BEL	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	Planung mit Standardlieferzeiten														
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	TAA														
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)	ZL _{Δ,Plan}														
BKT	Betriebskalendertage	ZR _m														
LTE	Liefertermineinhaltung [%]	μ														
		σ														
		Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]														
		Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])														
		Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])														
		Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]														
		Mittelwert														
		Standardabweichung														

Tabelle A 28: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.17

Verfahren		Versuchsnummer		BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{Δ,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]
		μ	σ	μ	σ			μ	σ		μ	σ						
mAAT	1.17.1	22,3	3,4	106,2	4,6	1,7	-39,2	-1,7	1,4	61,6	5,2	-0,02	7,9	-0,01	99,9			
	1.17.2	22,8	3,4	84,0	3,6	1,5	-41,1	-1,7	1,0	63,8	3,9	-0,02	6,6	-0,01	100,0			
	1.17.3	22,8	3,1	106,0	4,5	1,0	-15,5	-0,7	0,8	38,3	4,7	0,00	6,4	0,00	100,0			
	1.17.4	23,0	3,4	54,2	2,2	1,7	-69,6	-3,0	1,2	92,6	2,3	-0,02	6,4	0,00	100,0			
	1.17.5	22,7	2,9	80,3	3,4	1,8	-45,4	-2,0	1,4	68,2	3,6	-0,02	6,7	-0,01	99,9			
	1.17.6	22,7	3,3	104,2	4,5	1,3	-17,1	-0,7	1,3	41,1	4,6	0,00	6,3	0,00	94,0			
	1.17.7	22,6	3,4	92,4	4,0	1,7	-39,2	-1,7	1,1	61,9	4,7	-0,02	7,3	-0,02	100,0			
	1.17.8	22,9	3,5	103,4	4,3	1,9	-52,1	-2,3	1,9	74,8	5,3	-0,02	8,6	0,00	100,0			
	1.17.9	22,8	3,3	55,6	2,3	1,5	-66,5	-2,9	1,2	89,3	2,4	-0,01	6,3	0,00	100,0			
	1.17.10	22,4	3,2	98,1	4,2	1,5	-29,7	-1,3	1,1	52,1	4,5	-0,01	6,9	-0,01	99,6			
	1.17.11	22,3	3,4	118,5	5,2	1,9	-31,0	-1,4	1,2	53,0	7,5	0,00	10,0	0,00	99,8			
	1.17.12	22,8	3,4	118,6	5,2	1,6	-29,6	-1,3	1,0	51,9	7,6	0,00	10,0	0,00	100,0			
	1.17.13	22,8	3,1	118,6	5,2	1,6	-29,0	-1,3	1,0	51,4	7,6	0,00	10,0	0,00	100,0			
	1.17.14	23,0	3,4	118,3	5,1	3,4	-26,4	-1,2	2,4	54,9	7,7	0,00	10,0	0,00	90,7			
	1.17.15	22,7	2,9	118,5	5,2	1,7	-27,3	-1,2	1,0	49,6	7,7	0,00	10,0	0,00	100,0			
	1.17.16	22,7	3,3	118,5	5,2	2,0	-27,7	-1,2	1,3	50,2	7,7	0,00	10,0	0,00	97,7			
	1.17.17	22,6	3,4	118,4	5,2	1,7	-30,5	-1,4	1,0	52,8	7,5	0,00	10,0	0,00	100,0			
	1.17.18	22,9	3,5	118,3	5,1	2,1	-26,7	-1,2	1,3	49,7	7,7	0,00	10,0	0,00	97,4			
	1.17.19	22,8	3,3	118,5	5,2	2,3	-28,3	-1,2	1,4	51,9	7,7	0,00	10,0	0,00	95,5			
	1.17.20	22,4	3,2	118,5	5,2	1,9	-31,3	-1,4	1,2	53,3	7,5	0,00	10,0	0,00	100,0			
mAAT	∅	22,7	3,3	88,4	3,8	1,8	-41,5	-1,8	1,5	64,4	4,1	-0,01	6,9	-0,01	99,3			
SLZ	∅	22,7	3,3	118,5	5,2	2,1	-28,8	-1,3	1,4	51,9	7,6	0,00	10,0	0,00	98,1			

A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung	ZL _{m,plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]			ZL _{Δ,ist}	Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	RSA _m	Mittlerer Rückstand (in Anzahl Aufträge) Planung mit Standardlieferzeiten	ZL _{Δ,Plan}	Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])
BEL	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	SLZ	Terminabweichung im Abgang [BKT]	ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	TAA	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]	μ	Mittelwert
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge) Betriebskalendertage	ZAU _v	Durchlaufzeit (der Fertigung) [BKT]	σ	Standardabweichung
BKT	Liefertermineinhaltung [%]	ZDL	Mittlere Ist-Lieferzeit [BKT]		
LTE		ZL _{m,ist}			

Tabelle A 29: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.18

Verfahren		Versuchsnummer		BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{Δ,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]
		μ	σ	μ	σ			μ	σ		μ	σ						
mAAT		1.18.1	3.4	23,5	3,4	97,5	118,9	5,1	2,3	-42,0	-1,8	1,7	65,1	9,4	0,00	12,1	0,00	98,8
		1.18.2	3,2	24,0	98,2	118,9	4,9	1,5	-37,0	-1,5	1,1	60,5	7,0	0,00	9,5	0,00	100,0	
		1.18.3	3,3	24,0	98,4	118,9	5,1	1,9	-20,1	-0,8	1,3	43,0	9,0	0,03	11,2	0,03	99,8	
		1.18.4	3,3	24,2	96,9	113,0	4,6	2,5	-75,7	-3,2	2,5	99,5	5,4	-0,01	9,6	0,00	99,4	
		1.18.5	3,0	23,9	97,9	118,9	4,9	1,7	-44,5	-1,8	1,5	67,9	7,4	0,00	10,2	0,00	100,0	
		1.18.6	3,2	23,9	98,2	118,8	5,0	2,0	-14,2	-0,6	1,4	40,2	8,0	0,02	9,8	0,01	92,6	
		1.18.7	3,5	23,7	99,2	118,9	5,0	2,0	-31,8	-1,3	1,4	55,3	8,8	0,00	11,1	0,00	99,8	
		1.18.8	3,6	24,1	96,5	118,9	4,9	2,3	-46,4	-2,0	1,8	69,8	9,1	0,00	12,4	0,02	100,0	
		1.18.9	3,3	24,0	97,2	104,4	4,3	1,6	-61,9	-2,5	1,4	85,7	4,5	-0,01	8,1	0,00	99,8	
		1.18.10	3,2	23,7	98,4	118,9	5,0	2,1	-30,3	-1,3	1,5	53,8	8,1	0,00	10,4	0,00	99,2	
		1.18.11	3,4	23,5	96,7	118,4	5,0	2,0	-24,2	-1,0	1,2	47,3	7,9	0,00	10,0	0,00	99,5	
		1.18.12	3,2	24,0	97,2	118,6	4,9	1,7	-23,6	-1,0	1,0	47,1	7,9	0,00	10,0	0,00	100,0	
		1.18.13	3,3	24,0	97,2	118,5	4,9	1,7	-23,4	-1,0	1,0	47,0	7,9	0,00	10,0	0,00	100,0	
		1.18.14	3,3	24,2	96,5	118,3	4,8	3,4	-21,4	-0,9	2,3	52,8	8,0	0,00	10,0	0,00	90,1	
		1.18.15	3,0	23,9	96,7	118,6	4,9	1,8	-21,4	-0,9	1,0	44,8	8,0	0,00	10,0	0,00	99,9	
		1.18.16	3,2	23,9	97,1	118,5	4,9	2,1	-23,2	-1,0	1,3	47,2	7,9	0,00	10,0	0,00	97,3	
		1.18.17	3,5	23,7	98,2	118,4	4,9	1,8	-24,2	-1,0	0,9	47,6	7,9	0,00	10,0	0,00	100,0	
		1.18.18	3,6	24,1	95,6	118,4	4,9	2,3	-19,1	-0,8	1,4	43,8	8,1	0,00	10,0	0,00	95,6	
		1.18.19	3,3	24,0	96,7	118,5	4,9	2,3	-21,0	-0,9	1,3	45,9	8,0	0,00	10,0	0,00	95,0	
		1.18.20	3,2	23,7	97,2	118,5	5,0	2,0	-24,9	-1,0	1,1	48,1	7,9	0,00	10,0	0,00	99,5	
mAAT				23,9	3,3	97,8	116,8	4,9	2,0	-40,4	-1,7	1,8	64,1	7,7	0,00	10,5	0,01	98,9
SLZ				23,9	3,3	96,9	118,5	4,9	2,1	-22,6	-0,9	1,3	47,2	8,0	0,00	10,0	0,00	97,7

