

# Modellierung der Termintreue im Auftragsdurchlauf

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
Andreas Piontek

aus  
Gdynia

2020

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Tag der mündlichen Prüfung: 14. September 2020



## **Wissen schafft Innovation**

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze

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

Anschrift:

Technische Universität Hamburg-Harburg

Institut für Produktionsmanagement und -technik

Denickestraße 17

21073 Hamburg

Band 40:

Andreas Piontek

Modellierung der Termintreue im Auftragsdurchlauf

1. Auflage

Hamburg 2020

ISSN 1613-8244

Copyright Andreas Piontek 2020

<https://doi.org/10.15480/882.3175>

<https://orcid.org/0000-0002-7476-7824>

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand zu großen Teilen während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg.

Meinem Doktorvater und Leiter des Instituts Herrn Professor Hermann Lödding danke ich für seine außerordentlich gute fachliche Betreuung, sein stets gelassenes Gemüt und seine prägende Art der Führung. Herrn Professor Peter Nyhuis danke ich über die Erstellung des Zweitgutachtens hinaus für sein Interesse an meiner Arbeit und die wertvollen Hinweise zu dieser. Herrn Prof. Thorsten Schüppstuhl danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Herrn Dr. Axel Friedewald danke ich für seinen enorm hohen Einsatz und seine besondere Art, mit der er dem IPMT einen einzigartigen Charme verleiht. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Technischen Universität Hamburg danke ich für die hervorragenden Rahmenbedingungen und die Förderung der Forschung.

Meinen ehemaligen Kollegen danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre, die mir stets positiv in Erinnerung bleiben wird. Dabei möchte ich insbesondere Herrn Dr. Christoph Koch und Frau Friederike Engehausen hervorheben, mit denen ich mir die überwiegende Zeit ein Büro geteilt habe. Danke für die vielen Lacher, die kreativen fachlichen Diskussionen und die noch kreativeren nicht-fachlichen Diskussionen – es war mir eine Ehre, mit euch das Büro zu teilen. Herrn Dr. Philipp Halata danke ich für unzählige motivierende Sporteinheiten und den ebenso motivierenden qualitativ hohen Benchmark, den er mit seiner Dissertation gesetzt hat.

Mein persönlicher Dank gilt an dieser Stelle meinen Freunden, die mich auch während der Abschlussphase meiner Promotion nicht nur mit Ablenkung und Unterhaltung höchster Güteklasse verwöhnt, sondern auch die eine oder andere Absage meinerseits vertragen haben.

Meiner Mutter danke ich für ihre unermüdliche Unterstützung und bedingungslose Liebe und meinem Vater für das immerwährende Betonen der Bedeutung von Bildung und den unbändigen Willen seinen Kindern eine bessere Ausgangssituation im Leben zu ermöglichen.

Um jede Facette der Dankbarkeit und Wertschätzung gegenüber meiner Ehefrau Sónia zu erklären, müsste ich mehrere Seiten füllen. Daher möchte ich abschließend nur einige wenige nennen: Ihre Geduld, ihr Verzicht, ihre motivierenden Worte, ihr Perfektionismus, ihre Ausdauer, ihre Fürsorge, ihr großes Herz und ihre tiefe Verbundenheit waren und sind unerreichbar.

Hamburg im November 2020

Andreas Piontek

## **Kurzfassung**

Unbestritten ist die Termintreue die aktuell dominierende logistische Zielgröße. Eine hohe Termintreue steht für Verlässlichkeit und wirkt sich positiv auf den unternehmerischen Erfolg aus. Dennoch fällt es vielen Unternehmen schwer, eine hohe Termintreue zu erzielen. Einer der Gründe hierfür ist das fehlende Verständnis für die Wirkung von Maßnahmen der Fertigungssteuerung.

Die Termintreue ist von zwei Größen abhängig: dem Rückstand und der Reihenfolgeabweichung. Die vorliegende Arbeit zeigt, welches Potenzial die Reihenfolgebildung besitzt, um Abweichungen im Zugang auszugleichen. Hierzu wird zunächst die Reihenfolgeabweichung im Abgang für ein Arbeitssystem in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen modelliert. Die Einflussgrößen sind die Zugangsreihenfolgeabweichung, der Bestand am Arbeitssystem, die Anzahl der Maschinen an einem Arbeitssystem sowie die verwendete Reihenfolgeregel. Im zweiten Schritt wird das Modell auf beliebig komplexe Materialflüsse erweitert. Für beide Fälle liegt der Fokus auf einer Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin.

Neben der intensiven Betrachtung der Reihenfolgebildung zeigt die Arbeit den Einfluss des Rückstands im Zugang auf den Rückstand im Abgang eines Arbeitssystems sowie den Einfluss eines Rückstands im Zugang auf Rückstand und Reihenfolgeabweichungen in komplexen Materialflüssen.

Eine ausführliche Simulationsstudie untersucht und verifiziert die hohe Modellierungsgüte der entwickelten Modelle. Die Ergebnisse zeigen, dass die Modelle Unternehmen dabei unterstützen können, das Potenzial für die Verbesserung der Termintreue durch eine Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin zu quantifizieren. Abschließend bestätigt die Anwendung bei zwei Unternehmen die Praxistauglichkeit der erarbeiteten Modelle.

## **Abstract**

Without question schedule reliability currently dominates amongst the logistic targets in operations management. High schedule reliability represents trustworthiness and has a positive impact on the corporate success. However, many companies struggle to achieve high schedule reliability and one of the reasons is the missing knowledge about the effects of production control measures.

Schedule reliability is determined by two factors: backlog and sequence deviation. This work shows how sequencing can damp the effect of input sequence deviations. First, it is shown how the output sequence deviation can be modelled for one work station. The input variables are the input sequence deviation, the workstation's WIP, the number of machines at the workstation and the applied sequencing rule. The second step is to expand the model to a complex material flow with several workstations. For both scenarios the focus is on sequencing by earliest operation due date.

Besides intensively modelling the effect of sequencing, the work investigates the impact of backlogs in the input of a workstation on its backlog in the output. Moreover, it shows the effect of backlog on workstations' input sequence deviations within complex material flows.

An extensive simulation study investigates and verifies the high quality of the developed model. Thus, the models can support companies to quantify the potential to improve schedule reliability by following a sequencing by earliest operation due date. Finally, the application of the model at two different companies confirms its practicality.

# Inhalt

<b>Verzeichnis der im Text verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>VI</b>
<b>Verzeichnis der Bilder</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	2
<b>2 Grundlagen und Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
2.1 Grundlagen und Begriffsdefinitionen	5
2.2 Der betriebliche Auftragsdurchlauf	15
2.3 Beschreibung und Analyse der Terminabweichung im Auftragsdurchlauf	18
2.4 Bisherige Forschung zur Modellierung der Termintreue	20
2.5 Zusammenfassung und Defizite bisheriger Modellierungsansätze	27
<b>3 Modellierung der Termintreue im Auftragsdurchlauf</b>	<b>29</b>
3.1 Erweiterung der Definition der Reihenfolgeabweichung	29
3.2 Modellierung der reihenfolgebedingten Terminabweichung	31
3.2.1 Reihenfolgebedingte Terminabweichung für ein Arbeitssystem	31
3.2.2 Reihenfolgebedingte Terminabweichung für Fertigungsbereiche	38
3.2.3 Abschätzung der reihenfolgebedingten Termintreue	46
3.2.4 Bewertung der Reihenfolgeeinhaltung	50
3.3 Einfluss des Rückstands im Zugang auf die Terminabweichung im Abgang	52
3.3.1 Einfluss des Rückstands im Zugang auf die rückstandsbedingte Terminabweichung eines Arbeitssystems	53
3.3.2 Einfluss des Rückstands im Zugang auf die rückstandsbedingte Terminabweichung eines Fertigungsbereichs	59
3.3.3 Einfluss des Rückstands auf die Reihenfolgeabweichung im Zugang der Nachfolger-Arbeitssysteme	60
3.4 Abschätzung einer resultierenden Terminabweichungsverteilung	62
<b>4 Simulative Evaluierung der entwickelten Modelle</b>	<b>64</b>
4.1 Beschreibung des Simulationsmodells	64
4.2 Evaluierung des Modells für die reihenfolgebedingte Terminabweichung	66
4.2.1 Reihenfolgebedingte Terminabweichung für ein Arbeitssystem	66
4.2.2 Reihenfolgebedingte Terminabweichung für Fertigungsbereiche	75
4.2.3 Reihenfolgebedingte Termintreue	82
4.3 Evaluierung des Einflusses des Rückstands im Zugang auf die rückstandsbedingte Terminabweichung	85
4.3.1 Rückstandsbedingte Terminabweichung eines Arbeitssystems	85
4.3.2 Rückstandsbedingte Terminabweichung eines Fertigungsbereichs	89

---

4.3.3	Simulationsexperimente zum Einfluss des Rückstands auf die Reihenfolgeabweichung im Zugang nachfolgender Arbeitssysteme	92
4.4	Evaluierung der Abschätzung einer resultierenden Terminabweichungsverteilung	98
4.4.1	Resultierende Terminabweichungsverteilung für ein Arbeitssystem	98
4.4.2	Resultierende Terminabweichungsverteilung für Fertigungsbereiche	101
<b>5</b>	<b>Erkenntnisse der Modellierung</b>	<b>105</b>
<b>6</b>	<b>Anwendungsbeispiel zur Analyse und Verbesserung der Termintreue</b>	<b>107</b>
6.1	Anwendungsbeispiel für ein Arbeitssystem	107
6.2	Anwendungsbeispiel für eine Fertigung	112
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>125</b>
7.1	Zusammenfassung	125
7.2	Ausblick	126
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>127</b>
	<b>Anhang</b>	<b>130</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>157</b>
	<b>Schriftenreihe</b>	<b>158</b>

# Verzeichnis der im Text verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

## Allgemeine Merkmale (Index oder nachführende Bezeichnung)

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>
AB	abgangsbezogener Wert
AS	Arbeitssystem
B	bestandsbezogener Wert
FE	Fertigungsbereich
i, j, k	allgemeine Laufvariablen
Ist	Ist-Wert einer Größe
m	Mittelwert
max	maximaler Wert
mg	mittlerer gewichteter Wert
min	minimaler Wert
mod	modellierter Wert
OG	Obergrenze
Plan	Plan-Wert einer Größe
RA	reihenfolgeabweichungsbezogener Wert
RS	rückstandsbezogener Wert
s	Standardabweichung
sim	simulierter Wert
UG	Untergrenze
v	Variationskoeffizient einer Größe
ZU	zugangsbezogener Wert

## Dimensionsangaben

<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
BKT	Betriebskalendertage
Std	Stunden

## Formelzeichen

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
A	–	Auslastung
AB	Stunden	Abgang
ABA	–	Abgang in Anzahl Aufträgen
AnzAuf	–	Anzahl Aufträge
AnzAVG	–	Anzahl Arbeitsvorgänge im Betrachtungszeitraum
AnzÜA	–	Anzahl übergangener Aufträge
B	Stunden	Bestand
BA	–	Bestand in Anzahl Aufträgen
h	–	Häufigkeit
L	Stunden/Tag	Leistung
LA	–/Tag	Leistung in Anzahl Aufträgen pro Tag

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
LBG	–	Lieferbereitschaftsgrad
LT	–	Liefertreue
LTA	Tage	Lieferterminabweichung
LTE	–	Liefertermineinhaltung
MFK	–	Materialflusskoeffizient
P	Tage	Periodenlänge
R	Tage	Reichweite
RA	Stunden	Reihenfolgeabweichung (mit Auftragszeit gewichtet)
RAA	–	Reihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen
RD	–	Reihenfolgedisziplin
Rg	Stunden	Rang (mit Auftragszeit gewichtet)
RgA	–	Rang in Anzahl Aufträgen
RS	Stunden	Rückstand
RSA	–	Rückstand in Anzahl Aufträgen
TA	Tage	Terminabweichung
TAA	Tage	Terminabweichung im Abgang
TAB	–	Termin Bearbeitungsanfang Auftrag (Auftragsfreigabe)
TAE	–	Termin Bearbeitungsende Auftrag
TAR	Tage	relative Terminabweichung
TAZ	Tage	Terminabweichung im Zugang
TE	–	Termineinhaltung
TT	–	Termintreue
TZU	–	Zugangszeitpunkt
ZAU	Stunden	Auftragszeit (Vorgabestunden)
ZDF	Tage	Durchführungszeit
ZDL	Tage	Durchlaufzeit
ZU	Stunden	Zugang
ZUA	–	Zugang in Anzahl Aufträgen
ZW	Stunden	Wartezeit

### **Abkürzungen**

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
FIFO	First-in-first-out
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
KOZ	Kürzeste Operationszeit
TUHH	Technische Universität Hamburg
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VDI	Verband Deutscher Ingenieure

## Verzeichnis der Bilder

Bild 1:	Aufbau der Arbeit	4
Bild 2:	Logistische Zielgrößen	6
Bild 3:	Modell der Fertigungssteuerung	6
Bild 4:	Trichtermodell und Durchlaufdiagramm	7
Bild 5:	Produktionskennlinien	8
Bild 6:	Definition der Terminabweichungsgrößen	10
Bild 7:	Definition von Liefertreue, Liefertermineinhaltung und Lieferbereitschaftsgrad	11
Bild 8:	Rückstand im Durchlaufdiagramm	12
Bild 9:	Logistisches Modell des Auftragsdurchlaufs	16
Bild 10:	Terminregelkarte als Hilfsmittel zur Steuerung im Auftragsdurchlauf	19
Bild 11:	Darstellung eines Order Progress Diagrams	20
Bild 12:	Terminkennlinie nach Yu	21
Bild 13:	Terminabweichungsanteile im Durchlaufdiagramm	23
Bild 14:	Ableitung einer Terminkennlinie in Abhängigkeit des mittleren Rückstands	24
Bild 15:	Terminkennlinien	25
Bild 16:	Einflussgrößen der Terminabweichung im Abgang	26
Bild 17:	Definition der Reihenfolgeabweichung	30
Bild 18:	Aufteilung der Durchlaufzeit	30
Bild 19:	Darstellung des minimalen Abgangs im Durchlaufdiagramm	34
Bild 20:	Fallunterscheidung zur Prognose der Reihenfolgeabweichung	37
Bild 21:	Grundidee der Modellierung im Auftragsdurchlauf	39
Bild 22:	Zusammenhang zwischen der Leistung einer Fertigung und ihrer Arbeitssysteme	44
Bild 23:	Abschätzung der negativen Terminabweichung	47
Bild 24:	Beispiel für die Verteilung der negativen Terminabweichung (konstante TAA <sup>-</sup> )	48
Bild 25:	Beispiel für die Verteilung der negativen Terminabweichung (verteilte TAA <sup>-</sup> )	49
Bild 26:	Exemplarische Auswertung der Reihenfolgeeinhaltung eines Arbeitssystems	52
Bild 27:	Zusammenhang zwischen Rückstand im Zugang und Abgang im Durchlaufdiagramm	53
Bild 28:	Zusammenhang zwischen dem Rückstand im Zugang und dem Bestand	54
Bild 29:	Rückstand im Zugang in der Produktionskennlinie	55
Bild 30:	Rückstand im Abgang und Zugang in der Produktionskennlinie	56
Bild 31:	Grenzen des Rückstands im Abgang über der Zeit	58
Bild 32:	Beispiel für die rückstandsbedingte Reihenfolgeabweichung im Zugang	60
Bild 33:	Rückstandsbedingte Reihenfolgeabweichung im Histogramm	61
Bild 34:	Einstellungen und Zusammenhänge innerhalb des Simulationsmodells	66
Bild 35:	Vergleich der modellierten und gemessenen Reihenfolgeabweichung (ein Arbeitssystem, Versuchs-ID 68)	68
Bild 36:	Vergleich der modellierten und gemessenen Reihenfolgeabweichungsverteilung (ein Arbeitssystem, Versuchs-ID 68)	69
Bild 37:	Vergleich der modellierten und gemessenen reihenfolgebedingten Terminabweichung (ein Arbeitssystem, Versuchs-ID 68)	70

---

Bild 38:	Box-Plots für den Fehler der modellierten Reihenfolgeabweichung (ein Arbeitssystem, Versuchsreihe 12)	71
Bild 39:	Vergleich der Reihenfolgeabweichungen für Arbeitssysteme mit unterschiedlicher Maschinenanzahl (ein Arbeitssystem)	73
Bild 40:	Gemessene und modellierte Termineinhaltung über dem Bestand (ein Arbeitssystem)	74
Bild 41:	Materialfluss innerhalb der Simulationsversuche	75
Bild 42:	Vergleich der gemessenen und der mit individuellen Durchführungszeiten modellierten Reihenfolgeabweichung (Gleichung (37), Versuchs-ID 13)	77
Bild 43:	Verteilungen der gemessenen und modellierten kumulierten Reihenfolgeabweichung (Fertigungsbereiche, Versuchs-ID 13)	77
Bild 44:	Modellgüte bei unterschiedlichen Auftragszeitverteilungen (Fertigungsbereich)	79
Bild 45:	Vergleich der gemessenen und modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichung (Fertigungsbereich, Versuchs-ID 13)	80
Bild 46:	Gemessene und modellierte reihenfolgebedingte Termineinhaltung über dem mittleren Bestand (Fertigungsbereich)	81
Bild 47:	Gemessene und modellierte reihenfolgebedingte Termineinhaltung über dem mittleren Bestand bei Eilaufträgen (Fertigungsbereich)	81
Bild 48:	Kumulierte Verteilung der reihenfolgebedingten Terminabweichung mit und ohne Abschätzung der negativen Werte	83
Bild 49:	Vergleich der modellierten und gemessenen Verteilung inkl. geschätzter negativer $TAA_{RA}$ (Versuchs-ID 40, S. 146)	83
Bild 50:	Gemessene und modellierte reihenfolgebedingte Termintreue für drei unterschiedliche Termintoleranzen	84
Bild 51:	Auswirkungen des Rückstands im Zugang an einem Arbeitssystem	86
Bild 52:	Untergrenze des Rückstands und gemessener Rückstand bei unterschiedlicher Kapazitätsflexibilität	88
Bild 53:	Verlauf des Rückstands bei unterschiedlichen Rückständen im Zugang des Fertigungsbereichs	90
Bild 54:	Materialfluss und Rückstandsverteilung an Arbeitssystem 7	91
Bild 55:	Ausschnitt des Materialflusses und Rückstandsverteilung der Fertigung	91
Bild 56:	Simulationsaufbau für die Ermittlung der rückstandsbedingten Reihenfolgeabweichung im Zugang	93
Bild 57:	Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang eines Arbeitssystems bei unterschiedlichen Werten des mittleren Rückstands eines Vorgängers	94
Bild 58:	Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang eines Arbeitssystems bei unterschiedlich streuendem Rückstand eines Vorgängers	95
Bild 59:	Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang eines Arbeitssystems bei variierendem Anteil am Zugang durch die Vorgänger	97
Bild 60:	Vergleich der simulierten und modellierten Terminabweichung (Versuchs-ID 11)	100
Bild 61:	Vergleich der simulierten und modellierten Terminabweichung (Versuchs-ID 14)	103
Bild 62:	Zugangsterminabweichung des Beschriftungslasers	107
Bild 63:	Terminabweichungsverteilungen im Abgang des Beschriftungslasers	108
Bild 64:	Analyse der Reihenfolgebildung am Beschriftungslaser	109
Bild 65:	Vergleich der modellierten und tatsächlichen reihenfolgebedingten Terminabweichung	110
Bild 66:	Vergleich der modellierten und tatsächlichen Terminabweichung für den Beschriftungslaser	111

---

Bild 67: Vereinfachter Materialfluss der betrachteten Fertigung	112
Bild 68: Übersicht der Terminabweichung im Auftragsdurchlauf	114
Bild 69: Reihenfolge- und rückstandsbedingte Terminabweichung der Fertigung	115
Bild 70: Modellierte reihenfolgebedingte Terminabweichung der Fertigung	116
Bild 71: Tatsächliche und modellierte Terminabweichung im Abgang der Fertigung	117
Bild 72: Termineinhaltungskennlinie für die Fertigung	118
Bild 73: Reihenfolge- und rückstandsbedingte Terminabweichung des Fertigungsbereichs nach 50 % der Arbeitsvorgänge	119
Bild 74: Modellierte Reihenfolgebedingte Terminabweichung des Fertigungsbereichs nach 50 % der Arbeitsvorgänge	120
Bild 75: Tatsächliche und modellierte Terminabweichungsverteilung nach 50 % der Arbeitsvorgänge	121
Bild 76: Modellierte reihenfolgebedingte Terminabweichung im Abgang für die letzten 50 % der Arbeitsvorgänge	122
Bild 77: Tatsächliche und modellierte Terminabweichungsverteilung letzte 50 % der Arbeitsvorgänge	123
Bild 78: Versuchs-ID 11 mit 25 % stärkerer Streuung der geschätzten Rückstandsverteilung (25 % Abweichung von der tatsächlichen Rückstandsverteilung)	153
Bild 79: Versuchs-ID 14, mit 25 % stärkerer Streuung der geschätzten Rückstandsverteilung (25 % Abweichung von der tatsächlichen Rückstandsverteilung)	156

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergabe der Plan- und Ist-Ränge	13
Tabelle 2:	Vergabe der gewichteten Plan- und Ist-Ränge	14
Tabelle 3:	Beispiel für die Verteilung der negativen Terminabweichung	49
Tabelle 4:	Algorithmus zur Berechnung der Anzahl übersprungener Aufträge	51
Tabelle 5:	Algorithmus zur Berechnung der Anzahl der erfahrenen Verzögerungen	51
Tabelle 6:	Beispiel für die Auswirkung des Rückstands im Zugang auf den Rückstand im Abgang	56
Tabelle 7:	Einflussgrößen und Ausprägungen für die Evaluierung des Modells für ein Arbeitssystem	67
Tabelle 8:	Fehleranalyse des Modells der Reihenfolgeabweichung (ein Arbeitssystem, Versuchsreihe 12)	71
Tabelle 9:	Fehleranalyse des Modells der reihenfolgebedingten Terminabweichung (ein Arbeitssystem, Versuchsreihe 12)	72
Tabelle 10:	Einflussgrößen und Ausprägungen für die Evaluierung des Modells für mehrere Arbeitssysteme	76
Tabelle 11:	Qualitative Bewertung der Modellgleichungen	82
Tabelle 12:	Versuchsergebnisse zu Bild 51 a (Plan-Bestand 8 Stunden)	86
Tabelle 13:	Versuchsparameter zur Untersuchung der rückstandsbedingten Reihenfolgeabweichung	93
Tabelle 14:	Variierte Einflussgrößen für die Versuche zur Kopplung der Terminabweichungsanteile	99
Tabelle 15:	Variierte Einflussgrößen für die Versuche zur Kopplung der Terminabweichungsanteile	101



# 1 Einleitung

Aufträge pünktlich fertigzustellen und insbesondere auszuliefern ist für viele Industriebetriebe das übergeordnete logistische Ziel. Verspätet fertiggestellte Aufträge führen zu erhöhten Lieferkosten (z. B. für Expresslieferungen) oder zu Unbehagen und höheren Kosten bei externen sowie internen Kunden (z. B. durch Stillstand einer Montagelinie oder erzwungene Abweichungen von der geplanten Produktionsreihenfolge). Unter den logistischen Zielgrößen eines Unternehmens hat die Liefer- bzw. Termintreue daher eine besondere Stellung (Nyhuis et al., 2016, S. 9, Schuh & Stich, 2013, S. 23). Dies bestätigen auch viele Veröffentlichungen, die zeigen, dass Unternehmen mit hoher Liefertreue einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil genießen (u. a. Geissbauer, Roussel, Schrauf & Strom, 2012, S. 9, Jodlbauer & Gmainer, 2006, S. 44). Dennoch gelingt es Unternehmen trotz der großen Bedeutung oftmals nicht, eine hohe Termintreue durch eine geeignete Konfiguration der Produktionsplanung und -steuerung zu erzielen (Schuh & Stich, 2013, S. 23f.).

Die vorliegende Arbeit stellt ein Modell vor, das die Wirksamkeit der Reihenfolgebildung für eine hohe Termintreue aufzeigt. Mit dem entwickelten Modell können Unternehmen quantifizieren, in welchem Maße sie die Termintreue mit einer terminorientierten Reihenfolgebildung verbessern können, ohne hierzu aufwendige Simulationsexperimente durchführen zu müssen.

## 1.1 Motivation

Produktionsleiter stehen vor der Aufgabe, ihre Produktion im Zielkonflikt zwischen einer hohen Auslastung, niedrigen Beständen, kurzen Durchlaufzeiten und einer hohen Termintreue zu positionieren. Unternehmen können hierbei auf analytische Modelle zurückgreifen, die die Zusammenhänge zwischen den Stell-, Regel- und Zielgrößen erklären (Lödding, 2016, S. 43, Nyhuis & Wiendahl, 2012, S. 6ff., Hopp & Spearman, 1996, S. 201ff.). Für die Termintreue zeigt sich der Konflikt bei der Auslegung eines geeigneten Lieferzeitpuffers: Ein großzügiger Lieferzeitpuffer führt zu längeren Lieferzeiten und höheren Fertigwarenbeständen. Dagegen wirkt sich ein kleiner Lieferzeitpuffer zwar positiv auf die Lieferzeit und die Fertigwarenbestände aus, erfordert jedoch einen höheren Steuerungsaufwand in der Produktion. Termine auf Arbeitsvorgangsebene müssen strenger eingehalten werden und verringern den Freiraum in der Fertigungssteuerung. Zudem besteht ein größeres Risiko, Aufträge verspätet auszuliefern, was ggf. empfindliche Strafzahlungen nach sich zieht.

Eine wichtige Aufgabe für die Erreichung einer hohen Termintreue ist die Reihenfolgebildung. Studien zeigen unterschiedliche Ergebnisse zur Wahrnehmung und Umsetzung der Reihenfolgebildung in Unternehmen. Eine aktuelle Studie von vier Instituten für Produktionsmanagement zeigt zwar, dass ein Großteil der Unternehmen die hohe Bedeutung der Reihenfolgebildung er-

kennt, jedoch nur ca. jedes fünfte Unternehmen das Potenzial einer Reihenfolgebildung nach Termin nutzt, um Terminabweichungen im Zugang auszugleichen (Nyhuis et al., 2018, S. 19). Drei Viertel der Unternehmen schätzen der Studie zufolge die Kenntnisse ihrer Mitarbeiter zu den Auswirkungen von Steuerungsmethoden maximal als durchschnittlich ein (Nyhuis et al., 2018, S. 23). Demgegenüber zeigt die Untersuchung der Produktion am Standort Deutschland durch den VDMA und die RWTH Aachen, dass zwei Drittel der befragten Unternehmen den Liefertermin als Reihenfolgekriterium wählen und somit eine hohe Termintreue unterstützen (Schuh & Stich, 2013, S. 26). Wie konsequent die Mitarbeiter die vorgegebene Reihenfolgeregel einhalten, wird jedoch in vielen Fällen nicht erfasst. Oftmals mangelt es an der Durchsetzung der Reihenfolgebildung in der Fertigung. Daher schöpfen Unternehmen häufig nicht das vollständige Verbesserungspotenzial einer Reihenfolgebildung nach Termin aus. Um auf die Wirksamkeit einer Reihenfolgebildung nach Termin aufmerksam zu machen, ist es für die Forschung notwendig, Hilfsmittel zu entwickeln, die es ermöglichen, den Effekt der Reihenfolgebildung auf die Termintreue zu quantifizieren.

Für Unternehmen ist es vor allem interessant zu wissen, welchen Einfluss ein Eingriff in die bestehenden Steuerungsmethoden hat. Die Abbildung einer Produktion in einer Simulationsumgebung und die anschließende Durchführung von Simulationsexperimenten kann Unternehmen dabei helfen, den Einfluss eines Eingriffs abzuschätzen (Eley, 2012, S. 5ff.). Jedoch ist dies in der Regel mit einem hohen Aufwand verbunden. Alternativ hierzu können analytische Modelle dazu genutzt werden, um quantitative Aussagen zu treffen. Für viele Unternehmen ist jedoch oftmals entweder die Komplexität der Modelle oder deren isolierte Anwendbarkeit ein Hindernis. Daraus ergeben sich zwei grundsätzliche Anforderungen an neu entwickelte Modelle: Einerseits sollen sie möglichst verständlich und einfach anwendbar sein und andererseits eine ausreichende Genauigkeit bieten, um fundiert Entscheidungen treffen zu können.

## **1.2 Ziel der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit soll ein einfaches und dennoch ausreichend genaues Modell zur Abschätzung der Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen aufzeigen. Es soll sowohl für einzelne Arbeitssysteme als auch für komplexe Materialflüsse anwendbar sein und Unternehmen dabei unterstützen, ihr Verbesserungspotenzial zu quantifizieren. Neben einer Anwendung in Industriebetrieben soll die Arbeit die bestehenden Theorien zur Termintreue erweitern und einen weiteren Beitrag zur vollständigen Erklärung der logistischen Zielgrößen leisten.

## **1.3 Aufbau der Arbeit**

Auf die in diesem Kapitel herausgestellte Motivation und das Ziel der Arbeit folgen Grundlagen und Begriffsdefinitionen, um ein einheitliches Grundverständnis zu erzielen (Abschnitte 2.1 und

2.2). Darauf aufbauend vervollständigen die Darstellung der vorhandenen Analysemethoden (Abschnitt 2.3), die bisherigen Forschungsergebnisse (Abschnitt 2.4) und die Ausarbeitung des vorliegenden Forschungsdefizits (Abschnitt 2.5) das zweite Kapitel.

Kapitel 3 beschreibt die Modellierung der Termintreue. Der erste Abschnitt des Kapitels erweitert zunächst die Definition der Reihenfolgeabweichung. Daraufhin zeigt Abschnitt 3.2, wie sich die reihenfolgebedingte Terminabweichung für ein Arbeitssystem modellieren und auf Fertigungsbereiche mit mehreren aufeinanderfolgenden Arbeitssystemen übertragen lässt. Der darauf folgende Abschnitt (3.3) beschreibt den Einfluss eines Rückstands im Zugang auf die rückstandsbedingte Terminabweichung im Abgang ebenso für ein Arbeitssystem sowie für Fertigungsbereiche. Abschließend zeigt das Kapitel, wie beide Terminabweichungsanteile sich zu einer resultierenden Terminabweichungsverteilung zusammenführen lassen (Abschnitt 3.4).

Nach der Modellentwicklung folgt in Kapitel 4 die Evaluierung der entwickelten Modelle in einer Simulationsstudie. Diese ist ebenso wie die Modellentwicklung jeweils in die Evaluierung für einzelne Arbeitssysteme und für Fertigungsbereiche aufgeteilt. Innerhalb der Simulationsstudie werden die relevanten Parameter variiert und so wird die Modellgüte bei unterschiedlichen Randbedingungen nachgewiesen.

Kapitel 5 fasst die Erkenntnisse aus der Modellierung und der dazugehörigen Evaluierung zusammen. Darüber hinaus leitet es daraus ab, welche Maßnahmen Unternehmen treffen sollten, um eine hohe Termintreue zu erreichen.

Kapitel 6 zeigt zwei Anwendungsbeispiele der entwickelten Modelle in der Praxis. Auf Basis von Rückmeldedaten aus zwei Industriebetrieben wird gezeigt, wie das Modell das Potenzial zur Verbesserung der Termineinhaltung ermitteln kann und welche Maßnahmen die Beispielunternehmen umsetzen sollten, um das Verbesserungspotenzial auszuschöpfen. Im ersten Unternehmen wird das Modell hierbei an einem ausgewählten Arbeitssystem angewendet und bei dem zweiten Unternehmen wird eine Werkstattfertigung mit komplexem Materialfluss eingehend untersucht.

Abschließend fasst Kapitel 7 die Arbeit zusammen und zeigt in einem Ausblick, welche Forschungslücken in nachfolgenden Arbeiten geschlossen werden können. Bild 1 stellt den Aufbau der Arbeit in einer Übersicht dar.

Kapitel 1: Einleitung	
Kapitel 2: Grundlagen und Stand der Forschung	
Kapitel 3: Modellentwicklung	
Reihenfolgebedingte Terminabweichung - für ein Arbeitssystem - für Fertigungsbereiche	Rückstandsbedingte Terminabweichung - für ein Arbeitssystem - für Fertigungsbereiche
Resultierende Terminabweichung	
Kapitel 4: Simulative Evaluierung	
Reihenfolgebedingte Terminabweichung - für ein Arbeitssystem - für Fertigungsbereiche	Rückstandsbedingte Terminabweichung - für ein Arbeitssystem - für Fertigungsbereiche
Evaluierung der resultierenden Terminabweichung	
Kapitel 5: Erkenntnisse der Modellierung	
Kapitel 6: Anwendungsbeispiele	
Anwendung an einem Arbeitssystem	Anwendung in einem Fertigungsbereich
Kapitel 7: Zusammenfassung und Ausblick	

13645

**Bild 1: Aufbau der Arbeit**

## **2 Grundlagen und Stand der Forschung**

Die betriebliche Praxis und die Forschung verwenden eine Fülle unterschiedlicher Begriffe für verschiedene Aspekte der Produktionsplanung und -steuerung. Um das Verständnis zu vereinfachen, führt Abschnitt 2.1 daher kurz in die Grundlagen ein und definiert für die Arbeit wichtige Begriffe. Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist es, die Modellierung der Termintreue für ein einzelnes Arbeitssystem auf einen gesamten Auftragsdurchlauf zu übertragen. Daher beschreibt Abschnitt 2.2, was innerhalb dieser Arbeit unter einem Auftragsdurchlauf verstanden wird und Abschnitt 2.3 zeigt vorhandene Methoden, um die Terminabweichung im Auftragsdurchlauf zu analysieren. Der darauf folgende Abschnitt (2.4) stellt die bisherigen Arbeiten zur Modellierung der Termintreue vor und abschließend leitet Abschnitt 2.5 den Forschungsbedarf aus den Defiziten der bisherigen Arbeiten ab.

### **2.1 Grundlagen und Begriffsdefinitionen**

Die Grundlagen sind wesentlich für das Verständnis der Arbeit. Sie umfassen die logistischen Zielgrößen, kurze Erklärungen zum Trichtermodell, Durchlaufdiagrammen und zu Produktionskennlinien sowie die Begriffsdefinition der Termintreue und ihrer Bestandteile.

#### **Logistische Zielgrößen**

Lödding (2016, S. 21 ff.) stellt aufbauend auf Wiendahl (2010, S. 252) die logistischen Zielgrößen differenziert in interne und externe Logistikleistung und -kosten dar (Bild 2). Die externen Größen nimmt der Kunde direkt wahr. Die internen Größen können Unternehmen in ihrer Produktion messen. Dabei bestimmt die Produktionsplanung und -steuerung weitestgehend die Erreichung der logistischen Zielgrößen.

Bei der externen Logistikleistung ist die Unterscheidung der Zielgrößen zwischen einer Auftrags- und Lagerfertigung möglich. Während Auftragsfertiger an ihrer Lieferzeit und Lieferterminabweichung bzw. Liefertermintreue gemessen werden, ist für die Lagerfertigung der Servicegrad entscheidend. Der Servicegrad beschreibt den Anteil der sofort bedienten Anfragen gemessen an allen Anfragen innerhalb eines Bezugszeitraums. Die externen Logistikkosten entsprechen dem Preis bzw. dem Preisanteil, den der Kunde für die Logistikleistung zahlt.

Die internen Äquivalente für die Steuerung der Produktion sind zum einen die Durchlaufzeit, die Terminabweichung und Termintreue für die Logistikleistung, zum anderen für die Logistikkosten der Bestand, die Auslastung und mögliche Verzugskosten aufgrund verspäteter Lieferungen. Eine gut gesteuerte Produktion hat zum Ziel, eine geringe Durchlaufzeit und hohe Termintreue bei gleichzeitig geringen Beständen und hoher Auslastung zu erreichen. Eine hohe Zielerreichung all dieser Größen unterliegt jedoch einem Zielkonflikt. Im weiteren Verlauf des Kapitels ist be-

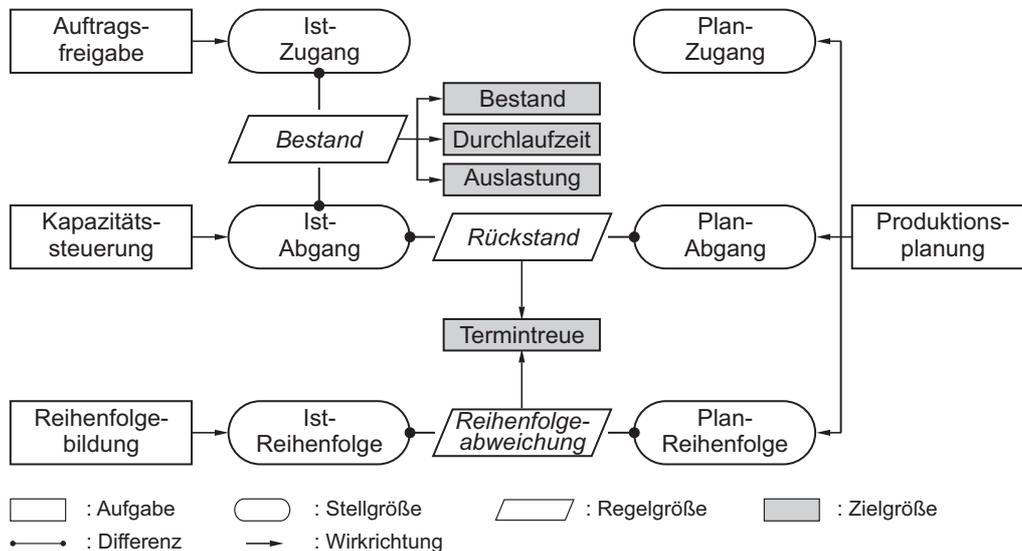
schrieben, welche bisherigen Forschungserkenntnisse bei der Positionierung innerhalb dieses Zielkonflikts unterstützen.

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

13646

**Bild 2: Logistische Zielgrößen (Lödding, 2016, S. 22)**

Das Modell der Fertigungssteuerung zeigt, welche Regel- und Stellgrößen die internen logistischen Zielgrößen beeinflussen und ordnet diesen die Aufgaben der Fertigungssteuerung zu (Bild 3).