A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung	ZL _{m,plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]			ZL _{Δ,ist}	Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	RSA _m	Mittlerer Rückstand (in Anzahl Aufträge) Planung mit Standardlieferzeiten	ZL _{Δ,Plan}	Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])
BEL	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	SLZ	Terminabweichung im Abgang [BKT]	ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	TAA	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]	μ	Mittelwert
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)	ZAU _v	Durchlaufzeit (der Fertigung) [BKT]	σ	Standardabweichung
BKT	Betriebskalendertage	ZDL	Mittlere Ist-Lieferzeit [BKT]		
LTE	Liefertermineinhaltung [%]	ZL _{m,ist}			

Tabelle A 30: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.19

Verfahren		Versuchsnummer		BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{Δ,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]
		μ	σ	μ	σ			μ	σ		μ	σ						
mAAT	1.19.1	24,7	3,7	95,4	118,9	5,0	2,5	-41,1	1,8	-1,8	64,1	13,3	0,04	16,7	0,05	98,9		
	1.19.2	24,8	4,6	94,6	118,9	4,8	2,0	-33,4	1,3	-1,4	58,0	10,4	0,01	13,1	0,02	100,0		
	1.19.3	25,2	3,3	97,3	118,9	5,0	2,1	-23,9	1,6	-1,0	47,1	13,2	0,07	16,1	0,07	99,5		
	1.19.4	25,4	3,6	97,2	118,8	4,6	2,7	-67,0	2,3	-2,7	92,9	6,2	-0,01	9,9	0,00	96,0		
	1.19.5	25,0	3,6	95,5	118,9	4,9	2,1	-44,7	1,8	-1,9	68,7	11,9	0,05	15,3	0,06	100,0		
	1.19.6	25,2	3,5	96,8	118,8	5,0	2,3	-17,4	1,5	-0,8	44,2	12,5	0,07	15,1	0,06	94,5		
	1.19.7	24,7	4,1	96,5	118,9	4,9	2,1	-33,1	1,5	-1,5	58,8	13,2	0,04	15,8	0,02	99,1		
	1.19.8	25,3	3,6	94,6	118,9	5,0	2,3	-42,3	1,7	-1,8	65,5	13,9	0,06	17,6	0,07	100,0		
	1.19.9	24,8	4,6	94,0	118,9	4,8	2,4	-55,3	2,3	-2,3	79,1	8,9	0,02	12,7	0,03	99,5		
	1.19.10	24,9	3,3	96,6	118,9	5,0	2,4	-38,6	1,7	-1,9	61,6	13,0	0,05	16,4	0,06	98,6		
	1.19.11	24,2	5,1	92,5	118,4	4,8	2,2	-12,2	1,2	-0,6	39,1	8,3	0,00	10,0	0,00	98,6		
	1.19.12	24,7	4,8	93,3	118,6	4,7	1,8	-12,0	1,0	-0,6	39,1	8,3	0,00	10,0	0,00	99,8		
	1.19.13	24,7	4,8	93,5	118,5	4,7	1,8	-13,5	1,0	-0,7	40,8	8,2	0,00	10,0	0,00	99,9		
	1.19.14	24,8	4,9	92,5	118,3	4,6	3,3	-7,7	2,2	-0,5	42,9	8,4	0,00	10,0	0,00	88,8		
	1.19.15	24,5	4,8	93,0	118,4	4,7	1,9	-8,1	1,1	-0,4	35,5	8,5	0,00	10,0	0,00	97,6		
	1.19.16	24,6	5,0	93,2	118,4	4,7	2,1	-14,6	1,3	-0,7	42,5	8,2	0,00	10,0	0,00	96,4		
	1.19.17	24,2	5,3	94,1	118,4	4,7	1,8	-14,9	0,9	-0,7	41,7	8,2	0,00	10,0	0,00	100,0		
	1.19.18	24,8	5,0	91,6	118,3	4,7	2,2	2,3	0,0	1,3	26,6	8,9	0,00	10,0	0,00	93,2		
	1.19.19	24,6	4,9	92,7	118,5	4,7	2,4	-8,4	-0,5	1,4	37,8	8,4	0,00	10,0	0,00	93,3		
	1.19.20	24,4	4,8	93,4	118,5	4,8	2,1	-13,8	-0,7	1,1	41,0	8,2	0,00	10,0	0,00	98,0		
mAAT	Ø	25,0	3,8	95,9	118,9	4,9	2,3	-39,7	1,8	-1,7	64,0	11,6	0,04	14,9	0,04	98,6		
SLZ	Ø	24,6	5,0	93,0	118,4	4,7	2,2	-10,3	1,3	-0,6	38,7	8,3	0,00	10,0	0,00	96,6		

A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung	ZL _{m,plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]			ZL _{Δ,ist}	Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	RSA _m	Mittlerer Rückstand (in Anzahl Aufträge) Planung mit Standardlieferzeiten	ZL _{Δ,Plan}	Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])
BEL	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	SLZ	Terminabweichung im Abgang [BKT]	ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	TAA	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]	μ	Mittelwert
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)	ZAU _v	Durchlaufzeit (der Fertigung) [BKT]	σ	Standardabweichung
BKT	Betriebskalendertage	ZDL	Mittlere Ist-Lieferzeit [BKT]		
LTE	Liefertermineinhaltung [%]	ZL _{m,ist}			

Tabelle A 31: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.20

Parameter		Fertigungssteuerung: ConWIP, Plan-Endtermin Störungen: 20% BEL _m : 95% ZR _m : 5 BKT AQ _m : 50% ZAU _v : 1														
		Versuchsnummer		BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]
Verfahren	Versuchsnummer	μ	σ	A _m [%]	BA _m [-]	μ	σ	RSA _m [-]	μ	σ	BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]	
		mAAT	1.20.1			18,0	3,0		93,2	118,5						6,4
	1.20.2	18,2	2,9	95,5	110,3	5,7	1,7	-14,8	-0,9	1,9	35,9	6,0	-0,01	8,1	0,00	91,9
	1.20.3	18,2	2,8	94,9	93,7	4,8	1,8	-25,7	-1,7	1,7	44,3	5,3	-0,02	8,0	0,00	98,3
	1.20.4	18,2	2,7	92,9	118,5	6,5	2,5	-57,5	-4,5	3,2	75,4	10,0	0,01	16,0	0,04	98,0
	1.20.5	18,2	2,7	94,0	112,8	5,9	1,8	-29,3	-2,2	2,0	48,3	6,6	-0,01	9,8	0,00	95,5
	1.20.6	18,2	3,0	96,0	95,4	4,5	2,0	-29,3	-1,9	1,4	48,4	4,9	-0,02	7,8	-0,02	96,9
	1.20.7	18,3	2,9	94,6	118,7	6,0	2,5	-20,7	-1,4	2,2	40,8	8,6	-0,02	10,9	-0,01	93,0
	1.20.8	18,5	2,9	93,9	118,7	6,5	2,0	-22,2	-2,3	2,7	40,5	9,2	0,01	12,8	0,03	97,5
	1.20.9	18,2	2,8	95,2	115,1	5,9	2,0	-58,8	-3,4	2,1	76,8	6,6	-0,01	10,9	0,00	99,5
	1.20.10	17,8	2,8	94,6	92,2	4,5	2,0	-31,8	-2,2	1,8	50,1	4,7	-0,02	8,0	0,00	98,1
	1.20.11	18,0	3,0	92,2	118,1	6,3	2,2	2,7	-0,6	2,4	23,6	8,3	-0,01	10,0	0,00	80,4
	1.20.12	18,2	2,9	94,7	110,2	5,7	1,6	-46,6	-2,9	1,7	64,5	6,0	-0,01	10,0	0,00	100,0
	1.20.13	18,2	2,8	94,2	94,5	4,9	1,8	-55,5	-3,5	2,3	73,4	5,4	-0,02	10,0	0,00	100,0
	1.20.14	18,2	2,7	91,9	117,8	6,5	2,4	6,7	1,1	2,1	14,9	10,1	0,01	10,0	0,00	67,2
	1.20.15	18,2	2,7	93,1	112,2	5,9	1,6	-37,8	-2,3	1,8	55,7	6,6	0,00	10,0	0,00	99,9
	1.20.16	18,2	3,0	95,1	96,1	4,5	1,9	-58,2	-4,0	2,3	76,2	4,9	-0,02	10,0	0,00	99,7
	1.20.17	18,3	2,9	94,1	118,2	5,8	2,4	7,0	-0,7	2,8	15,7	8,2	-0,02	10,0	0,00	84,9
	1.20.18	18,5	2,9	93,3	118,0	6,4	2,0	-0,4	0,1	1,7	22,1	9,1	0,00	10,0	0,00	78,2
	1.20.19	18,2	2,8	94,6	114,6	5,9	1,6	-31,2	-2,3	1,8	49,1	6,6	-0,01	10,0	0,00	99,8
	1.20.20	17,8	2,8	93,5	98,5	4,7	1,9	-54,0	-3,8	2,2	71,7	5,1	-0,02	10,0	0,00	99,0
mAAT	∅	18,2	2,9	94,5	109,4	5,7	2,2	-33,2	-2,3	2,4	52,1	7,0	-0,01	10,5	0,00	96,6
SLZ	∅	18,2	2,9	93,7	109,8	5,7	2,1	-26,7	-1,9	2,7	46,7	7,0	-0,01	10,0	0,00	90,9
A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung														
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]	ZL _{m,plan} Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]														
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	ZL _{Δ,ist} Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])														
BEL	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	RSA _m Mittlerer Rückstand (in Anzahl Aufträge) Planung mit Standardlieferzeiten														
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	SLZ _m Terminabweichung im Abgang [BKT]														
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)	TAA Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]														
BKT	Betriebskalendertage	ZAU _v Durchlaufzeit (der Fertigung) [BKT]														
LTE	Liefertermineinhaltung [%]	ZL _{m,ist} Mittlere Ist-Lieferzeit [BKT]														

Tabelle A 32: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.21

Parameter		Fertigungssteuerung: ConWIP, Plan-Endtermin Störungen: 20% BEL _m : 100% ZR _m : 5 BKT AQ _m : 50% ZAU _v : 1														
		Versuchsnummer	BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]
		μ	σ			μ	σ		μ	σ						
mAAT	1.21.1	18,8	3,2	93,3	118,5	6,6	2,9	-27,6	-1,9	2,4	46,8	14,8	0,03	18,6	0,05	93,7
	1.21.2	19,2	3,0	95,6	118,6	6,3	2,4	1,5	0,0	2,1	23,7	12,2	0,03	13,7	0,03	78,2
	1.21.3	19,2	3,1	96,0	118,7	6,3	1,9	-0,5	-0,3	1,7	23,4	10,9	0,01	12,4	0,01	86,2
	1.21.4	19,2	3,0	92,9	118,5	6,6	2,7	-52,5	-3,9	2,8	70,5	16,5	0,06	23,2	0,10	97,6
	1.21.5	19,2	2,9	94,1	118,8	6,4	2,2	-20,1	-1,7	2,3	40,7	13,0	0,04	16,0	0,05	91,4
	1.21.6	19,2	3,1	96,0	118,5	6,3	2,1	-14,5	-0,8	1,7	34,9	11,1	0,01	13,0	0,00	91,5
	1.21.7	19,2	3,1	94,4	118,7	6,3	2,6	-14,7	-0,5	2,1	36,1	15,3	0,03	16,6	0,01	82,0
	1.21.8	19,4	3,1	93,6	118,7	6,5	2,4	-14,3	-1,6	2,5	34,1	15,4	0,06	19,4	0,08	92,9
	1.21.9	19,1	3,0	95,6	118,6	6,3	2,3	-52,8	-2,9	2,1	71,2	12,7	0,03	16,9	0,04	99,1
	1.21.10	18,8	3,0	95,1	118,5	6,4	2,2	-24,6	-1,8	1,9	43,6	10,8	0,01	13,9	0,02	95,6
SLZ	1.21.11	18,8	3,2	92,0	118,1	6,5	2,7	96,7	5,9	3,6	4,4	14,9	0,04	10,0	0,00	15,7
	1.21.12	19,2	3,0	94,9	118,1	6,3	2,5	43,4	3,1	2,9	8,2	12,1	0,03	10,0	0,00	31,6
	1.21.13	19,2	3,1	95,1	118,4	6,2	2,0	29,2	2,1	2,0	6,9	11,1	0,01	10,0	0,00	36,4
	1.21.14	19,2	3,0	91,9	117,8	6,5	2,7	99,6	7,3	5,0	2,4	16,3	0,06	10,0	0,00	11,4
	1.21.15	19,2	2,9	93,3	118,1	6,3	2,3	50,7	3,7	3,4	8,0	12,7	0,04	10,0	0,00	27,8
	1.21.16	19,2	3,1	95,3	118,0	6,2	2,0	30,0	1,9	1,7	6,7	10,9	0,01	10,0	0,00	34,8
	1.21.17	19,2	3,1	94,2	118,2	6,3	2,5	98,6	5,6	3,2	1,7	14,6	0,03	10,0	0,00	8,2
	1.21.18	19,4	3,1	93,3	118,0	6,4	2,4	91,0	6,3	4,6	6,9	15,3	0,06	10,0	0,00	16,5
	1.21.19	19,1	3,0	94,6	118,4	6,3	2,3	62,0	4,1	3,2	10,3	13,1	0,04	10,0	0,00	23,1
	1.21.20	18,8	3,0	93,8	118,2	6,4	2,1	30,8	1,9	1,9	10,0	10,9	0,01	10,0	0,00	29,4
mAAT	Ø	19,1	3,1	94,7	118,6	6,4	2,4	-22,0	-1,6	2,5	42,5	13,3	0,03	16,4	0,04	90,8
SLZ	Ø	19,1	3,1	93,8	118,1	6,3	2,4	63,2	4,2	3,8	6,5	13,2	0,03	10,0	0,00	23,5
mAAT		Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung											ZL _{m,plan}	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]		
SLZ		-terminierung											ZL _{Δ,ist}	Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])		
mAAT		Mittlere Auslastung [%]											ZL _{Δ,Plan}	Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])		
SLZ		Mittlere Annahmquote [%]											ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]		
mAAT		Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]											μ	Mittelwert		
SLZ		Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]											σ	Standardabweichung		
mAAT		Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]														
SLZ		Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)														
mAAT		Betriebskalendertage														
SLZ		Liefertermineinhaltung [%]														