13647

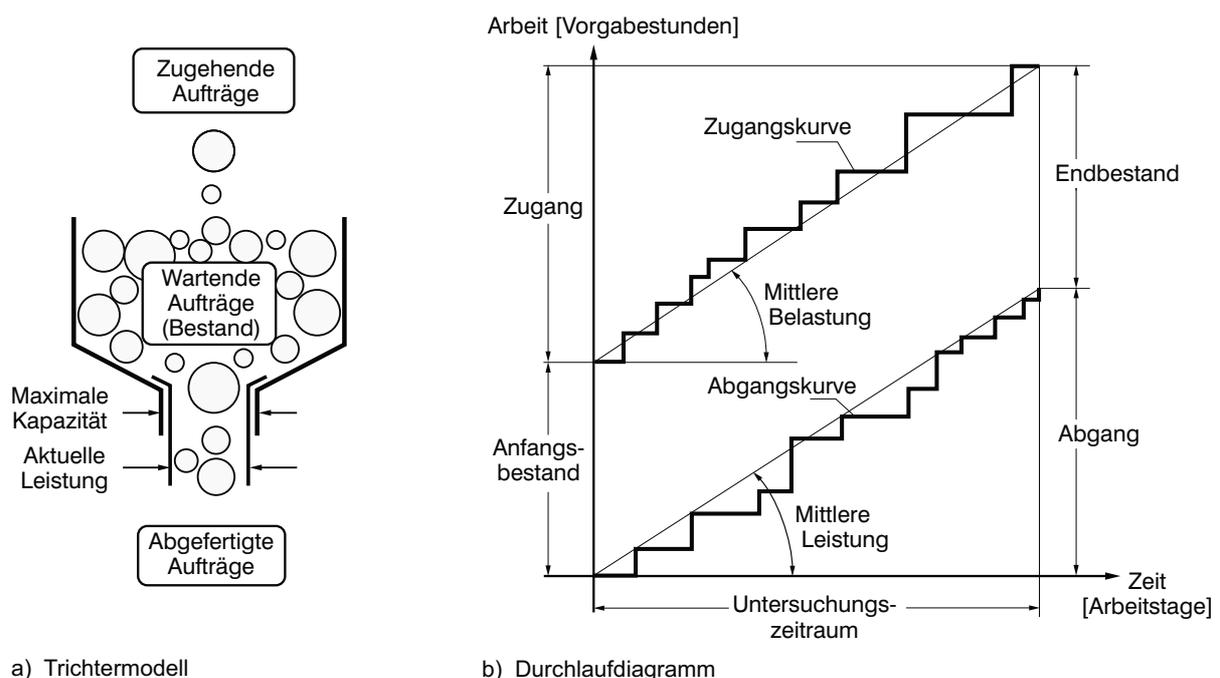
**Bild 3: Modell der Fertigungssteuerung (Lödding, 2016, S. 8)**

Das Zusammenwirken der Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung ist in weiten Teilen erforscht. Die Berechnung logistischer Kennlinien und die Auslegung von Beständen mit Hilfe der Kennlinientheorie findet in der betrieblichen Praxis eine vergleichsweise breite Anwendung (Nyhuis & Wiendahl, 2012, S. 192). Sie ermöglicht es Unternehmen, sich im Zielkonflikt zwischen einer hohen Auslastung, niedrigen Beständen und kurzen Durchlaufzeiten zu positionieren und diese Positionierung mit geeigneten Verfahren der Auftragsfreigabe (z. B. ConWIP) umzu-

setzen. Auch für die Termintreue sind bereits Modellierungsansätze vorhanden, die Abschnitt 2.4 genauer beschreibt.

### Trichtermodell, Durchlaufdiagramm und Produktionskennlinien

Das Trichtermodell nutzt die Analogie eines Trichters, um die Auftragsbearbeitung an Arbeitssystemen zu beschreiben (Bechte, 1984, 13 ff., Wiendahl, 1997, 83 f.). Bild 4a zeigt einen Trichter mit Kreisen, in dem jeder Kreis einem Auftrag entspricht. Die Größe der Kreise stellt hierbei die Auftragszeit der Aufträge dar. Aufträge gehen dem Trichter zu (Zugang), warten im Trichter (Bestand) und verlassen den Trichter nach der Bearbeitung (Abgang). Beschreibt man den Durchlauf der Aufträge über die Zeit, entsteht das Durchlaufdiagramm (Bild 4b). Es zeigt eine kumulierte Zugangs- und Abgangskurve und den Bestand für jeden Zeitpunkt als vertikale Differenz der beiden Kurven. Die horizontale Differenz beschreibt die Reichweite, die aussagt, wie lange der vorliegende Bestand bei der aktuellen Leistung ausreicht, um das Arbeitssystem mit Aufträgen zu versorgen (Bechte, 1984, 36 ff.).



a) Trichtermodell

b) Durchlaufdiagramm

13648

**Bild 4: Trichtermodell und Durchlaufdiagramm (Bechte, zitiert nach Wiendahl, 1997, S. 84)**

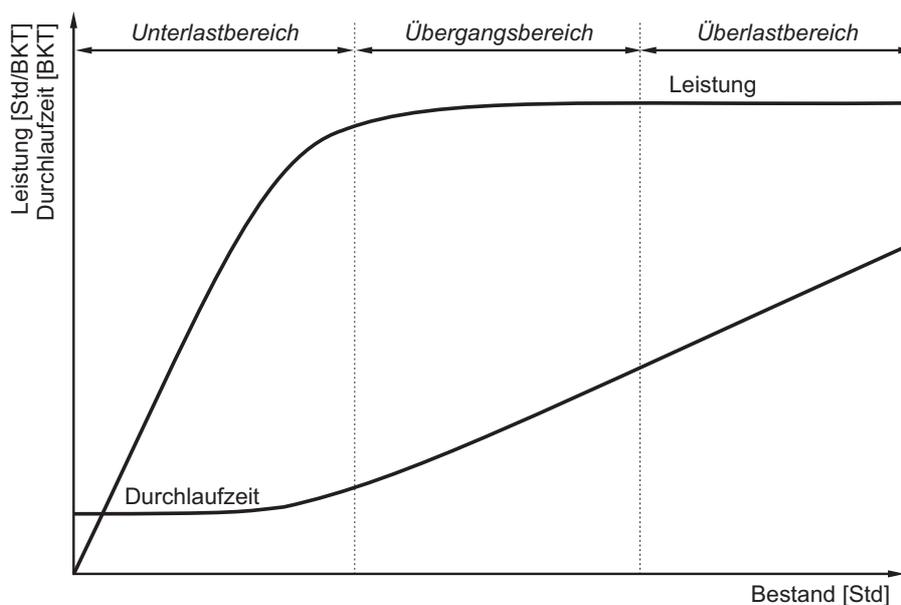
Aus dem Trichtermodell und dem Durchlaufdiagramm leitet sich die sogenannte Trichterformel ab, die den Zusammenhang zwischen den Mittelwerten der Leistung, des Bestands und der Reichweite beschreibt (Gleichung (1), Bechte, 1984, S. 39, Nyhuis & Wiendahl, 2012, S. 28).

$$R_m = \frac{B_m}{L_m} \quad (1)$$

$R_m$       mittlere Reichweite [Tage]                       $B_m$       mittlerer Bestand [Stunden]  
 $L_m$       mittlere Leistung [Stunden/Tag]

Die Trichterformel verdeutlicht, dass eine Fertigung die mittlere Reichweite (und damit die mittlere Durchlaufzeit) entweder mit einer Reduktion des Bestands oder einer Steigerung der Leistung senken kann. Da ein zu geringer Bestand Auslastungsverluste verursacht, ist es für Unternehmen notwendig, einen Bestand zu wählen, der zwar geringe Durchlaufzeiten, aber auch ein geringes Risiko für Auslastungsverluste herbeiführt. Für die Positionierung zwischen Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung eignen sich Produktionskennlinien (Wiendahl, 1997, 136 ff., Nyhuis & Wiendahl, 2012).

Produktionskennlinien beschreiben logistische Zielgrößen in Abhängigkeit des mittleren Bestands. Bild 5 zeigt den Verlauf der Produktionskennlinien für die Leistung und die Durchlaufzeit eines Arbeitssystems. Mit zunehmendem Bestand steigt die Leistung des Arbeitssystems zunächst linear. Im Unterlastbereich ist die Auslastung des Arbeitssystems gering und jeder zusätzliche Auftrag erhöht die Leistung des Arbeitssystems. Dies gilt so lange, bis Aufträge um die Kapazität des Arbeitssystems konkurrieren. In diesem sogenannten Übergangsbereich nimmt die Steigung der Leistung ab, bis sie nahezu die maximale Leistung erreicht. Auf den Übergangsbereich folgt der Überlastbereich, in dem jeder zusätzliche Auftrag den Bestand erhöht und die Durchlaufzeit verlängert, jedoch keine wesentliche Leistungserhöhung mehr herbeiführt.



13649

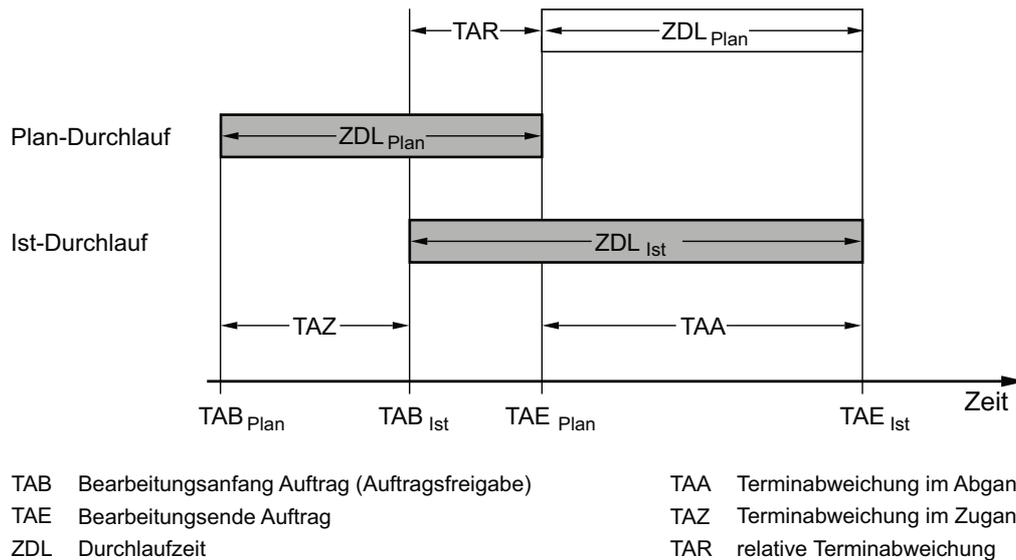
**Bild 5: Produktionskennlinien (in Anlehnung an Nyhuis & Wiendahl, 2012, S. 37)**

Der Verlauf der Durchlaufzeit folgt dem gleichen Prinzip. Im Unterlastbereich wird jeder Auftrag sofort bearbeitet und die Durchlaufzeit entspricht der Durchführungszeit des Auftrags. Sobald Aufträge um die Kapazität konkurrieren, entsteht zusätzlich eine Wartezeit, die die Durchlaufzeit verlängert (Übergangsbereich). Erreicht der Bestand am Arbeitssystem den Überlastbereich, steigt die Durchlaufzeit nahezu proportional mit dem Bestand.

Der Verlauf der Produktionskennlinien hängt von mehreren Parametern ab. Der wichtigste ist hierbei die Auftragszeitverteilung des Arbeitssystems. Nyhuis und Wiendahl (2012, 61 ff.) ist es gelungen, für Produktionskennlinien eine Näherungsgleichung herzuleiten, die es Unternehmen ermöglicht, einen Zielbestand festzulegen und sich somit zwischen hoher Auslastung, geringen Beständen und kurzen Durchlaufzeiten zu positionieren.

### **Termintreue**

Der wichtigste Bestandteil der Termintreue ist die Terminabweichung. Diese ist als Differenz zwischen Ist- und Plan-Termin (Dombrowski, 1988, S. 48) definiert und kann sowohl positiv (zu spät) als auch negativ (zu früh) sein. Eine Terminabweichung kann hierbei grundsätzlich sowohl im Zugang als auch im Abgang eines logistischen Systems (z. B. eine Fertigung oder ein Arbeitssystem) auftreten. Die Terminabweichung im Zugang einer Fertigung (TAZ) ist die Differenz aus Ist- und Plan-Freigabetermin. Analog entspricht die Terminabweichung im Abgang (TAA) der Differenz aus Ist- und Plan-Bearbeitungsende. Die Differenz zwischen der Terminabweichung im Zugang und der Terminabweichung im Abgang ist die relative Terminabweichung (TAR). Sie entspricht auch der Abweichung der Ist- von der Plan-Durchlaufzeit. Addiert man zu der Terminabweichung im Zugang die relative Terminabweichung, ergibt dies die Terminabweichung im Abgang. Bild 6 veranschaulicht den beschriebenen Zusammenhang zwischen den Terminabweichungsgrößen grafisch, und die Gleichungen (2)–(4) zeigen die Berechnungsvorschriften für die Terminabweichungsgrößen (Dombrowski, 1988, S. 49, Lödding, 2016, S. 33ff.).



13650

**Bild 6: Definition der Terminabweichungsgrößen (Dombrowski, 1988, S. 49 zitiert nach Lödding, 2016, S. 33)**

$$TAZ = TAB_{Ist} - TAB_{Plan} \quad (2)$$

$$TAA = TAE_{Ist} - TAE_{Plan} \quad (3)$$

$$TAR = TAA - TAZ = ZDL_{Ist} - ZDL_{Plan} \quad (4)$$

TAZ	Terminabweichung im Zugang [Tage]	TAB	Bearbeitungsanfang
TAA	Terminabweichung im Abgang [Tage]	TAE	Bearbeitungsende
TAR	relative Terminabweichung [Tage]	ZDL	Durchlaufzeit [Tage]

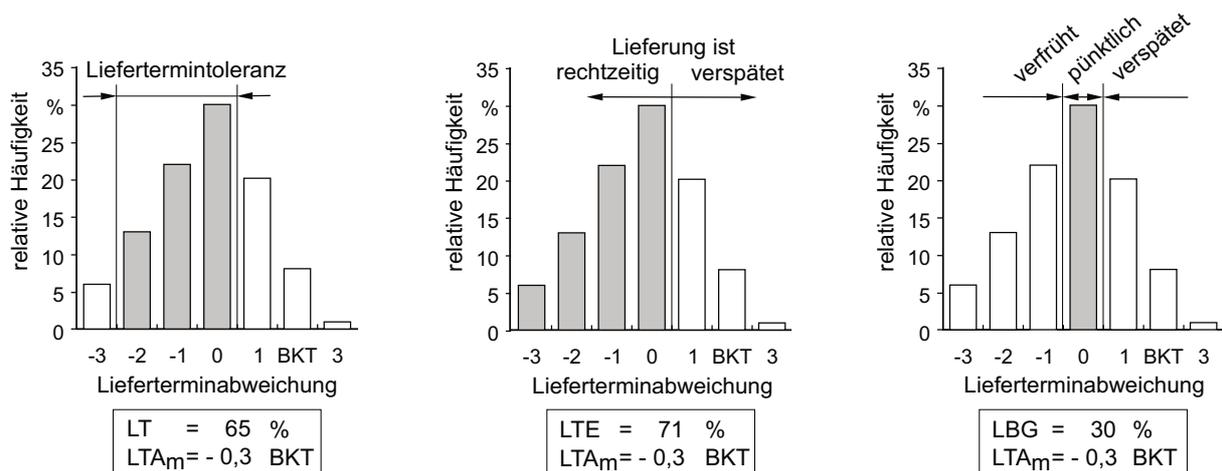
Während die Terminabweichung einen einzelnen Auftrag oder Arbeitsvorgang bewertet, beurteilt die Termintreue eine Vielzahl von Aufträgen innerhalb eines Zeitraums und somit die logistische Leistung eines Systems. Ein Auftrag gilt als termintreu, sofern seine Terminabweichung innerhalb einer festgelegten Termintoleranz liegt, die durch die Unter- und Obergrenzen der zulässigen Terminabweichung festgelegt ist. So kann die Produktionsleitung zum Beispiel vorgeben, dass ein Auftrag, der einen Tag zu spät fertiggestellt wird, noch als termintreu gilt. Die Höhe der Termintoleranz hängt in der Regel von Faktoren wie der vereinbarten Liefertermintoleranz mit dem Kunden, dem eingeplanten Lieferzeitpuffer, den Kosten einer Verspätung oder den anfallenden Lagerkosten für eine zu frühe Fertigstellung ab. Zur Berechnung der Termintreue gilt folgende Gleichung (Lödding, 2016, S. 34):

$$TT = \frac{\text{AnzAuf mit } TA_{UG} \leq TA \leq TA_{OG}}{\text{AnzAuf}} \cdot 100 \quad (5)$$

TT	Termintreue [-]	TA	Terminabweichung [Tage]
UG	Untergrenze [Tage]	OG	Obergrenze [Tage]
AnzAuf	Anzahl Aufträge [-]		

Die Termintreue ist analog zur Terminabweichung an unterschiedlichen Stellen im Auftragsdurchlauf messbar. Hierzu wird die entsprechende Terminabweichung des betrachteten Messpunktes berücksichtigt, zum Beispiel für den Zugang die Terminabweichung im Zugang (TAZ) und für den Abgang folglich die Terminabweichung im Abgang (TAA). Für Analysezwecke kann die Veränderung der Termintreue zwischen zwei Messpunkten bereits einen ersten Hinweis auf Schwächen im Auftragsdurchlauf geben.

Während die Termintreue im Abgang die Erfüllung des internen Produktionsplans bewertet, zeigt die Liefertreue die Erfüllung des dem Kunden mitgeteilten Liefertermins. Dieser ist in der Regel durch einen Lieferzeitpuffer und die Versandzeit vom Bearbeitungsende eines Auftrags entkoppelt (Lödding, 2016, S. 34). Folglich kann die Liefertreue von der Termintreue abweichen, wenn der Lieferzeitpuffer Schwankungen im Produktionsprozess dämpft. Für die Liefertreue sind zwei Sonderfälle vorhanden, für die die Termintoleranz vordefiniert ist: zum einen die Liefertermineinhaltung und zum anderen der Lieferbereitschaftsgrad (vgl. Bild 7).



a) Liefertreue (LT)

b) Liefertermineinhaltung (LTE)

c) Lieferbereitschaftsgrad (LBG)

$LTA_m$  : mittl. Lieferterminabweichung

13651

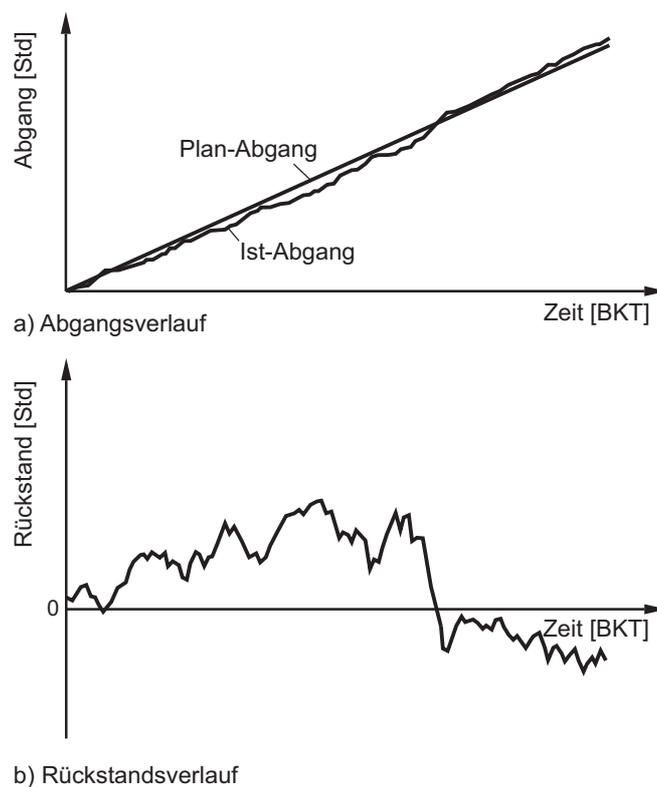
**Bild 7: Definition von Liefertreue, Liefertermineinhaltung und Lieferbereitschaftsgrad (Lödding, 2016, S. 28)**

Die Liefertermineinhaltung zeigt den Anteil der Aufträge, die innerhalb eines Betrachtungszeitraums rechtzeitig, d. h. früher oder exakt zum Termin, ausgeliefert wurden. Der Lieferbereitschaftsgrad hingegen zeigt den Anteil der Aufträge an, die pünktlich zum Liefertermin ausgeliefert wurden.

Das bereits erwähnte Modell der Fertigungssteuerung (vgl. Bild 3) zeigt, dass die Termintreue vom Rückstand und von der Reihenfolgeabweichung abhängt. Hierbei ist der Rückstand die Differenz aus Plan- und Ist-Abgang (Petermann, 1996, S. 66). Der Plan-Abgang ergibt sich aus dem Produktionsplan und zeigt an, welchen Arbeitsinhalt eine Fertigung oder ein Arbeitssystem in-

nerhalb eines Bezugszeitraums herstellen soll. Der Ist-Abgang zeigt hingegen, welchen Arbeitsinhalt die Fertigung oder das Arbeitssystem tatsächlich fertiggestellt hat. In der Regel ist der Arbeitsinhalt eines Auftrags als Summe seiner Auftragszeiten (ZAU) definiert und in Stunden angegeben. Jedoch ist es auch möglich, den Abgang in Anzahl Aufträgen oder Anzahl Produkten darzustellen, zum Beispiel dann, wenn unzuverlässige oder keine Plan-Auftragszeiten vorliegen.

In einem Durchlaufdiagramm lässt sich der Verlauf von Plan- und Ist-Abgang darstellen (Bild 8a). Im Beispiel weist der Plan-Abgang einen konstanten Verlauf auf, während sich im Ist-Abgang die Variabilität der Produktion zeigt.



13652

**Bild 8: Rückstand im Durchlaufdiagramm (Lödding, 2016, S. 553)**

Der Rückstandsverlauf als Differenz aus kumuliertem Plan- und Ist-Abgang ergänzt das Durchlaufdiagramm (Bild 8b). Rückstände können sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Ein positiver Rückstand bedeutet, dass die Fertigung den geforderten Plan-Abgang unterschritten hat. Ein negativer Rückstand zeigt hingegen, dass die Fertigung der Planung vorseilt. Sowohl eine positive als auch eine negative Abweichung vom Plan-Abgang führen zu Terminabweichungen und können somit die Termintreue senken. Eine geeignete Kapazitätssteuerung hat im Falle von Abweichungen die Aufgabe, mit dem Ist-Abgang den Plan-Abgang zu erreichen.

Die Reihenfolgeabweichung beschreibt die Abweichung der Ist- von der Plan-Reihenfolge. Die Plan-Reihenfolge ist durch die Plan-Termine bestimmt, die die terminliche Dringlichkeit der Aufträge darstellen. Während der Rückstand anzeigt, ob die Fertigung ausreichend Aufträge herstellt,

zeigt die Reihenfolgeabweichung, ob die Fertigung die terminlich dringendsten Aufträge herstellt. Gleichung (6) definiert die Reihenfolgeabweichung als Differenz zwischen Ist- und Plan-Abgangsrank (Meißner, 2009, S. 78, Kuyumcu, 2013, S. 38). Hierbei zeigt eine negative Reihenfolgeabweichung die Beschleunigung des betrachteten Auftrags gegenüber seinem Plan, während eine positive Reihenfolgeabweichung auf eine Verzögerung hinweist.

$$RAA_i = RgA_{Ist,i} - RgA_{Plan,i} \quad (6)$$

$RAA_i$  Reihenfolgeabweichung von Auftrag  $i$  [-]       $RgA_{Ist,i}$  Ist-Abgangsrank von Auftrag  $i$  [-]  
 $RgA_{Plan,i}$  Plan-Abgangsrank von Auftrag  $i$  [-]

Um die Reihenfolgeabweichung zu bestimmen, ist es notwendig, jedem Auftrag einen eindeutigen Plan-Rang zuzuordnen. Um die Ränge aus einer Auftragsliste (z. B. Rückmeldedaten aus einem ERP-System) zu ermitteln, sortiert man diese nach ihrer terminlichen Dringlichkeit. Da Plan-Endtermine oftmals nur tagesgenau vorliegen, ist eine geeignete Sortierung notwendig, um die Ränge eindeutig zu bestimmen (vgl. Kuyumcu, 2013, S. 37). Liegen Plan-Endtermine inklusive einer Uhrzeit vor (z. B. aufgrund einer Feinterminierung), reicht für die Ermittlung der Plan-Ränge die Sortierung nach dem Plan-Endtermin. Analog reicht die Sortierung nach dem Ist-Endtermin, sofern Mitarbeiter Aufträge nach ihrer Fertigstellung am Arbeitssystem inklusive einer Uhrzeit zurückmelden.

Liegt eine eindeutige Sortierung vor, erhält jeder Auftrag einen aufsteigenden ganzzahligen Rang. Der Mittelwert und die Summe der Reihenfolgeabweichung ergeben stets null (Kuyumcu, 2013, S. 39). Dies folgt daraus, dass jede Beschleunigung stets Verzögerungen in gleicher Höhe verursacht. Tabelle 1 zeigt die Vergabe der Plan- und Ist-Ränge an einem Beispiel.

**Tabelle 1: Vergabe der Plan- und Ist-Ränge (in Anlehnung an Kuyumcu (2013, S. 38))**

Index [-]	Auftragsnummer [-]	Plan-Endtermin [Tag]	Ist-Endtermin [Tag]	Plan-Rang [-]	Ist-Rang [-]	Reihenfolgeabweichung [-]
1	1003	156	154	3	1	-2
2	1001	154	155	1	2	1
3	1004	157	156	4	3	-1
4	1002	155	157	2	4	2
5	1005	158	158	5	5	0
						$\Sigma = 0$

Zur Unterscheidung von großen und kleinen Aufträgen führt Kuyumcu den gewichteten Rang und die gewichtete Reihenfolgeabweichung ein (Kuyumcu, 2013, S. 39). Der gewichtete Rang eines Auftrags entspricht der Summe der Auftragszeiten aller Aufträge bis zu seinem Rang (einschließlich seiner eigenen Auftragszeit). Tabelle 2 zeigt aufbauend auf dem Beispiel aus Tabelle 1

die Berechnung der gewichteten Ränge. Die Summe und der Mittelwert des gewichteten Rangs sind im Gegensatz zum ungewichteten Rang nicht immer null, da die Auftragsgröße einen Einfluss auf die gesamte Beschleunigung bzw. Verzögerung eines Auftragsbestands aufweist. Die Beschleunigung kleinerer Aufträge führt zu einer Verkürzung der mittleren Durchlaufzeit (Conway, Maxwell & Miller, 1967, S. 232).

**Tabelle 2: Vergabe der gewichteten Plan- und Ist-Ränge (in Anlehnung an Kuyumcu (2013, S. 40))**

Index [-]	Auftragsnummer [-]	ZAU [Std]	Plan-Rang [-]	Ist-Rang [-]	Reihenfolgeabweichung [-]	Gewichteter Plan-Rang [Std]	Gewichteter Ist-Rang [Std]	Gewichtete Reihenfolgeabweichung [Std]
1	1003	0,5	3	1	-2	8	0,5	-7,5
2	1001	3,5	1	2	1	3,5	4	-0,5
3	1004	1	4	3	-1	9	5	-4,0
4	1002	4	2	4	2	7,5	9	-1,5
5	1005	2	5	5	0	11	11	-0,0
					$\Sigma = 0$			$\Sigma = -9,5$

Reihenfolgeabweichungen können aus unterschiedlichen Gründen auftreten und lassen sich in zwei Kategorien einstufen:

1. Reihenfolgeabweichungen, die nicht durch die Reihenfolgeentscheidung am Arbeitssystem vermieden werden können und
2. Reihenfolgeabweichungen, die durch die Reihenfolgeentscheidung am Arbeitssystem verursacht werden.

Die erste Kategorie deckt sämtliche Reihenfolgeabweichungen ab, die dadurch entstehen, dass der Auftrag mit der höchsten Priorität zum Zeitpunkt der Reihenfolgeentscheidung nicht im Umlaufbestand vorliegt. Dies kann durch Rückstände und/oder Reihenfolgeabweichungen an vorgelegerten Arbeitssystemen bedingt sein. In diesem Fall ist es für den Mitarbeiter am Arbeitssystem nicht möglich, die Reihenfolgeabweichung zu vermeiden (Kuyumcu, 2013, S. 27).

Zur zweiten Kategorie gehören sämtliche Reihenfolgeentscheidungen am Arbeitssystem, die die terminliche Dringlichkeit von Aufträgen vernachlässigen. Dies können z. B. bewusste Abweichungen von der Plan-Reihenfolge sein, um Rüstaufwände einzusparen (rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung) oder eine FIFO-Reihenfolgebildung, die Abweichungen im Zugang nicht ausgleichen kann. Um die Qualität der Entscheidungen am Arbeitssystem zu beurteilen, eignet sich die Reihenfolgedisziplin (Lödding, 2016, S. 520ff.). Die Reihenfolgedisziplin berücksichtigt lediglich, ob Mitarbeiter zum Zeitpunkt der Reihenfolgeentscheidung den in der Warteschlange dringendsten Auftrag auswählen und verdichtet sämtliche Reihenfolgeentscheidungen innerhalb

eines Betrachtungszeitraums in einer Kennzahl. Diese zeigt den prozentualen Anteil der richtigen Reihenfolgeentscheidungen gemessen an allen Reihenfolgeentscheidungen. Kuyumcu hat zur Berechnung der Reihenfolgedisziplin einen Algorithmus entwickelt, der die Berechnung aus Rückmeldedaten ermöglicht (Kuyumcu, 2013, S. 166). Lödning (2016, 520 ff.) definiert die Reihenfolgedisziplin über die Anzahl der übergangenen Aufträge (Gleichung (7)). Eine richtige Reihenfolgeentscheidung übergeht per Definition keinen dringenderen Auftrag aus der Warteschlange. Daher entspricht die Reihenfolgedisziplin der Anzahl der Arbeitsvorgänge, die keinen Auftrag übergehen, geteilt durch alle Arbeitsvorgänge innerhalb eines Betrachtungszeitraums:

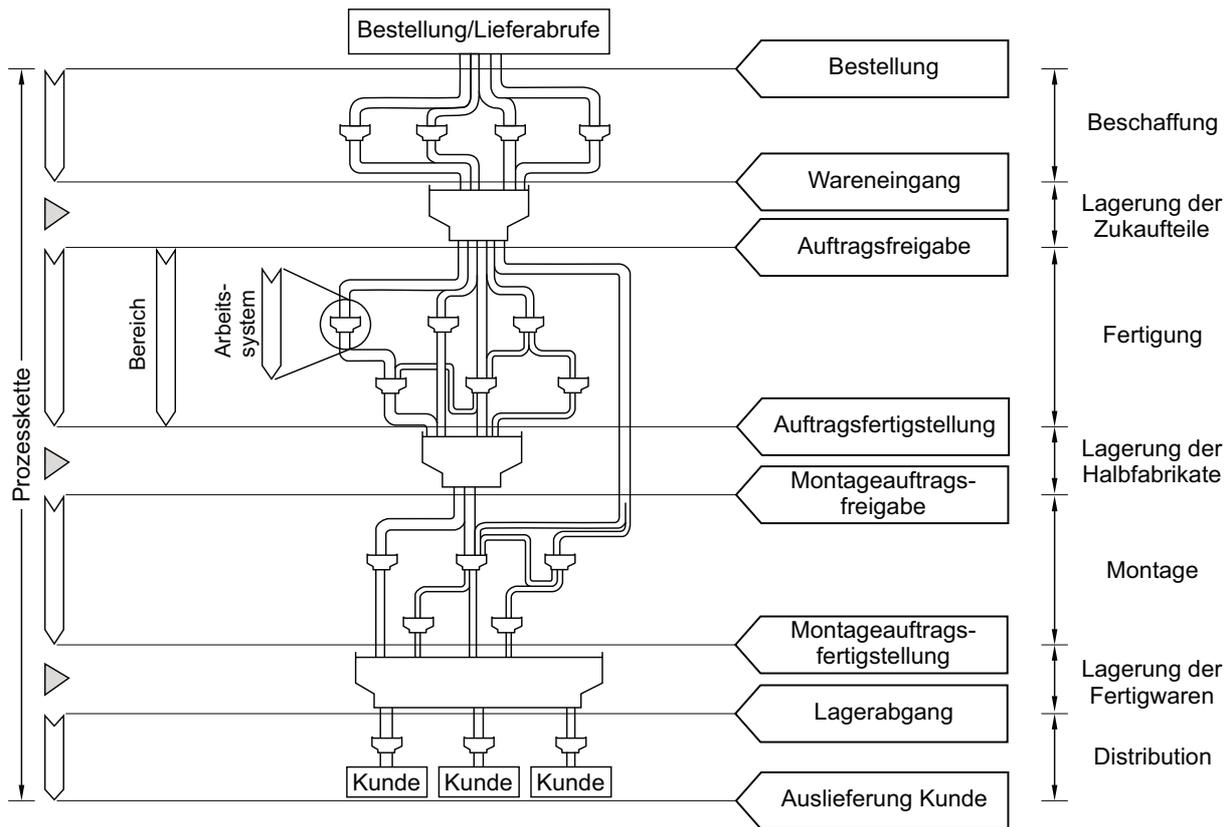
$$RD = \frac{\text{AnzAVG mit AnzÜA=0}}{\text{AnzAVG}} \cdot 100 \quad (7)$$

RD	Reihenfolgedisziplin [-]	AnzAVG	Anzahl Arbeitsvorgänge [-]
AnzÜA	Anzahl übergangener Aufträge [-]		

Die Reihenfolgedisziplin zeigt zwar, wie viele Fehlentscheidungen durch die Reihenfolgebildung an einem Arbeitssystem entstehen, jedoch zeigt sie weder die Auswirkungen noch das Ausmaß der Fehlentscheidungen. Die Analyse der Verteilung der Anzahl übergangener Aufträge kann hierbei aufschlussreich sein. Abschnitt 3.2.4 dieser Arbeit zeigt ein vollständiges Vorgehen zur Bewertung der Reihenfolgeeinhaltung eines Arbeitssystems, das die Auswirkungen von Fehlentscheidungen darstellt.

## 2.2 Der betriebliche Auftragsdurchlauf

Bild 9 zeigt die logistischen Prozesse im betrieblichen Auftragsdurchlauf in Form eines Trichter-netzes. Der Beginn eines jeden Auftrags ist die Auftragserzeugung. Diese löst, falls notwendig, die Beschaffung von Zukaufteilen aus. Die erzeugten Aufträge befinden sich in einem Auftragspool, aus dem die Auftragsfreigabe erfolgt, die wiederum eine Warenentnahme auslöst. Das genutzte Auftragsfreigabeverfahren bestimmt den Zugang zur Fertigung und definitionsgemäß auch zum ersten Arbeitssystem (Wiendahl, 1997, S. 109). Hierbei existieren unterschiedliche Auftragsfreigabeverfahren, die in drei Klassen eingeteilt werden können: die sofortige Auftragsfreigabe, die terminorientierte Auftragsfreigabe und die bestandsregelnde Auftragsfreigabe (Lödning, 2016, S. 339f.).



13653

**Bild 9: Logistisches Modell des Auftragsdurchlaufs (in Anlehnung an Wiendahl, 2010, S. 268 und Windt, 2001, S. 39)**

Die Fertigung ist im Auftragsdurchlauf häufig ein komplexes System und weist je nach Fertigungsprinzip eine unterschiedlich hohe Materialflusskomplexität auf. Aufträge können insbesondere in Werkstattfertigungen je nach Produktvariante eine unterschiedliche Anzahl an Arbeitssystemen in unterschiedlicher Reihenfolge durchlaufen und zudem unterschiedliche Auftragszeiten aufweisen. Ist ein Auftrag fertiggestellt, wird dieser entweder einer Montage, einem Lager oder direkt der Distribution übermittelt. Die vorliegende Arbeit betrachtet vorwiegend den Auftragsdurchlauf durch die Fertigung, lässt sich jedoch auf die vor- und nachgelagerten Bereiche übertragen.

Im Folgenden werden für die Auftragsfreigabe und die Fertigung Ursachen für Rückstand und Reihenfolgeabweichungen aufgezeigt.

### **Auftragsfreigabe**

Die Auftragsfreigabe regelt den Zugang zur Fertigung und kann üblicherweise aus einem Auftragspool den nächsten freizugebenden Auftrag wählen. Lödding beschreibt systematisch eine Vielzahl von Auftragsfreigabeverfahren (Lödding, 2016, S. 339ff.).

In der Auftragsfreigabe können Rückstände aus vier Gründen auftreten:

1. Die Auftragsfreigabe gibt ohne ersichtlichen Grund Aufträge verspätet oder verfrüht frei (niedrige Freigabedisziplin).
2. Aufgrund von fehlendem Material können nicht ausreichend Aufträge freigegeben werden.
3. Die Auftragsfreigabe erfolgt bestandsregelnd und die Fertigung befindet sich im Rückstand.
4. Die Auftragsfreigabe erfolgt trotz einer Rückwärtsterminierung der Aufträge sofort nach der Auftragszeugung, wodurch die ermittelten Plan-Starttermine unberücksichtigt bleiben.

Für die Auftragsfreigabe bestehen in der Regel keine Kapazitätsrestriktionen, da die Freigabe eines Auftrags keinen relevanten Zeitanteil besitzt. Daher sind kapazitätsbedingte Rückstände ausgeschlossen.

Gründe für Reihenfolgeabweichungen in der Auftragsfreigabe sind zum einen fehlendes Material, sodass die Freigabe des dringendsten Auftrags verhindert ist, und zum anderen eine mangelnde Reihenfolgedisziplin in der Auftragsfreigabe. Diese kann wiederum aus unterschiedlichen Gründen auftreten, z. B. wenn die Termine von Aufträgen nicht die tatsächliche Dringlichkeit widerspiegeln oder wenn die Mitarbeiter der Auftragsfreigabe andere Kriterien als die terminliche Dringlichkeit als Freigabekriterium wählen. Einige Auftragsfreigabeverfahren, wie die Bestandsorientierte Auftragsfreigabe oder die Workload Control, vertauschen die Reihenfolge von Aufträgen gegenüber der Plan-Reihenfolge gezielt, um einen arbeitssystemspezifischen Belastungsabgleich zu ermöglichen. Thürer, Stevenson und Silva (2011) haben eine ausführliche Literaturanalyse zur Workload Control veröffentlicht, in der auch ein Überblick über die Verfahrenslogik zu finden ist.

### **Fertigung**

Da der Rückstand als Differenz zwischen Plan- und Ist-Abgang definiert ist, geraten Arbeitssysteme einer Fertigung entweder in Rückstand, weil Kapazitätsstörungen (z. B. Maschinenstörungen oder Personalausfälle) vorliegen, die den Ist-Abgang unerwartet senken oder weil die Plan-Vorgaben unrealistisch sind (Lödding, 2016, S. 84). Für die Produktionsplanung und -steuerung ergeben sich daraus zwei Aufgaben:

1. mit der Termin- und Kapazitätsplanung einen realistisch erreichbaren Plan-Abgang festlegen und
2. mit der Fertigungssteuerung (z. B. durch Überstunden) Kapazitätsstörungen aufholen.

Sind Rückstände mit der Fertigungssteuerung nicht aufholbar, beispielsweise an Engpässen, die bereits an der Kapazitätsgrenze (z. B. 3 Schichten, 7 Tage die Woche) fertigen, sollte die Produktionsplanung diese Rückstände in der Termin- und Kapazitätsplanung berücksichtigen.

Reihenfolgeabweichungen hingegen treten entweder auf, weil

- das Reihenfolgekriterium am Arbeitssystem nicht an den Plan-Termin gebunden ist (z. B. FIFO-Reihenfolgebildung),
- die Mitarbeiter von der Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin aus unbekanntem Gründen abweichen (niedrige Reihenfolgedisziplin)
- oder weil die terminlich dringenden Aufträge nicht im Bestand vorliegen (Terminabweichungen im Zugang). (Lödding, 2016, S. 89)

Um Reihenfolgeabweichungen zu vermeiden, sollte die Fertigungsleitung (Lödding, 2016, S. 520ff.)

1. eine Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin kommunizieren und die Reihenfolgeeinhaltung messen (z. B. mit der Reihenfolgedisziplin),
2. zwingend die Plan-Termine für die Arbeitsvorgänge definieren, da sonst die Mitarbeiter in der Fertigung nur erschwert den dringenden Auftrag finden können,
3. mögliche Zielkonflikte für eine Abweichung von der Plan-Reihenfolge (z. B. durch Rüstoptimierung) auflösen und
4. Hilfsmittel zur Reihenfolgebildung zur Verfügung stellen.