Tabelle A 33: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.22

Parameter		Fertigungssteuerung: ConWIP, Plan-Endtermin Störungen: 20% BEL _m : 105% ZR _m : 5 BKT AQ _m : 50% ZAU _v : 1														
		Versuchsnummer	BEL [-]		A _m [%]	BA _m [-]	ZDL [BKT]		RSA _m [-]	TAA [BKT]		BFW [-]	ZL _{m,ist} [BKT]	ZL _{m,Plan} [BKT]	ZL _{Δ,Plan} [BKT]	LTE [%]
		μ	σ			μ	σ		μ	σ						
mAAT	1.22.1	19,7	3,4	92,9	118,5	6,5	2,9	-23,7	-1,7	2,5	44,1	20,2	25,0	0,10	91,4	
	1.22.2	20,2	3,1	95,9	118,6	6,3	2,5	1,5	0,1	1,9	23,4	17,6	19,9	0,08	76,6	
	1.22.3	20,1	2,9	96,1	118,8	6,3	2,1	-1,8	-0,1	1,7	24,8	16,6	18,6	0,06	82,5	
	1.22.4	20,2	2,9	92,7	118,5	6,6	2,7	-49,2	-3,4	2,6	67,1	21,7	29,7	0,15	97,5	
	1.22.5	20,1	2,8	93,9	118,8	6,4	2,3	-15,0	-1,2	2,1	35,8	18,6	22,3	0,10	90,5	
	1.22.6	20,0	3,3	96,1	118,6	6,2	2,1	-4,9	-0,1	1,7	26,7	16,6	18,6	0,05	82,4	
	1.22.7	20,1	3,2	95,1	118,7	6,3	2,7	-8,7	-0,6	2,1	31,0	20,1	22,2	0,06	82,9	
	1.22.8	20,3	3,1	94,1	118,7	6,5	2,3	-10,8	-1,1	2,3	31,0	20,7	25,6	0,13	90,6	
	1.22.9	20,1	3,2	95,3	118,7	6,4	2,4	-50,4	-2,8	2,1	68,7	18,6	23,6	0,09	98,8	
	1.22.10	19,8	3,1	94,8	118,5	6,4	2,3	-18,1	-1,4	2,0	38,4	16,7	20,4	0,07	93,4	
SLZ	1.22.11	19,7	3,4	92,1	118,0	6,5	2,8	186,1	11,3	6,4	3,1	20,3	10,0	0,00	7,7	
	1.22.12	20,2	3,1	94,9	118,2	6,3	2,6	135,9	8,6	5,8	4,3	17,6	10,0	0,00	15,0	
	1.22.13	20,1	2,9	95,3	118,3	6,2	2,2	119,2	7,6	4,8	3,8	16,6	10,0	0,00	8,6	
	1.22.14	20,2	2,9	91,7	117,7	6,5	2,8	190,8	12,5	7,9	1,5	21,5	10,0	0,00	8,2	
	1.22.15	20,1	2,8	93,2	118,1	6,3	2,4	144,1	9,3	6,4	3,5	18,3	10,0	0,00	13,0	
	1.22.16	20,0	3,3	95,5	118,1	6,2	2,2	123,7	7,6	4,6	2,1	16,6	10,0	0,00	7,3	
	1.22.17	20,1	3,2	94,2	118,2	6,3	2,6	191,6	11,2	6,1	1,3	20,2	10,0	0,00	3,6	
	1.22.18	20,3	3,1	93,4	117,9	6,4	2,5	185,3	11,7	7,5	4,3	20,7	10,0	0,00	12,2	
	1.22.19	20,1	3,2	94,6	118,3	6,3	2,4	155,2	9,7	6,2	5,7	18,7	10,0	0,00	14,3	
	1.22.20	19,8	3,1	93,8	118,2	6,3	2,3	120,8	7,5	4,8	5,4	16,5	10,0	0,00	18,3	
mAAT	Ø	20,1	3,1	94,7	118,6	6,4	2,4	-18,1	-1,2	2,4	39,1	18,8	22,6	0,08	88,7	
SLZ	Ø	20,1	3,1	93,9	118,1	6,3	2,5	155,3	9,7	6,4	3,5	18,7	10,0	0,00	10,8	
A _m	Mittlere Auslastung [%]	mAAT														
AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]	Modelbasierte Auftragsannahme und -terminierung														
BA _m	Mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträge) [-]	ZL _{m,plan}														
BEL	Belastung (in Anzahl Aufträgen) [-]	ZL _{Δ,ist}														
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]	Mittlere Plan-Lieferzeit [BKT]														
BFW	Fertigwarenbestand (in Anzahl Aufträge)	Mittlere Ist-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])														
BKT	Betriebskalendertage	ZL _{Δ,Plan}														
LTE	Liefertermineinhaltung [%]	Mittlere Plan-Lieferzeitverlängerung (in BKT pro Tag [BKT/BKT])														
		Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]														
		μ														
		σ														
		Standardabweichung														

A 6 Evaluationsergebnisse unter irregulären Bedingungen

Tabelle A 34: Übersicht über die Parameter der Versuchsreihen 2.1 - 2.15

Reihe	BEL _m [%]	AQ _m [%]	ZR _m [BKT]	F _{AQ} [-]	F _{PRO} [-]	F _{ZAU} [-]	AQ _{m,Ist} [%]	AQ _{m,Plan} [%]	PRO _{m,Ist} [Std./Std.]	PRO _{m,Plan} [Std./Std.]	ZAU _{m,Ist} [Std.]	ZAU _{m,Plan} [Std.]
2.1	100	50	5	0,1	0,0	0,0	55	50	1,0	1,0	1,00	1,00
2.2	100	50	5	0,2	0,0	0,0	60	50	1,0	1,0	1,00	1,00
2.3	100	50	5	0,3	0,0	0,0	65	50	1,0	1,0	1,00	1,00
2.4	100	50	5	0,4	0,0	0,0	70	50	1,0	1,0	1,00	1,00
2.5	100	50	5	0,5	0,0	0,0	75	50	1,0	1,0	1,00	1,00
2.6	100	50	5	0,0	0,1	0,0	50	50	0,9	1,0	1,00	1,00
2.7	100	50	5	0,0	0,2	0,0	50	50	0,8	1,0	1,00	1,00
2.8	100	50	5	0,0	0,3	0,0	50	50	0,7	1,0	1,00	1,00
2.9	100	50	5	0,0	0,4	0,0	50	50	0,6	1,0	1,00	1,00
2.10	100	50	5	0,0	0,5	0,0	50	50	0,5	1,0	1,00	1,00
2.11	100	50	5	0,0	0,0	0,1	50	50	1,0	1,0	1,00	0,90
2.12	100	50	5	0,0	0,0	0,2	50	50	1,0	1,0	1,00	0,83
2.13	100	50	5	0,0	0,0	0,3	50	50	1,0	1,0	1,00	0,77
2.14	100	50	5	0,0	0,0	0,4	50	50	1,0	1,0	1,00	0,72
2.15	100	50	5	0,0	0,0	0,5	50	50	1,0	1,0	1,00	0,66