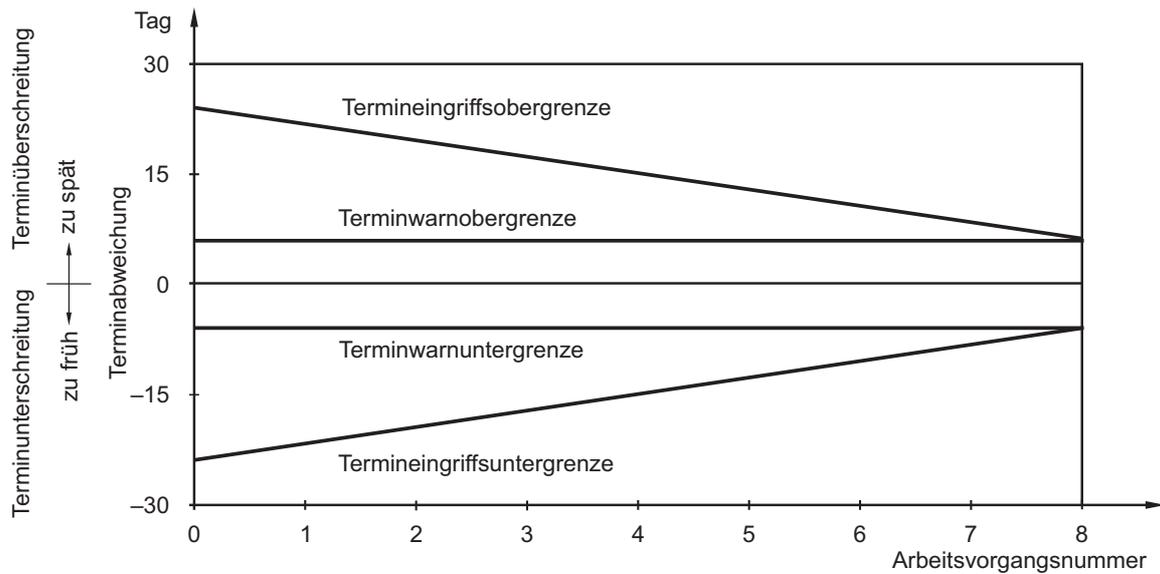
Geeignete Hilfsmittel sind z. B. Reihenfolgeboxen, die die Sortierung von Auftragspapieren nach Termin vereinfachen oder auch markierte Bereitstellungsflächen, die dem Mitarbeiter die Priorisierung der Aufträge anzeigen (vgl. hierzu Lödding, 2016, S. 524).

### **2.3 Beschreibung und Analyse der Terminabweichung im Auftragsdurchlauf**

Für die Analyse der Terminabweichung einzelner logistischer Systeme ist die Darstellung im Histogramm (vgl. Bild 7) eine zu Recht beliebte Darstellungsform. Für die Darstellung der Terminabweichung im Auftragsdurchlauf haben Dombrowski (1988) und Soepenberget al. (2008, S. 500ff.) zwei artverwandte Darstellungsformen entwickelt.

Dombrowski (1988) legt mit seiner Arbeit einen entscheidenden Grundstein, indem er die Prinzipien der Qualitätssicherung auf die Termintreue überträgt. Er zeigt, wie bereits in Abschnitt 2.1 dargestellt (Bild 6), wie die Terminabweichung definiert ist und an welchen Stellen sie messbar ist. Darüber hinaus hat er die Darstellung der Terminabweichung im Histogramm etabliert und ein Terminalsicherungssystem entwickelt, das Unternehmen zeigt, wie sie ihre Termintreue analysieren und im Auftragsdurchlauf mit geeigneten Hilfsmitteln steuern können.

Zu den Hilfsmitteln gehört unter anderem die Terminregelkarte, die auftragspezifisch zeigt, welche Terminabweichung im Verlauf der Auftragsbearbeitung zulässig ist (Dombrowski, 1988, S. 162). Bild 10 zeigt beispielhaft eine Terminregelkarte für einen Auftrag mit acht Arbeitsvorgängen.

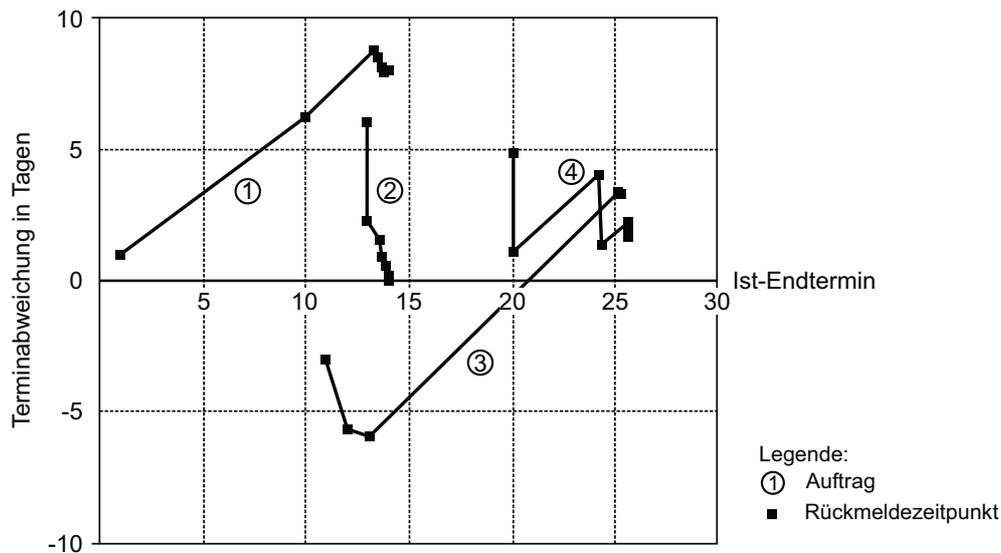


13654

**Bild 10: Terminregelkarte als Hilfsmittel zur Steuerung im Auftragsdurchlauf (Dombrowski, 1988, S. 162)**

Die Terminregelkarte zeigt, dass Terminabweichungen zu Beginn des Auftragsdurchlaufs eher tolerier- und vor allem aufholbar sind als zum Ende der Auftragsbearbeitung. Dies beruht darauf, dass für jeden Arbeitsvorgang ein Zeitpuffer vorliegt und die Summe der geplanten Zeitpuffer mit jedem Arbeitsvorgang abnimmt.

Soepenberget al. (2008, S. 500ff.) stellen mit dem *Order Progress Diagram* eine Möglichkeit vor, die Terminabweichung eines Auftrags über seinem Auftragsdurchlauf darzustellen. Im *Order Progress Diagram* (Bild 11) ist die Terminabweichung über der Zeit aufgetragen. Jeder Punkt zeigt hierbei die Terminabweichung zum Zeitpunkt der Rückmeldung eines Produktionsschrittes. Der erste Punkt symbolisiert hierbei die Zugangsterminabweichung des Auftrags zum Auftragspool. Die Punkte eines Auftrags sind mit Linien verbunden und zeigen somit die Veränderung der Terminabweichung über der Zeit auf. So nimmt beispielsweise die Terminabweichung von Auftrag 1 bis zum dritten Arbeitsvorgang stark zu und die letzten Arbeitsvorgänge können die entstandene Terminabweichung nicht mehr aufholen. Ein weiteres Beispiel ist Auftrag 3, der zunächst eine negative Terminabweichung aufweist und schließlich eine verspätete Fertigstellung erfährt.



13655

**Bild 11: Darstellung eines Order Progress Diagrams (Soepenberget al., 2008, S. 501)**

Das *Order Progress Diagram* ist für einzelne Aufträge eine sinnvolle Darstellung, um die Entwicklung der Terminabweichung der betrachteten Aufträge zu veranschaulichen. Bei vielen Aufträgen und somit auch vielen Linien führt es jedoch zu unübersichtlichen Verläufen.

## 2.4 Bisherige Forschung zur Modellierung der Termintreue

Die Forschung zur Termintreue ist vielfältig. Es existieren einige Arbeiten aus dem *Operations Research*, die in der Regel darauf abzielen, einen möglichst guten Produktionsplan abzuleiten, der eine hohe logistische Zielerreichung ermöglicht. Einige der Arbeiten untersuchen insbesondere den Einfluss von Reihenfolgeregeln auf die Summe der Terminabweichung oder die maximale Verspätung und entwickeln neue Heuristiken und Algorithmen zur Reihenfolgebildung (z. B. Graham, Lawler, Lenstra & Kan, 1979, Baker & Trietsch, 2009, Allahverdi, 2015).

Der Einfluss von Reihenfolgeregeln auf die Termintreue wurde bereits 1967 von Conway, Maxwell und Miller (Conway et al., 1967) in Simulationsversuchen untersucht. Sie zeigen, dass die Reihenfolgebildung nach kürzester Operationszeit (KOZ) zu einer höheren Termineinhaltung, geringeren mittleren Terminabweichungen und deutlich geringeren mittleren Durchlaufzeiten führt als terminorientierte Reihenfolgeregeln. Sie führen jedoch auch aus, dass dies eine sehr hohe Streuung der Terminabweichung zum Preis hat (Conway et al., 1967, 230 ff.). Seitdem wurden die Erkenntnisse dank weiterer Forschung deutlich erweitert. Baker und Trietsch (2009, S. 357ff.) beschreiben die qualitativen Verläufe der Terminabweichungsverteilung in Abhängigkeit der Reihenfolgeregel und zeigen mit Simulationsexperimenten, welchen Einfluss Reihenfolgeregeln auf die mittlere positive Terminabweichung (*mean tardiness*) besitzen. Reihenfolgeregeln, die den Termin der Arbeitsvorgänge berücksichtigen, erreichen hierbei die geringsten Abweichungen. Des Weiteren nehmen die Abweichungen mit zunehmender Plan-Durchlaufzeit ab.

Neben der Forschung aus dem Operations Research konzentrieren sich einige Autoren auf die Entwicklung von logistischen Modellen, die Wirkzusammenhänge abbilden, und so zeigen, wie Unternehmen die Termintreue eines logistischen Systems beherrschen können. Die folgenden Abschnitte beschreiben die für die vorliegende Arbeit bedeutsamsten Vorarbeiten zur Modellierung der Termintreue.

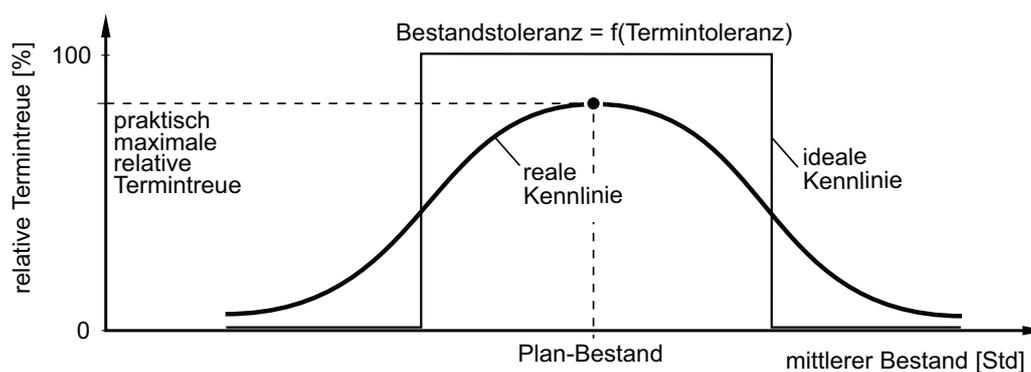
### Terminkennlinie nach Yu

Yu (2001) zeigt in seiner Dissertation aufbauend auf den grundlegenden Erkenntnissen von Dombrowski (1988) die Beziehung zwischen Rückstand und Terminabweichung und entwickelt damit die zweite Trichterformel:

$$TAA_{mg} = \frac{RS_m}{L_m} \quad (8)$$

$TAA_{mg}$	mittlere gewichtete Terminabweichung [Tage]
$RS_m$	mittlerer Rückstand [Stunden]
$L_m$	mittlere Leistung [Stunden/Tag]

Darüber hinaus entwickelt Yu eine Kennlinie, die die relative Termintreue als Funktion des mittleren Bestands darstellt (Bild 12). In der Herleitung der Terminkennlinie wird die Zugangsterminabweichung gleich null gesetzt, daher zeigt die Terminkennlinie eigentlich die Einhaltung der Plan-Durchlaufzeiten (Yu, 2001, S. 72). Dementsprechend verschlechtert sich die Termintreue sowohl bei positiven als auch negativen Abweichungen vom Plan-Bestand. Zudem gilt die Kennlinie lediglich für eine Abarbeitung nach der FIFO-Regel (Yu, 2001, S. 65).



13656

**Bild 12: Terminkennlinie nach Yu (Lödding, 2016, S. 62, Yu, 2001, S. 63)**

Da die relative Termintreue nur bedingt eine Aussage zu der vom Kunden wahrgenommenen Liefertreue treffen kann, ist es sinnvoll, die Terminabweichung im Abgang eines Systems zu modellieren.

### Modellierung der Termintreue in der Produktion nach Kuyumcu

Kuyumcu erweitert die Modellierung der Terminabweichung von Yu und modelliert in seiner Dissertation die Terminabweichung im Abgang mit ihren Anteilen aus Rückstand und aus Rei-

henfolgeabweichung für einzelne Aufträge. Die Modellierung kann jede Terminabweichungsverteilung in ihre Bestandteile aufteilen. Darüber hinaus gelingt es ihm, die Verteilung der Terminabweichung im Abgang mit einer analytischen Näherungsgleichung zu beschreiben (Kuyumcu, 2013).

Die rückstandsbedingte Terminabweichung ergibt sich in Anlehnung an Yu (2001, S. 41) aus dem Verhältnis zwischen Rückstand und Ist-Leistung. Wobei sich die Terminabweichung eines einzelnen Auftrags aus dem Rückstand zum Plan-Endtermin und der Ist-Leistung zwischen Plan- und Ist-Endtermin errechnet (vgl. Kuyumcu, 2013, S. 45 und Lödding, 2016, S. 83). Gleichung (9) zeigt die Berechnungsvorschrift für die rückstandsbedingte Terminabweichung.

$$TAA_{RS,i} = \frac{RS(TAE_{Plan,i})}{L_{Ist}} \quad (9)$$

$TAA_{RS,i}$	rückstandsbedingte Terminabweichung von Auftrag i [Tage]
$RS(TAE_{Plan,i})$	Rückstand zum Plan-Fertigstellungstermin von Auftrag i [Stunden]
$L_{Ist}$	Ist-Leistung [Stunden/Tag]

Die reihenfolgebedingte Terminabweichung hingegen ist das Verhältnis zwischen der Reihenfolgeabweichung eines Auftrags und der Plan-Leistung (Gleichung (10), Kuyumcu, 2013, S. 43):

$$TAA_{RA,i} = \frac{RA_i}{L_{Plan}} \quad (10)$$

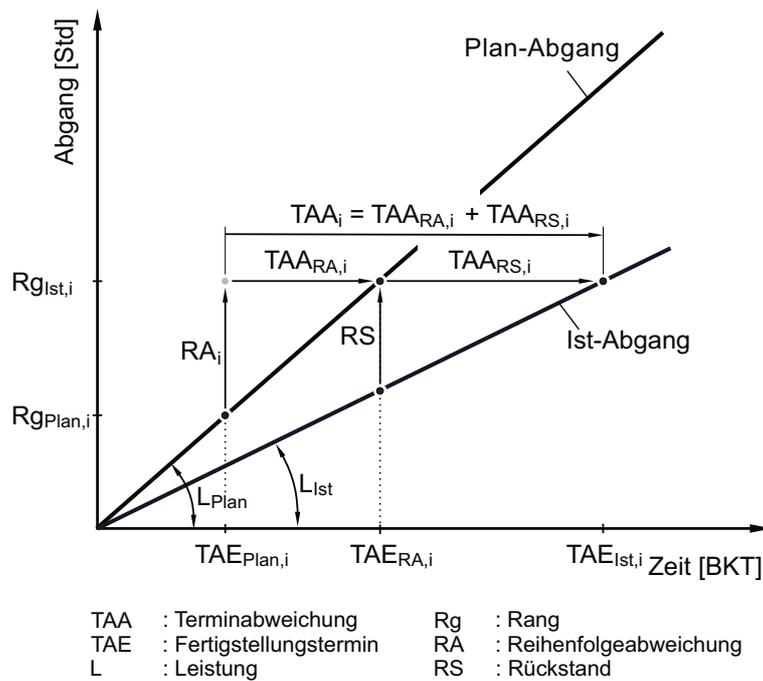
$TAA_{RA,i}$	reihenfolgebedingte Terminabweichung von Auftrag i [Tage]
$RA_i$	Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [Stunden]
$L_{Plan}$	Plan-Leistung [Stunden/Tag]

Die Terminabweichung eines Auftrags entspricht stets der Summe aus reihenfolgebedingter und rückstandsbedingter Terminabweichung (Gleichung (11), Kuyumcu, 2013, S. 46).

$$TAA_i = TAA_{RS,i} + TAA_{RA,i} \quad (11)$$

$TAA_i$	Terminabweichung von Auftrag i [Tage]
$TAA_{RS,i}$	rückstandsbedingte Terminabweichung von Auftrag i [Tage]
$TAA_{RA,i}$	reihenfolgebedingte Terminabweichung von Auftrag i [Tage]

Bild 13 zeigt die Aufteilung der Terminabweichung im Durchlaufdiagramm und führt den reihenfolgebedingten Fertigstellungstermin ( $TAA_{RA}$ ) ein. Dieser entspricht dem Zeitpunkt, zu dem der Plan-Abgang dem Ist-Rang entspricht und zeigt den Termin an, zu dem der Auftrag ohne Rückstand fertiggestellt worden wäre.



13657

**Bild 13: Terminabweichungsanteile im Durchlaufdiagramm (Lödding, 2016, S. 90)**

Dank der Aufteilung der Terminabweichung hat Kuyumcu ein systematisches Verständnis der Termintreue geschaffen, auf dem er seine Modellierung aufbaut. Er zeigt zwar, dass die Faltung der einzelnen Terminabweichungsverteilungen mit ausreichender Genauigkeit die resultierende Terminabweichungsverteilung ergibt (Kuyumcu, 2013, S. 59). Für eine direkte Ableitung der Terminabweichungsverteilung aus den Verteilungen des Rückstands, der Reihenfolgeabweichung und der Leistung ist die stochastische Faltung jedoch nicht unmittelbar anwendbar (Kuyumcu, 2013, S. 61). Daher untersucht Kuyumcu bekannte Verteilungsformen auf ihre Eignung, die Terminabweichung zu beschreiben. Er identifiziert die logistische Verteilung als die Geeignetste und erweitert diese um drei Korrekturparameter, um die Güte der Approximation zu erhöhen. Seine Arbeit zeigt, dass eine Termintreuekennlinie in Abhängigkeit von Rückstand und Reihenfolgeabweichung die Termintreue approximieren kann. Zwar erreicht er durch die Anwendung der Korrekturparameter gute Ergebnisse, jedoch ist die Nutzung der Modellierung für Unternehmen nur mit erheblichem Aufwand möglich. Zudem bestimmt das Modell selbst bei einer korrekten empirischen Ermittlung der Korrekturparameter nicht jeden Betriebspunkt einer Fertigung exakt (Kuyumcu, 2013, S. 149).

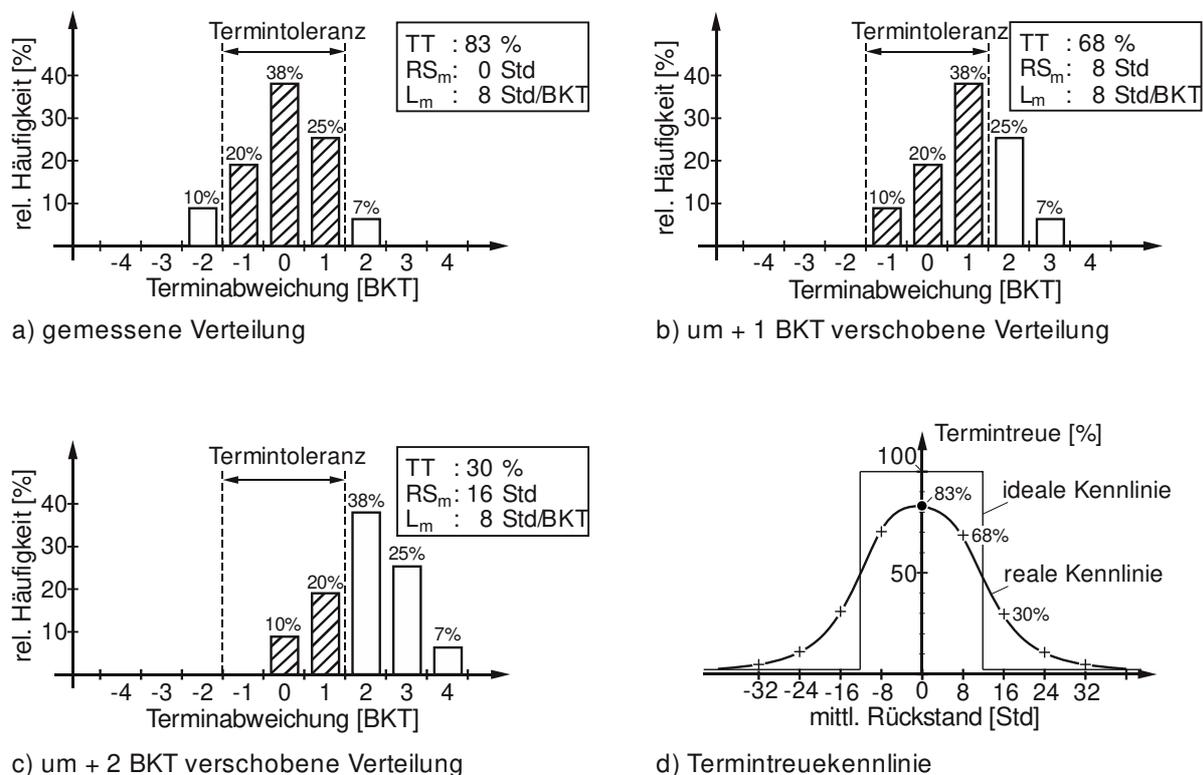
Zusätzlich zu der analytischen Modellierung entwickeln Lödding und Kuyumcu (2014, S. 2878ff.) eine einfache Methode, um eine Terminkennlinie in Abhängigkeit des Rückstands zu erzeugen. Diese zeigt, welche Termintreue eine Fertigung in Abhängigkeit der Rückstandshöhe bei unveränderter Reihenfolgeabweichung erreichen kann. Um die Kennlinie zu erzeugen, wird eine gegebene Terminabweichungsverteilung um ganze Tage verschoben. Daraufhin wird die jeweils resul-

tierende Termintreue berechnet und in einem Koordinatensystem visualisiert (vgl. Bild 14). Die Rückstandswerte zu der Verschiebung um Tage, lassen sich mit folgender Gleichung bestimmen:

$$RS(TAA_m+k)=RS_m(TAA_m)+k \cdot L_m \tag{12}$$

RS(TAA <sub>m</sub> +k)	Rückstand bei Verschiebung von TAA <sub>m</sub> um k Tage [Stunden]
RS <sub>m</sub> (TAA <sub>m</sub> )	mittlerer Rückstand bei TAA <sub>m</sub> [Stunden]
k	Verschiebung der Terminabweichungsverteilung [-]
L <sub>m</sub>	mittlere Leistung [Stunden/Tag]

Bild 14 zeigt, wie aus einer bestehenden Terminabweichungsverteilung eine Termintreuekennlinie abgeleitet wird. (Lödding, 2016, S. 97).



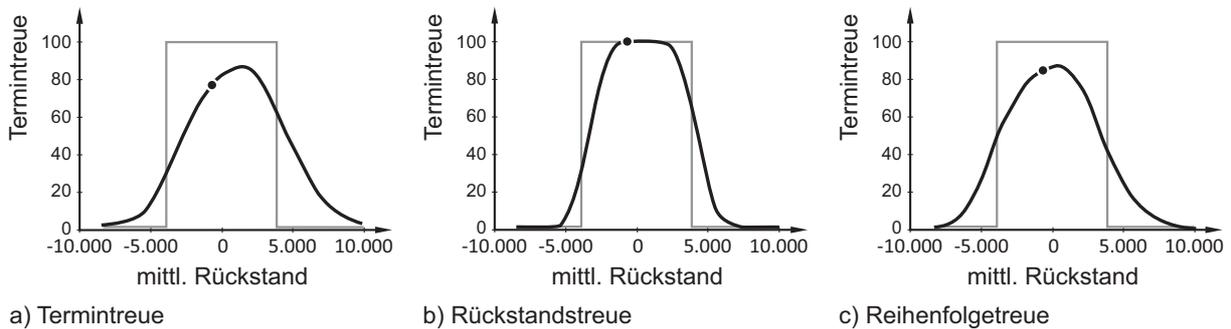
TT : Termintreue      RS : Rückstand      L : Leistung      • : Messpunkt      + : Stützpunkt

13658

**Bild 14: Ableitung einer Terminkennlinie in Abhängigkeit des mittleren Rückstands (Lödding, 2016, S. 96)**

Das Vorgehen kann analog für die einzelnen Terminabweichungsanteile durchgeführt werden und visualisiert dann die sogenannte Rückstands- bzw. Reihenfolge-treue der untersuchten Fertigung über dem mittleren Rückstand (Bild 15). Die Rückstandstreu beschreibt hierbei die Termintreue auf Basis der rückstandsbedingten Terminabweichung und die Reihenfolge-treue die Termintreue auf Basis der reihenfolgebedingten Terminabweichung. Auf diese Weise verdeutlicht das Vorgehen, ob die Reduktion des Rückstands, der Rückstandstreuung oder die Senkung der Reihenfolgeabweichung den größeren Stellhebel darstellt. Das Beispiel in Bild 15 zeigt, dass die Termintreue im betrachteten Fall ohne Reihenfolgeabweichungen bei 100 Prozent läge

(Bild 15b). Eine vollständige Vermeidung von Rückstand bei gleichbleibender Reihenfolgeabweichung würde hingegen zu einer Termintreue von ca. 90 Prozent führen (Bild 15c).



13659

**Bild 15: Terminkennlinien (Lödding, 2016, S. 97)**

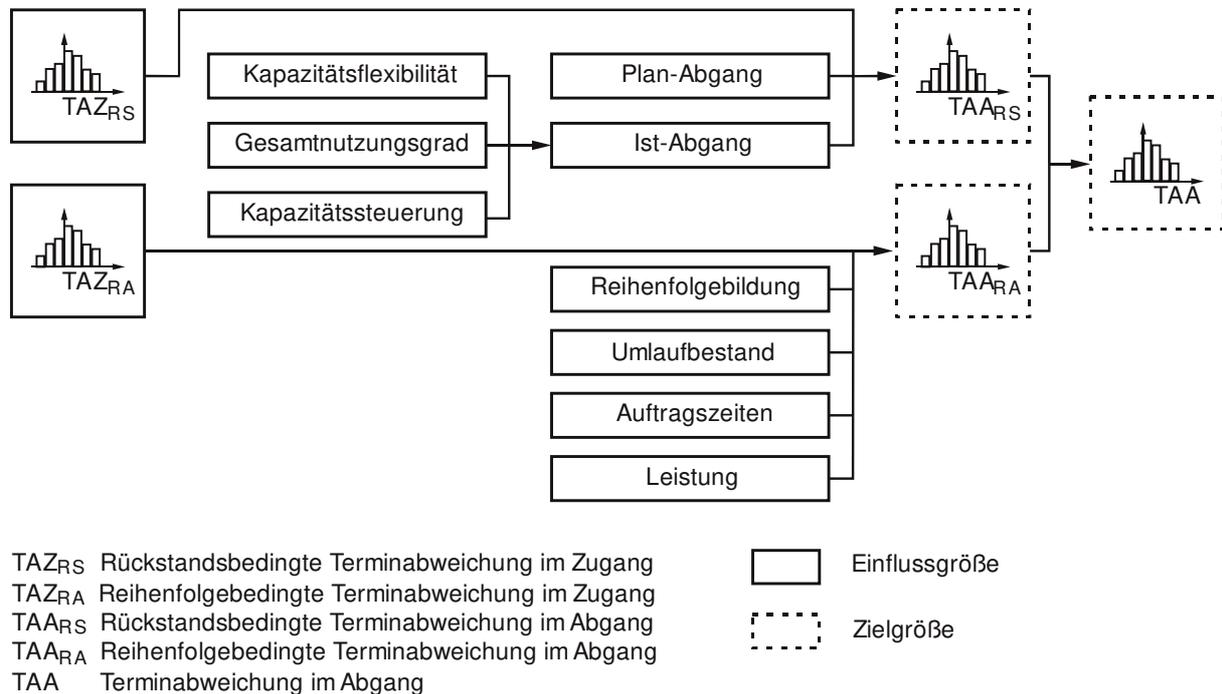
Kuyumcu gelingt es darüber hinaus, in seiner Dissertation den Einfluss der Reihenfolgedisziplin auf die Termintreue simulativ zu belegen (Kuyumcu, 2013, S. 116ff.). Er zeigt, dass eine niedrige Reihenfolgedisziplin mit zunehmendem Bestand die Termintreue stärker senkt (Kuyumcu, 2013, S. 124). Bislang fehlt jedoch ein Modell, das Unternehmen die Vorhersage der Termintreue für Fertigungsbereiche mit mehreren Arbeitssystemen ermöglicht, wenn Reihenfolgeabweichungen im Zugang auftreten und eine hohe Reihenfolgedisziplin eingehalten wird.

### Modellbasierte Berechnung der Termintreue nach Bertsch

Bertsch (2015) beschreibt in seiner Dissertation, wie die Terminabweichung eines Arbeitssystems in Abhängigkeit seiner Einflussgrößen modelliert werden kann. Die Modellierung baut auf der Arbeit von Kuyumcu (2013) auf und nutzt die Aufteilung der Terminabweichung, um deren Anteile aus Rückstand und aus Reihenfolgeabweichung separat zu modellieren (Bertsch, 2015, S. 55). Bertsch zeigt, dass die stochastische Faltung der reihenfolge- und rückstandsbedingten Terminabweichung gute Ergebnisse für die Abgangsterminabweichung eines Arbeitssystems erzielt (Bertsch, 2015, S. 127) und bestätigt damit Kuyumcus Erkenntnisse.

Bild 16 visualisiert die von Bertsch identifizierten Einflussgrößen auf die rückstandsbedingte und reihenfolgebedingte Terminabweichung. Sofern eine Rückstandsverteilung fehlt, ermittelt Bertsch diese in Abhängigkeit der Einflussgrößen und unterscheidet hierbei zwischen der Ermittlung des Rückstands bei Unterlast und bei Überlast. So stellt Bertsch fest, dass im Unterlastbereich die wesentliche Einflussgröße für den Rückstand im Abgang der Rückstand im Zugang darstellt. In diesem Fall treten Auslastungsverluste auf und der Ist-Abgang folgt dem Ist-Zugang mit einem zeitlichen Versatz (Bertsch, 2015, S. 105f.). Für den Überlastbereich stellt Bertsch fest, dass der Rückstand im Zugang durch den Bestand gepuffert wird und somit die in Bild 16 dargestellten Einflussgrößen zu berechnen sind (Bertsch, 2015, S. 107f.). Das entwickelte Modell ist aufgrund

der Berücksichtigung vieler Faktoren sehr umfassend und erfordert dementsprechend auch die Abschätzung sämtlicher Einflussgrößen.



13660

**Bild 16: Einflussgrößen der Terminabweichung im Abgang (Bertsch, 2015, S. 55)**

Für die Berechnung der reihenfolgebedingten Terminabweichung ist die angewandte Reihenfolgebildung die ausschlaggebende Einflussgröße. Daher unterscheidet Bertsch zwischen vier verschiedenen Reihenfolgeregeln: FIFO-Reihenfolgebildung, zufällige Reihenfolgebildung, rüstop-timale Reihenfolgebildung und Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin. Er stellt fest:

1. Bei FIFO-Reihenfolgebildung entspricht die reihenfolgebedingte Terminabweichung im Abgang der reihenfolgebedingten Terminabweichung im Zugang (Bertsch, 2015, S. 76).
2. Eine rüstop-timale Reihenfolgebildung folgt den Regeln einer zufälligen Reihenfolgebildung und die reihenfolgebedingte Terminabweichung ist in diesem Fall maßgeblich von der Warteschlangenlänge abhängig (Bertsch, 2015, S. 76ff.).
3. Für die Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin muss zwischen verspätet und verfrüht zugehenden Aufträgen unterschieden werden, um die reihenfolgebedingte Terminabweichung zu modellieren (Bertsch, 2015, S. 82ff.).

Bertsch modelliert die reihenfolgebedingte Terminabweichung, indem er zu der Zugangsterminabweichung eines Auftrags die minimale relative Terminabweichung addiert. Diese definiert er als Differenz aus der minimalen Durchlaufzeit eines Auftrags und der mittleren Durchlaufzeit bzw. der Reichweite eines Arbeitssystems. Mit der Berücksichtigung der Reichweite bezieht Bertsch

den Umlaufbestand des Arbeitssystems in die Berechnung ein (Bertsch, 2015, S. 84). Für die Modellierung der zu früh zugehenden Aufträge nutzt Bertsch eine sehr detaillierte Betrachtung der Aufträge in der Warteschlange. Er berechnet die Wahrscheinlichkeit, wann ein zu früh zugehender Auftrag zum dringendsten Auftrag in der Warteschlange wird (Bertsch, 2015, S. 85ff.). Für beide Modellierungsteile der reihenfolgebedingten Terminabweichung nutzt Bertsch die Prämisse konstanter Plan-Durchlaufzeiten (Bertsch, 2015, 81 & 83).

Bertsch validiert das entwickelte Modell in umfangreichen Simulationsversuchen und zeigt die hohe Güte der Modellierung unter den aufgestellten Prämissen (Bertsch, 2015, S. 122ff.). Mit zunehmender Bestandsschwankung nimmt die Genauigkeit des Modells der reihenfolgebedingten Terminabweichung ab (Bertsch, 2015, S. 141). Grigutsch (2016, S. 124ff.) wendet Bertschs Modell in seiner Dissertation auf lineare und konvergierende Materialflüsse an und zeigt damit die grundsätzliche Anwendbarkeit für Fertigungsbereiche. Eine Übertragung der Modellierung auf Fertigungsbereiche mit mehreren Arbeitssystemen ist jedoch mit einem sehr hohen Aufwand verbunden. Zudem ist eine Anwendung in komplexen Materialflüssen bisher nicht beschrieben.

## 2.5 Zusammenfassung und Defizite bisheriger Modellierungsansätze

Die bisherigen Untersuchungen zeigen die Sinnhaftigkeit einer separaten Betrachtung der Einflussgrößen auf die Termintreue: Reihenfolgeabweichung und Rückstand. Terminorientierte Reihenfolgeregeln reduzieren Reihenfolgeabweichungen und eine zuverlässige Produktionsplanung sowie eine geeignete Kapazitätssteuerung führen zu geringen Rückständen. Kuyumcu quantifiziert die Wirkung der Einflussgrößen, modelliert die Anteile der Terminabweichung in Abhängigkeit der Reihenfolgeabweichung und des Rückstands und zeigt darüber hinaus, wie mit den Verteilungsparametern der Einflussgrößen eine Termintreuekennlinie erzeugt wird. Zudem verdeutlicht er simulativ, welchen Einfluss die Reihenfolgedisziplin bei unterschiedlichen Bestandsniveaus auf die reihenfolgebedingte Termintreue hat.

Bertsch erweitert Kuyumcus Modellierung und zeigt auf, welche Einflussgrößen sowohl für die reihenfolgebedingte als auch rückstandsbedingte Terminabweichung vorliegen. Ihm gelingt es erstmals, die Auswirkungen von Reihenfolgeregeln auf die Terminabweichung analytisch zu modellieren. Darüber hinaus zeigt er, wie sich Rückstände eines Arbeitssystems in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen berechnen lassen. Damit gelingt es ihm, beide Terminabweichungsanteile für ein Arbeitssystem zu modellieren und schließlich mit der Faltung der einzelnen Verteilungen in die Abgangsterminabweichung zu überführen. Die Prämissen für die Anwendung seines Modells sind jedoch konstante Plan-Durchlaufzeiten und Einzelarbeitssysteme.

Darüber hinaus sind die bisher entwickelten Modelle nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand für Fertigungsbereiche mit mehreren Arbeitssystemen anwendbar. Für einen linearen Materialfluss ist

der Zusammenhang zwischen der Abgangsterminabweichung des Vorgängers und der Zugangsterminabweichung des Nachfolgers zwar einfach hergeleitet. Jedoch fehlen bereits für leicht komplexere Materialflüsse Modelle, die die Zusammenhänge ausreichend genau und einfach beschreiben. Die Modellierung von Bertsch ist unter den genannten Prämissen dafür geeignet, jedoch vergleichsweise komplex und daher nicht einfach verständlich.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, aufbauend auf den bisherigen Forschungsergebnissen, die Termintreue im Auftragsdurchlauf zu modellieren. Die Modellierung soll sowohl für einfache als auch für komplexe Materialflüsse geeignet sein und die Zusammenhänge in einem einfachen Modell mit ausreichender Genauigkeit beschreiben. Darüber hinaus soll die Arbeit zeigen, was Unternehmen tun können, um die Termintreue zu verbessern. Hierzu wird insbesondere die Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin untersucht. Darüber hinaus werden Kennzahlen entwickelt, die die Reihenfolgeeinhaltung umfassend beschreiben.

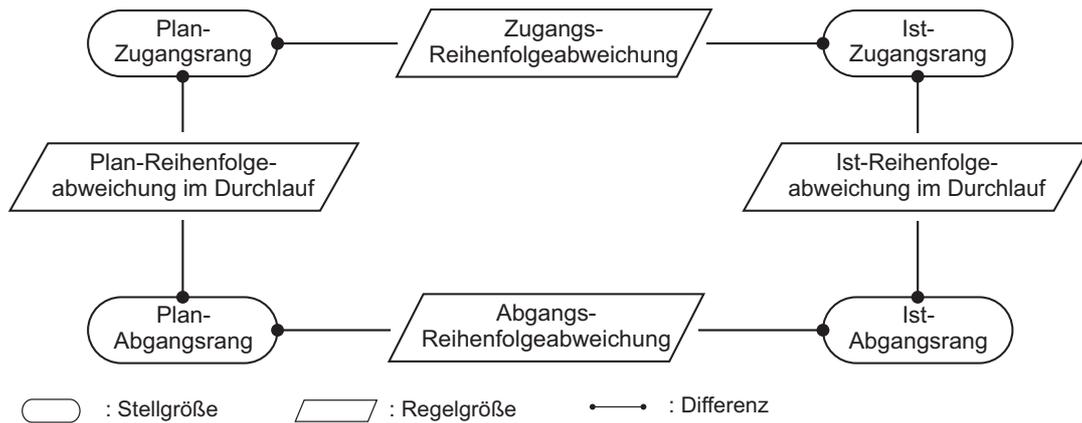
### 3 Modellierung der Termintreue im Auftragsdurchlauf

Das nachfolgend vorgestellte Modell soll eine Antwort auf die Frage geben, welche Terminabweichung ein Auftrag bestenfalls erreichen kann, wenn er einer Fertigung mit einer gegebenen Reihenfolgeabweichung und bei einem bekannten Rückstand zugeht. Daraus lässt sich die Termintreue eines Arbeitssystems als auch einer Fertigung bei einer Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin modellieren. Abschnitt 3.1 beschreibt zunächst, an welchen relevanten Stellen eine Reihenfolgeabweichung messbar ist und erweitert somit die Definition der Reihenfolgeabweichung. Daraufhin werden die Einflussgrößen der Terminabweichung einzeln modelliert. Abschnitt 3.2 zeigt, wie sich die Reihenfolgeabweichung für beliebige Aufträge bei gegebener Reihenfolgeabweichung im Zugang ermitteln lässt. Zunächst erfolgt die Modellierung für ein Arbeitssystem und daraufhin die Erweiterung auf eine Kombination von Arbeitssystemen, wie sie in einer Werkstattfertigung anzutreffen ist. Der darauffolgende Abschnitt 3.3 beschreibt, welchen Einfluss der Rückstand im Zugang auf den Rückstand im Abgang eines Auftragsdurchlaufs besitzt. Die Modellierung wird auch für den Rückstand schrittweise eingeführt. Abschließend (Abschnitt 3.4) erfolgt die Modellsynthese, die Rückschlüsse auf die Terminabweichungsverteilung im Abgang in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen ermöglicht.

#### 3.1 Erweiterung der Definition der Reihenfolgeabweichung

Kuyumcu definiert in seiner Dissertation die Reihenfolgeabweichung im Abgang als Differenz zwischen Ist- und Plan-Abgangsrang eines Auftrags. Diese Definition lässt sich analog auf den Zugangsrang übertragen und ermöglicht somit eine genaue Analyse der Planeinhaltung im Zugang eines Arbeitssystems oder einer Fertigung. Die Reihenfolgeabweichung im Zugang beschreibt, um wie viele Ränge ein Auftrag verzögert ( $RAA_{ZU} > 0$ ) bzw. beschleunigt ( $RAA_{ZU} < 0$ ) einem Arbeitssystem zugeht. Wie die Reihenfolgeabweichung im Abgang lässt sich auch die Reihenfolgeabweichung im Zugang mit der Auftragszeit gewichten, um zu beurteilen, ob eher große oder kleine Aufträge verzögert (beschleunigt) zugehen. Aus der Quantifizierung der Reihenfolgeabweichung im Zugang lässt sich schließlich auch die Terminabweichung im Zugang in ihre Anteile aus Reihenfolgeabweichung und Rückstand aufteilen.

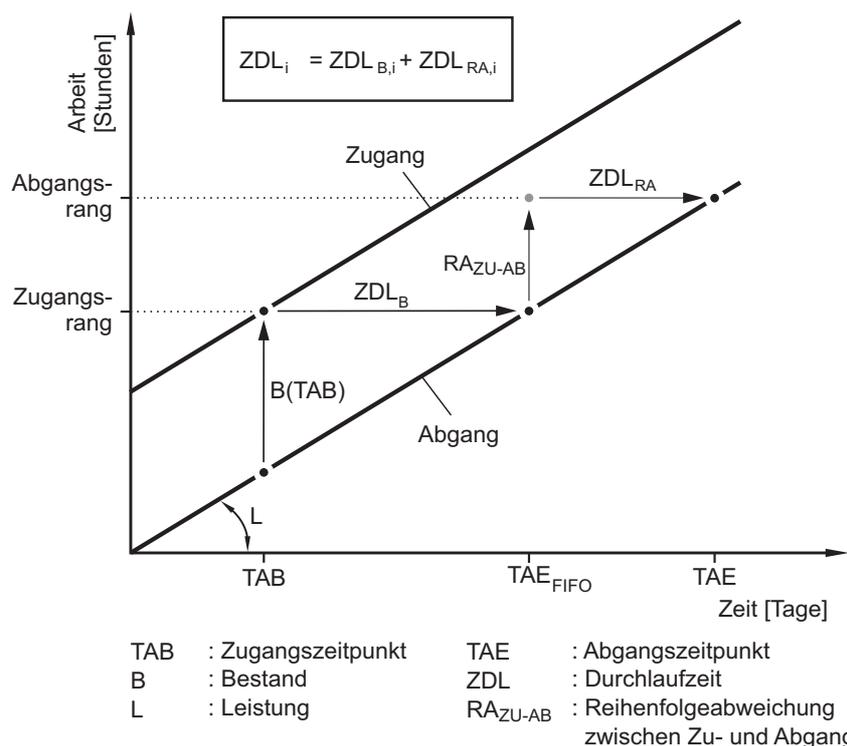
Um die Beschleunigung eines Auftrags zu beurteilen, ist es darüber hinaus sinnvoll, die Reihenfolgeabweichung eines Auftrags zwischen dem Zugang und dem Abgang zu definieren. Diese zeigt die Beschleunigung (bzw. Verzögerung) eines Auftrags an einem Arbeitssystem im Vergleich zu einer FIFO-Reihenfolgebildung an. Die Beschleunigung lässt sich als Plan-Größe mit der Differenz aus Plan-Zugangs- und Plan-Abgangsrang bestimmen; als Ist-Wert entsprechend als Differenz von Ist-Zugangs- und Ist-Abgangsrang. Bild 17 visualisiert die unterschiedlichen Reihenfolgeabweichungen.



13661

**Bild 17: Definition der Reihenfolgeabweichung**

Lödding und Piontek (2018) nutzen die Definition der Reihenfolgeabweichung zwischen Zugang und Abgang, um Little's Law zu erweitern. Dabei bedienen sie sich der gleichen Logik, wie Kuyumcu sie für die Aufteilung der Terminabweichung verwendet. Daraus folgt, dass auch die Durchlaufzeit sich in zwei Komponenten aufteilen lässt: die bestandsbedingte Durchlaufzeit und die reihenfolgebedingte Durchlaufzeit (Bild 18).



13662

**Bild 18: Aufteilung der Durchlaufzeit**

Die bestandsbedingte Durchlaufzeit entspricht der Durchlaufzeit eines Auftrags, wenn die Reihenfolgebildung nach der FIFO-Logik erfolgt. Sie ergibt sich aus der horizontalen Differenz zwischen Abgang und Zugang. Die reihenfolgebedingte Durchlaufzeit hingegen bildet den Einfluss der Reihenfolgebildung auf die Durchlaufzeit ab. Diese lässt sich im Durchlaufdiagramm als Differenz zwischen dem Endtermin (TAE) eines Auftrags und dem errechneten Endtermin bei

FIFO-Reihenfolgebildung ( $TAE_{\text{FIFO}}$ ) ablesen. Für die reihenfolgebedingte Durchlaufzeit gilt darüber hinaus, dass sie dem Quotienten aus der Reihenfolgeabweichung zwischen Zu- und Abgang und der Leistung entspricht.

Mit der Erweiterung von Little's Law kann man den frühesten Abgangszeitpunkt eines Auftrags an einem Arbeitssystem bestimmen. Dies nutzt die Modellierung der reihenfolgebedingten Terminabweichung im folgenden Abschnitt. Für eine ausführliche Herleitung der Erweiterung von Little's Law wird an dieser Stelle auf die Veröffentlichung hierzu von Lödding und Piontek (2018) verwiesen.

## 3.2 Modellierung der reihenfolgebedingten Terminabweichung

Die Reihenfolgeabweichung eines Auftrags im Abgang ist als Differenz zwischen Ist- und Plan-Abgangsrank definiert (vgl. Abschnitt 2.1). Da der Plan-Abgangsrank eines Auftrags aus der Produktionsplanung hervorgeht und durch die Fertigungssteuerung nicht beeinflussbar ist, liegt der Schwerpunkt der Modellierung der Reihenfolgeabweichung auf der Ermittlung des minimalen Ist-Abgangsrank eines Auftrags. Dieser eignet sich, um eine Untergrenze für die Reihenfolgeabweichung zu ermitteln und somit insbesondere für verspätet zugewandene Aufträge zu prüfen, ob sich diese trotz ihrer Verspätung noch rechtzeitig fertigstellen lassen. Mit Hilfe des modellierten Ist-Abgangsrank lassen sich daraufhin sowohl die Reihenfolgeabweichung als auch die reihenfolgebedingte Terminabweichung ermitteln.

Die Beschreibung der Modellierung ist in mehrere Abschnitte unterteilt: Während Abschnitt 3.2.1 die Modellierung der Reihenfolgeabweichung für ein Arbeitssystem beschreibt, erweitert Abschnitt 3.2.2 die Modellierung auf Fertigungsbereiche mit mehreren Arbeitssystemen. Darauf aufbauend zeigt Abschnitt 3.2.3, wie sich aus der Modellierung der minimalen reihenfolgebedingten Terminabweichung die reihenfolgebedingte Termintreue abschätzen lässt. Abschnitt 3.2.4 zeigt zusätzlich zur entwickelten Modellierung, wie sich Reihenfolgeentscheidungen an Arbeitssystemen umfangreich bewerten lassen.

### 3.2.1 Reihenfolgebedingte Terminabweichung für ein Arbeitssystem

Hinweis: Die in diesem Abschnitt vorgestellte Modellierung wurde in weiten Teilen bereits im PPC-Journal veröffentlicht (Lödding & Piontek, 2017).

Geht ein Auftrag einem Arbeitssystem zu, so erhält er einen eindeutigen Zugangsrank. Dieser wird in der Regel entweder in Vorgabestunden oder in der Anzahl zugewandener Aufträge gemessen (vgl. Abschnitt 2.1). Der Ist-Zugangsrank eines Auftrags entspricht definitionsgemäß dem Wert des Ist-Zugangs zum Zugangszeitpunkt des betrachteten Auftrags (inkl. dem zugehenden Auftrag). Welchen Ist-Abgangsrank dieser Auftrag erreicht, hängt primär von der Reihenfolge-

bildung ab. Wird an einem Arbeitssystem mit nur einer Maschine eine FIFO-Reihenfolgebildung verfolgt, so entspricht der Ist-Abgangsrank eines Auftrags seinem Ist-Zugangsrank. Daher gilt für eine strikte FIFO-Reihenfolgebildung an einem Arbeitssystem mit einer Maschine:

$$RgA_{AB,i} = RgA_{ZU,i} \quad (13)$$

$RgA_{AB,i}$  Abgangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $RgA_{ZU,i}$  Zugangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]

Besteht ein Arbeitssystem aus mehreren parallelen Maschinen, können die Abgangsranke auch bei einer strikten FIFO-Reihenfolgebildung von den Zugangsrancken abweichen, sofern die Auftragszeiten variieren. In diesem Fall ist es möglich, dass ein Auftrag aufgrund seiner längeren Auftragszeit von einem später zugehenden Auftrag mit kürzerer Auftragszeit überholt wird.

Für eine terminorientierte Reihenfolgebildung ist es möglich, den minimalen Abgangsrank zu modellieren. Der minimale Abgangsrank ergibt sich hierbei durch die maximale Beschleunigung des betrachteten Auftrags. Eine maximale Beschleunigung des Auftrags bedeutet, dass der Auftrag die höchste Priorität in der Warteschlange besitzt und als nächstmöglicher bearbeitet wird. An dieser Stelle werden zwei Fälle unterschieden:

1. Das Arbeitssystem ist zum Zugangszeitpunkt frei.
2. Das Arbeitssystem ist zum Zugangszeitpunkt belegt.

Für Arbeitssysteme mit hoher Auslastung ist in der Regel der zweite Fall gültig.

Da der Abgangsrank eines Auftrags dem Abgang zum Abgangszeitpunkt eines Arbeitssystems entspricht, gilt für die Ermittlung des minimalen Abgangsrancks eines Auftrags:

$$RgA_{AB,min,i} = \begin{cases} ABA(TZU_i) + 1, & \text{wenn das Arbeitssystem frei ist} \\ ABA(TZU_i) + 2, & \text{wenn das Arbeitssystem belegt ist} \end{cases} \quad (14)$$

$RgA_{AB,min,i}$  minimaler Abgangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $ABA(TZU_i)$  Abgang zum Zugangszeitpunkt von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]

Für Arbeitssysteme mit mehreren Maschinen bzw. Arbeitsplätzen wird die Modellierung erweitert. Unter der Voraussetzung, dass

- alle Maschinen (Arbeitsplätze) zum Zugangszeitpunkt belegt sind,
- alle Aufträge, die bereits in Bearbeitung sind, vor dem betrachteten Auftrag fertiggestellt werden und
- der betrachtete Auftrag nicht von anderen Aufträgen überholt wird,

berechnet sich der minimale Abgangsrank wie folgt:

$$RgA_{AB,min,i} = ABA(TZU_i) + AnzahlMaschinen + 1 \quad (15)$$

$RgA_{AB,min,i}$  minimaler Abgangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $ABA(TZU_i)$  Abgang zum Zugangszeitpunkt von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]

Die Höhe der Beschleunigung eines Auftrags ist bestandsabhängig. Je mehr Aufträge in einer Warteschlange enthalten sind, umso mehr Aufträge kann ein betrachteter Auftrag überspringen. Daher ist es sinnvoll, Gleichung (15) bestandsabhängig darzustellen. Hierzu wird der Zusammenhang zwischen Zugang, Bestand und Abgang eines Systems genutzt. Demnach entspricht der Abgang eines Arbeitssystems zu jedem Zeitpunkt dem Zugang abzüglich des Bestands. Im weiteren Verlauf wird vorerst der Fall eines Arbeitssystems mit einer Maschine und hoher Auslastung genutzt, um die Modellierung herzuleiten. Für diesen Fall werden daher zu der umgeformten Gleichung zwei Ränge hinzuaddiert:

$$RgA_{AB,min,i} = ZUA(TZU_i) - BA(TZU_i) + 2 \quad (16)$$

$RgA_{AB,min,i}$  minimaler Abgangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $BA(TZU_i)$  Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $ZUA(TZU_i)$  Zugang zum Zugangszeitpunkt von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]

Neben dem Bestand ist die Reihenfolgeabweichung im Zugang eine entscheidende Größe für den minimalen Abgangsrank. Die Reihenfolgeabweichung im Zugang ist wie folgt definiert:

$$RAA_{ZU,i} = RgA_{ZU,Ist,i} - RgA_{ZU,Plan,i} \quad (17)$$

$RAA_{ZU,i}$  Reihenfolgeabweichung im Zugang von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $RgA_{ZU,Ist,i}$  Ist-Zugangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $RgA_{ZU,Plan,i}$  Plan-Zugangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]

Da der Ist-Zugangsrank eines Auftrags ( $RgA_{ZU,Ist,i}$ ) dem Ist-Zugang zum Zugangstermin des Auftrags ( $ZUA(TZU_i)$ ) entspricht, wird Gleichung (17) umgeformt und in Gleichung (16) eingesetzt. Es folgt für den minimalen Abgangsrank eines Auftrags:

$$RgA_{AB,min,i} = RAA_{ZU,i} - BA(TZU_i) + 2 + RgA_{ZU,Plan,i} \quad (18)$$

$RgA_{AB,min,i}$  minimaler Abgangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $RAA_{ZU,i}$  Reihenfolgeabweichung im Zugang von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $BA(TZU_i)$  Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $RgA_{ZU,Plan,i}$  Plan-Zugangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]

Für die minimale Reihenfolgeabweichung folgt dementsprechend:

$$RAA_{min,i} = RAA_{ZU,i} - BA(TZU_i) + 2 + RgA_{ZU,Plan,i} - RgA_{AB,Plan,i} \quad (19)$$

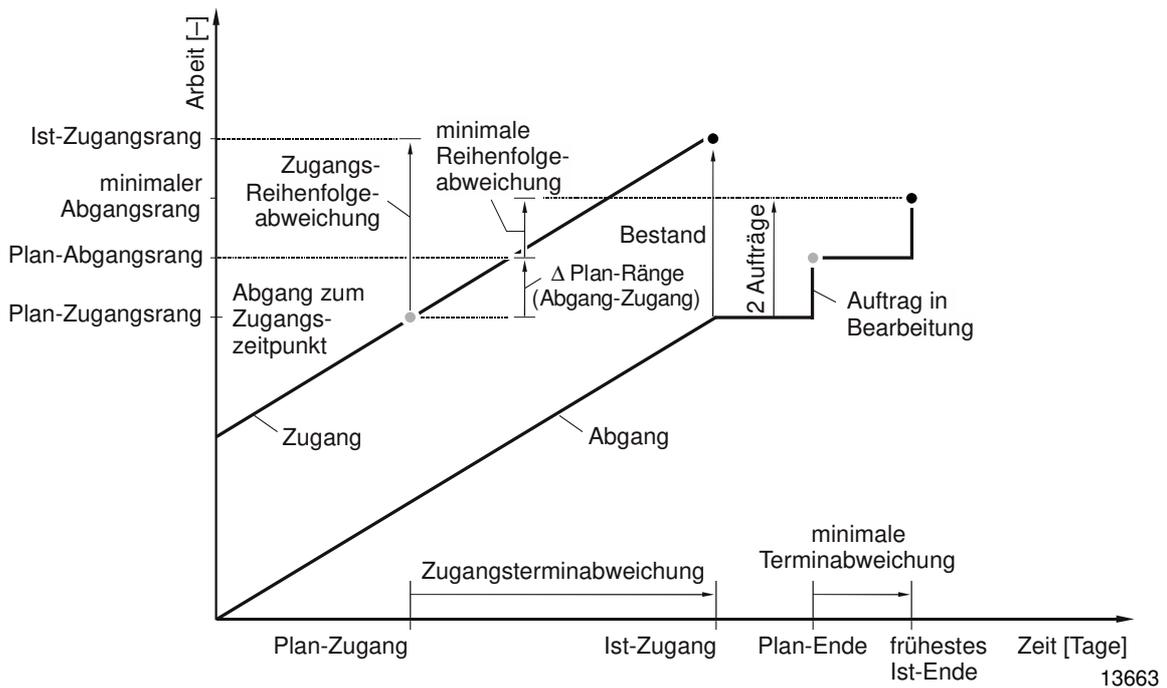
$RAA_{min,i}$  Minimale Reihenfolgeabweichung von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $RAA_{ZU,i}$  Reihenfolgeabweichung im Zugang von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $BA(TZU_i)$  Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $RgA_{ZU,Plan,i}$  Plan-Zugangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]  
 $RgA_{AB,Plan,i}$  Plan-Abgangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]

Bestände liegen oftmals nur zu ausgewählten Messzeitpunkten vor, da die EDV-seitige Erfassung jedes Zu- und Abgangs nicht immer direkt erfolgt. Ist der Bestand zum Zugangszeitpunkt unbekannt, ist eine Näherung mit dem mittleren Bestand möglich. Da der Bestand zum Zugangszeitpunkt eines Auftrags im Mittel höher ist, folgt als Näherung für den Bestand zum Zugangszeitpunkt:

$$BA(TZU_i) = BA_m + 0,5 \tag{20}$$

$BA(TZU_i)$  Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag  $i$  in Anzahl Aufträgen [-]  
 $BA_m$  Mittlerer Bestand in Anzahl Aufträgen [-]

Bild 19 zeigt die Modellierung des minimalen Abgangs für ein Arbeitssystem im Durchlaufdiagramm. Als Zwischenfazit lässt sich festhalten: Die Reihenfolgeabweichung eines Auftrags an einem Einzelarbeitssystem ist von drei Größen abhängig, der Zugangsreihenfolgeabweichung, dem Bestand zum Zugangszeitpunkt des betrachteten Auftrags und der geplanten Reihenfolgeabweichungen zwischen Zugang und Abgang (z. B. bei Eilaufträgen). An einem Arbeitssystem mit parallelen Maschinen ist darüber hinaus die Anzahl der Maschinen zu berücksichtigen.



**Bild 19: Darstellung des minimalen Abgangs im Durchlaufdiagramm (Lödding & Piontek, 2017, S. 462)**

Die Modellierung des minimalen Abgangs beruht auf der maximalen Beschleunigung eines Auftrags. Die maximale Beschleunigung von Aufträgen ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn diese notwendig ist, um einen Auftrag rechtzeitig fertigzustellen. Daher wird für die Bestimmung der resultierenden Reihenfolgeabweichung eine Fallunterscheidung vorgenommen.

Fall 1: Ein Auftrag muss beschleunigt werden.

Fall 2: Ein Auftrag muss nicht beschleunigt werden.

Für den ersten Fall gilt, Aufträge mit einer positiven Zugangsreihenfolgeabweichung (zu spät zugegangen) werden so weit beschleunigt, wie dies zum Ausgleich der Reihenfolgeabweichung im Zugang erforderlich ist (Ziel: Reihenfolgeabweichung im Abgang = 0), wobei die minimale Reihenfolgeabweichung nicht unterschritten werden kann. Gleichung (21) beschreibt den ersten Fall der Fallunterscheidung.

$$RAA_{i,RAAZU>0} = \max(RAA_{\min,i}; 0) \quad (21)$$

$RAA_{i,RAAZU>0}$	Reihenfolgeabweichung von Auftrag i bei positiver Zugangsreihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen [-]
$RAA_{\min,i}$	Minimale Reihenfolgeabweichung von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]

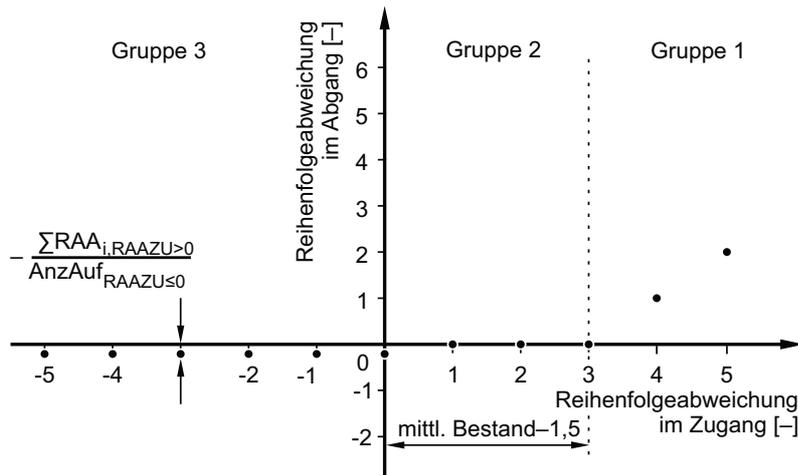
Der zweite Fall gilt für alle restlichen Aufträge, die das Arbeitssystem mit negativer oder ohne Zugangsreihenfolgeabweichung erreichen (zu früh oder pünktlich zugegangen). Hierzu ist zunächst eine vereinfachte Näherung möglich. Die Summe aller Reihenfolgeabweichungen in Anzahl Aufträgen ergibt per Definition null. Daher muss die Summe der negativen Reihenfolgeabweichungen die positiven ausgleichen. Der Mittelwert der negativen Reihenfolgeabweichung entspricht demnach der Summe der positiven Reihenfolgeabweichungen geteilt durch die Anzahl aller Aufträge mit nicht positiver Reihenfolgeabweichung im Zugang. Gleichung (22) zeigt den zweiten Fall der Fallunterscheidung.

$$RAA_{i,RAAZU\leq 0} = - \frac{\sum RAA_{i,RAAZU>0}}{AnzAuf_{RAAZU\leq 0}} \quad (22)$$

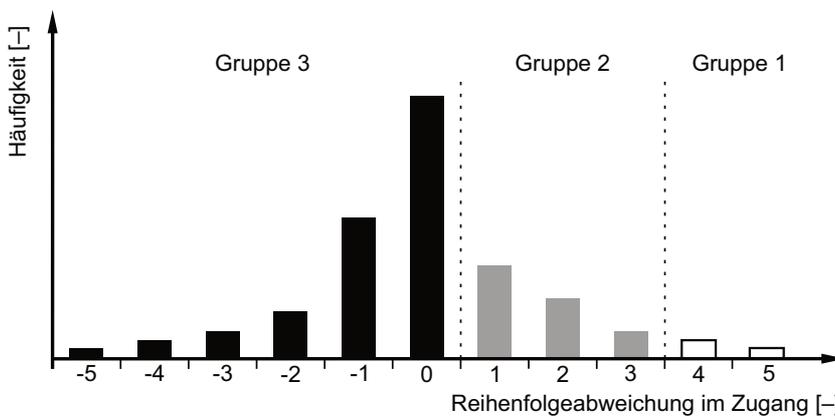
$RAA_{i,RAAZU\leq 0}$	Reihenfolgeabweichung von Auftrag i bei nicht positiver Zugangsreihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen [-]
$RAA_{i,RAAZU>0}$	Reihenfolgeabweichung von Auftrag i bei positiver Zugangsreihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen [-]
$AnzAuf_{RAAZU\leq 0}$	Anzahl der Aufträge mit einer nicht positiven Zugangsreihenfolgeabweichung [-]

Bild 20 verdeutlicht die Fallunterscheidung und den Effekt der vereinfachten Näherung. Bild 20a zeigt die prognostizierte Reihenfolgeabweichung über der Reihenfolgeabweichung im Zugang. Es wird deutlich, dass drei Gruppen an Aufträgen bzw. Reihenfolgeabweichungen mit der vorgestellten Modellierung auftreten können. Die erste Gruppe bildet den Teil von Fall 1 ab, bei dem der Auftrag maximal beschleunigt wird und dennoch eine Reihenfolgeabweichung im Abgang erfährt. Die zweite Gruppe repräsentiert die Gruppe der Aufträge, die zwar mit einer positiven Reihenfolgeabweichung zugehen, aber gezielt beschleunigt werden, um ohne Reihenfolgeabweichung abzugehen. Gruppe 3 zeigt die vereinfachte Modellierung der Reihenfolgeabweichung aller Aufträge, die dem Arbeitssystem mit einer nicht positiven Reihenfolgeabweichung zugehen.

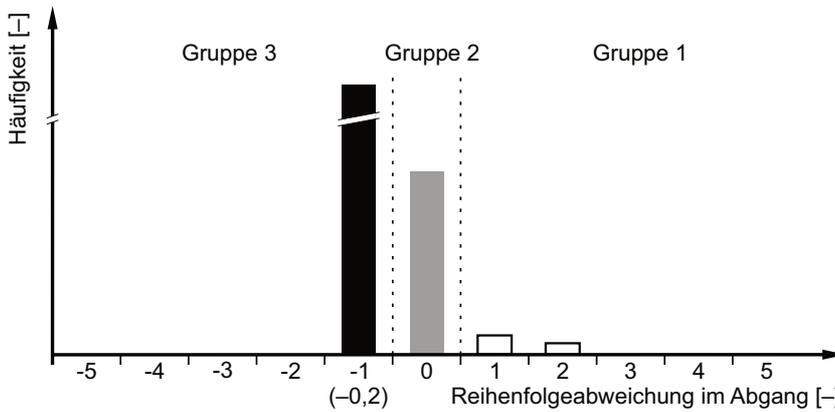
Im unteren Bildteil ist eine Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang (Bild 20b) und die dazugehörige prognostizierte Reihenfolgeabweichung im Abgang (Bild 20c) in Histogrammen zu sehen. Es wird deutlich, dass die Prognose der negativen Reihenfolgeabweichung im Abgang (Gruppe 3) vereinfacht ist. In der Realität wird die Reihenfolgeabweichung zwangsläufig auf mehrere Klassen verteilt sein. Dies zeigt sich auch im errechneten Mittelwert der negativen Reihenfolgeabweichung, der bei  $-0,2$  Aufträgen liegt. Die Reihenfolgeabweichung folgt keiner klassischen Verteilungsform, wie zum Beispiel der Normalverteilung, daher lässt sich der negative Bereich der Reihenfolgeabweichung durch eine Verteilungsform lediglich abschätzen. Abschnitt 3.2.3 zeigt ein vereinfachtes Vorgehen, um die Verteilung der negativen reihenfolgebedingten Terminabweichung zu schätzen.



a) Prognoselogik für die Reihenfolgeabweichung im Abgang (bei konstanten Plan-Durchlaufzeiten)



b) Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang



c) Prognose der Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Abgang

- RAA : Reihenfolgeabweichung im Abgang in Anzahl Aufträgen
- RAA<sub>RAAZU>0</sub> : Reihenfolgeabweichung im Abgang bei positiver Reihenfolgeabweichung im Zugang
- RAAZU : Reihenfolgeabweichung im Zugang in Anzahl Aufträgen
- AnzAuf : Anzahl Aufträge

13664

**Bild 20: Fallunterscheidung zur Prognose der Reihenfolgeabweichung (Lödding & Piontek, 2017, S. 465)**

Aus der Reihenfolgeabweichung lässt sich schließlich die reihenfolgebedingte Terminabweichung ermitteln. Sie entspricht dem Quotienten aus der Reihenfolgeabweichung und der Plan-Leistung, die zwischen dem Zugang des Auftrags und dem reihenfolgebedingten Abgang des Auftrags vor-

liegt (vgl. Abschnitt 2.4). Eine einfache Näherung für die Plan-Leistung ist ihr Mittelwert. Daher folgt für die prognostizierte reihenfolgebedingte Terminabweichung:

$$TAA_{RA,i} = \frac{RAA_i}{LA_{Plan,m}} \quad (23)$$

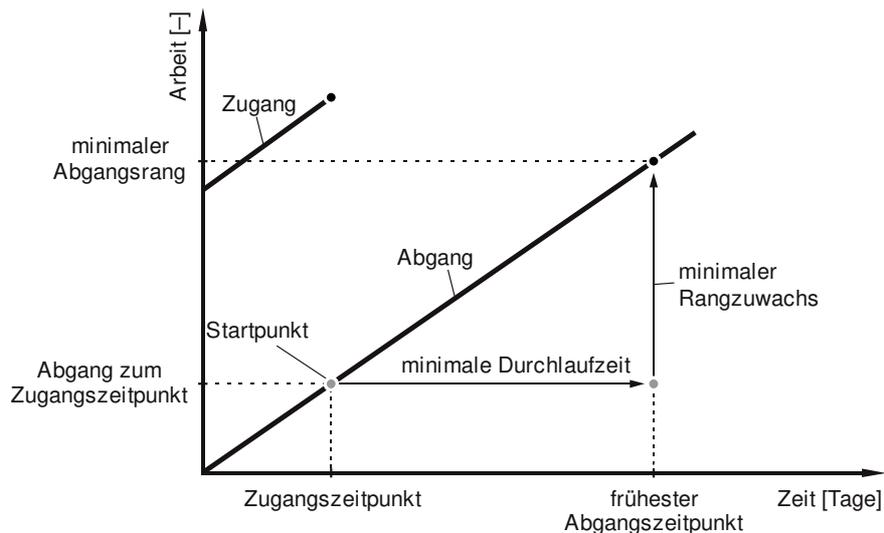
$TAA_{RA,i}$	Reihenfolgebedingte Terminabweichung von Auftrag i [Tage]
$RAA_i$	Reihenfolgeabweichung von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$LA_{Plan,m}$	Mittlere Plan-Leistung in Anzahl Aufträgen [-/Tag]

Die in diesem Abschnitt beschriebene Modellierung der reihenfolgebedingten Terminabweichung von Aufträgen für ein Arbeitssystem ist die Grundlage für die Modellierung über mehrere Arbeitssysteme, die der folgende Abschnitt beschreibt.

### 3.2.2 Reihenfolgebedingte Terminabweichung für Fertigungsbereiche

In komplexen Materialflüssen verfolgen Aufträge unterschiedliche Wege durch die Fertigung. Diese können sich in der Art und Anzahl der durchlaufenen Arbeitssysteme unterscheiden. Die Ausgangssituation ist jedoch identisch zur Modellierung für ein Arbeitssystem: Ein Auftrag geht der Fertigung zu und die Frage ist, welcher Abgangsrang bei einer maximalen Beschleunigung an jedem Arbeitssystem resultiert. Hierzu ist es notwendig, den Abgang zum Zugangszeitpunkt, den Abgangsverlauf der Fertigung und die minimale Durchlaufzeit des Auftrags zu kennen (vgl. Bild 21). Um die minimale Durchlaufzeit zu ermitteln, werden der Arbeitsplan bzw. die zu durchlaufenen Arbeitssysteme und die dazugehörigen Auftragszeiten benötigt.

Die Prämissen des vorgestellten Modells sind, dass die Arbeitssysteme eine strikte Reihenfolgebildung nach Termin verfolgen und keine Rückstände durch Maschinenstörungen oder andere kapazitive Störungen (z. B. Personalausfälle) entstehen. Die Modell-Herleitung bezieht sich an einigen Stellen auf die Erkenntnisse zur Eilauftragsmodellierung von Trzyna (2015, S. 36ff.), da eine maximale Beschleunigung, wie sie für die Modellierung im ersten Schritt angenommen wird, starke Ähnlichkeiten zur Eilauftragsmodellierung aufweist.



13665

**Bild 21: Grundidee der Modellierung im Auftragsdurchlauf**

Analog zur Modellierung für ein Arbeitssystem ist der Ausgangspunkt der Modellierung der Ist-Abgang der Fertigung zum Zugangszeitpunkt. Zu diesem wird der modellierte minimale Rangzuwachs ( $\Delta RgA_{\min,i}$ ), der aufgrund der minimalen Durchlaufzeit folgt, addiert (Gleichung (24)).

$$RgA_{AB,\min,i} = ABA(TZU_i) + \Delta RgA_{\min,i} \quad (24)$$

$RgA_{AB,\min,i}$	Minimaler Abgangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$ABA(TZU_i)$	Ist-Abgang zum Zugangszeitpunkt von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$\Delta RgA_{\min,i}$	Minimaler Rangzuwachs in Anzahl Aufträgen [-]

Der Abgang zum Zugangszeitpunkt wird analog zur Modellierung für ein Arbeitssystem ermittelt, indem zunächst vom Zugangsrank der Bestand subtrahiert wird (vgl. Gleichung (16)). Weiterhin wird der Ist-Zugangsrank durch den Plan-Zugangsrank und die Reihenfolgeabweichung im Zugang ersetzt (vgl. Gleichung (17)). Umgeformt folgt:

$$RgA_{AB,\min,i} = RgA_{ZU,Plan,i} + RAA_{ZU} - BA(TZU_i) + \Delta RgA_{\min,i} \quad (25)$$

$RgA_{AB,\min,i}$	Minimaler Abgangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$RgA_{ZU,Plan}$	Plan-Zugangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$RAA_{ZU}$	Zugangsreihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen [-]
$BA(TZU_i)$	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$\Delta RgA_{\min,i}$	Minimaler Rangzuwachs in Anzahl Aufträgen [-]

Der minimale Rangzuwachs hängt von der minimalen Auftragsdurchlaufzeit ab und stellt sich bei einer maximalen Beschleunigung an jedem Arbeitssystem ein. Die Auftragsdurchlaufzeit ergibt sich aus der Summe der Durchlaufzeiten, die der Auftrag an jedem Arbeitssystem erfährt. Die minimale Durchlaufzeit hängt hierbei für jedes Arbeitssystem von der minimalen Wartezeit des Auftrags und seiner Durchführungszeit ab. Für Arbeitssysteme mit mehreren Maschinen entspricht die minimale Wartezeit der kleinsten restlichen Auftragszeit der auf den Maschinen befindlichen Aufträge. Die folgenden Ausführungen gelten für Arbeitssysteme mit einer Maschine.

Für Arbeitssysteme mit einer Maschine und hoher Auslastung entspricht die minimale Wartezeit der restlichen Bearbeitungszeit des zum Zugangszeitpunkt auf der Maschine befindlichen Auftrags (Trzyna, 2015, S. 38ff.):

$$Z_{W_{\min,i}} = Z_{AU_{\text{Rest},j}} \quad (26)$$

$Z_{W_{\min,i}}$  Minimale Wartezeit für Auftrag i [Stunden]  
 $Z_{AU_{\text{Rest},j}}$  Restauftragszeit von Auftrag i an Arbeitssystem j [Stunden]

Die restliche Auftragszeit ist vom Zugangszeitpunkt des Auftrags abhängig. Im ungünstigsten Fall geht der Auftrag genau dann zu, wenn gerade die Bearbeitung eines anderen Auftrags begonnen wurde. In diesem Fall wartet der Auftrag die gesamte Auftragszeit des momentan aufgelegten Auftrags. Im besten Fall wartet der Auftrag gar nicht, da der vorher aufgelegte Auftrag in dem Moment fertiggestellt wird, in dem der betrachtete Auftrag zugeht. Im Mittel trifft der Auftrag bei der halben Auftragszeit ein. Für die Berechnung der mittleren Wartezeit ist jedoch zu berücksichtigen, dass große Aufträge ein Arbeitssystem länger belegen als Aufträge mit kleinen Auftragszeiten. Daher ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass ein neu eintreffender Auftrag auf die Restbearbeitung eines großen Auftrags warten muss (Jäger, 2000, S. 69, Trzyna, 2015, S. 40). Daher dient die halbe mittlere gewichtete Auftragszeit als Näherung für die restliche Auftragszeit.

$$Z_{AU_{\text{Rest}}} \approx \frac{Z_{AU_{\text{mg}}}}{2} = \frac{Z_{AU_{\text{m}}} \cdot (1 + Z_{AU_{\text{v}}}^2)}{2} \quad (27)$$

$Z_{AU_{\text{Rest}}}$  Restauftragszeit [Stunden]                       $Z_{AU_{\text{mg}}}$  Mittlere gewichtete Auftragszeit [Stunden]  
 $Z_{AU_{\text{m}}}$  Mittlere Auftragszeit [Stunden]                       $Z_{AU_{\text{v}}}$  Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]

Die Auftragszeit lässt sich mittels Division durch die maximale Leistung in die sogenannte Durchführungszeit überführen (Nyhuis & Wiendahl, 2012, S. 20). Daher folgt für die restliche Durchführungszeit im Mittel:

$$Z_{DF_{\text{Rest}}} \approx \frac{Z_{DF_{\text{mg},j}}}{2} \quad (28)$$

$Z_{DF_{\text{Rest}}}$  Mittlere restliche Durchführungszeit [Tage]  
 $Z_{DF_{\text{mg},j}}$  Mittlere gewichtete Durchführungszeit an Arbeitssystem j [Tage]

Die minimale Durchlaufzeit entspricht folglich der Summe der restlichen Durchführungszeit und der Durchführungszeit des betrachteten Auftrags.

$$Z_{DL_{\min,i,j}} = \frac{Z_{DF_{\text{mg},j}}}{2} + Z_{DF_{i,j}} \quad (29)$$

$Z_{DL_{\min,i,j}}$  Minimale Durchlaufzeit von Auftrag i an Arbeitssystem j [Tage]  
 $Z_{DF_{\text{mg},j}}$  Mittlere gewichtete Durchführungszeit an Arbeitssystem j [Tage]  
 $Z_{DF_{i,j}}$  Durchführungszeit von Auftrag i an Arbeitssystem j [Tage]

Für die Summe der minimalen Durchlaufzeiten an allen durchlaufenen Arbeitssystemen eines Auftrags gilt:

$$ZDL_{\min,i} = \sum_{j=1}^{\text{AnzAVG}} ZDL_{\min,i,j} = \sum_{j=1}^{\text{AnzAVG}} \left( \frac{ZDF_{\text{mg},j}}{2} + ZDF_{i,j} \right) \quad (30)$$

$ZDL_{\min,i}$	Minimale Durchlaufzeit für Auftrag i [Tage]
$ZDL_{\min,i,j}$	Minimale Durchlaufzeit von Auftrag i an Arbeitssystem j [Tage]
$ZDF_{\text{mg},j}$	Mittlere gewichtete Durchführungszeit an Arbeitssystem j [Tage]
$ZDF_{i,j}$	Durchführungszeit von Auftrag i an Arbeitssystem j [Tage]

Durch eine einfache trigonometrische Beziehung, die auch Bild 21 verdeutlicht, folgt der minimale Rangzuwachs durch die Multiplikation der minimalen Durchlaufzeit mit der Leistung der Fertigung in Anzahl Aufträgen:

$$\Delta RgA_{\min,i} = \left( \sum_{j=1}^{\text{AnzAVG}} \left( \frac{ZDF_{\text{mg},j}}{2} + ZDF_{i,j} \right) \right) \cdot LA_{\text{m,FE}} \quad (31)$$

$\Delta RgA_{\min,i}$	Minimaler Rangzuwachs von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$ZDF_{\text{mg},j}$	Mittlere gewichtete Durchführungszeit an Arbeitssystem j [Tage]
$ZDF_{i,j}$	Durchführungszeit von Auftrag i an Arbeitssystem j [Tage]
$LA_{\text{m,FE}}$	Mittlere Leistung des Fertigungsbereichs in Anzahl Aufträgen [-/Tag]

Die Ermittlung der einzelnen Durchführungszeiten kann bei vielen unterschiedlichen Auftragszeiten und einer Vielzahl von Arbeitssystemen zu einem hohen Auswertungsaufwand führen. Daher ist die Legitimität der folgenden Vereinfachungen der Modellierung zu prüfen:

1. Die individuelle Auftragszeit ( $ZAU_{i,j}$ ) an den Arbeitssystemen entspricht ungefähr der mittleren Auftragszeit ( $ZAU_{\text{m},j}$ ).
2. Die mittlere Leistung ( $L_{\text{m}}$ ) des Arbeitssystems entspricht ungefähr der maximalen Leistung ( $L_{\text{max}}$ ) des Arbeitssystems.

$$ZDL_{\min,i} = \frac{ZAU_{\text{mg}}}{2} + \frac{ZAU_i}{L_{\text{max}}} \approx \frac{ZAU_{\text{m}} \cdot (1 + ZAU_v^2)}{2} + \frac{ZAU_{\text{m}}}{L_{\text{m}}} = \frac{0,5 \cdot ZAU_{\text{m}} \cdot (1 + ZAU_v^2) + ZAU_{\text{m}}}{L_{\text{m}}} \quad (32)$$

$ZDL_{\min,i}$	Minimale Durchlaufzeit für Auftrag i [Tage]
$ZAU_{\text{mg}}$	Mittlere gewichtete Auftragszeit am Arbeitssystem [Stunden]
$L_{\text{max}}$	Maximale Leistung [Stunden/Tag]
$ZAU_i$	Auftragszeit von Auftrag i [Tage]
$ZAU_{\text{m}}$	Mittlere Auftragszeit [Stunden]
$ZAU_v$	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
$L_{\text{m}}$	Mittlere Leistung [Stunden/Tag]

Mit der Beziehung zwischen der mittleren Auftragszeit, der mittleren Leistung in Stunden pro Tag und der Leistung in Anzahl Aufträgen pro Tag (vgl. Nyhuis & Wiendahl, 2012, S. 34 und

Gleichung (33)) ist eine weitere Umformung möglich, die die Modellierung entscheidend vereinfacht (Gleichung (34)).

$$ZAU_m = \frac{L_m}{LA_m} \Leftrightarrow L_m = ZAU_m \cdot LA_m \quad (33)$$

ZAU <sub>m</sub>	Mittlere Auftragszeit [Stunden]
L <sub>m</sub>	Mittlere Leistung [Stunden/Tag]
LA <sub>m</sub>	Mittlere Leistung in Anzahl Aufträgen [-/Tag]

Durch Einsetzen der Gleichung (33) in Gleichung (32) folgt:

$$ZDL_{\min,i} \approx \frac{0,5 \cdot (1 + ZAU_v^2) + 1}{LA_m} = \frac{0,5 \cdot ZAU_v^2 + 1,5}{LA_m} \quad (34)$$

ZDL <sub>min,i</sub>	Minimale Durchlaufzeit für Auftrag i [Tage]
LA <sub>m</sub>	Mittlere Leistung in Anzahl Aufträgen [-/Tag]
ZAU <sub>v</sub>	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]

Für den minimalen Rangzuwachs im Auftragsdurchlauf gilt demnach vereinfacht:

$$\Delta RgA_{\min,i} \approx \sum_{j=1}^{\text{AnzAVG}} \frac{LA_{m,FE}}{LA_{m,j}} \cdot (0,5 \cdot ZAU_{v,j}^2 + 1,5) \quad (35)$$

ΔRgA <sub>min,i</sub>	Minimaler Rangzuwachs von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
LA <sub>m,FE</sub>	Mittlere Leistung des Fertigungsbereichs in Anzahl Aufträgen pro Tag [-/Tag]
LA <sub>m,j</sub>	Mittlere Leistung des Arbeitssystems j in Anzahl Aufträgen pro Tag [-/Tag]
ZAU <sub>v,j</sub>	Variationskoeffizient der Auftragszeit an Arbeitssystem j [-]

Die hergeleitete Logik hinter Gleichung (35) lässt sich an einem einfachen Beispiel erklären: Teilt man die Leistung der Fertigung durch die Leistung des Arbeitssystems, erhält man den Faktor, mit dem die Fertigung im Vergleich zum Arbeitssystem Aufträge fertigstellt. Das heißt, verlassen an einem Tag 8 Aufträge die Fertigung, während ein betrachtetes Arbeitssystem 4 Aufträge fertig, ergibt sich ein Faktor von 2 – die Fertigung stellt somit doppelt so viele Aufträge pro Tag fertig wie das betrachtete Arbeitssystem.