AQ _m	Mittlere Annahmequote [%]
AQ _{m,Ist}	Mittlere Ist-Annahmequote [%]
AQ _{m,Plan}	Mittlere Plan-Annahmequote [%]
BEL _m	Mittlere Belastung im Verhältnis zur Kapazität [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{AQ}	Fehleinschätzung der Annahmequote [-]
F _{PRO}	Fehleinschätzung der Produktivität [-]
F _{ZAU}	Fehleinschätzung der Auftragszeit [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
PRO _{Ist}	Ist-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
PRO _{Plan}	Plan-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
ZAU _{Ist}	Ist-Auftragszeit [Std.]
ZAU _{Plan}	Plan-Auftragszeit [Std.]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]

11 Anhang

Tabelle A 35: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.1

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT			AQ_m: 50%		ZAU_v: 0	
Verfahren	Versuchsnummer	AQ _{m,Ist} [%]	AQ _{m,Plan} [%]	F _{AQ} [-]	RSA _{mod.} [-]	RSA _{max,Per.} [-]
mAAT	2.1.1	55	50	0,1	12,0	16,9
	2.1.2	55	50	0,1	12,0	18,1
	2.1.3	55	50	0,1	12,0	15,7
	2.1.4	55	50	0,1	12,0	18,3
	2.1.5	55	50	0,1	12,0	19,7
	2.1.6	55	50	0,1	12,0	15,8
	2.1.7	55	50	0,1	12,0	17,5
	2.1.8	55	50	0,1	12,0	16,3
	2.1.9	55	50	0,1	12,0	21,3
	2.1.10	55	50	0,1	12,0	12,0
mAAT	∅	55	50	0,1	12,0	17,2

AQ _m	Mittlere Annahmequote [%]
AQ _{m,Ist}	Mittlere Ist-Annahmequote [%]
AQ _{m,Plan}	Mittlere Plan-Annahmequote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{AQ}	Fehleinschätzung der Annahmequote [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
RSA _{max,Per.}	Mittleres Periodenmaximum des Rückstands der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
RSA _{mod.}	Modellierter Rückstand der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]

Tabelle A 36: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.2

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT			AQ_m: 50%		ZAU_v: 0	
Verfahren	Versuchsnummer	AQ _{m,Ist} [%]	AQ _{m,Plan} [%]	F _{AQ} [-]	RSA _{mod.} [-]	RSA _{max,Per.} [-]
mAAT	2.2.1	60	50	0,2	24,0	27,7
	2.2.2	60	50	0,2	24,0	26,4
	2.2.3	60	50	0,2	24,0	27,9
	2.2.4	60	50	0,2	24,0	24,4
	2.2.5	60	50	0,2	24,0	25,3
	2.2.6	60	50	0,2	24,0	29,1
	2.2.7	60	50	0,2	24,0	29,7
	2.2.8	60	50	0,2	24,0	24,6
	2.2.9	60	50	0,2	24,0	24,1
	2.2.10	60	50	0,2	24,0	25,1
mAAT	∅	60	50	0,2	24,0	26,4

AQ _m	Mittlere Annahmequote [%]
AQ _{m,Ist}	Mittlere Ist-Annahmequote [%]
AQ _{m,Plan}	Mittlere Plan-Annahmequote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{AQ}	Fehleinschätzung der Annahmequote [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
RSA _{max,Per.}	Mittleres Periodenmaximum des Rückstands der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
RSA _{mod.}	Modellierter Rückstand der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]

11 Anhang

Tabelle A 37: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.3

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT			AQ_m: 50%		ZAU_v: 0	
Verfahren	Versuchsnummer	AQ _{m,Ist} [%]	AQ _{m,Plan} [%]	F _{AQ} [-]	RSA _{mod.} [-]	RSA _{max,Per.} [-]
mAAT	2.3.1	65	50	0,3	36,0	38,3
	2.3.2	65	50	0,3	36,0	33,9
	2.3.3	65	50	0,3	36,0	36,1
	2.3.4	65	50	0,3	36,0	38,8
	2.3.5	65	50	0,3	36,0	37,4
	2.3.6	65	50	0,3	36,0	36,3
	2.3.7	65	50	0,3	36,0	35,0
	2.3.8	65	50	0,3	36,0	39,5
	2.3.9	65	50	0,3	36,0	37,8
	2.3.10	65	50	0,3	36,0	36,3
mAAT	∅	65	50	0,3	36,0	36,9

AQ_m Mittlere Annahmequote [%]
 AQ_{m,Ist} Mittlere Ist-Annahmequote [%]
 AQ_{m,Plan} Mittlere Plan-Annahmequote [%]
 BKT Betriebskalendertag
 F_{AQ} Fehleinschätzung der Annahmequote [-]
 mAAT Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
 RSA_{max,Per.} Mittleres Periodenmaximum des Rückstands der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
 RSA_{mod.} Modellierter Rückstand der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
 ZAU_v Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
 ZR_m Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]

Tabelle A 38: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.4

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT			AQ_m: 50%		ZAU_v: 0	
Verfahren	Versuchsnummer	AQ _{m,Ist} [%]	AQ _{m,Plan} [%]	F _{AQ} [-]	RSA _{mod.} [-]	RSA _{max,Per.} [-]
mAAT	2.4.1	70	50	0,4	48,0	42,3
	2.4.2	70	50	0,4	48,0	46,5
	2.4.3	70	50	0,4	48,0	47,7
	2.4.4	70	50	0,4	48,0	47,7
	2.4.5	70	50	0,4	48,0	47,3
	2.4.6	70	50	0,4	48,0	47,4
	2.4.7	70	50	0,4	48,0	47,1
	2.4.8	70	50	0,4	48,0	46,7
	2.4.9	70	50	0,4	48,0	49,9
	2.4.10	70	50	0,4	48,0	46,6
mAAT	∅	70	50	0,4	48,0	46,9

AQ_m Mittlere Annahmequote [%]
 AQ_{m,Ist} Mittlere Ist-Annahmequote [%]
 AQ_{m,Plan} Mittlere Plan-Annahmequote [%]
 BKT Betriebskalendertag
 F_{AQ} Fehleinschätzung der Annahmequote [-]
 mAAT Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
 RSA_{max,Per.} Mittleres Periodenmaximum des Rückstands der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
 RSA_{mod.} Modellierter Rückstand der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
 ZAU_v Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
 ZR_m Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]

11 Anhang

Tabelle A 39: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.5

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT			AQ_m: 50%		ZAU_v: 0	
Verfahren	Versuchsnummer	AQ _{m,Ist} [%]	AQ _{m,Plan} [%]	F _{AQ} [-]	RSA _{mod.} [-]	RSA _{max,Per.} [-]
mAAT	2.5.1	75	50	0,5	60,0	57,2
	2.5.2	75	50	0,5	60,0	56,4
	2.5.3	75	50	0,5	60,0	59,4
	2.5.4	75	50	0,5	60,0	56,9
	2.5.5	75	50	0,5	60,0	58,6
	2.5.6	75	50	0,5	60,0	58,3
	2.5.7	75	50	0,5	60,0	57,6
	2.5.8	75	50	0,5	60,0	59,7
	2.5.9	75	50	0,5	60,0	54,4
	2.5.10	75	50	0,5	60,0	57,6
mAAT	∅	75	50	0,5	60,0	57,6