Mit der Logik lässt sich eine weitere, noch stärker vereinfachende Modellierung ableiten, die Bild 22 veranschaulicht. Darin wird ein Auftrag betrachtet, der zwei Arbeitssysteme durchläuft. Bild 22a zeigt das Durchlaufdiagramm des ersten Arbeitssystems, das den Auftrag bearbeitet. Der zugegangene Auftrag wartet zunächst auf seine Bearbeitung, danach fertigt das Arbeitssystem den Auftrag. Der Abgangszeitpunkt von Arbeitssystem 1 entspricht dem Zugangstermin zu Arbeitssystem 2, dessen Durchlaufdiagramm in Bild 22b dargestellt ist. Auch dort wartet der Auftrag zunächst, bis der auf der Maschine befindliche Auftrag fertiggestellt ist, und wird danach selbst bearbeitet.

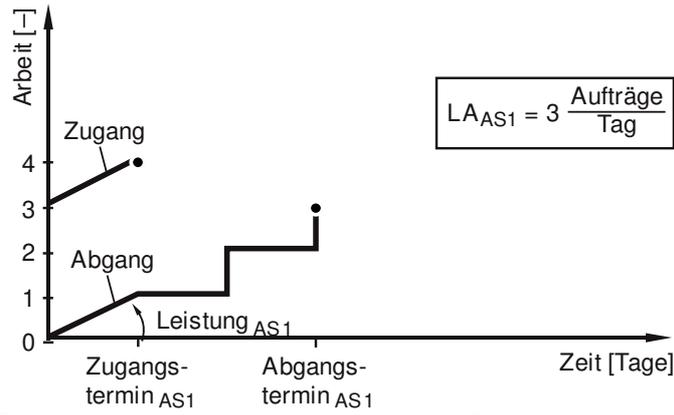
Bild 22c zeigt abschließend das dazugehörige Durchlaufdiagramm der Fertigung. Der Zugangstermin zur Fertigung entspricht dem Zugangstermin zum ersten Arbeitssystem. Während Arbeitssystem 1 den Auftrag fertigstellt, erhöht sich der Abgang der Fertigung um 4 Aufträge. Es folgt die Bearbeitung an Arbeitssystem 2, während derer sich der Abgang der Fertigung um weitere 3 Aufträge erhöht. Der minimale Abgangsrank des betrachteten Auftrags ergibt sich folglich aus drei Komponenten:

1. dem Abgang der Fertigung zum Zugangszeitpunkt des Auftrags,
2. der Veränderung des Abgangs, während Arbeitssystem 1 den Auftrag bearbeitet und
3. der Veränderung des Abgangs, während Arbeitssystem 2 den Auftrag bearbeitet.

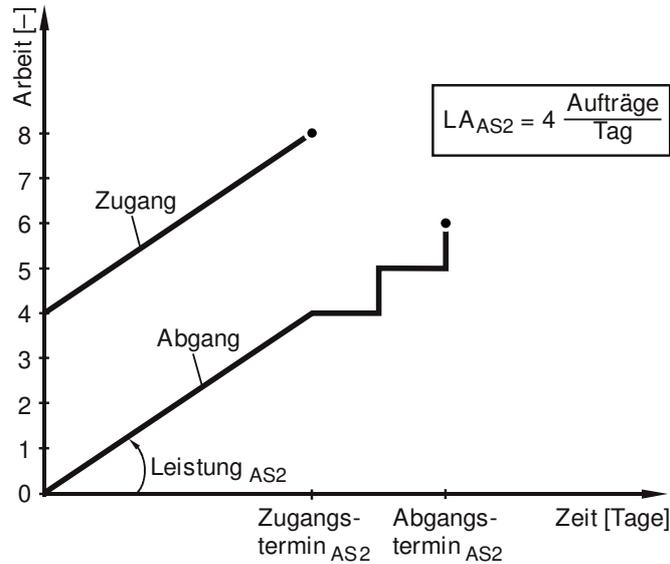
Diese stark vereinfachte Modellierung berechnet den minimalen Rangzuwachs durch das Verhältnis der Leistung der Fertigung und des Arbeitssystems und einem angenommenen Zuwachs von zwei Rängen an jedem Arbeitssystem (Gleichung (36)). Die Gleichung entspricht hierbei der Gleichung (35) mit einem Variationskoeffizienten der Auftragszeit von eins.

$$\Delta RgA_{\min,i} \approx \sum_{j=1}^{\text{AnzAVG}} 2 \cdot \frac{LA_{m,FE}}{LA_{m,j}} \quad (36)$$

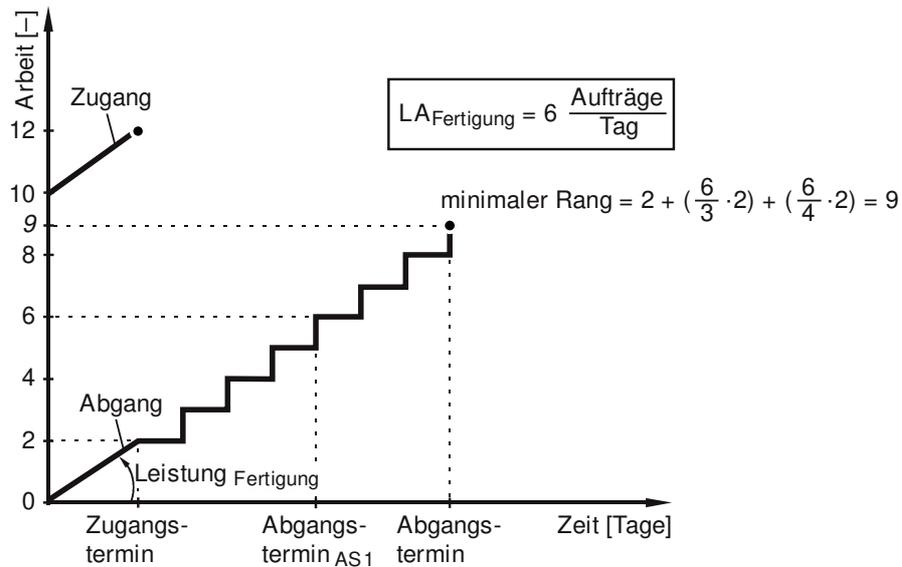
$\Delta RgA_{\min,i}$	Minimaler Rangzuwachs von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$LA_{m,FE}$	Mittlere Leistung des Fertigungsbereichs in Anzahl Aufträgen pro Tag [-/Tag]
$LA_{m,j}$	Mittlere Leistung des Arbeitssystems j in Anzahl Aufträgen pro Tag [-/Tag]



a) Durchlaufdiagramm für Arbeitssystem 1 (AS1)



b) Durchlaufdiagramm für Arbeitssystem 2 (AS2)



c) Durchlaufdiagramm der Fertigung

Bild 22: Zusammenhang zwischen der Leistung einer Fertigung und ihrer Arbeitssysteme

13666

Abschließend zeigen die Gleichungen (37), (38) und (39) zusammenfassend, wie sich der minimale Rang bei aufeinanderfolgenden Arbeitssystemen auf drei verschiedene Weisen ermitteln lässt. Die genaueste Prognose berücksichtigt die individuelle Durchführungszeit jedes Auftrags:

$$RgA_{AB,min,i} = RgA_{ZU,Plan,i} + RAA_{ZU} - BA(TZU_i) + \left( \sum_{j=1}^{AnzAVG} \frac{ZDF_{mg,j}}{2} + ZDF_{i,j} \right) \cdot LA_{m,FE} \quad (37)$$

$RgA_{AB,min,i}$	Minimaler Rang von Auftrag i bei nicht positiver Zugangsreihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen [-]
$RgA_{ZU,Plan,i}$	Plan-Zugangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$RAA_{ZU}$	Zugangsreihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen [-]
$BA(TZU_i)$	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$ZDF_{mg,j}$	Mittlere gewichtete Durchführungszeit an Arbeitssystem j [Tage]
$ZDF_{i,j}$	Durchführungszeit von Auftrag i an Arbeitssystem j [Tage]
$LA_{m,FE}$	Mittlere Leistung des Fertigungsbereichs in Anzahl Aufträgen pro Tag [-/Tag]

Setzt man die individuelle Auftragszeit der Aufträge gleich der mittleren Auftragszeit, lässt sich folgende vereinfachende Gleichung herleiten:

$$RgA_{AB,min,i} = RgA_{ZU,Plan,i} + RAA_{ZU} - BA(TZU_i) + \sum_{j=1}^{AnzAVG} \frac{LA_{m,FE}}{LA_{m,j}} \cdot (0,5 \cdot ZAU_{v,j}^2 + 1,5) \quad (38)$$

$RgA_{AB,min,i}$	Minimaler Rang von Auftrag i bei nicht positiver Zugangsreihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen [-]
$RgA_{ZU,Plan,i}$	Plan-Zugangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$RAA_{ZU}$	Zugangsreihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen [-]
$BA(TZU_i)$	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$LA_{m,FE}$	Mittlere Leistung des Fertigungsbereichs in Anzahl Aufträgen [-/Tag]
$LA_{m,j}$	Mittlere Leistung des Arbeitssystems j in Anzahl Aufträgen [-/Tag]
$ZAU_{v,j}$	Variationskoeffizient der Auftragszeit an Arbeitssystem j [-]

Am einfachsten ist es schließlich, auch die für jedes Arbeitssystem individuelle Streuung der Auftragszeit zu vernachlässigen und den Variationskoeffizienten der Auftragszeit gleich eins zu setzen. In diesem Fall gilt folgende Gleichung:

$$RgA_{AB,min,i} = RgA_{ZU,Plan,i} + RAA_{ZU} - BA(TZU_i) + \sum_{j=1}^{AnzAVG} 2 \cdot \frac{LA_{m,FE}}{LA_{m,j}} \quad (39)$$

$RgA_{AB,min,i}$	Minimaler Rang von Auftrag i bei nicht positiver Zugangsreihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen [-]
$RgA_{ZU,Plan,i}$	Plan-Zugangsrank von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$RAA_{ZU}$	Zugangsreihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen [-]
$BA(TZU_i)$	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$LA_{m,FE}$	Mittlere Leistung des Fertigungsbereichs in Anzahl Aufträgen [-/Tag]
$LA_{m,j}$	Mittlere Leistung des Arbeitssystems j in Anzahl Aufträgen [-/Tag]

Analog zur Modellierung für ein Arbeitssystem lässt sich daraufhin die minimale Reihenfolgeabweichung als Differenz aus minimalem Abgangsrank und dem Plan-Abgangsrank berechnen. Für

die Prognose der Reihenfolgeabweichung ist auch hier im nächsten Schritt eine Fallunterscheidung notwendig. Sofern ein Auftrag eine Beschleunigung benötigt, wird er beschleunigt, außer seine Reihenfolgeabweichung im Abgang wird dadurch negativ. Dann wird er lediglich so stark beschleunigt, bis die Reihenfolgeabweichung null beträgt (vgl. hierzu auch Gleichung (21) aus Abschnitt 3.2.1). Benötigt der betrachtete Auftrag keine Beschleunigung ( $RAA_{zu} \leq 0$ ) gilt auch bei der Betrachtung von Fertigungsbereichen folgende Näherung: Die Summe der Reihenfolgeabweichung beträgt null, daher entspricht der Mittelwert der negativen Reihenfolgeabweichung der Summe der positiven Reihenfolgeabweichung geteilt durch die Anzahl aller Aufträge mit nicht positiver Reihenfolgeabweichung im Zugang (vgl. hierzu Gleichung (22) aus Abschnitt 3.2.1).

Die Prognose der reihenfolgebedingten Terminabweichung folgt wie bereits für ein Arbeitssystem aus dem Quotienten der prognostizierten Reihenfolgeabweichung und der Leistung (vgl. Gleichung (23)). Abschnitt 4.2.2 zeigt die Evaluierung der Gleichungen und untersucht auch die Anwendbarkeit der vereinfachten Modellierung (Gleichungen (38) und (39)).

### 3.2.3 Abschätzung der reihenfolgebedingten Termintreue

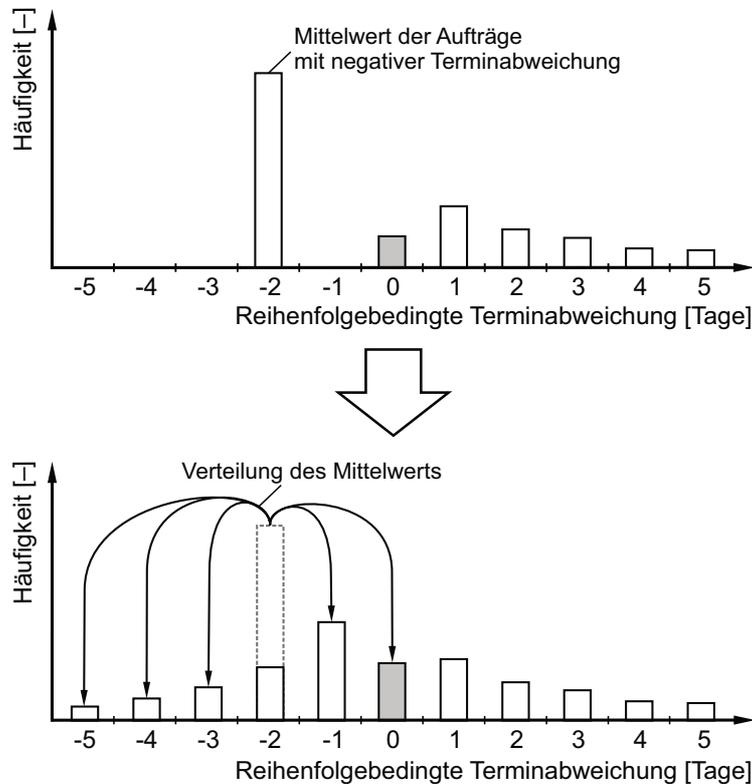
Die in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Modelle schätzen die negativen Werte der reihenfolgebedingten Terminabweichung nur durch einen Mittelwert ab. Dies ist zwar für die Ermittlung der reihenfolgebedingten Termineinhaltung ausreichend, jedoch benötigt die Modellierung der Termintreue für die negativen Terminabweichungen eine differenziertere Verteilungsform.

Bertsch nähert sich der Verteilung der negativen reihenfolgebedingten Terminabweichung mit der Berechnung der Wahrscheinlichkeit, dass ein zu früh zugehender Auftrag den frühesten Plan-Endtermin im Bestand besitzt (vgl. Bertsch, 2015, S. 85ff.). Dabei leitet er in einem recht aufwendigen Vorgehen her, dass die Wahrscheinlichkeit von der Verteilung der Terminabweichung im Zugang, dem Bestand und der Leistung des Arbeitssystems abhängt.

Dieser Abschnitt zeigt demgegenüber ein stark vereinfachtes Vorgehen, das die Prognose der Verteilung der negativen reihenfolgebedingten Terminabweichungen für viele Fälle ausreichend beschreiben kann. Hierzu wird zunächst die Annahme aufgestellt, dass der Mittelwert der reihenfolgebedingten Terminabweichung null beträgt; also die reihenfolgebedingte Terminabweichung nicht mit ihren Auftragszeiten korreliert (vgl. Abschnitt 2.1). Auf Grundlage dieser Annahme lassen sich die ermittelten positiven Werte der Terminabweichung daher aufsummieren und auf die nicht positiven Terminabweichungsklassen verteilen.

Bild 23 veranschaulicht das Vorgehen an einem Beispiel. Im Beispiel ist die modellierte mittlere negative Terminabweichung kleiner als  $-1$  und der Terminabweichungsklasse  $-2$  zugeordnet. Die

Summe der negativen Terminabweichungen muss der Summe der positiven Terminabweichungen entsprechen, um einen Mittelwert von null zu erzielen.



13667

**Bild 23: Abschätzung der negativen Terminabweichung**

Die Verteilung der negativen Terminabweichung kann unterschiedlichen Verteilungsformen folgen. Innerhalb der vorliegenden Arbeit hat sich folgendes Vorgehen als einfach anwendbar und für viele Fälle ausreichend genau ergeben.

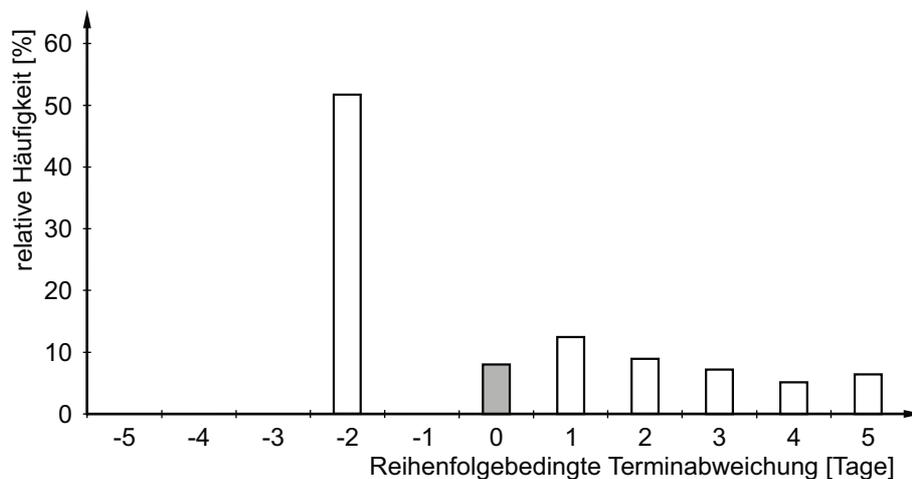
Die Summe der positiven Terminabweichungen wird auf eine zunächst zu bestimmende Anzahl von negativen Terminabweichungsklassen verteilt. Die Anzahl der Klassen lässt sich hierbei iterativ bestimmen. Hierzu wird eine Startanzahl an Klassen ausgewählt und die Häufigkeit für jede Klasse so bestimmt, dass die einzelnen Klassen den gleichen Anteil zum Ausgleich der positiven Terminabweichung beisteuern. Gleichung (40) beschreibt, wie sich die Häufigkeit der Klassen bestimmen lässt.

$$h(TAA_{RA,i}^-) = \frac{\sum TAA_{RA,mod}^+}{\text{Anzahl Klassen} \cdot |TAA_{RA,i}|} \quad (40)$$

- $h(TAA_{RA,i}^-)$  Geschätzte Häufigkeit für die Klasse  $i$  der negativen reihenfolgebedingten Terminabweichung [-]
- $\sum TAA_{RA,mod}^+$  Summe der modellierten positiven reihenfolgebedingten Terminabweichung [-]
- $TAA_{RA,i}$  Terminabweichungsklasse  $i$  [-]

Ist die Häufigkeit für jede Terminabweichungsklasse ermittelt, wird überprüft, ob die Anzahl der gewählten Klassen eine valide Lösung darstellt. Ist die Summe der neu bestimmten Häufigkeiten kleiner oder gleich der Häufigkeit des zuvor modellierten Mittelwerts, ist die Lösung valide. Die Differenz aus der neu bestimmten Häufigkeit und der Häufigkeit des modellierten Mittelwerts wird der Häufigkeitsklasse 0 hinzuaddiert, um die Summe der betrachteten Aufträge konstant zu halten. Ist die Summe der neu bestimmten Häufigkeiten größer als die Häufigkeit des Mittelwerts, ist die Anzahl der gewählten Klassen zu erhöhen und die Häufigkeiten sind mit Gleichung (40) neu zu bestimmen.

Tabelle 3 zeigt an einem Beispiel, wie sich die Häufigkeiten der negativen Werte einer beispielhaft modellierten Verteilung (Bild 24) mit dem vorgestellten Vorgehen abschätzen lassen.



13668

**Bild 24: Beispiel für die Verteilung der negativen Terminabweichung (konstante TAA-)**

In Tabelle 3 sind in Spalte (1) die Terminabweichungsklassen und in Spalte (2) die modellierten Häufigkeiten der reihenfolgebedingten Terminabweichung. Wie bereits in Bild 24 zu sehen ist, befindet sich der Mittelwert der negativen reihenfolgebedingten Terminabweichung in der Häufigkeitsklasse  $-2$ .

Die Summe aller positiven Terminabweichungen liegt in diesem Beispiel bei 6.241 Tagen. Um die Annahme zu erfüllen, dass der Mittelwert der reihenfolgebedingten Terminabweichung null ergibt, gilt es die Summe mit den negativen Werten auszugleichen. Spalte (3) zeigt daher, wie sich für alle negativen Terminabweichungsklassen die Häufigkeit nach Gleichung (40) ermitteln lässt, um einen Mittelwert von null zu erreichen. Somit ergibt sich bei einer Anzahl von fünf Klassen für die Häufigkeit der Terminabweichungsklasse  $-1$  ein Schätzwert von 1.248 ( $6241/(5 \cdot 1)$ ). Dies wird für sämtliche negative Terminabweichungsklassen wiederholt. Die Summe der geschätzten Häufigkeiten ergibt in diesem Fall 2.850 und ist kleiner als die modellierte Häufigkeit der negativen reihenfolgebedingten Terminabweichung von 3.106 (Spalte (2), Terminabweichungsklasse  $-$

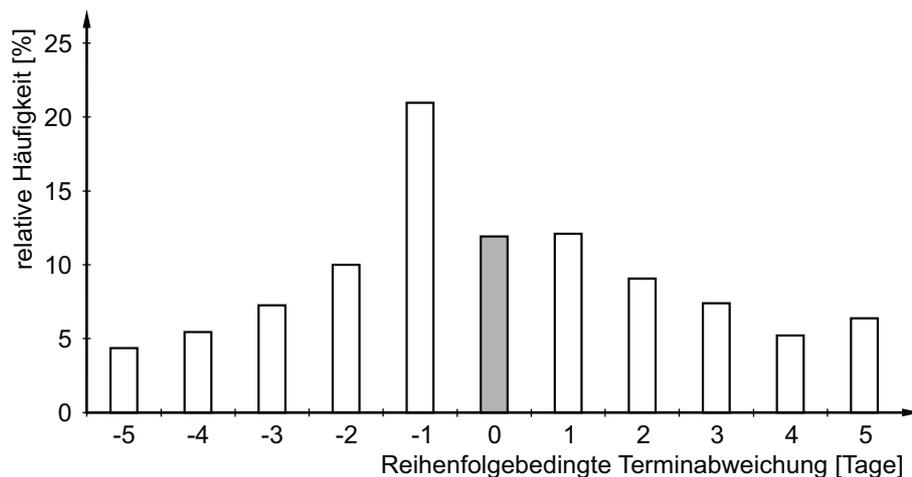
2). Die Differenz aus beiden wird daher der Klasse 0 zugeordnet und zu den bereits modellierten 478 aufaddiert. Spalte (4) zeigt die resultierenden Häufigkeiten für sämtliche Terminabweichungsklassen und Spalte (5) die dazugehörige Prüfspalte mit der Prüfsumme in der letzten Zeile. Diese weicht in dem Beispiel aufgrund der Rundung der Häufigkeiten leicht von null ab.

**Tabelle 3: Beispiel für die Verteilung der negativen Terminabweichung**

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Klasse	$h(TAA_{RA,modelliert})$	$h(TAA_{RA,5\text{ Klassen}}^-)$	$h(TAA_{RA})$	Klasse $\cdot h(TAA_{RA})$
-5	0	250	250	-1.250
-4	0	312	312	-1.248
-3	0	416	416	-1.248
-2	3.106	624	624	-1.248
-1	0	1.248	1.248	-1.248
0	478	$478+(3.106-2.850)=734$	734	0
1	743		743	743
2	543		543	1.086
3	429		429	1.287
4	305		305	1.220
5	381		381	1.905
				$\Sigma -1$

$h(TAA_{RA,modelliert})$  Modellierte Häufigkeit für die Klasse  $i$  der reihenfolgebedingten Terminabweichung [-]  
 $h(TAA_{RA,5\text{ Klassen}}^-)$  Geschätzte Häufigkeit der negativen reihenfolgebedingten Terminabweichung bei 5 Klassen [-]  
 $h(TAA_{RA})$  Angepasste Häufigkeit der reihenfolgebedingten Terminabweichung [-]

Bild 25 zeigt die mit dem Vorgehen neu ermittelte Verteilung mit den relativen Häufigkeiten.



13669

**Bild 25: Beispiel für die Verteilung der negativen Terminabweichung (verteilte TAA<sup>-</sup>)**

Abschnitt 4.2.3 evaluiert das Vorgehen in Simulationsversuchen und stellt die mit dem Verfahren geschätzten Terminabweichungsverteilungen mit simulierten Verteilungen gegenüber.

### 3.2.4 Bewertung der Reihenfolgeeinhaltung

Die vorhergehenden Abschnitte zeigen, wie sich die minimale reihenfolgebedingte Terminabweichung modellbasiert ermitteln lässt. Die Prämisse für die minimale reihenfolgebedingte Terminabweichung ist eine maximale Beschleunigung von Aufträgen, die eine Beschleunigung erfahren müssen, um ihre Verspätung zu minimieren. Diese Aufträge sollten zum Zeitpunkt der Reihenfolgeentscheidung die terminlich dringendsten Aufträge sein und somit durch eine Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin maximal beschleunigt werden. Wird diese Reihenfolgebildung nicht konsequent verfolgt, bleibt die minimale reihenfolgebedingte Terminabweichung unerreicht. Wie bereits im Stand der Forschung (vgl. Abschnitt 2.1) vorgestellt, zeigt die Reihenfolgedisziplin den prozentualen Anteil der richtigen Reihenfolgeentscheidungen an. Die Reihenfolgedisziplin reicht als Kennzahl jedoch nicht aus, um die Konsequenzen einer Fehlentscheidung umfassend zu veranschaulichen. Daher wird in diesem Abschnitt ein Verfahren zur vollständigen Bewertung der Reihenfolgeeinhaltung vorgestellt.

Fehlentscheidungen an Arbeitssystemen weisen drei Dimensionen auf:

- die Häufigkeit von Fehlentscheidungen,
- die Auswirkung auf den beschleunigten Auftrag und
- die Auswirkung auf die übrigen Aufträge.

Die Häufigkeit von Fehlentscheidungen ermittelt die Reihenfolgedisziplin bereits indirekt. Da die Reihenfolgedisziplin den Anteil richtiger Entscheidungen zeigt, ist ebenso der Anteil der Fehlentscheidungen bekannt.

Um die Auswirkungen einer Fehlentscheidung zu beurteilen, wird zwischen der beschleunigenden und der verzögernden Wirkung unterschieden. Hierbei hat jede Fehlentscheidung stets eine beschleunigende Wirkung auf den ausgewählten Auftrag. Die Anzahl der übersprungenen Aufträge zeigt dabei die Stärke dieser Beschleunigung an. Die Verzögerung von Aufträgen wird hingegen durch eine oder mehrere Beschleunigungen anderer Aufträge verursacht. Hierbei erhöht jedes Überspringen eines Auftrags schrittweise seine Verzögerung, d. h. je öfter ein Auftrag übersprungen wird, desto stärker wird er durch die Reihenfolgebildung verzögert.

Tabelle 4 zeigt einen Algorithmus, der die Beschleunigung bzw. Anzahl übersprungener Aufträge für einen beliebigen Auftrag berechnet. Der erste Schritt filtert die Aufträge, die mit dem betrachteten Auftrag im Bestand waren. Im zweiten Schritt ermittelt der Algorithmus, welche dieser Aufträge später fertiggestellt wurden. Von diesen Aufträgen zählen alle, die einen früheren Plan-Endtermin hatten, zu den übersprungenen Aufträgen.

**Tabelle 4: Algorithmus zur Berechnung der Anzahl übersprungener Aufträge**

Zähle alle Aufträge, für die gilt:		
Ist-Zugangstermin < Ist-Abgangstermin von Auftrag i		
	Ist-Rang > Ist-Rang von Auftrag i	
	Plan-Rang < Plan-Rang von Auftrag i	

Tabelle 5 zeigt, einen Algorithmus, der die Anzahl der Verzögerungen von Aufträgen ermittelt. Auch hier ist der erste Schritt, die Aufträge zu filtern, die mit dem betrachteten Auftrag im Bestand waren. Im zweiten Schritt zählt der Algorithmus die Aufträge, die das Arbeitssystem vor dem betrachteten Auftrag fertiggestellt hat und abschließend (3. Schritt) von diesen Aufträgen, die Aufträge, deren Plan-Abgangsrank größer war als der des betrachteten Auftrags. Die damit ermittelten Aufträge sind die, die den betrachteten Auftrag übersprungen haben.

**Tabelle 5: Algorithmus zur Berechnung der Anzahl der erfahrenen Verzögerungen**

Zähle alle Aufträge, für die gilt:		
Ist-Zugangstermin < Ist-Abgangstermin von Auftrag i		
	Ist-Rang < Ist-Rang von Auftrag i	
	Plan-Rang > Plan-Rang von Auftrag i	

Die Höhe der Verzögerung durch Fehlentscheidungen zeigt, wie oft ein Auftrag übersprungen wurde. In einigen Fällen kann ein Auftrag zuerst Verzögerungen erfahren und nach den Verzögerungen selber beschleunigt werden. Für die Auswertung bedeutet dies, dass der Auftrag sowohl in den beschleunigten als auch den verzögerten Aufträgen erscheint. Bild 26 zeigt eine exemplarische Auswertung der Reihenfolgeeinhaltung eines Arbeitssystems.

Arbeitsystem: Schleiferei

Zeitraum: April – September 2018

Arbeitsvorgänge: 3.548

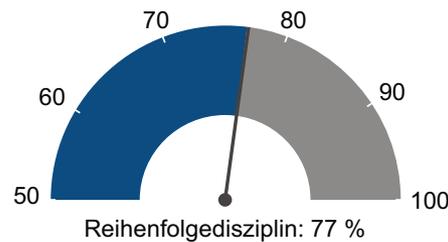
Beschleunigungen [Aufträge]

Anzahl 816

Mittelwert 1,7

Maximum 17

Median 1



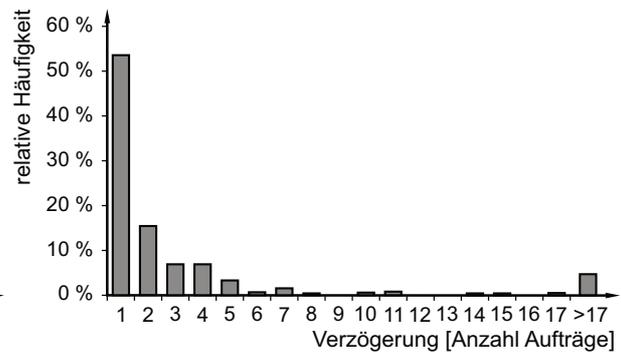
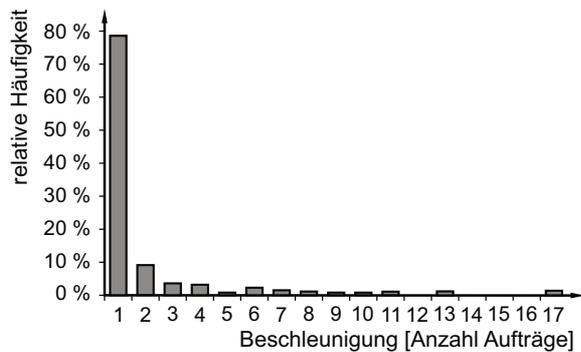
Verzögerungen [Aufträge]

Anzahl 390

Mittelwert 3,5

Maximum 50

Median 1



13670

**Bild 26: Exemplarische Auswertung der Reihenfolgeeinhaltung eines Arbeitssystems**

Mit Hilfe der erweiterten Betrachtung der Reihenfolgedisziplin lassen sich Aussagen treffen, wie

- etwa jede 4. Entscheidung am betrachteten Arbeitssystem war falsch,
- rund 80 % der beschleunigten Aufträge haben lediglich einen Auftrag übersprungen,
- über 50 % der verzögerten Aufträge wurden lediglich von einem Auftrag übersprungen,
- die maximale Verzögerung am Arbeitssystem betrug 50 Aufträge.

Die Gewichtung der ermittelten Verzögerungen als auch der Beschleunigungen mit der Leistung überführt diese in eine Terminabweichung. Beispielsweise entspricht die maximale Verzögerung um 50 Aufträge bei einer Leistung von 10 Aufträgen pro Tag einer Verzögerung um fünf Tage, die auf falsche Reihenfolgeentscheidungen zurückzuführen ist.

### 3.3 Einfluss des Rückstands im Zugang auf die Terminabweichung im Abgang

Rückstände liegen vor, wenn der Ist-Abgang vom Plan-Abgang abweicht. Dies kann drei übergeordnete Gründe haben:

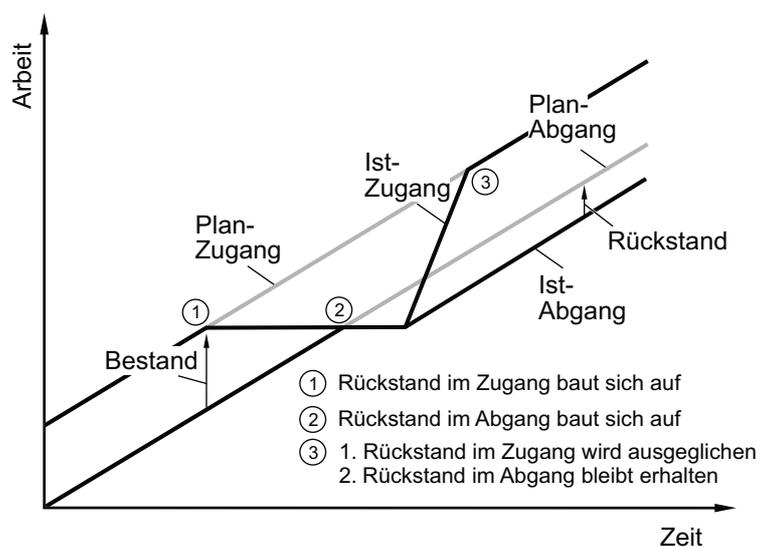
1. kurzfristig gestörte Kapazitäten, beispielsweise aufgrund von Maschinenstörungen oder Personalausfällen,
2. systematische Abweichungen der Ist- und Plan-Leistung z. B. durch eine unrealistische Produktionsplanung,
3. Auslastungsverluste durch Materialflussabrisse.

Die nachfolgenden Abschnitte untersuchen den Einfluss eines Rückstands im Zugang auf den Rückstand im Abgang eines Arbeitssystems (Abschnitt 3.3.1) sowie im Abgang eines Fertigungs-

bereichs mit mehreren aufeinanderfolgenden Arbeitssystemen (Abschnitt 3.3.2). Der Rückstand im Zugang hat grundsätzlich eine bestandsenkende Wirkung und somit einen Einfluss auf den Betriebspunkt eines Arbeitssystems bzw. einer Fertigung. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich daher vorwiegend auf Rückstände im Abgang durch Auslastungsverluste. Abschnitt 3.3.3 zeigt abschließend den Effekt von Rückständen auf die Reihenfolgeabweichung im Zugang einzelner Arbeitssysteme in komplexen Materialflüssen.

### 3.3.1 Einfluss des Rückstands im Zugang auf die rückstandsbedingte Terminabweichung eines Arbeitssystems

Grundsätzlich gilt: Solange der Bestand an einem Arbeitssystem ausreicht, um die Plan-Auslastung des Arbeitssystems zu gewährleisten, hat der Rückstand im Zugang keine Auswirkung auf den Rückstand im Abgang des Arbeitssystems. Erfährt ein Arbeitssystem aufgrund eines dauerhaften Rückstands im Zugang Auslastungsverluste, so folgt der Ist-Abgang dem Ist-Zugang mit einem zeitlichen Versatz (vgl. hierzu auch Bertsch, 2015, S. 106). Werden diese Rückstände im Zugang ausgeglichen, erhöht sich der Bestand am betrachteten Arbeitssystem dauerhaft, sofern 1. zuvor Auslastungsverluste aufgetreten sind und 2. das Arbeitssystem den daraus entstandenen Rückstand im Abgang nicht ausregelt (vgl. Bild 27).



**Bild 27: Zusammenhang zwischen Rückstand im Zugang und Abgang im Durchlaufdiagramm**

13671

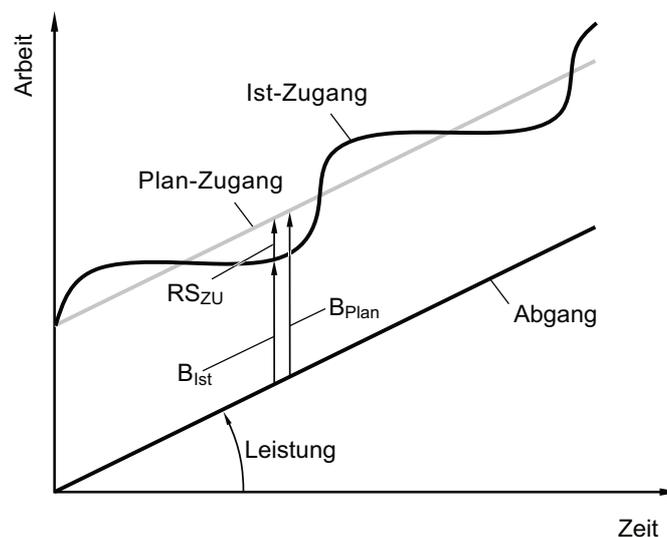
Ob Auslastungsverluste durch Rückstände im Zugang auftreten, lässt sich über den Zusammenhang zwischen Bestand und Auslastung abschätzen. Die Auslastung eines Arbeitssystems hängt von dem vorliegenden Ist-Bestand ab. Daher ist es notwendig, den Ist-Bestand in Abhängigkeit seiner Einflussgrößen zu modellieren, um die Wirkung von Rückständen im Zugang auf die Auslastung zu zeigen. Die Einflussgrößen sind der Plan-Bestand, der Rückstand im Zugang und der

Rückstand im Abgang des Arbeitssystems. Gleichung (41) beschreibt den Zusammenhang mathematisch und Bild 28 zeigt ihn im Durchlaufdiagramm.

$$B_{Ist}(t) = B_{Plan}(t) - RS_{ZU}(t) + RS_{AB}(t) \quad (41)$$

$B_{Ist}(t)$	Ist-Bestand zum Zeitpunkt t [Stunden]
$B_{Plan}(t)$	Plan-Bestand zum Zeitpunkt t [Stunden]
$RS_{ZU}(t)$	Rückstand im Zugang zum Zeitpunkt t [Stunden]
$RS_{AB}(t)$	Rückstand im Abgang zum Zeitpunkt t [Stunden]

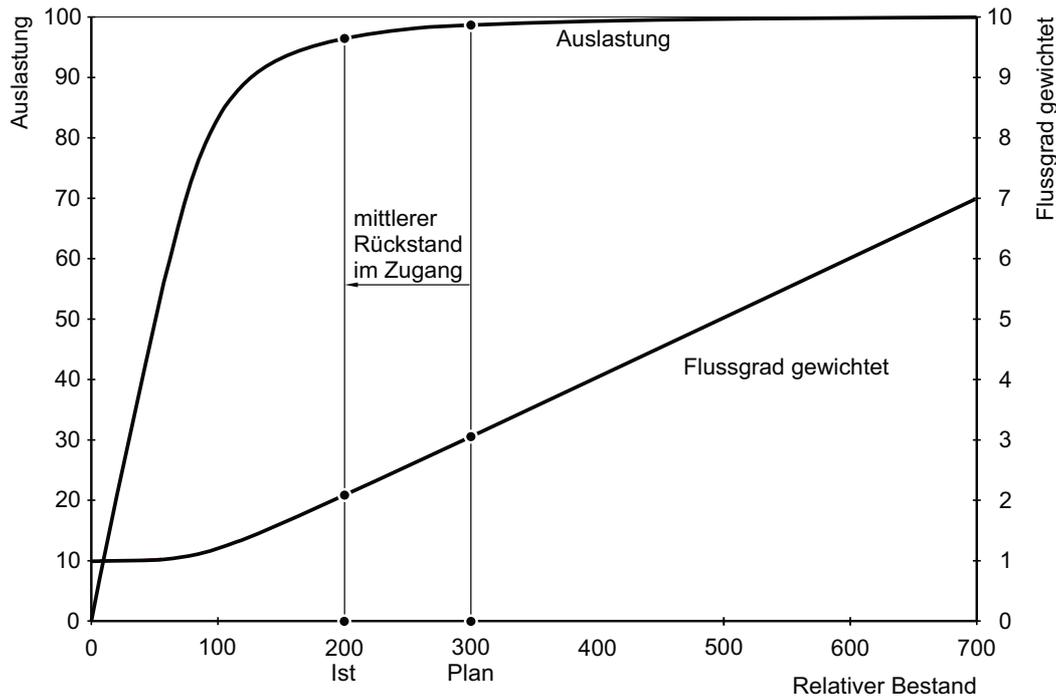
Sofern weder ein Rückstand im Zugang noch im Abgang vorliegt, entspricht der Ist-Bestand dem Plan-Bestand. Folglich führen Rückstände im Zugang und Rückstände im Abgang zu Abweichungen vom Plan-Bestand, sofern sie sich nicht gegenseitig ausgleichen.



13672

**Bild 28: Zusammenhang zwischen dem Rückstand im Zugang und dem Bestand**

Ein Rückstand im Zugang kann je nach Betriebspunkt eines Arbeitssystems einen direkten Einfluss auf die Auslastung und somit auf den Rückstand im Abgang ausüben. Bild 29 zeigt den Einfluss des Rückstands im Zugang auf den Bestand und die Auslastung in einer normierten Produktionskennlinie. Ein positiver Rückstand im Zugang wirkt sich bestandssenkend aus, sofern der Rückstand im Abgang vernachlässigbar ist und sich somit nicht bestandsverändernd auswirkt. Die Auswirkung der Bestandssenkung auf die Auslastung hängt zum einen von der logistischen Positionierung bzw. dem Plan-Bestand und zum anderen von der Höhe des Rückstands im Zugang ab. Im Beispiel aus Bild 29 führt die Bestandsreduktion durch den Rückstand im Zugang zu Auslastungsverlusten von rund 2 % (vgl. hierzu Nyhuis & Wiendahl, 2012, S. 90).



13673

**Bild 29: Rückstand im Zugang in der Produktionskennlinie**

Gleichung (42) beschreibt, wie sich für diesen Fall der resultierende Rückstand im Abgang abschätzen lässt. Dieser hängt vom Auslastungsverlust gegenüber der Plan-Auslastung, der geplanten Leistung und der Periodenlänge ab.

$$RS_{AB} = \left(1 - \frac{A_{Ist}}{A_{Plan}}\right) \cdot L_{Plan} \cdot P \quad (42)$$

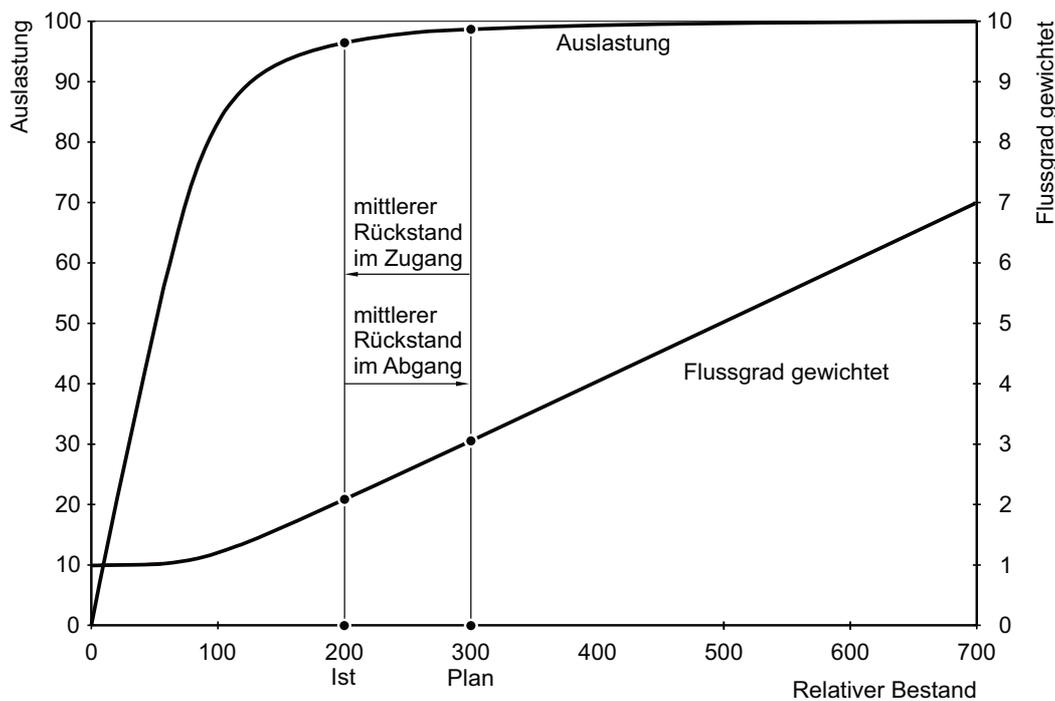
$RS_{AB}$	Rückstand im Abgang [Stunden]	$A_{Ist}$	Ist-Auslastung [-]
$A_{Plan}$	Plan-Auslastung [-]	$L_{Plan}$	Plan-Leistung [Stunden/Tag]
$P$	Periodenlänge [Tage]		

Tabelle 6 veranschaulicht an einem Beispiel die Bedeutung des Rückstands im Zugang für Arbeitssysteme mit moderaten Plan-Beständen (relativer Bestand  $\approx 300\%$ ). Das betrachtete Arbeitssystem ist mit einem Plan-Bestand von 24 Stunden ausgelegt und es liegt ein Rückstand im Zugang von 8 Stunden vor. Hierdurch ergibt sich ein Ist-Bestand von 16 Stunden (unter Vernachlässigung von Rückständen im Abgang). Durch den Rückstand im Zugang sinkt der relative Bestand von  $300\%$  auf  $200\%$  und es resultieren Auslastungsverluste von ca.  $2\%$ . Diese führen ihrerseits zu einem Rückstand im Abgang durch Auslastungsverluste von  $0,8$  Stunden nach 5 Tagen.

**Tabelle 6: Beispiel für die Auswirkung des Rückstands im Zugang auf den Rückstand im Abgang**

Mittlerer Plan-Bestand		Mittlerer Rückstand im Zugang		Mittlerer Ist-Bestand		Idealer Mindestbestand
24 Stunden		8 Stunden		16 Stunden		8 Stunden
Relativer Bestand		Auslastung		Leistung		Periodenlänge
Plan	Ist	Plan	Ist	Plan	Ist	
300 %	200 %	100 %	97,5 %	8 Std/Tag	7,8 Std/Tag	5 Tage
Resultierender Rückstand bei einer Periodenlänge von 5 Tagen						
$0,025 \cdot 8 \text{ Stunden/Tag} \cdot 5 \text{ Tage} = 1 \text{ Stunde}$						

Hierbei ist jedoch ein zusätzlicher Effekt zu berücksichtigen: Da der resultierende Rückstand im Abgang den Ist-Bestand und somit auch den relativen Bestand erhöht, steigt hierdurch auch die Ist-Auslastung (die Auslastungsverluste sinken) mit zunehmender Dauer (Bild 30). Für das Beispiel aus Tabelle 6 heißt dies, dass der Bestand nach 5 Tagen um eine Stunde ansteigt, was einer Steigerung des relativen Bestands um 12,5 % entspricht.



13674

**Bild 30: Rückstand im Abgang und Zugang in der Produktionskennlinie**

Anhand der Produktionskennlinie lässt sich zwar der Effekt eines Rückstands im Zugang grundsätzlich erklären. Jedoch erlaubt dieses Vorgehen lediglich eine Abschätzung, da die Produktionskennlinien ausschließlich Mittelwerte abbilden und nur für längere Zeiträume gelten.

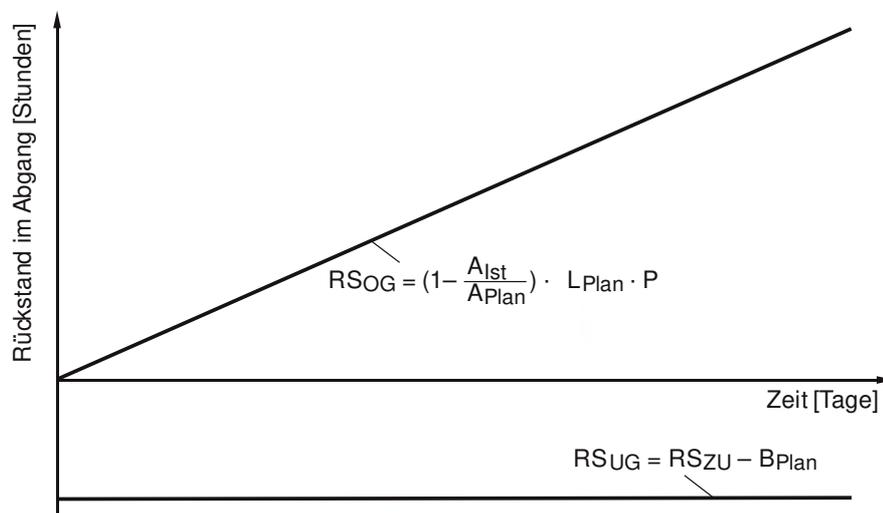
Neben der Darstellung der Auswirkungen eines Rückstands im Zugang auf den Rückstand im Abgang mit Produktionskennlinien sind Grenzwerte für den Rückstand im Abgang sinnvoll und einfach beschreibbar.



$$RS_{AB} \geq RS_{ZU} - B_{Plan} \quad (49)$$

RS	Rückstand [Stunden]	AB	Abgang [Stunden]
ZU	Zugang [Stunden]	B	Bestand [Stunden]

Während die Untergrenze des Rückstands im Abgang vom Rückstand im Zugang und dem Plan-Bestand abhängt, ist die Obergrenze hingegen von der Dauer der verminderten Leistung und der Höhe des Leistungsabfalls abhängig und steigt bei konstanter Leistungsabweichung mit zunehmender Dauer linear an (vgl. hierzu auch Gleichung (42)). Bild 31 veranschaulicht die durch die Gleichungen definierten Grenzen des Rückstands im Abgang. Im Bild ist die Untergrenze für einen konstanten Plan-Bestand und Rückstand im Zugang dargestellt. Beide Größen sind grundsätzlich variabel und somit ist die Untergrenze ebenso variabel. Die Obergrenze des Rückstands ist in dem Bild für konstante Auslastungsverluste dargestellt.



Legende:

RSOG	Rückstandsobergrenze [Stunden]	L <sub>Plan</sub>	Plan-Leistung [Stunden/Tag]
P	Periodenlänge [Tage]	RSUG	Rückstandsuntergrenze [Stunden]
RS <sub>ZU</sub>	Rückstand im Zugang [Stunden]	B <sub>Plan</sub>	Plan-Bestand [Stunden]
A <sub>Ist</sub>	Ist-Auslastung [-]	A <sub>Plan</sub>	Plan-Auslastung [-]

13675

**Bild 31: Grenzen des Rückstands im Abgang über der Zeit**

In Bild 31 ist die Untergrenze im negativen Bereich dargestellt, d. h. in der Darstellung ist der Bestand am Arbeitssystem groß genug, um den Plan-Abgang zu übertreffen. Liegt die Untergrenze des Rückstands im positiven Bereich, bedeutet dies folglich, dass der Plan-Abgang für das Arbeitssystem aufgrund des Bestands unerreichbar ist.

Aus den Grenzen für den Rückstand lassen sich auch Grenzen für die rückstandsbedingte Terminabweichung ableiten. Diese entsprechen dem Quotienten aus Rückstand und Leistung (vgl. Gleichung (9)). Daher gelten für die rückstandsbedingte Terminabweichung die gleichen Einflussgrößen für die Ober- und Untergrenze wie für den Rückstand im Abgang.

### 3.3.2 Einfluss des Rückstands im Zugang auf die rückstandsbedingte Terminabweichung eines Fertigungsbereichs

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, beeinflusst der Rückstand eines Arbeitssystems den Bestand seiner Nachfolger. In einem linearen Materialfluss entspricht der Rückstand im Abgang des Vorgängers dem Rückstand im Zugang eines Arbeitssystems – zumindest in Anzahl Aufträgen. Sofern die Auftragszeiten sich zwischen den Arbeitssystemen unterscheiden, unterscheidet sich folglich auch die Höhe des Rückstands. Sofern sich der Rückstand im Zugang durch den Rückstand im Abgang des Vorgängers ermitteln lässt, lassen sich auch die Auslastungsverluste durch die resultierende Bestandssenkung abschätzen. Der Effekt des Rückstands im Zugang einer Fertigung auf den Rückstand im Abgang nimmt mit der Anzahl der zu durchlaufenden Arbeitssysteme ab. Ähnlich wie bei der Reihenfolgebildung übt der Bestand hierbei eine Pufferfunktion aus.

In komplexen Materialflüssen kann der Rückstand im Zugang eines Arbeitssystems von mehr als einem Vorgänger abhängen. Gleichung (50) beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Rückstand im Zugang eines Arbeitssystems und dem Rückstand im Abgang seiner Vorgänger. Hierzu nutzt die Gleichung den Rückstand aller Vorgänger und gewichtet diesen mit dem Materialflusskoeffizienten, der zwischen dem Arbeitssystem und dem betrachteten Vorgänger vorliegt. Schneider (2004, S. 47) zeigt in seiner Dissertation ausführlich, wie sich ein Materialflusskoeffizient aus Rückmeldedaten ermitteln lässt. Da sich die Vorgabestunden zwischen den Arbeitsgängen und somit auch Arbeitssystemen üblicherweise unterscheiden, kann der Rückstand an dieser Stelle nicht in Stunden in die Gleichung einfließen. Stattdessen empfiehlt sich eine Berechnung in Anzahl Aufträgen.

$$RSA_{ZU,j}(T) = \sum_{i=1}^n RSA_{AB,i}(T) \cdot MFK_{i,j} \quad (50)$$

$RSA_{ZU,j}(T)$	Rückstand im Zugang von Arbeitssystem j zum Zeitpunkt T in Anzahl Aufträgen [-]
$RSA_{AB,i}(T)$	Rückstand im Abgang von Vorgänger i zum Zeitpunkt T in Anzahl Aufträgen [-]
$MFK_{i,j}$	Materialflusskoeffizient zwischen Arbeitssystem i und dem Nachfolger-Arbeitssystem j [-]

Grundsätzlich gilt auch für komplexe Materialflüsse: Je mehr Arbeitssysteme ein Auftrag durchläuft, desto weniger wirkt sich der Rückstand im Zugang zur Fertigung auf den Rückstand im Abgang der Fertigung aus. Darüber hinaus gilt, dass der Rückstand im Abgang eines Arbeitssystems mit zunehmender Anzahl der Nachfolger und somit kleinerem Materialflusskoeffizienten einen geringeren Einfluss auf deren Rückstand im Zugang besitzt.

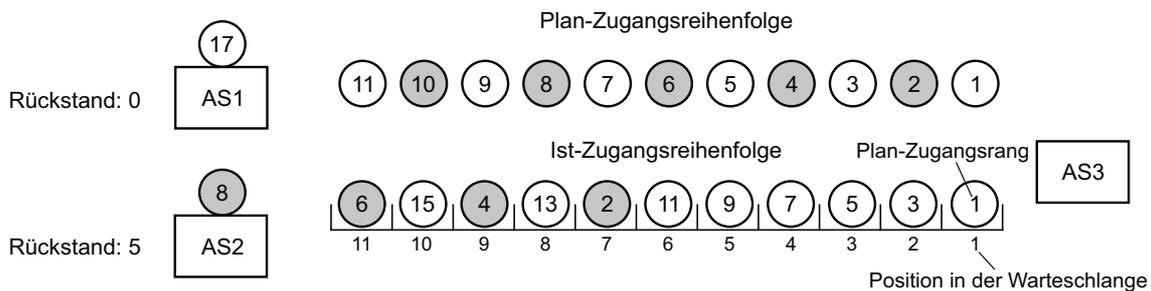
Der Abgang einer Fertigung lässt sich mit Hilfe der Endtermine der Aufträge ermitteln. Die wiederum entsprechen definitionsgemäß den Endterminen der letzten Arbeitsvorgänge. Das heißt

für die Ermittlung des Rückstands einer Fertigung, dass die Arbeitssysteme, die die letzten Arbeitsvorgänge durchführen, den Rückstand bestimmen. Hierbei ist zu beachten, dass Arbeitssysteme oftmals nicht nur die letzten, sondern auch frühere Arbeitsvorgänge ausführen. Dies berücksichtigt die Gleichung mit dem Materialflusskoeffizienten, der für den Rückstand einer Fertigung den Anteil der Aufträge darstellt, für die das Arbeitssystem den letzten Arbeitsvorgang ausführt. Der Rückstand einer Fertigung ist somit ebenso mit der Gleichung (50) aus den Rückständen der Arbeitssysteme, die den letzten Arbeitsvorgang eines Auftrags bearbeiten, ermittelbar. Abschnitt 4.3.2 evaluiert die Gleichung und untersucht in Simulationsexperimenten die Auswirkung von Rückständen im Zugang zur Fertigung auf den Rückstand im Abgang.

### 3.3.3 Einfluss des Rückstands auf die Reihenfolgeabweichung im Zugang der Nachfolger-Arbeitssysteme

In nicht-linearen Materialflüssen wirken sich Rückstände von Arbeitssystemen auf die Reihenfolgeabweichung im Zugang ihrer Nachfolger aus. Der folgende Abschnitt verdeutlicht die Auswirkung an einem einfachen Beispiel.

Bild 32 zeigt die Modellierung eines Idealprozesses, in dem zwei Arbeitssysteme einen Nachfolger in gleicher Höhe mit Aufträgen versorgen. Beide Arbeitssysteme halten die Plan-Reihenfolge streng ein und haben eine identische Plan-Leistung, jedoch befindet sich Arbeitssystem 2 im Rückstand und verursacht hierdurch eine Reihenfolgeabweichung im Zugang des Nachfolgers. Die Plan-Reihenfolge sieht eine abwechselnde Belieferung des Nachfolgers vor. Der Rückstand baut sich in den ersten 6 Aufträgen auf und ist von dort an konstant bei 5 Aufträgen. Der Effekt, der dadurch auftritt, ist eine im Betrag ansteigende Reihenfolgeabweichung im Zugang von Arbeitssystem 3, die sich dem Rückstand von Arbeitssystem 2 annähert.



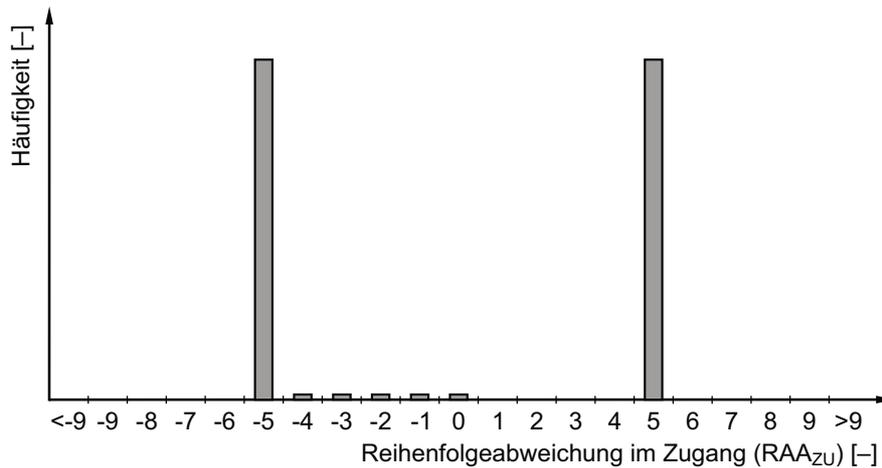
Ist-Zugangsrank an AS3	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Plan-Zugangsrank an AS3	6	15	4	13	2	11	9	7	5	3	1
Reihenfolgeabweichung im Zugang von AS3	+5	-5	+5	-5	+5	-5	-4	-3	-2	-1	0

AS Arbeitssystem

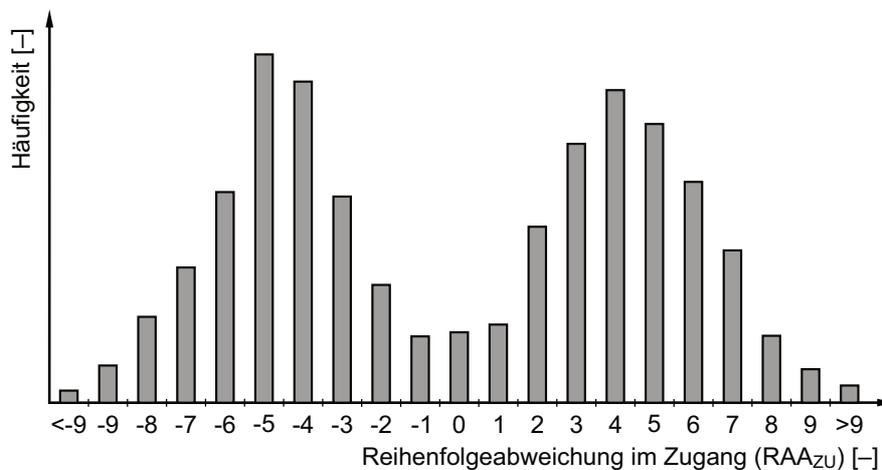
13676

**Bild 32:** Beispiel für die rückstandsbedingte Reihenfolgeabweichung im Zugang

Bild 33a zeigt die resultierende rückstandsbedingte Reihenfolgeabweichung in einem Histogramm. Im realen Prozess ist die Annahme einer abwechselnden Belieferung der Nachfolger unrealistisch, da streuende Auftragszeiten an Vorgängerarbeitssystemen zu abweichenden Plan-Zugangsreihenfolgen führen. Die Übertragung auf einen realen Prozess mit schwankenden Auftragszeiten sollte daher zu einer bimodalen Verteilungsform mit zwei lokalen Maxima führen (Bild 33b).



a) Rückstandsbedingte Reihenfolgeabweichung im Zugang (ideal)



b) Rückstandsbedingte Reihenfolgeabweichung im Zugang (real)

13677

### Bild 33: Rückstandsbedingte Reihenfolgeabweichung im Histogramm

Die Hypothese ist, dass die Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang eines Arbeitssystems von der Rückstandsverteilung der beliefernden Arbeitssysteme, ihrem Materialflusskoeffizienten und ihrem Anteil am Zugang des betrachteten Arbeitssystems abhängt.

Abschnitt 4.3.3 untersucht diese Hypothese und verdeutlicht in Simulationsexperimenten, welchen Einfluss der Rückstand von Vorgängern auf die Reihenfolgeabweichung im Zugang besitzt.

### 3.4 Abschätzung einer resultierenden Terminabweichungsverteilung

Die Kopplung der Terminabweichungsverteilungen erfolgt über die stochastische Faltung, mit der sich die Verteilung der Summe mehrerer Variablen berechnen lässt. Dabei ist anzumerken, dass die Faltung der reihenfolgebedingten und rückstandsbedingten Terminabweichungsverteilungen die Abschätzung der resultierenden Terminabweichung ermöglicht, sofern die beiden Verteilungen voneinander unabhängig sind (vgl. Beichelt, 2003, S. 68ff., Kuyumcu, 2013, S. 57ff. und Bertsch, 2015, S. 74f.).

Für die reihenfolgebedingte Terminabweichung kann das Modell aus Abschnitt 3.2 zumindest für die positiven Werte der reihenfolgebedingten Terminabweichung sehr gute Ergebnisse liefern. Für die negativen Werte der reihenfolgebedingten Terminabweichung liegt lediglich eine grobe Schätzung vor, die jedoch in vielen Fällen ausreicht, um eine Terminabweichungsverteilung zu ermitteln.

Für die rückstandsbedingte Terminabweichung liegt innerhalb dieser Arbeit kein Modell vor, das eine Terminabweichungsverteilung ermitteln lässt. Die Ausführungen in Abschnitt 3.3 zeigen, dass der Rückstand im Zugang bei moderaten Beständen in der Regel nicht den ausschlaggebenden Faktor für Rückstände im Abgang darstellt. Rückstände aufgrund von Kapazitätsstörungen sind an dieser Stelle jedoch nicht vollständig vernachlässigbar, da der Einfluss des Rückstands einer Fertigung auf die Terminabweichung im Abgang für Unternehmen von großem Interesse ist. Die folgenden Ausführungen beschreiben daher kurz drei Varianten, um den Rückstand für den Anwender möglichst aufwandsarm in die Modellierung einer resultierenden Terminabweichungsverteilung zu berücksichtigen.

Die erste Variante setzt voraus, dass die Fertigungssteuerung Rückstände vollständig ausregeln kann. In diesem Fall ist eine Faltung der Verteilungen nicht notwendig, da die resultierende der reihenfolgebedingten Terminabweichungsverteilung entspricht.

Die zweite Variante setzt eine vorhandene Rückstandsverteilung oder Verteilung der rückstandsbedingten Terminabweichung voraus (beispielsweise aus historischen Daten). Die Prämisse hierbei ist, dass (historische) Rückstände unabhängig von der Reihenfolgebildung unverändert auftreten. In diesem Fall ergibt die stochastische Faltung der historischen rückstandsbedingten Terminabweichungsverteilung mit der modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichungsverteilung die zu erwartende resultierende Terminabweichungsverteilung.

Die dritte Variante baut auf einer Schätzung der Rückstandsverteilung auf. Bertsch (2015, S. 107ff.) zeigt in seiner Dissertation, wie sich eine Rückstandsverteilung approximieren lässt. Die Ermittlung ist jedoch aufwendig, wie im Stand der Forschung bereits beschrieben (vgl. Abschnitt

2.4). Eine aufwandsarme, jedoch ungenauere Alternative ist die Schätzung des Rückstands durch Normalverteilungen mit unterschiedlich ausgeprägten Verteilungsparametern. Diese ermöglichen es, den Einfluss des Rückstands auf die Terminabweichung für unterschiedliche Ausprägungen des Rückstands abzuschätzen und ggf. eine Rückstandsregelung auf dieser Grundlage auszulegen. Aus den geschätzten Rückstandsverteilungen lässt sich die dazugehörige rückstandsbedingte Terminabweichungsverteilung durch Gewichtung mit der Leistung ermitteln und mit der reihenfolgebedingten Terminabweichungsverteilung falten, um eine resultierende Terminabweichungsverteilung zu erhalten.

Für mehrere Arbeitssysteme ist die Kopplung über die Faltung nur bedingt anwendbar, da wie gezeigt, der Rückstand einzelner Arbeitssysteme im Auftragsdurchlauf zu Reihenfolgeabweichungen im Zugang nachfolgender Arbeitssysteme führt. Da die Faltung die Unabhängigkeit der einzelnen Verteilungen voraussetzt, verliert die Modellierung mit zunehmender Abhängigkeit der Einflussgrößen an Genauigkeit. Abschnitt 4.4 evaluiert, wie gut sich durch die Faltung der Terminabweichungsanteile eine resultierende Terminabweichungsverteilung ermitteln lässt.

## 4 Simulative Evaluierung der entwickelten Modelle

Dieses Kapitel untersucht mit Hilfe von Simulationsexperimenten, wie hoch die Genauigkeit der entwickelten Modelle aus Kapitel 3 ist.

Die Simulation ist für die Erforschung komplexer Sachverhalte ein weit verbreitetes Mittel (Nyhuis & Wiendahl, 2012, S. 49, Rabe, Spieckermann & Wenzel, 2008, S. 1), das bereits bei einer Vielzahl von logistischen Fragestellungen zum Einsatz kam (z. B. Evaluierung von Produktionskennlinien oder Beurteilung von Reihenfolgeregeln). Für den ordnungsgemäßen Aufbau und die Durchführung von Simulationsexperimenten existiert eine Vielzahl von Leitfäden und Richtlinien (z. B. Eley, 2012, Rabe et al., 2008). Die VDI-Richtlinie 3633 definiert die Simulation als „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbarem Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ (VDI - Verein Deutscher Ingenieure). Das in dieser Arbeit verwendete Simulationsmodell soll daher ein reales Arbeitssystem bzw. eine reale Fertigung in ausreichender Genauigkeit nachbilden, um die Übertragbarkeit der Modelle in die Praxis zu bestätigen.

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben zunächst die zu Grunde liegende Simulationsumgebung sowie das entwickelte Simulationsmodell (Abschnitt 4.1). Daraufhin werden die analytischen Modelle für die Reihenfolgeabweichung (Abschnitt 4.2) und die aufgestellten Hypothesen für den Rückstand (Abschnitt 4.3) jeweils für ein Arbeitssystem und für Fertigungsbereiche evaluiert. Abschließend beschreibt Abschnitt 4.4 die Evaluierung der Kopplung der Terminabweichungsanteile.

### 4.1 Beschreibung des Simulationsmodells

Das verwendete Simulationsmodell wurde mit der Software Plant Simulation der Firma Siemens erstellt. Es handelt sich hierbei um eine diskrete ereignisorientierte Simulation, d. h. die Simulation geht von einem Systemzustand in den nächsten über, ohne dass zwischen zwei Zuständen eine Veränderung möglich ist.

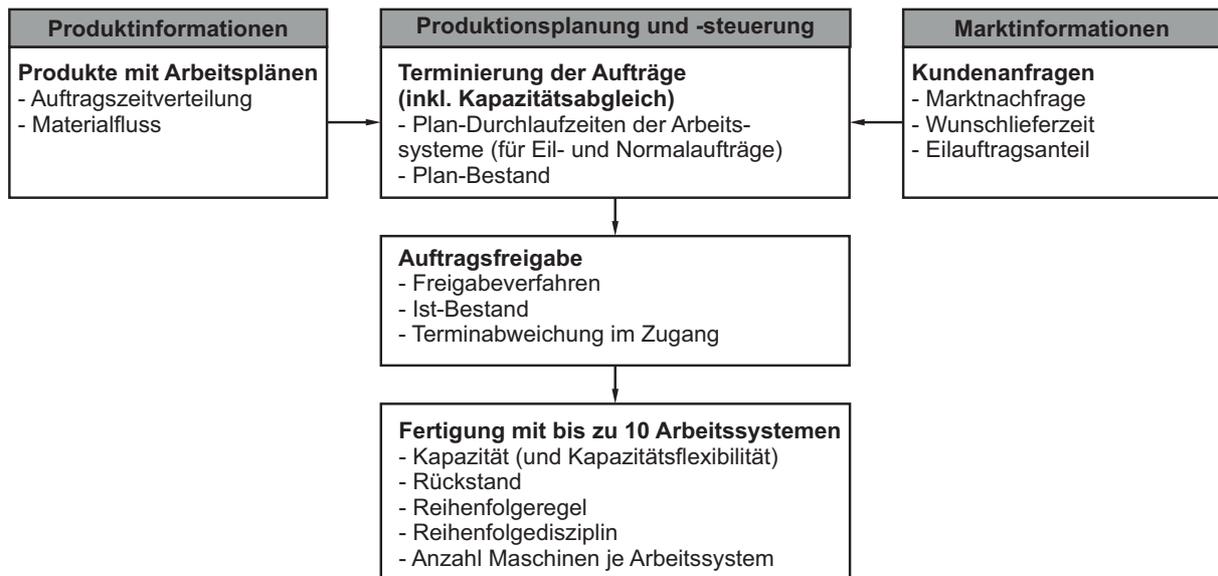
Innerhalb des entwickelten Simulationsmodells sind Variationen mehrerer Einstellparameter möglich. So kann eine mit dem Simulationsmodell erstellte Fertigung variabel aus nur einem Arbeitssystem, einer Fertigungslinie oder einer Werkstattfertigung mit maximal zehn Arbeitssystemen bestehen. Jedes Produkt innerhalb des Simulationsmodells besitzt einen Arbeitsplan mit den zu durchlaufenden Arbeitssystemen und dazugehörigen Auftragszeiten. Die Arbeitspläne sind hierbei zwischen Simulationsläufen variabel und ermöglichen somit sowohl die Variation der Materialflusskomplexität als auch der Auftragszeitverteilung. Jedem Arbeitssystem ist darüber hinaus eine individuell einstellbare Plan-Durchlaufzeit für Standardaufträge und eine zusätzliche

für Eilaufträge zugeordnet, die für die Terminierung genutzt wird und zusammen mit der Nachfrage den Plan-Bestand der Arbeitssysteme definiert. Der Ist-Bestand hingegen ist durch das Auftragsfreigabeverfahren beeinflussbar. Ist eine terminorientierte Auftragsfreigabe eingestellt, gehen die Aufträge zum Plan-Starttermin zu – der Bestand entwickelt sich dann abhängig von der Nachfrage und dem Rückstand der Fertigung. Die bestandsregelnde Auftragsfreigabe nach dem ConWIP-Verfahren hingegen führt zu konstanten Beständen in der simulierten Fertigung.

Neben dem Bestand definiert die Auftragsfreigabe die Zugangsterminabweichung. Diese ist entweder über eine Verteilungsform definiert oder durch gezielte tagesbasierte Rückstände und die Wahl einer Reihenfolgedisziplin der Auftragsfreigabe beeinflussbar. Arbeitssysteme erhalten, wenn gewünscht, ebenfalls vordefinierte Rückstände (auch negative Rückstände), die auf unterschiedlichen Verteilungsformen basieren können. Sofern die Rückstände auf null gesetzt sind, erreicht jedes Arbeitssystem stets seinen Plan-Abgang, sofern dies mit der eingestellten Kapazitätsflexibilität möglich ist.

Die Arbeitssysteme können die Reihenfolge nach unterschiedlichen Regeln bilden. So ist zum einen eine Reihenfolgebildung nach dem FIFO-Prinzip einstellbar und zum anderen können die Arbeitssysteme Aufträge nach ihrem frühesten Plan-Endtermin priorisieren. Für eine Reihenfolgebildung nach dem frühesten Plan-Endtermin ist es zudem möglich, eine definierte Reihenfolgedisziplin vorzugeben. Hierdurch wird lediglich der mit der Reihenfolgedisziplin eingestellte Anteil der Aufträge nach dem frühesten Plan-Endtermin priorisiert. Die restlichen Aufträge werden zufällig ohne eine bestimmte Reihenfolgeregel aus dem Auftragsbestand gewählt, um eine nicht systematische Abweichung von der eingestellten Reihenfolgeregel zu simulieren.

Weitere Variationsmöglichkeiten sind die Anzahl der Kundenanfragen und die dazugehörigen Wunschlieferzeitverteilungen, die Anzahl der Maschinen je Arbeitssystem sowie der Eilauftragsanteil innerhalb der Anfragen. Bild 34 fasst die möglichen Einstellungen und ihren Zusammenhang innerhalb der Simulation zusammen.



13678

**Bild 34: Einstellungen und Zusammenhänge innerhalb des Simulationsmodells**

Die einzelnen Teile des Simulationsmodells wurden innerhalb der Entwicklung mit etablierten Techniken verifiziert und validiert. Es kamen insbesondere Strukturiertes Durchgehen, Grenzwerttests und Sensitivitätsanalysen (Rabe et al., 2008, S. 93ff.) zum Einsatz. Hypothese ist, dass das abschließend verwendete Simulationsmodell alle Bereiche realer Fertigungen inklusive der vorgelagerten Auftragsannahme und -terminierung in ausreichender Genauigkeit abbildet.

## 4.2 Evaluierung des Modells für die reihenfolgebedingte Terminabweichung

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die durchgeführten Simulationsexperimente und die dazugehörigen Ergebnisse, die die Güte der Modellierung der Reihenfolgeabweichung aus Abschnitt 3.2 zeigen. Der Abschnitt ist in die Evaluierung der Modelle für ein Arbeitssystem (Abschnitt 4.2.1) und für Fertigungsbereiche (Abschnitt 4.2.2) unterteilt.