AQ _m	Mittlere Annahmequote [%]
AQ _{m,Ist}	Mittlere Ist-Annahmequote [%]
AQ _{m,Plan}	Mittlere Plan-Annahmequote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{AQ}	Fehleinschätzung der Annahmequote [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
RSA _{max,Per.}	Mittleres Periodenmaximum des Rückstands der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
RSA _{mod.}	Modellierter Rückstand der Fertigung (in Anzahl Aufträgen) [-]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]

Tabelle A 40: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.6

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT			AQ_m: 50%		ZAU_v: 0	
Verfahren	Versuchsnummer	PRO _{Ist} [Std./Std.]	PRO _{Plan} [Std./Std.]	F _{PRO} [-]	ΔRSA _{mod.} [1/BKT]	ΔRSA _{Ist} [1/BKT]
mAAT	2.6.1	0,9	1	0,1	0,22	0,13
	2.6.2	0,9	1	0,1	0,22	0,23
	2.6.3	0,9	1	0,1	0,22	0,26
	2.6.4	0,9	1	0,1	0,22	0,19
	2.6.5	0,9	1	0,1	0,22	0,21
	2.6.6	0,9	1	0,1	0,22	0,22
	2.6.7	0,9	1	0,1	0,22	0,24
	2.6.8	0,9	1	0,1	0,22	0,26
	2.6.9	0,9	1	0,1	0,22	0,23
	2.6.10	0,9	1	0,1	0,22	0,17
mAAT	∅	0,9	1	0,1	0,22	0,21

AQ _m	Mittlere Annahmequote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{PRO}	Fehleinschätzung der Produktivität [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
PRO _{Ist}	Ist-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
PRO _{Plan}	Plan-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
ΔRSA _{Ist}	Ist-Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
ΔRSA _{mod.}	Modellierte Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]

11 Anhang

Tabelle A 41: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.7

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT		AQ_m: 50%		ZAU_v: 0		
Verfahren	Versuchsnummer	PRO _{Ist} [Std./Std.]	PRO _{Plan} [Std./Std.]	F _{PRO} [-]	ΔRSA _{mod.} [1/BKT]	ΔRSA _{Ist} [1/BKT]
mAAT	2.7.1	0,8	1	0,2	0,80	0,7
	2.7.2	0,8	1	0,2	0,80	0,8
	2.7.3	0,8	1	0,2	0,80	0,8
	2.7.4	0,8	1	0,2	0,80	0,8
	2.7.5	0,8	1	0,2	0,80	0,8
	2.7.6	0,8	1	0,2	0,80	0,8
	2.7.7	0,8	1	0,2	0,80	0,8
	2.7.8	0,8	1	0,2	0,80	0,9
	2.7.9	0,8	1	0,2	0,80	0,9
	2.7.10	0,8	1	0,2	0,80	0,7
mAAT	∅	0,8	1	0,2	0,80	0,80

AQ _m	Mittlere Annahmehquote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{PRO}	Fehleinschätzung der Produktivität [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
PRO _{Ist}	Ist-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
PRO _{Plan}	Plan-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
ΔRSA _{Ist}	Ist-Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
ΔRSA _{mod.}	Modellierte Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]

Tabelle A 42: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.8

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT		AQ_m: 50%		ZAU_v: 0		
Verfahren	Versuchsnummer	PRO _{Ist} [Std./Std.]	PRO _{Plan} [Std./Std.]	F _{PRO} [-]	ΔRSA _{mod.} [1/BKT]	ΔRSA _{Ist} [1/BKT]
mAAT	2.8.1	0,7	1	0,3	1,66	1,6
	2.8.2	0,7	1	0,3	1,66	1,7
	2.8.3	0,7	1	0,3	1,66	1,7
	2.8.4	0,7	1	0,3	1,66	1,7
	2.8.5	0,7	1	0,3	1,66	1,7
	2.8.6	0,7	1	0,3	1,66	1,1
	2.8.7	0,7	1	0,3	1,66	1,7
	2.8.8	0,7	1	0,3	1,66	1,9
	2.8.9	0,7	1	0,3	1,66	1,7
	2.8.10	0,7	1	0,3	1,66	1,6
mAAT	∅	0,7	1	0,3	1,66	1,64

AQ _m	Mittlere Annahmehquote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{PRO}	Fehleinschätzung der Produktivität [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
PRO _{Ist}	Ist-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
PRO _{Plan}	Plan-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
ΔRSA _{Ist}	Ist-Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
ΔRSA _{mod.}	Modellierte Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]

Tabelle A 43: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.9

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT			AQ_m: 50%		ZAU_v: 0	
Verfahren	Versuchsnummer	PRO _{Ist} [Std./Std.]	PRO _{Plan} [Std./Std.]	F _{PRO} [-]	ΔRSA _{mod.} [1/BKT]	ΔRSA _{Ist} [1/BKT]
mAAT	2.9.1	0,6	1	0,4	2,74	2,7
	2.9.2	0,6	1	0,4	2,74	2,8
	2.9.3	0,6	1	0,4	2,74	2,7
	2.9.4	0,6	1	0,4	2,74	2,8
	2.9.5	0,6	1	0,4	2,74	2,8
	2.9.6	0,6	1	0,4	2,74	2,8
	2.9.7	0,6	1	0,4	2,74	2,8
	2.9.8	0,6	1	0,4	2,74	2,8
	2.9.9	0,6	1	0,4	2,74	2,9
	2.9.10	0,6	1	0,4	2,74	2,7
mAAT	∅	0,6	1	0,4	2,74	2,78

AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{PRO}	Fehleinschätzung der Produktivität [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
PRO _{Ist}	Ist-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
PRO _{Plan}	Plan-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
ΔRSA _{Ist}	Ist-Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
ΔRSA _{mod.}	Modellierte Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]

Tabelle A 44: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.10

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT			AQ_m: 50%		ZAU_v: 0	
Verfahren	Versuchsnummer	PRO _{Ist} [Std./Std.]	PRO _{Plan} [Std./Std.]	F _{PRO} [-]	ΔRSA _{mod.} [1/BKT]	ΔRSA _{Ist} [1/BKT]
mAAT	2.10.1	0,5	1	0,5	4,00	3,9
	2.10.2	0,5	1	0,5	4,00	4,1
	2.10.3	0,5	1	0,5	4,00	4,0
	2.10.4	0,5	1	0,5	4,00	4,1
	2.10.5	0,5	1	0,5	4,00	4,0
	2.10.6	0,5	1	0,5	4,00	4,1
	2.10.7	0,5	1	0,5	4,00	4,0
	2.10.8	0,5	1	0,5	4,00	4,1
	2.10.9	0,5	1	0,5	4,00	4,1
	2.10.10	0,5	1	0,5	4,00	4,0
mAAT	∅	0,5	1	0,5	4,00	4,04

AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{PRO}	Fehleinschätzung der Produktivität [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
PRO _{Ist}	Ist-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
PRO _{Plan}	Plan-Produktivität (in Vorgabestunden pro Stunde) [Std. /Std.]
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
ΔRSA _{Ist}	Ist-Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
ΔRSA _{mod.}	Modellierte Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]