### 4.2.1 Reihenfolgebedingte Terminabweichung für ein Arbeitssystem

In den durchgeführten Experimenten variieren die Einflussgrößen des Modells. Diese sind der Bestand des Arbeitssystems, die Auftragszeitverteilung, die Standardabweichung der reihenfolgebedingten Zugangsterminabweichung, die geplanten Beschleunigungen von Aufträgen (Eilaufträge) sowie die Anzahl der Maschinen des Arbeitssystems (vgl. Tabelle 7). Die Auswertung der Simulationsexperimente erfolgt über den Vergleich der modellierten Werte für die Reihenfolgeabweichung und Termineinhaltung mit den in der Simulation gemessenen Werten.

**Tabelle 7: Einflussgrößen und Ausprägungen für die Evaluierung des Modells für ein Arbeitssystem**

<b>Einflussgröße</b>	<b>Ausprägung</b>				
Bestand	5 Varianten				
Variationskoeffizient der Auftragszeit	0	0,7		1	
Standardabweichung der TAZ <sub>RA</sub>	0	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage
Anteil Eilaufträge	0 %		10 %		20 %
Anzahl Maschinen je Arbeitssystem	1	2		4	

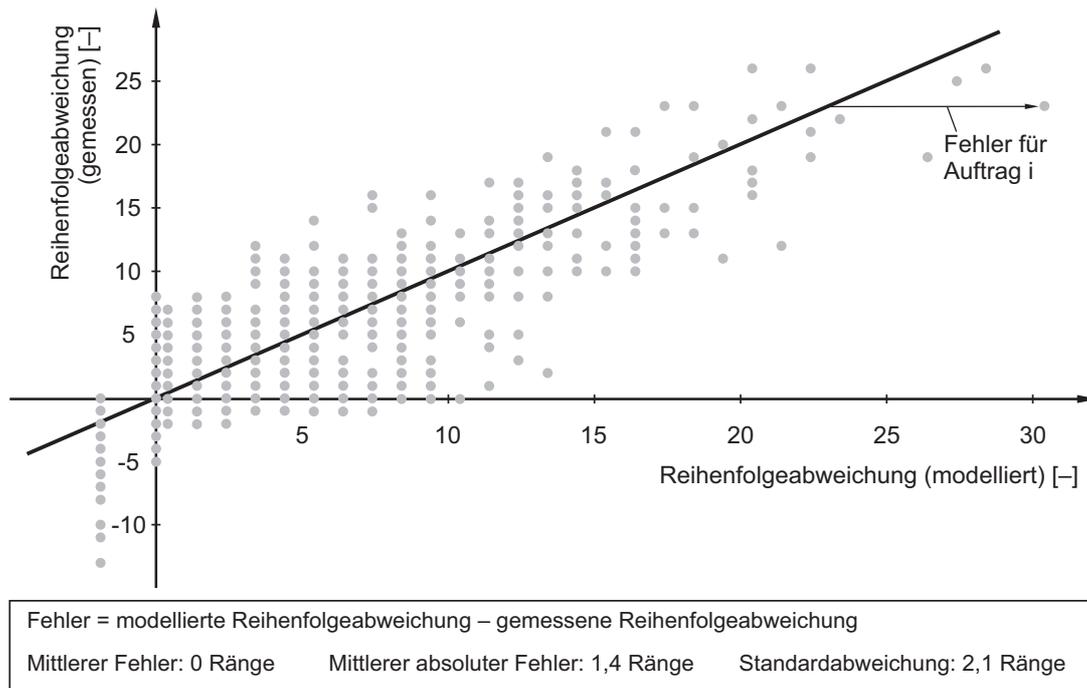
TAZ<sub>RA</sub>: Reihenfolgebedingte Zugangsterminabweichung

Die gesammelten Simulationsergebnisse von 210 Simulationsexperimenten sind im Anhang gebündelt. Die folgenden Ausführungen beschreiben zum einen ausgewählte Versuche im Detail, um die Genauigkeit für einzelne Szenarien zu zeigen, und zum anderen verdichten sie die Versuchsergebnisse mehrerer Experimente, um eine schnelle und objektive Gesamtschätzung der Modellgüte zu ermöglichen. Die Evaluierung soll Antworten auf folgende Fragen geben:

- Wie genau kann das Modell die Reihenfolgeabweichung, die reihenfolgebedingte Termineinhaltung und -termintreue vorhersagen?
- Wie robust ist das Modell gegenüber Schwankungen der Auftragszeit (des Bestands)?
- Wie robust ist das Modell gegenüber Eilaufträgen?
- Wie genau ist das Modell bei mehreren Maschinen je Arbeitssystem?

Bild 35 zeigt die gemessene über der modellierten Reihenfolgeabweichung für ein Simulationsexperiment mit leicht schwankendem Bestand ( $BA_m=13,6$  Aufträge,  $BA_s=3,6$  Aufträge), streuenden Auftragszeiten ( $ZAU_m=50$  Minuten,  $ZAU_s=50$  Minuten) und einer moderaten Variation der Terminabweichung im Zugang ( $TAZ_{RA,s}=1$  Tag). Zudem kommen in dem Simulationsexperiment keine Eilaufträge vor und das Arbeitssystem besteht aus einer Maschine. Die Reihenfolgebildung erfolgt strikt nach frühestem Plan-Endtermin (Reihenfolgedisziplin = 100 %).

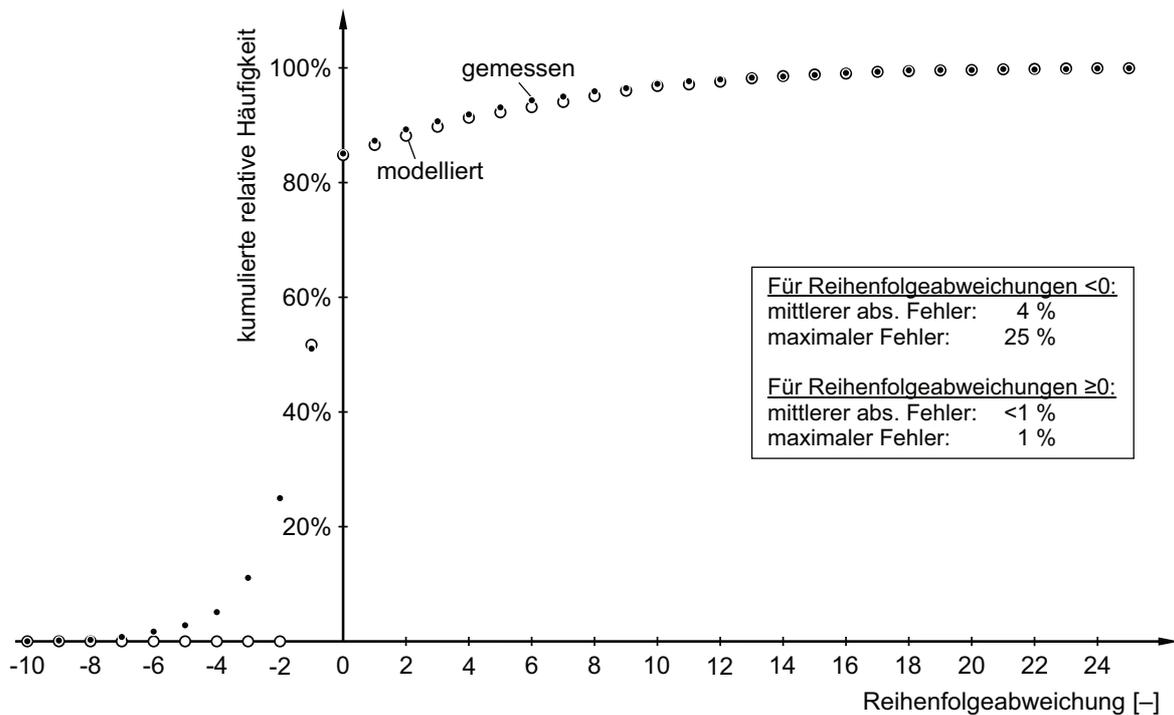
Die Winkelhalbierende entspricht einer exakten Übereinstimmung zwischen gemessener und modellierter Reihenfolgeabweichung. Für die Einzelwerte liegen zum Teil auch deutliche Abweichungen zwischen der modellierten und der gemessenen Reihenfolgeabweichung vor. Zwar stimmt die Modellierung nicht für jeden Auftrag, dennoch sind zum einen ein Korrelationskoeffizient von 0,83 und ein mittlerer absoluter Fehler von 1,5 Rängen ein Zeichen für eine hohe Modellierungsgüte. Der Korrelationskoeffizient für die Prognose der Reihenfolgeabweichung für Aufträge mit positiver Zugangsreihenfolgeabweichung liegt bei 0,85 und deutet somit eine leicht höhere Modellierungsgüte an. Die auftretenden Abweichungen resultieren hierbei vornehmlich durch den schwankenden Bestand im Simulationsversuch. Im Mittel gleichen sich die Fehler jedoch aus, sodass ein mittlerer Fehler von null vorliegt.



13679

**Bild 35: Vergleich der modellierten und gemessenen Reihenfolgeabweichung (ein Arbeitssystem, Versuchs-ID 68)**

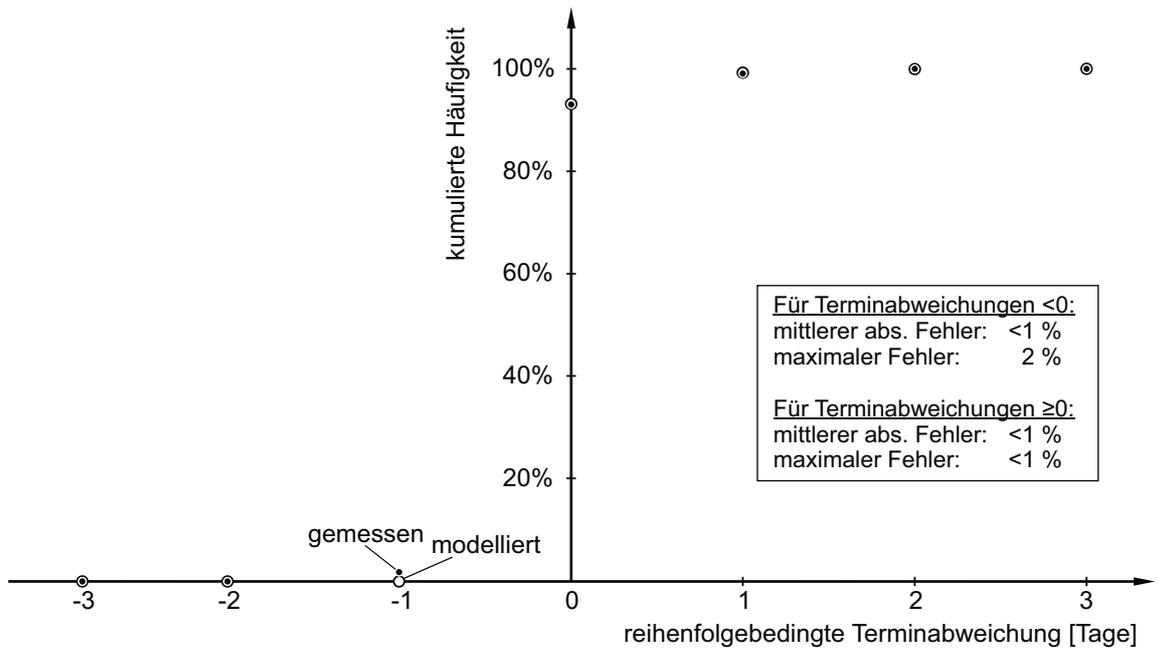
Bild 36 zeigt für denselben Versuch die kumulierten Verteilungen der gemessenen und modellierten Reihenfolgeabweichung. Die sehr hohe Übereinstimmung der Kurven bestätigt die Modellierungsgüte. Für Reihenfolgeabweichungen größer oder gleich null liegt der mittlere Fehler bei unter einem Prozentpunkt und der maximale Fehler bei einem Prozentpunkt. Für die negativen Werte ergibt sich aufgrund der vereinfachten Abschätzung der negativen Werte durch einen Mittelwert eine hohe maximale Abweichung von 25 Prozent.



13680

**Bild 36: Vergleich der modellierten und gemessenen Reihenfolgeabweichungsverteilung (ein Arbeitssystem, Versuchs-ID 68)**

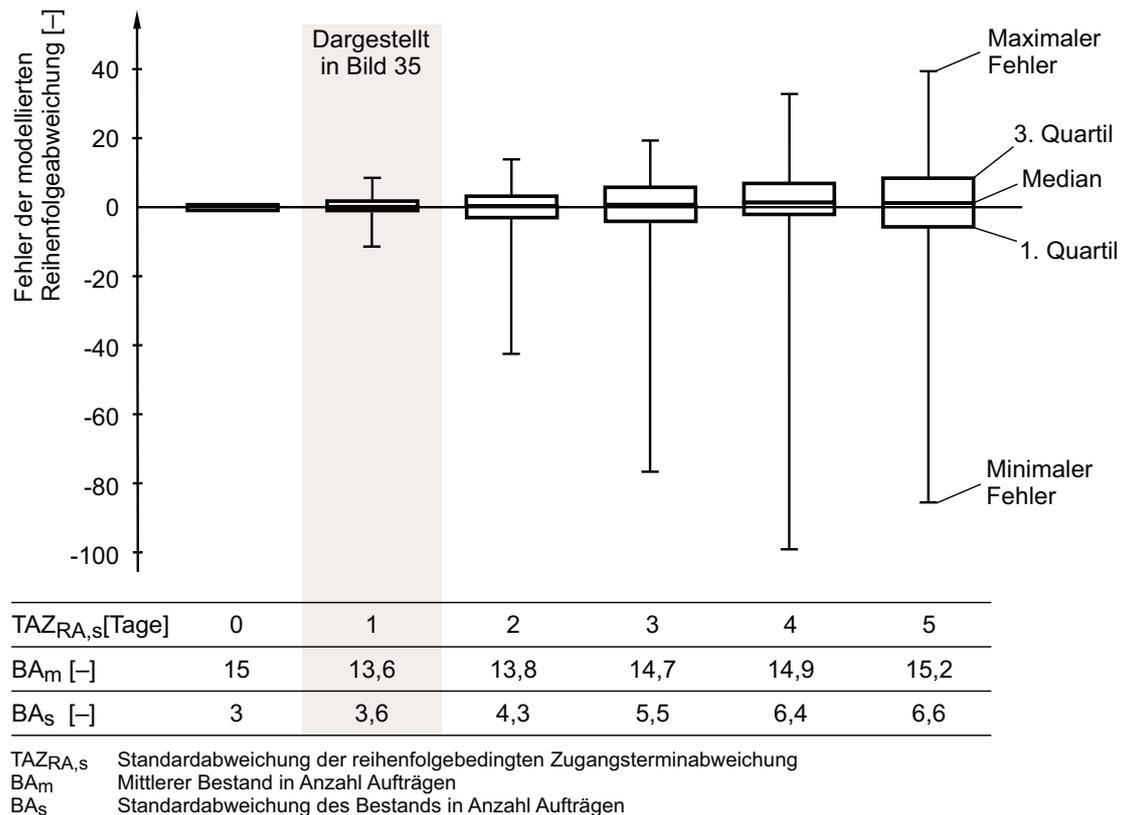
Für die Anwendung zur Modellierung der Termineinhaltung ist es notwendig, die Modellierungsgüte für die reihenfolgebedingte Terminabweichung zu beurteilen. Bild 37 zeigt für denselben Versuch die kumulierte Verteilung der reihenfolgebedingten Terminabweichung für die Modellierung und die gemessenen Werte. Für Terminabweichungen größer oder gleich null kann die Modellierung mit einer sehr hohen Genauigkeit (maximaler absoluter Fehler kleiner 1 Prozentpunkt) die kumulierte Verteilung abbilden. Für die reihenfolgebedingte Terminabweichung ist in diesem Fall auch die Güte der Modellierung der negativen Werte sehr hoch, da die entstandenen Reihenfolgeabweichungen sehr klein sind und somit kaum negative reihenfolgebedingte Terminabweichungen auftraten.



13681

**Bild 37: Vergleich der modellierten und gemessenen reihenfolgebedingten Terminabweichung (ein Arbeitssystem, Versuchs-ID 68)**

Die weiteren Simulationsexperimente aus der Versuchsreihe zeigen ähnlich hohe Genauigkeiten bei der Prognose der Reihenfolgeabweichung und der reihenfolgebedingten Terminabweichung. Die Fehler für die Rangprognose einzelner Aufträge, die Bild 35 für ein Simulationsexperiment zeigt, verdichtet Bild 38 für eine Versuchsreihe. Die Box-Plots zeigen das erste Quartil, den Median, das dritte Quartil sowie mit den Antennen den minimalen und maximalen Fehler zu jedem Simulationsexperiment. Mit zunehmender Streuung der Zugangsterminabweichung ist das Modell stärker gefordert. Zum einen entstehen durch die Schwankung der Zugangsterminabweichung auch Bestandsschwankungen, die das Modell mit dem Mittelwert nicht berücksichtigt. Zum anderen müssen größere Schwankungen der Reihenfolgeabweichung im Zugang ausgeglichen und prognostiziert werden. Dadurch ist naturgemäß das Potenzial eines größeren Fehlers gegeben. Bild 38 verdeutlicht jedoch auch, dass der Fehler für 50 Prozent der Aufträge (zwischen erstem und drittem Quartil) sehr gering ist.



13682

**Bild 38: Box-Plots für den Fehler der modellierten Reihenfolgeabweichung (ein Arbeitssystem, Versuchsreihe 12)**

Tabelle 8 zeigt für die Versuchsreihe aus Bild 38 die mittleren absoluten und maximalen Fehler für die kumulierte Reihenfolgeabweichung (verdichtete Darstellung von Bild 36). Aufgrund der vereinfachten Modellierung der negativen Reihenfolgeabweichung sind die Fehler für diese vergleichsweise hoch. Jedoch ist die Modellierung der kumulierten Verteilung der nicht negativen Reihenfolgeabweichungen sehr genau und weist sowohl einen sehr kleinen mittleren absoluten Fehler als auch durchgehend für alle Versuche einen geringen maximalen Fehler auf.

**Tabelle 8: Fehleranalyse des Modells der Reihenfolgeabweichung (ein Arbeitssystem, Versuchsreihe 12)**

TAZ <sub>RA,s</sub>	Reihenfolgeabweichung < 0		Reihenfolgeabweichung ≥ 0	
	Mittlerer absoluter Fehler	Maximaler absoluter Fehler	Mittlerer absoluter Fehler	Maximaler absoluter Fehler
0	0 %	0 %	0 %	0 %
1 <sup>1)</sup>	4 %	25 %	<1 %	1 %
2	4 %	28 %	<1 %	1 %
3	4 %	30 %	<1 %	2 %
4	6 %	30 %	<1 %	2 %
5	6 %	29 %	<1 %	2 %

TAZ<sub>RA,s</sub>: Standardabweichung der reihenfolgebedingten Zugangsterminabweichung

<sup>1)</sup> dargestellt in Bild 36

Tabelle 9 zeigt analog zu Tabelle 8 die Fehler des Modells für die reihenfolgebedingte Terminabweichung (verdichtete Darstellung von Bild 37). Die Ergebnisse bestätigen, die hohe Genauigkeit der Modellierung für positive Werte bei schwankendem Bestand, variierenden Auftragszeiten und auch bei großen Reihenfolgeabweichungen im Zugang.

**Tabelle 9: Fehleranalyse des Modells der reihenfolgebedingten Terminabweichung (ein Arbeitssystem, Versuchsreihe 12)**

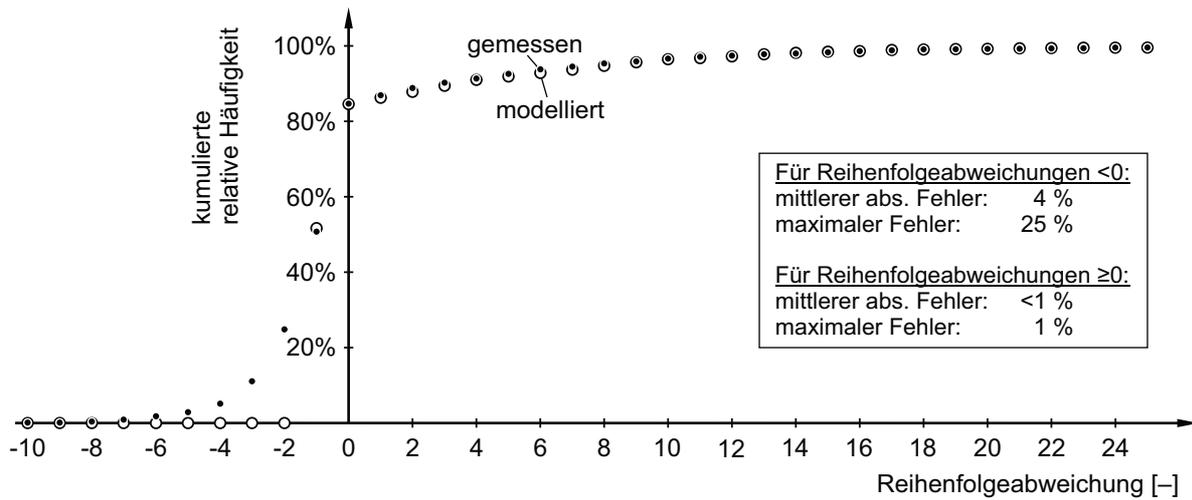
TAZ <sub>RA,s</sub>	Reihenfolgebedingte Terminabweichung < 0		Reihenfolgebedingte Terminabweichung ≥ 0	
	Mittlerer absoluter Fehler	Maximaler absoluter Fehler	Mittlerer absoluter Fehler	Maximaler absoluter Fehler
0	0	0	0	0
1 <sup>1)</sup>	<1 %	2 %	<1 %	<1 %
2	3 %	17 %	<1 %	2 %
3	3 %	17 %	<1 %	2 %
4	5 %	17 %	<1 %	2 %
5	6 %	24 %	<1 %	2 %

TAZ<sub>RA,s</sub>: Standardabweichung der reihenfolgebedingten Zugangsterminabweichung

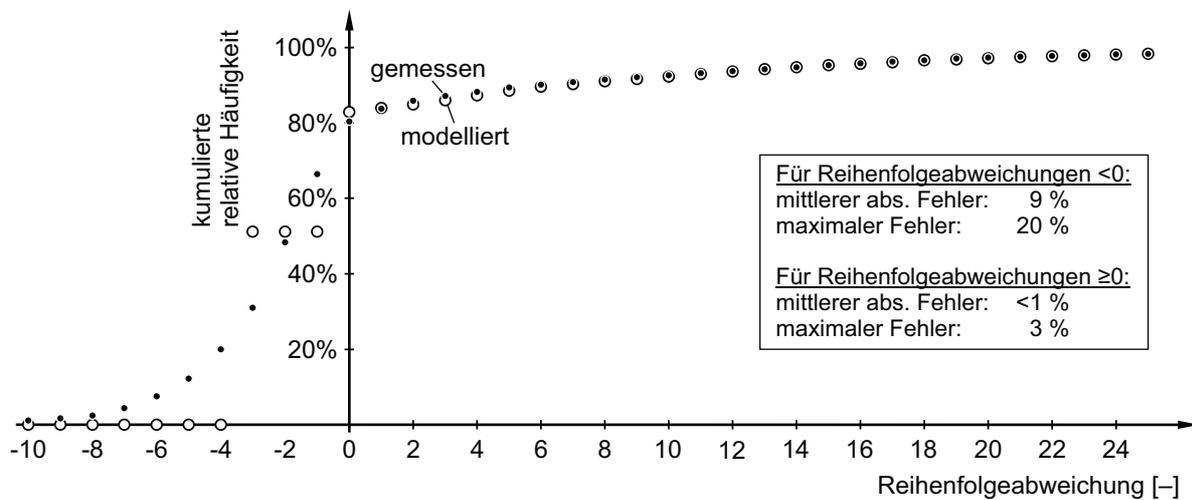
<sup>1)</sup> dargestellt in Bild 37

Die Evaluierung des Modells auf seine Robustheit gegenüber Eilaufträgen und/oder mehreren Maschinen je Arbeitssystem erfolgte teilfaktoriell. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell auch bei Eilauftragsanteilen von 10 und 20 Prozent die kumulierte Reihenfolgeabweichung und die reihenfolgebedingte Terminabweichung mit einem sehr geringen Fehler abbildet (vgl. Anhang zu Abschnitt 4.2.1).

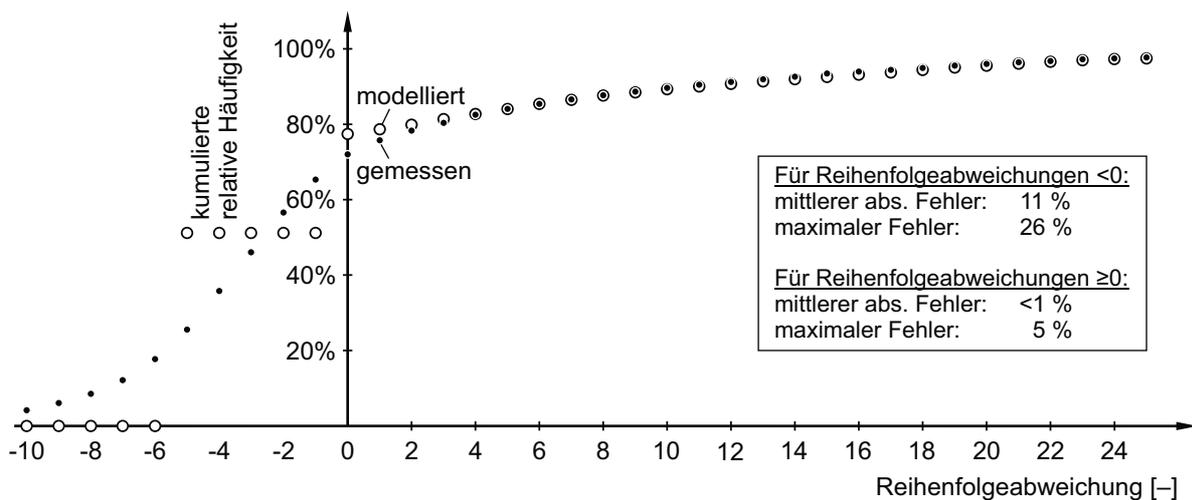
Für Arbeitssysteme mit mehreren Maschinen zeigt das Modell ebenso gute Ergebnisse, jedoch weicht die berechnete Reihenfolgeabweichung von der gemessenen stärker ab als für den Fall mit einer Maschine. Der Grund hierfür sind variierende Bearbeitungszeiten der Aufträge, die dazu führen, dass Aufträge während der Bearbeitung auf der Maschine überholt werden können. Bild 39 zeigt jeweils die gemessene und modellierte Reihenfolgeabweichung für Versuche mit einer, zwei und vier parallelen Maschinen am Arbeitssystem sowie vergleichbarem Bestand (Reichweite ≈ 1 Tag), vergleichbarer Auftragszeitverteilung (ZAU<sub>v</sub> ≈ 1) und einer vergleichbaren Streuung der Zugangsterminabweichung (TAZ<sub>s</sub> = 1 Tag). Es wird deutlich, dass das Modell bei mehreren Maschinen zwar ungenauer ist, jedoch immer noch eine hohe Genauigkeit für positive Reihenfolgeabweichungen aufweist. Die Abweichung des Modells nimmt mit der Streuung der Auftragszeit und der Anzahl der Maschinen zu. Wird die Reihenfolgeabweichung zum Zugangszeitpunkt auf die Maschine gemessen, so zeigt das Ergebnis, dass die einzige Ursache für die Abweichung die beschriebene Überholung der Aufträge auf den Maschinen ist.



a) Reihenfolgeabweichungsverteilung für ein Arbeitssystem mit einer Maschine (Versuchsreihe 12,  $TAZ_{RA,s}=1$ )



b) Reihenfolgeabweichungsverteilung für ein Arbeitssystem mit zwei Maschinen (Versuchsreihe 27,  $TAZ_{RA,s}=1$ )



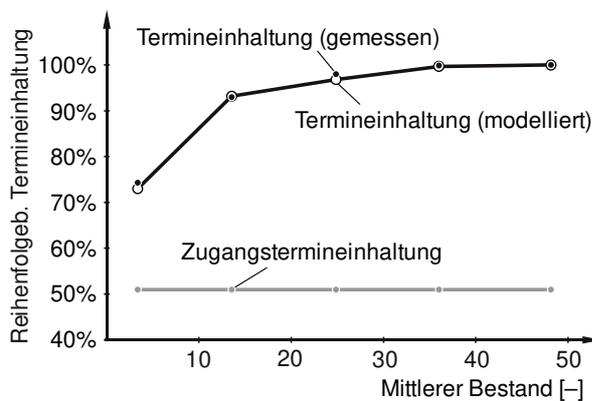
c) Reihenfolgeabweichungsverteilung für ein Arbeitssystem mit vier Maschinen (Versuchsreihe 32,  $TAZ_{RA,s}=1$ )

13683

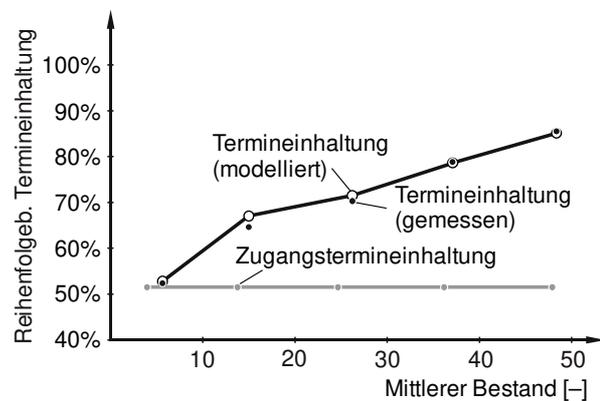
**Bild 39: Vergleich der Reihenfolgeabweichungen für Arbeitssysteme mit unterschiedlicher Maschinenanzahl (ein Arbeitssystem)**

Neben der Evaluierung des Modells zeigen die durchgeführten Versuche, wie wirksam die Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin die Termineinhaltung verbessert. Das Potenzial

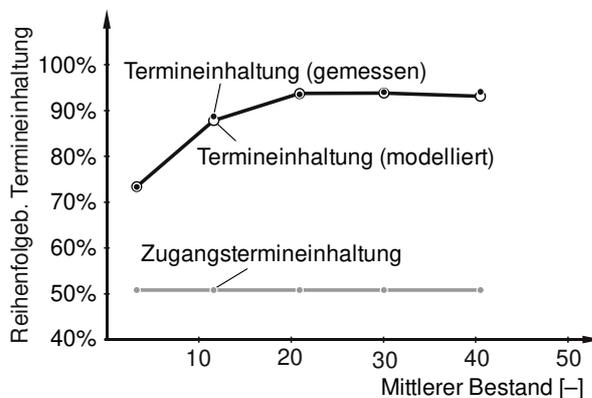
hängt hierbei vom vorliegenden Bestand ab und nimmt mit dem Bestand zu. Je höher der Bestand ist, desto höher ist der Schlupf für die Aufträge, um Reihenfolgeabweichungen im Zugang auszugleichen. Folglich kann die Reihenfolgebildung positive Reihenfolgeabweichungen im Abgang eher vermeiden. Des Weiteren zeigen die Versuche, dass eine hohe Streuung der Zugangsterminabweichung dazu führt, dass mehr Aufträge mit einer unaufholbaren Zugangsreihenfolgeabweichung zugehen als bei geringer Streuung (vgl. Bild 40a und b). Zudem stimmen die modellierten Werte für die Termineinhaltung mit einer sehr hohen Genauigkeit mit den gemessenen Werten überein. Dies gilt auch beim Auftreten von Eilaufträgen und für Arbeitssysteme mit mehreren Maschinen (Bild 40c und d).



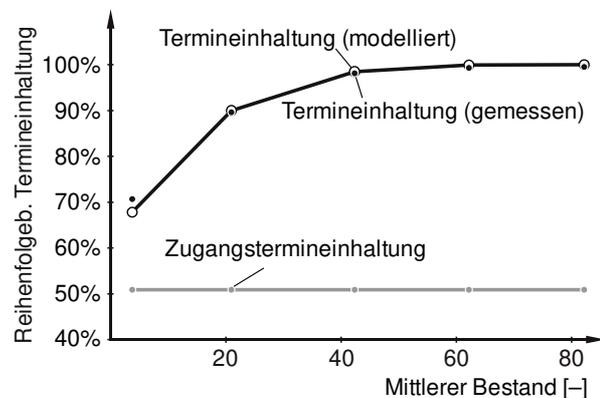
a) Geringe Streuung der Zugangsterminabweichung ( $TAZ_{RA,s}=1$ , Versuchsreihen 11-15)



b) Hohe Streuung der Zugangsterminabweichung ( $TAZ_{RA,s}=4$ , Versuchsreihen 11-15)



c) Geringe Streuung der Zugangsterminabweichung 20% Eilaufträge ( $TAZ_{RA,s}=1$ , Versuchsreihen 21-25)



d) Geringe Streuung der Zugangsterminabweichung 4 Maschinen ( $TAZ_{RA,s}=1$ , Versuchsreihen 31-35)

13684

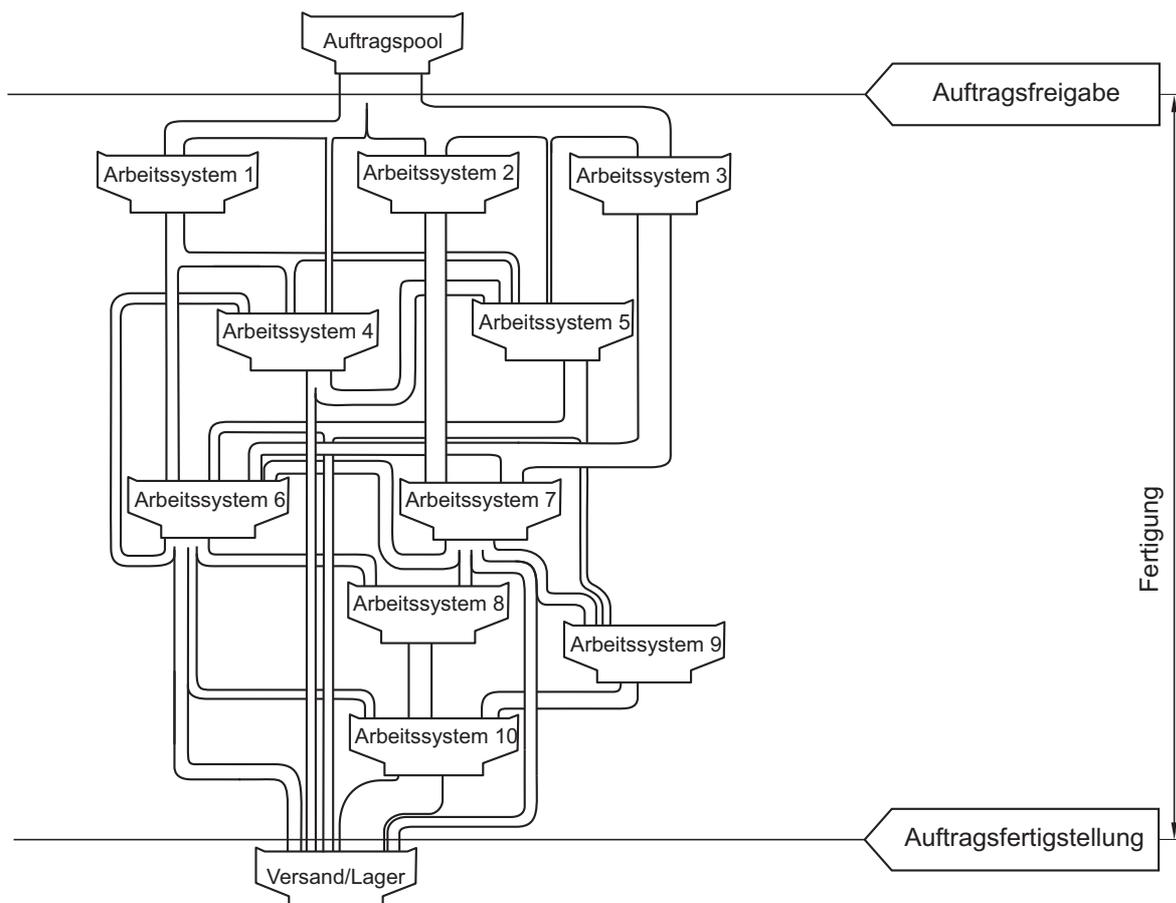
**Bild 40: Gemessene und modellierte Termineinhaltung über dem Bestand (ein Arbeitssystem)**

Das entwickelte Modell für ein Arbeitssystem kann somit mit einer sehr hohen Genauigkeit die positive reihenfolgebedingte Terminabweichung im Abgang in Abhängigkeit der Zugangsreihenfolgeabweichung bzw. Zugangsterminabweichung, des Bestands und der Anzahl der Maschinen beschreiben.

#### 4.2.2 Reihenfolgebedingte Terminabweichung für Fertigungsbereiche

Die durchgeführten Simulationsexperimente evaluieren die Gleichungen (37)–(39) (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die Gleichung (37) beschreibt die Modellierung mit individuellen Durchführungszeiten, die Gleichung (38) nutzt die individuellen Variationskoeffizienten der Auftragszeit der durchlaufenen Arbeitssysteme und Gleichung (39) ist die am stärksten vereinfachende Gleichung, die einen konstanten Variationskoeffizienten von eins annimmt.

Das verwendete Simulationsmodell weist einen komplexen Materialfluss mit 10 Arbeitssystemen auf und die Aufträge durchlaufen 2–5 Arbeitsvorgänge (Bild 41).



13685

**Bild 41: Materialfluss innerhalb der Simulationsversuche**

Wie bereits bei der Evaluierung der Gleichung für ein Arbeitssystem wurden hauptsächlich der Bestand, die Zugangsterminabweichung und die Auftragszeitverteilung variiert, um die Modellgüte zu untersuchen. Zusätzlich wurden Versuchsreihen mit unterschiedlichen Eilauftragsanteilen durchgeführt, um die Eignung des Modells bei heterogenen Plan-Durchlaufzeiten zu zeigen (vgl. Tabelle 10).