11 Anhang

Tabelle A 45: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.11

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT			AQ_m: 50%		ZAU_v: 0	
Verfahren	Versuchsnummer	ZAU _{Ist} [Std.]	ZAU _{Plan} [Std.]	F _{ZAU} [-]	ΔRSA _{mod.} [1/BKT]	ΔRSA _{Ist} [1/BKT]
mAAT	2.11.1	1,00	0,90	0,1	0,2	0,1
	2.11.2	1,00	0,90	0,1	0,2	0,2
	2.11.3	1,00	0,90	0,1	0,2	0,2
	2.11.4	1,00	0,90	0,1	0,2	0,2
	2.11.5	1,00	0,90	0,1	0,2	0,2
	2.11.6	1,00	0,90	0,1	0,2	0,2
	2.11.7	1,00	0,90	0,1	0,2	0,1
	2.11.8	1,00	0,90	0,1	0,2	0,2
	2.11.9	1,00	0,90	0,1	0,2	0,2
	2.11.10	1,00	0,90	0,1	0,2	0,1
mAAT	∅	1,00	0,90	0,1	0,20	0,18

AQ _m	Mittlere Annahmehquote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{ZAU}	Fehleinschätzung der Auftragszeit [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZAU _{Ist}	Ist-Auftragszeit [Std.]
ZAU _{Plan}	Plan-Auftragszeit [Std.]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
ΔRSA _{Ist}	Ist-Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
ΔRSA _{mod.}	Modellierte Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]

Tabelle A 46: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.12

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT			AQ_m: 50%		ZAU_v: 0	
Verfahren	Versuchsnummer	ZAU _{Ist} [Std.]	ZAU _{Plan} [Std.]	F _{ZAU} [-]	ΔRSA _{mod.} [1/BKT]	ΔRSA _{Ist} [1/BKT]
mAAT	2.12.1	1,00	0,83	0,2	0,7	0,7
	2.12.2	1,00	0,83	0,2	0,7	0,7
	2.12.3	1,00	0,83	0,2	0,7	0,7
	2.12.4	1,00	0,83	0,2	0,7	0,7
	2.12.5	1,00	0,83	0,2	0,7	0,7
	2.12.6	1,00	0,83	0,2	0,7	0,7
	2.12.7	1,00	0,83	0,2	0,7	0,7
	2.12.8	1,00	0,83	0,2	0,7	0,7
	2.12.9	1,00	0,83	0,2	0,7	0,7
	2.12.10	1,00	0,83	0,2	0,7	0,6
mAAT	∅	1,00	0,83	0,2	0,69	0,68

AQ _m	Mittlere Annahmehquote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{ZAU}	Fehleinschätzung der Auftragszeit [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZAU _{Ist}	Ist-Auftragszeit [Std.]
ZAU _{Plan}	Plan-Auftragszeit [Std.]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
ΔRSA _{Ist}	Ist-Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
ΔRSA _{mod.}	Modellierte Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]

11 Anhang

Tabelle A 47: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.13

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT		AQ_m: 50%		ZAU_v: 0		
Verfahren	Versuchsnummer	ZAU _{Ist} [Std.]	ZAU _{Plan} [Std.]	F _{ZAU} [-]	ΔRSA _{mod.} [1/BKT]	ΔRSA _{Ist} [1/BKT]
mAAT	2.13.1	1,00	0,77	0,3	1,4	1,3
	2.13.2	1,00	0,77	0,3	1,4	1,4
	2.13.3	1,00	0,77	0,3	1,4	1,4
	2.13.4	1,00	0,77	0,3	1,4	1,5
	2.13.5	1,00	0,77	0,3	1,4	1,4
	2.13.6	1,00	0,77	0,3	1,4	1,4
	2.13.7	1,00	0,77	0,3	1,4	1,3
	2.13.8	1,00	0,77	0,3	1,4	1,4
	2.13.9	1,00	0,77	0,3	1,4	1,4
	2.13.10	1,00	0,77	0,3	1,4	1,3
mAAT	∅	1,00	0,77	0,3	1,35	1,39

AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{ZAU}	Fehleinschätzung der Auftragszeit [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZAU _{Ist}	Ist-Auftragszeit [Std.]
ZAU _{Plan}	Plan-Auftragszeit [Std.]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
ΔRSA _{Ist}	Ist-Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
ΔRSA _{mod.}	Modellierte Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]

Tabelle A 48: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.14

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT		AQ_m: 50%		ZAU_v: 0		
Verfahren	Versuchsnummer	ZAU _{Ist} [Std.]	ZAU _{Plan} [Std.]	F _{ZAU} [-]	ΔRSA _{mod.} [1/BKT]	ΔRSA _{Ist} [1/BKT]
mAAT	2.14.1	1,00	0,72	0,4	2,1	2,1
	2.14.2	1,00	0,72	0,4	2,1	2,2
	2.14.3	1,00	0,72	0,4	2,1	2,2
	2.14.4	1,00	0,72	0,4	2,1	2,2
	2.14.5	1,00	0,72	0,4	2,1	2,2
	2.14.6	1,00	0,72	0,4	2,1	2,2
	2.14.7	1,00	0,72	0,4	2,1	2,1
	2.14.8	1,00	0,72	0,4	2,1	2,2
	2.14.9	1,00	0,72	0,4	2,1	2,3
	2.14.10	1,00	0,72	0,4	2,1	2,1
mAAT	∅	1,00	0,72	0,4	2,13	2,17

AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{ZAU}	Fehleinschätzung der Auftragszeit [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZAU _{Ist}	Ist-Auftragszeit [Std.]
ZAU _{Plan}	Plan-Auftragszeit [Std.]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
ΔRSA _{Ist}	Ist-Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
ΔRSA _{mod.}	Modellierte Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]

11 Anhang

Tabelle A 49: Ergebnisse aus Versuchsreihe 2.15

Parameter						
Fertigungssteuerung: Referenzzustand			Störungen: Keine			
ZR_m: 5 BKT		AQ_m: 50%		ZAU_v: 0		
Verfahren	Versuchsnummer	ZAU _{Ist} [Std.]	ZAU _{Plan} [Std.]	F _{ZAU} [-]	ΔRSA _{mod.} [1/BKT]	ΔRSA _{Ist} [1/BKT]
mAAT	2.15.1	1,00	0,66	0,5	3,0	2,9
	2.15.2	1,00	0,66	0,5	3,0	3,1
	2.15.3	1,00	0,66	0,5	3,0	3,1
	2.15.4	1,00	0,66	0,5	3,0	3,1
	2.15.5	1,00	0,66	0,5	3,0	3,1
	2.15.6	1,00	0,66	0,5	3,0	3,0
	2.15.7	1,00	0,66	0,5	3,0	3,0
	2.15.8	1,00	0,66	0,5	3,0	3,0
	2.15.9	1,00	0,66	0,5	3,0	3,1
	2.15.10	1,00	0,66	0,5	3,0	2,9
mAAT	∅	1,00	0,66	0,5	3,00	3,02

AQ _m	Mittlere Annahmquote [%]
BKT	Betriebskalendertag
F _{ZAU}	Fehleinschätzung der Auftragszeit [-]
mAAT	Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung
ZAU _v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZAU _{Ist}	Ist-Auftragszeit [Std.]
ZAU _{Plan}	Plan-Auftragszeit [Std.]
ZR _m	Mittlere Kundenrückmeldezeit [BKT]
ΔRSA _{Ist}	Ist-Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]
ΔRSA _{mod.}	Modellierte Rückstandssteigerung der Fertigung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [1/BKT]

Schriftenreihe

Band 1

Koch, Jens Bodo: Unterstützung der schiffbaulichen Projektierung durch Repräsentation von Erfahrungswissen, 2004.

Band 2

Meyer, Sven: Flexible Gruppenarbeit in der Auftragsfertigung, 2004.

Band 3

Joswig, Dirk: Untersuchungen zum Zerspanverhalten weicher Elastomerwerkstoffe, 2005.

Band 4

Kerse, Nils: Unterstützung der schiffbaulichen Produktentstehung durch Einsatz von Virtual Reality (VR)-Technologien, 2007.

Band 5

Kurzewitz, Mathias: Kompetenzentwicklung als Element erfolgreicher Strategieumsetzung – dargestellt am Beispiel des Schiffbaus, 2007.

Band 6

Davids, Niko: Workflow-Management in Produktentwicklungsprojekten der Investitionsgüterindustrie, 2008.

Band 7

Möller, Carsten: Untersuchungen zum Drehen von gesinterten WC-Co-Hartmetallwalzringen, 2009.

Band 8

Gotsch, Falko: Untersuchungen zum Zerspanverhalten von Elastomerschäumen mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Fertigung von Feder-Dämpfer-Bauteilen, 2009.

Band 9

Neumann, Lutz: Risikomanagement bei der Gestaltung von Unternehmenskooperationen – untersucht am Beispiel der Investitionsgüterindustrie, 2009.

Band 10

Sellmer, Dirk: Untersuchungen zur Verbesserung des Arbeitsergebnisses beim Vollbohren unter besonderer Berücksichtigung der Prozesskräfte und der Spanbildung, 2010.

Band 11

Eggers, Daniel: Entwicklung von Dienstleistungsportfolios bei Investitionsgüterherstellern – dargestellt am Beispiel der maritimen Industrie, 2009.

Band 12

Kindler, Jörg: Werkstückqualität und Standzeitoptimierung von Zerspanwerkzeugen bei der Umrissbearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, 2010.

Band 13

Frömming, Hanno: Zerspanung von WC-Co-Hartmetall im unterbrochenen Schnitt, 2011.

Band 14

Schweitzer, Thomas: Nutzungsgradsteigerung verketteter Produktionslinien, 2011.

Band 15

Wagner, Lars Arne: Szenariobasierte Planung und Steuerung mit Simulation im Schiffbau, 2011.

Band 16

Schäfer, Christoph: Einsatzmodell zur systematischen Nutzung von Virtueller Realität in der Unikatproduktion, 2012.

Band 17

Hartmann, Dirk: Delamination an Bauteilkanten beim Umrissfräsen kohlenstofffaser-verstärkter Kunststoffe, 2012.

Band 18

Kuyumcu, Arif: Modellierung der Termintreue in der Produktion, 2013.

Band 19

Czumanski, Thomas: Handlungsorientierte Analyse der Arbeitsproduktivität in der Serienproduktion, 2013.

Band 20

Schütte, Christoph: Bohren und Hobeln von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Schneide-Faser-Lage, 2014.

Band 21

Wandt, Robert: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus, 2014.

Band 22

Eichenseer, Christiane: Beschichtung, thermomechanische Charakterisierung und Spannungsanalyse von Schneidkeramik, 2014.

Band 23

Heinig, Martin: Nutzung von Virtuellen Technologien für die Montageplanung von Unikaten, 2015.

Band 24

Körkel, Gregor K.: Zerspanbarkeitsbewertung von Faserverbundkunststoffen bei der Fräsbearbeitung dünnwandiger Bauteile in der Großserie, 2015.

Band 25

Ramirez Martinez, Juan A.: Flexible Automated Assembly Systems for Large CFRP-Structures using Geometrical and Force Information, 2015.

Band 26

Dose, Frank: Methode zur wissensbasierten Prozessentwicklung - Ein Ansatz für die Berücksichtigung sich wandelnder Teilsysteme beim Bohren von Schichtverbunden, 2015.

Band 27

Trzyna, Daniel: Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion, 2015.

Band 28

Griefahn, Dominik M.: Geometrieprüfung innerer Strukturen von Faserverbund-Sandwichbauteilen, 2015.

Band 29

Borrmann, Christof: Adaptive Montageprozesse für CFK-Großstrukturen mittels Offline-Programmierung von Industrierobotern, 2016.

Band 30

Klingelhöller, Christian: Trennschleifen von CFK-Schalenbauteilen mit räumlich gekrümmten Konturen, 2016.

Band 31

Titov, Fedor: Technologiegestützte Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter, 2016.

Band 32

Tietze, Florian: Analyse und Verbesserung der Arbeitsproduktivität in der Unikatproduktion, 2017.

Band 33

Geis, Tobias: Bearbeitungsstrategien zur Zerspanung von Faser-Verbund-Honeycomb-Sandwich, 2017.

Band 34

Koppold, Nico: Kapazitätsplanung und -steuerung in der Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern, 2017.

Band 35

Halata, Philipp S.: Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion, 2018.

Band 36

Brüggemann, Felix: Bauteilqualität und Werkzeugverschleiß beim Fräsen von CFK-Gelege unter räumlichen Eingriffsbedingungen, 2018.

Band 37

Benter, Martin: Analyse von Bewegungsabläufen mit 3D-Kameras, 2018.

Band 38

Koch, Christoph: Wertstromanalyse und -design für Auftragsfertiger, 2018.

Band 39

Cordes, Marcel: Modellierung von Bahngenaugigkeit und dynamischer Stabilität beim robotergeführten Fräsen, 2019.

Band 40

Piontek, Andreas: Modellierung der Termintreue im Auftragsdurchlauf, 2020.

Band 41

Grabner, Constantin: Methodengestütztes Produktivitätsmanagement. Entwicklung eines datenbasierten Vorgehens, 2020.

Band 42

Glöckner, Robert: Entwicklung eines Gesamtmodells der Arbeitsproduktivität und der logistischen Zielgrößen, 2020.

Band 43

Schröder, Henrik: Kompetenzentwicklung in der Montage mit Hilfe virtueller Technologien, 2020.

Band 44

Engehausen, Friederike: Modellierung und Auslegung der Reihenfolgebildung mit Rüstfamilien, 2021.

Band 45

Sikorra, Jan Niklas: Frühzeitige Aufwands- und Termineinschätzung der schiffbaulichen Unikatproduktion, 2021.

Band 46

Haux, Moritz A.: Modellierung von Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion, 2021.

Band 47

von Wenserski, Robert: Helixfräsen und Bohren von laseradditiv gefertigten Bauteilen aus Titan für Luftfahrtanwendungen, 2021.

Band 48

Meluzov, Nikolaj: Informationsmanagement für ein digitales Instandhaltungsassistenzsystem, 2022.

Band 49

Rost, Jan Robert: Digitale Assistenzsysteme für kollaboratives Arbeiten in der Unikatproduktion, 2023.

Band 50

Steenwerth, Philipp: Analyse und Optimierung von Suchvorgängen in der industriellen Produktion, 2023.

Band 51

Brosche, Justus: Nutzung von Motion-Capture-Technologien zur individuellen Ergonomieanalyse in der Produktion, 2023.

Band 52

Mehnen, Jan: Modellgestützte Berechnung der thermischen Belastung bei der Zerspanung von unidirektionalem CFK, 2023.

Band 53

Mundt, Christopher: Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung, 2024.