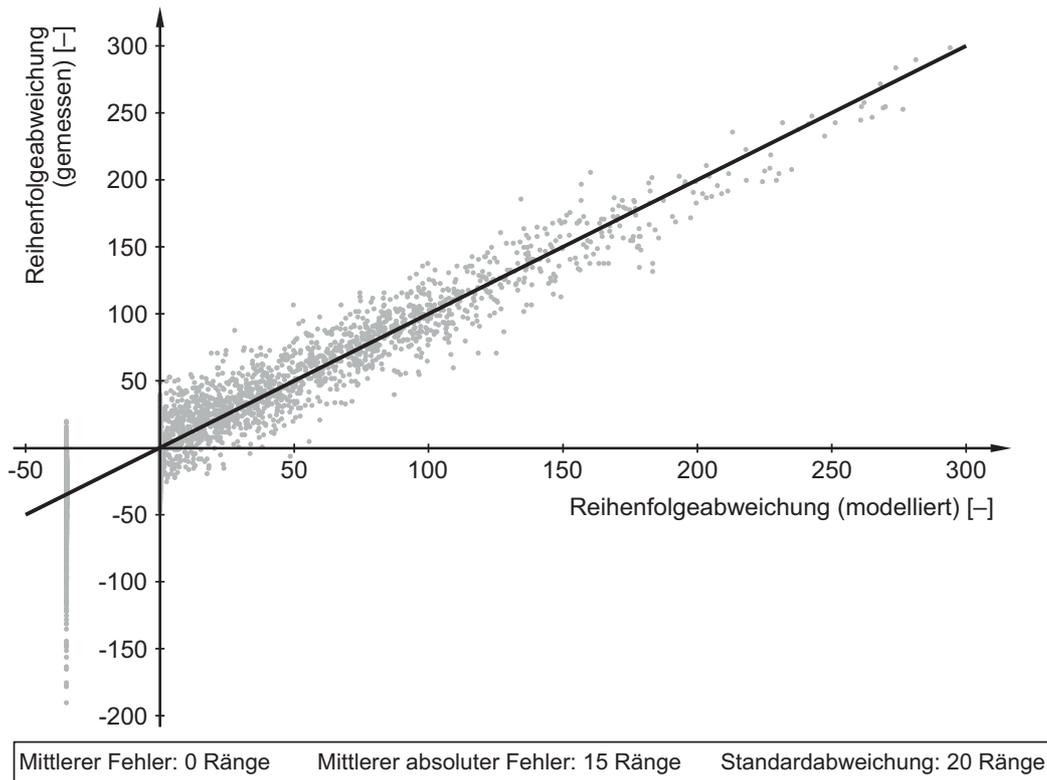
**Tabelle 10: Einflussgrößen und Ausprägungen für die Evaluierung des Modells für mehrere Arbeitssysteme**

<b>Einflussgröße</b>	<b>Ausprägung</b>						
Bestand	6 Varianten						
Variationskoeffizient der Auftragszeit	0,5		1,2			2,0	
Standardabweichung der TAZ <sub>RA</sub>	0	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage	5 Tage	6 Tage
Anteil Eilaufträge	0 %		10 %			20 %	

TAZ<sub>RA</sub>: Reihenfolgebedingte Terminabweichung im Zugang

Es wurden 138 Simulationsexperimente durchgeführt (siehe Anhang, S. 138 ff.) und die folgenden Ausführungen beschreiben die Ergebnisse ausgewählter Simulationsexperimente im Detail. Bild 42 zeigt die gemessene über der mit individuellen Durchführungszeiten modellierten Reihenfolgeabweichung (Gleichung (37)). Der dazugehörige Versuch (Versuchsreihe 2, ID 13) weist einen moderat schwankenden Bestand auf (80 Aufträge im Mittel, Standardabweichung 21 Aufträge), zudem liegt eine streuende Auftragszeit (2,5 Stunden im Mittel, Standardabweichung 2,8 Stunden) und eine hohe Variation der Terminabweichung im Zugang (Standardabweichung 5 Tage) vor. Wie bereits für ein Arbeitssystem kann die Modellierung auch für komplexe Materialflüsse nicht für jeden Auftrag den exakten Abgangsrang ermitteln, jedoch weist das Modell auch hier einen hohen Korrelationskoeffizienten von 0,93 auf. Zudem gleichen sich die Fehler im Mittel aus, sodass ein mittlerer Fehler von null vorliegt.

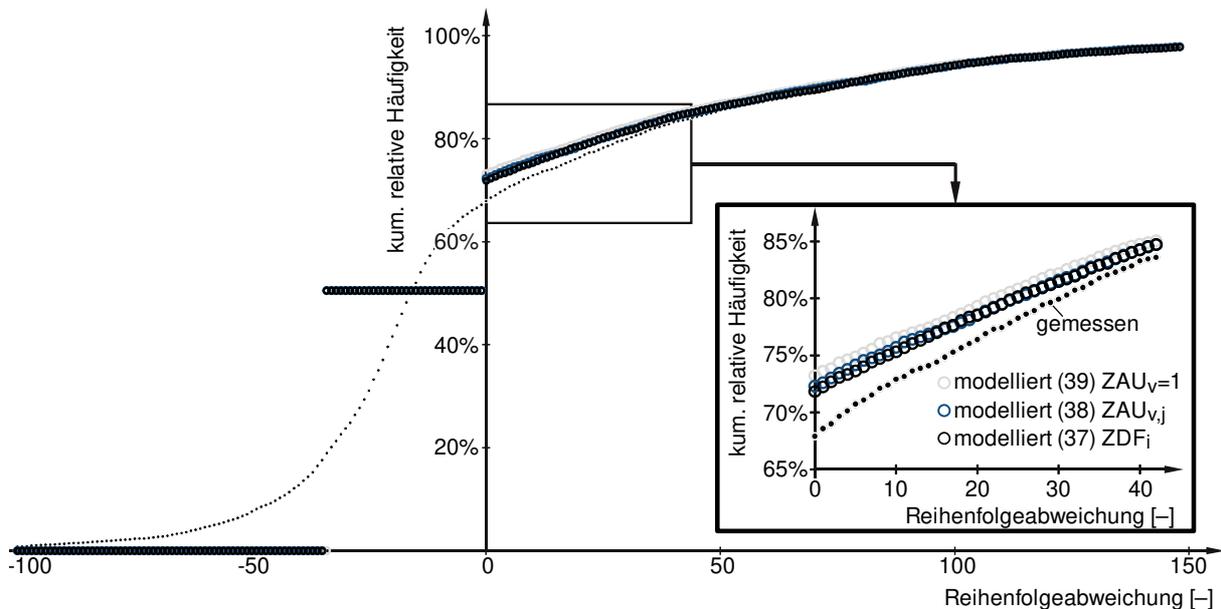
Da die Streudiagramme für die beiden Modellierungen mit dem Variationskoeffizienten der Auftragszeit (Gleichungen (38) und (39)) sehr ähnlich zu dem Streudiagramm in Bild 42 aussehen und ebenso Korrelationskoeffizienten von 0,93 aufweisen, wird auf ihre Darstellung an dieser Stelle verzichtet.



13686

**Bild 42: Vergleich der gemessenen und der mit individuellen Durchführungszeiten modellierten Reihenfolgeabweichung (Gleichung (37), Versuchs-ID 13)**

Bild 43 zeigt für den gleichen Versuch die Verteilung der kumulierten Reihenfolgeabweichung für alle drei Gleichungen und die tatsächlich gemessene Reihenfolgeabweichung.



Gleichung 37: Modellierung mit individuellen Durchführungszeiten (ZDF<sub>i</sub>)  
 Gleichung 38: Modellierung mit individuellen Variationskoeffizienten der Auftragszeit (ZAU<sub>v,j</sub>)  
 Gleichung 39: Modellierung mit konstantem Variationskoeffizienten der Auftragszeit (ZAU<sub>v</sub>=1)

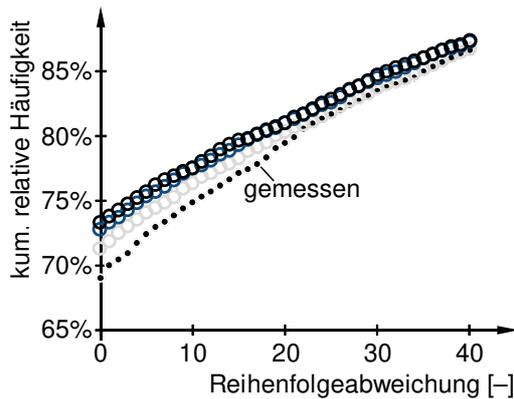
13687

**Bild 43: Verteilungen der gemessenen und modellierten kumulierten Reihenfolgeabweichung (Fertigungsbereiche, Versuchs-ID 13)**

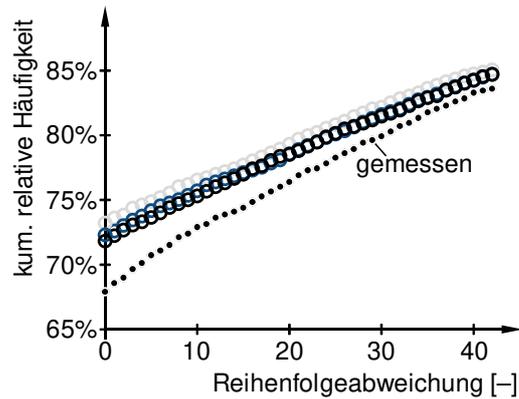
Alle drei Gleichungen weichen für diesen Versuch kaum voneinander ab und können die gemessene Verteilung nahezu gleich gut abbilden. Für die negative Reihenfolgeabweichung liegt erwartungsgemäß wie auch bei der Modellierung für ein Arbeitssystem eine schlechte Übereinstimmung vor. Ab einer Reihenfolgeabweichung von 50 Aufträgen ist die Modellierung sehr genau. In diesem Versuch tritt lediglich ein mittlerer absoluter Fehler von 1 Prozent für den nicht negativen Bereich auf. Der maximale Fehler für die Gleichungen (37) und (38) liegt bei 3,9 Prozent und für die Gleichung (39) bei 5,3 Prozent. Für diesen Versuch tritt zudem eine systematische Unterschätzung der Reihenfolgeabweichung auf, was einer Überschätzung des Potenzials Zugangsreihenfolgeabweichungen auszugleichen entspricht. Die systematische Überschätzung tritt dadurch auf, dass bei hohen Abweichungen im Zugang vermehrt Situationen auftreten, in denen zwei oder mehr Aufträge um eine maximale Beschleunigung konkurrieren. Diese Konkurrenz bildet das Modell nicht ab, da es davon ausgeht, dass sich jeder Auftrag maximal beschleunigen lässt.

Bild 44 zeigt Ausschnitte der kumulierten Verteilung der Reihenfolgeabweichung für drei unterschiedliche Variationskoeffizienten der Auftragszeit. Es wird deutlich, dass die stark vereinfachende Modellierung mit Gleichung (39) mit zunehmender Variation der Auftragszeit die gemessenen Werte erwartungsgemäß schlechter abbildet. Das Modell überschätzt das Potenzial, Reihenfolgeabweichungen zu dämpfen und ist somit als optimistisch einzuschätzen. Daher bietet die vereinfachende Gleichung, die einen konstanten Variationskoeffizienten von 1 annimmt, insbesondere für geringere Variationen der Auftragszeit (Bild 44a) eine höhere Güte die Reihenfolgeabweichung zu beschreiben. Die vereinfachende Modellierung korrigiert hierbei die systematische Überschätzung des Modells.

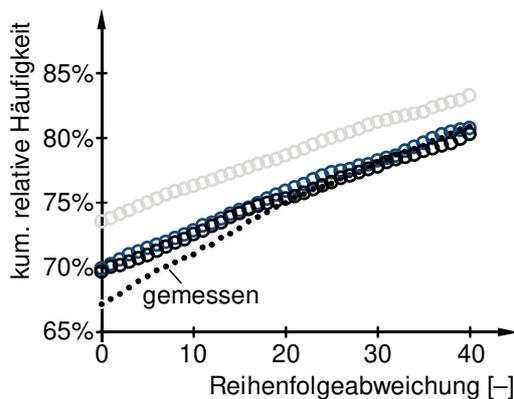
Darüber hinaus bestätigt Bild 44a–c, dass die Modelle mit den individuellen Durchführungszeiten der Aufträge (Gleichung (37)) und den individuellen Variationskoeffizienten der Auftragszeit (Gleichung (38)) nahezu identische Ergebnisse ermitteln.



a) Variationskoeffizient der Auftragszeit = 0,5  
(Versuchs-ID 97)



b) Variationskoeffizient der Auftragszeit = 1,2  
(Versuchs-ID 13)



c) Variationskoeffizient der Auftragszeit = 2,0  
(Versuchs-ID 55)

Legende:

- Modellierung mit individuellen Durchführungszeiten ( $ZDF_i$ ) (Gleichung (37))
- Modellierung mit individuellen Variationskoeffizienten der Auftragszeit ( $ZAU_{v,i}$ ) (Gleichung (38))
- Modellierung mit konstantem Variationskoeffizienten der Auftragszeit ( $ZAU_{v=1}$ ) (Gleichung (39))

13688

**Bild 44: Modellgüte bei unterschiedlichen Auftragszeitverteilungen (Fertigungsreich)**

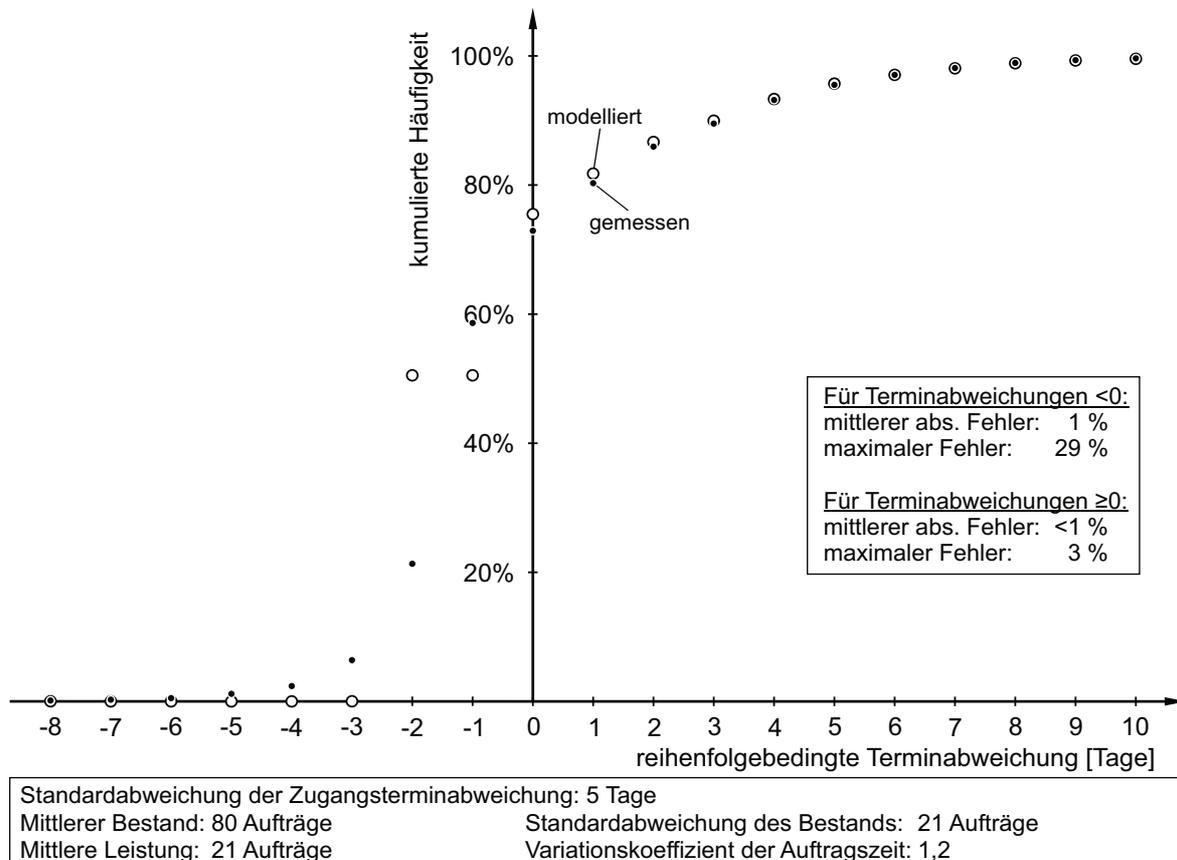
Der Vergleich der gemessenen und modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichung bestätigt, dass alle drei Modelle auch die Termineinhaltung und die Häufigkeit der positiven reihenfolgebedingten Terminabweichung mit einer ausreichend hohen Genauigkeit abbilden können.

Bild 45 zeigt die Verteilungen der gemessenen und modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichung für den gleichen Versuch wie in Bild 42 und Bild 43 (Variationskoeffizienten der Auftragszeit von 1,2). Die modellierten Werte sind mit Gleichung (37) (individuelle Durchführungszeit) ermittelt. Sowohl für die Gleichung (38) als auch Gleichung (39) sehen die Verteilungen nahezu identisch aus. Daher wird auch an dieser Stelle auf die Darstellung verzichtet.

Da das Modell die negativen Werte der reihenfolgebedingten Terminabweichung nur als Mittelwert abbildet, entstehen für die negativen Werte folglich mit zunehmender Streuung der Terminabweichung größere Fehler.

Die Güte des Modells steigt für die reihenfolgebedingte Terminabweichung im Vergleich zur Reihenfolgeabweichung aufgrund der vergleichsweise hohen Leistung in Anzahl Aufträgen

( $LA_m=21$ ). Dadurch relativiert sich der ungenaue Bereich zwischen 0 und 30 der Kennlinie der Reihenfolgeabweichung (vgl. Bild 43).

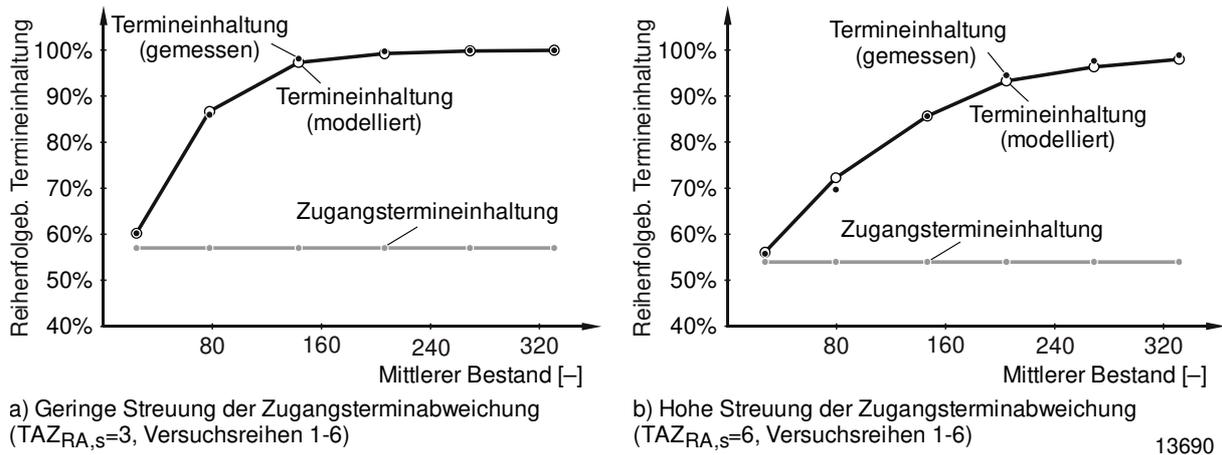


13689

**Bild 45: Vergleich der gemessenen und modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichung (Fertigungsbereich, Versuchs-ID 13)**

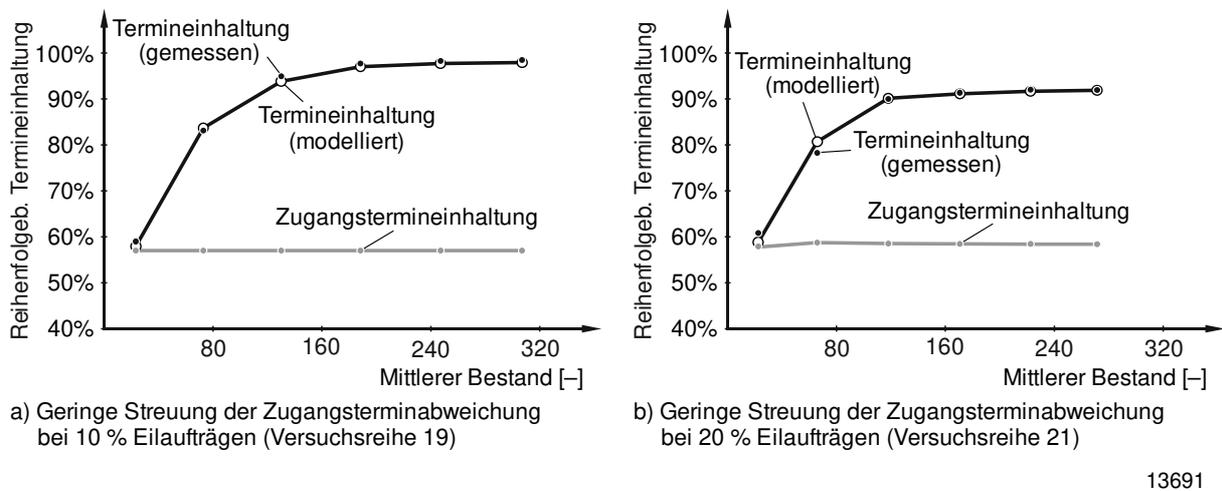
Die weiteren Simulationsexperimente bestätigen, dass alle drei Modellgleichungen in der Regel eine hohe Genauigkeit erreichen (vgl. Anhang).

Wie für ein Arbeitssystem ist es auch für eine Fertigung möglich, Zugangsterminabweichungen mit einer Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin auszugleichen. Auch in diesem Fall hängt das Potenzial maßgeblich vom Bestand der Fertigung ab. Die entwickelten Modelle können mit einer sehr hohen Genauigkeit die reihenfolgebedingte Termineinhaltung beschreiben. Bild 46 zeigt für zwei Versuchsreihen die Genauigkeit der entwickelten Modelle.



**Bild 46: Gemessene und modellierte reihenfolgebedingte Termineinhaltung über dem mittleren Bestand (Fertigungsbereich)**

Das Modell ist auch in der Lage, die reihenfolgebedingte Terminabweichung zu bestimmen, wenn Eilaufträge auftreten. Bild 47 zeigt die gemessene und modellierte Termineinhaltung bei Eilauftragsanteilen von 10 und 20 Prozent. Für beide untersuchten Eilauftragsanteile ist die maximale absolute Abweichung im niedrigen einstelligen Prozentbereich (1,1 und 2,5 Prozentpunkte).



**Bild 47: Gemessene und modellierte reihenfolgebedingte Termineinhaltung über dem mittleren Bestand bei Eilaufträgen (Fertigungsbereich)**

Die drei Gleichungen weisen für die reihenfolgebedingte Termineinhaltung eine hohe bis sehr hohe Genauigkeit auf, wenn die Schwankungen der Auftragszeit in einem für die Praxis üblichen Bereich auftreten ( $ZAU_{v,j}=0,5 - 2,0$ ) Daher ist es sinnvoll zu bestimmen, welche Gleichung den geringsten Umsetzungsaufwand in der Anwendung besitzt. Tabelle 11 zeigt eine qualitative Bewertung der Gleichungen. Der Erfassungsaufwand für Gleichung (37) ist der höchste, da die Auftragszeiten und die maximale Leistung für jedes Arbeitssystem vorliegen müssen, um die Durchführungszeiten zu berechnen. Darüber hinaus ist die mittlere Leistung der Fertigung Teil der Gleichung. Diese ist jedoch ebenso für die Gleichungen (38) und (39) notwendig.

Gleichung (38) benötigt zusätzlich die Variationskoeffizienten der Auftragszeit jedes Arbeitssystems sowie die mittlere Leistung der Arbeitssysteme. Gleichung (39) hat den geringsten Erfassungsaufwand, da sie zusätzlich zu der mittleren Leistung der Fertigung lediglich die mittlere Leistung der Arbeitssysteme benötigt. Bei stark schwankenden Auftragszeiten erzielt sie jedoch wie beschrieben deutlich schlechtere Ergebnisse. Für geringe Schwankungen der Auftragszeiten wiederum erzielt die Gleichung sogar bessere Ergebnisse – die vereinfachende Modellierung korrigiert hierbei die systematische Überschätzung des Modells. Für die meisten Anwendungen ist Gleichung (38) empfehlenswert, da sie qualitativ bewertet das beste Aufwand-Nutzen-Verhältnis besitzt.

**Tabelle 11: Qualitative Bewertung der Modellgleichungen**

Gleichung für $\Delta RgA$	Anzahl Variablen	Erfassungsaufwand	Fehler bei hohem $ZAU_v$
(37) $(\sum_{j=1}^{AnzAVG} \frac{ZDF_{mg,j}}{2} + ZDF_{i,j}) \cdot LA_{FE,m}$	3	hoch	gering
(38) $\sum_{j=1}^{AnzAVG} \frac{LA_{m,FE}}{LA_{m,j}} \cdot (0,5 \cdot ZAU_{v,j}^2 + 1,5)$	3	mittel	gering
(39) $\sum_{j=1}^{AnzAVG} 2 \cdot \frac{LA_{FE,m}}{LA_{j,m}}$	2	gering	mittel – hoch

$ZAU_{v,j}$ : Variationskoeffizient der Auftragszeit [–]

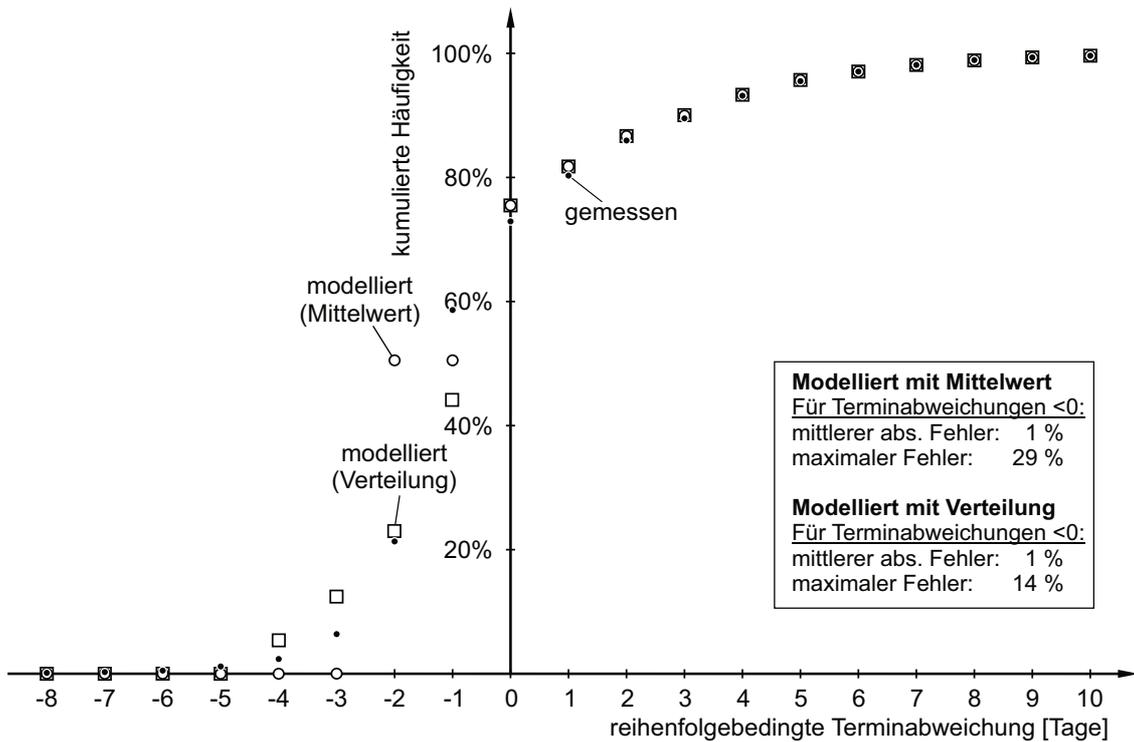
$ZDF$ : Durchführungszeit [Tage]

$LA$ : Leistung [–/Tag]

### 4.2.3 Reihenfolgebedingte Termintreue

Dieser Abschnitt evaluiert in Simulationsversuchen die Abschätzung der negativen Terminabweichung aus dem modellierten Mittelwert, wie sie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben ist. Hierzu wird die modellierte mit der simulierten Termintreue, der bereits im vorherigen Abschnitt beschriebenen Simulationsversuche verglichen.

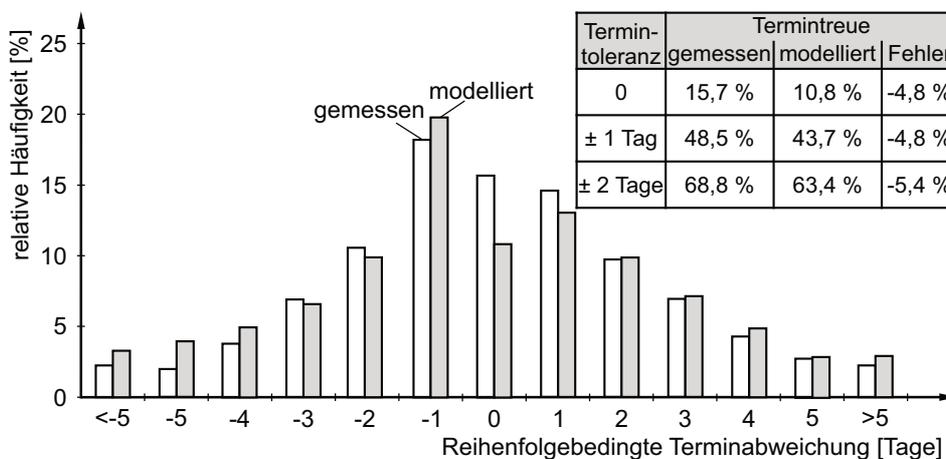
Bild 48 zeigt zum einen die Modellierung mit dem Mittelwert und zum anderen die Abschätzung der negativen reihenfolgebedingten Terminabweichung, wie sie in Abschnitt 3.4 beschrieben ist. Die dargestellte Verteilung gehört zu dem ausführlich beschriebenen Versuch aus Abschnitt 4.2.2 (Bild 45). Zwar trifft die Abschätzung die gemessene Verteilung nicht vollständig, jedoch verbessert sie die Prognose deutlich, indem sie den maximalen Fehler halbiert (von 29 auf 14 Prozentpunkte).



13692

**Bild 48: Kumulierte Verteilung der reihenfolgebedingten Terminabweichung mit und ohne Abschätzung der negativen Werte**

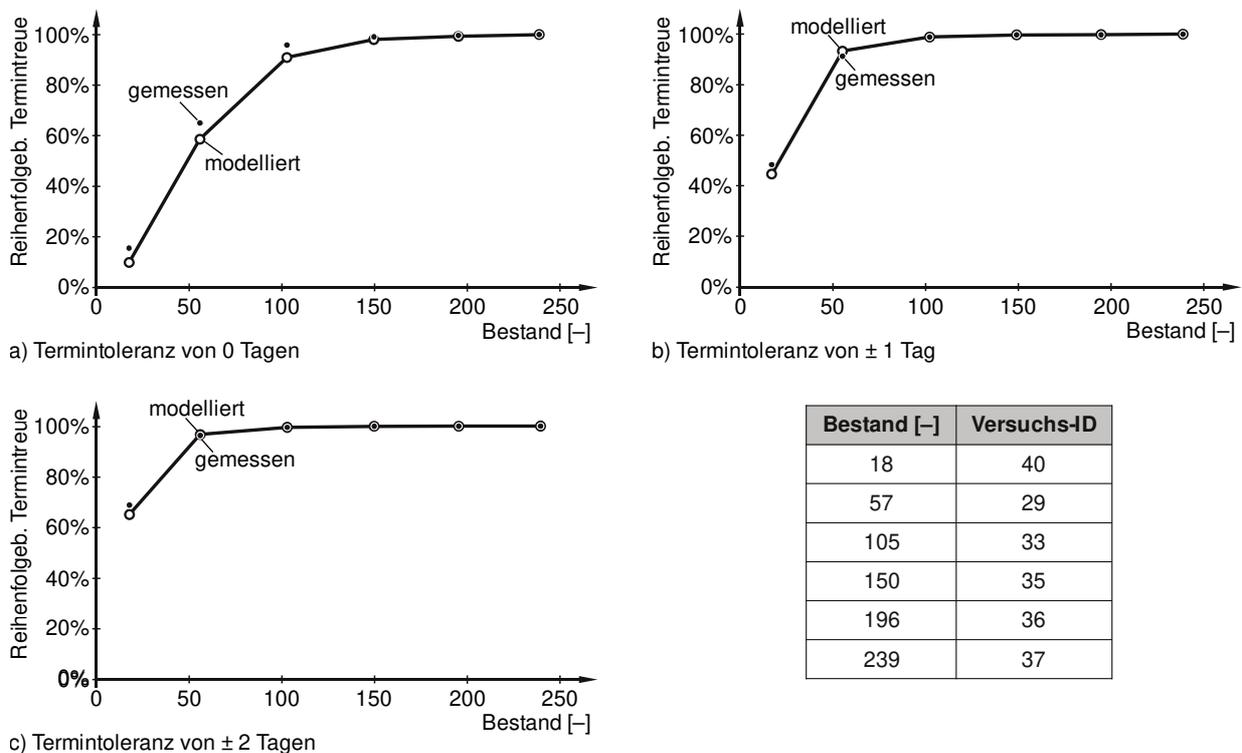
Weitere Versuche bestätigen die Verbesserung der Prognose. Bild 49 vergleicht für einen Versuch mit einem geringen mittleren Bestand von 18 Aufträgen (Reichweite = 0,25 Tage), einer moderaten Streuung der Zugangsterminabweichung ( $TAZ_{RA,s} = 3$  Tage) und einem Variationskoeffizienten der Auftragszeit von 0,5 die gemessene und modellierte Verteilung. Die Verteilungen stimmen mit einer hohen Genauigkeit überein. Zusätzlich wird der Termintreue-Fehler für drei unterschiedliche Termintoleranzen angezeigt. Die Abweichung liegt für den ausgewählten Versuch für alle drei Termintoleranzen bei ca. 5 Prozentpunkten.



13693

**Bild 49: Vergleich der modellierten und gemessenen Verteilung inkl. geschätzter negativer TAA<sub>RA</sub> (Versuchs-ID 40, S. 146)**

Bild 50 zeigt für die dazugehörige Versuchsreihe den Vergleich zwischen der gemessenen und modellierten Termintreue in Abhängigkeit des Bestands für drei unterschiedliche Termintoleranzen. In der gezeigten Versuchsreihe weisen viele der Messpunkte einen geringen Fehler auf. Jedoch treten in einigen der durchgeführten Versuche auch stärkere Abweichungen von über 10 Prozent auf. In über 50 ausgewerteten Versuchen liegen der mittlere absolute Fehler für die Prognose der Terminabweichungsverteilung bei 2 Prozentpunkten und der maximale Fehler bei 33 Prozentpunkten (mittlerer maximaler Fehler von 11 Prozentpunkten). Die Termintreue (Termintoleranz von  $\pm 1$  Tag) wird über die ausgewerteten Versuche mit einem mittleren absoluten Fehler von 4 Prozentpunkten prognostiziert. Dies zeigt zwar, dass die stark vereinfachte Schätzung nicht in allen Fällen eine hohe Genauigkeit aufweist, dennoch erhöht die Verteilung der Werte die Genauigkeit der Modellierung der negativen reihenfolgebedingten Terminabweichung im Vergleich zur Abschätzung mit einem Mittelwert.



13694

**Bild 50: Gemessene und modellierte reihenfolgebedingte Termintreue für drei unterschiedliche Termintoleranzen**

Zusammenfassend zeigt die Evaluierung, dass die Abschätzung zwar nicht in jedem Fall eine exakte Schätzung der reihenfolgebedingten Termintreue ermöglicht, jedoch eine Prognose der Verteilung mit einfachen Mitteln schnell ermöglicht und so eine Kopplung mit einer rückstandsbedingten Terminabweichungsverteilung zulässt.

### 4.3 Evaluierung des Einflusses des Rückstands im Zugang auf die rückstandsbedingte Terminabweichung

Die Evaluierung der rückstandsbedingten Terminabweichung erfolgt in drei Abschnitten. Abschnitt 4.3.1 evaluiert zunächst den beschriebenen Einfluss des Rückstands im Zugang auf den Rückstand im Abgang eines Arbeitssystems. Daraufhin zeigt Abschnitt 4.3.2, dass zum einen der Rückstand im Zugang gemäß der Gleichungen aus Abschnitt 3.3.2 über die Rückstände der Vorgänger eines Arbeitssystems modellierbar ist. Zum anderen zeigt der Abschnitt, dass der Rückstand einer Fertigung aus den Rückständen der Arbeitssysteme, die den letzten Arbeitsvorgang eines Auftrags bearbeiten, abbildbar ist (Gleichung (50)). Abschnitt 4.3.3 bestätigt abschließend die Hypothese, dass der Rückstand eines Arbeitssystems zu Reihenfolgeabweichungen im Zugang seiner Nachfolger führt (Abschnitt 3.3.3).

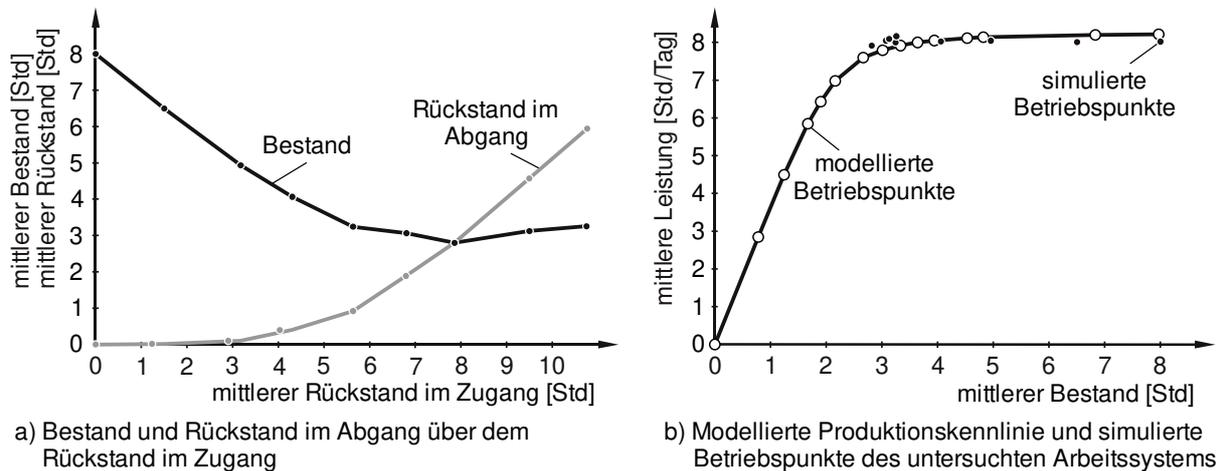
#### 4.3.1 Rückstandsbedingte Terminabweichung eines Arbeitssystems

Drei Simulationsreihen mit unterschiedlichen Auftragszeitverteilungen ( $ZAU_v \approx 0,4$ ,  $ZAU_v \approx 1$  und  $ZAU_v \approx 1,6$ ) evaluieren in diesem Abschnitt den Einfluss des Rückstands im Zugang auf die rückstandsbedingte Terminabweichung eines Arbeitssystems. Die Simulationsreihen bestehen hierbei aus insgesamt 30 Simulationsversuchen mit variierendem Rückstand im Zugang. Die folgenden Ausführungen beschreiben eine der durchgeführten Simulationsreihen ( $ZAU_v \approx 1$ ) im Detail. Die gesammelten Ergebnisse aller Simulationsreihen sind im Anhang zu finden.

Zunächst wurde für das zu untersuchende Arbeitssystem eine Produktionskennlinie erzeugt und ein Referenz-Betriebspunkt bestimmt. Die Auftragszeitverteilung des Arbeitssystems hat einen Mittelwert von 1,16 Stunden und eine Standardabweichung von 1,14 Stunden ( $ZAU_v \approx 1$ ). Das Arbeitssystem hat daraus folgend einen idealen Mindestbestand von 2,3 Stunden und ist im Ausgangszustand bei einem relativen Bestand von ca. 350 % positioniert (Mittlerer Bestand von 8 Stunden, siehe Tabelle 12).

Anschließend wurde der mittlere Rückstand im Zugang über mehrere Simulationsläufe variiert. Bild 51a zeigt den Zusammenhang zwischen dem mittleren Rückstand im Zugang und dem mittleren Bestand am Arbeitssystem sowie den dazugehörigen Verlauf des Rückstands im Abgang. Sämtliche Größen sind hierbei in Stunden aufgezeigt. Es wird deutlich, dass der mittlere Bestand mit zunehmendem Rückstand im Zugang abnimmt und sich einem Grenzwert nähert. In diesem Fall liegt der Grenzwert bei 3,3 Stunden und somit über dem berechneten idealen Mindestbestand (relativer Bestand = 140 %). Der mittlere Rückstand im Abgang hingegen nimmt mit zunehmendem Rückstand im Zugang zunächst nur geringfügig zu und steigt mit dem Erreichen des Grenz-Bestands nahezu linear mit dem mittleren Rückstand im Zugang an.

Bild 51b zeigt die dazugehörige modellierte Produktionskennlinie und die aus den Versuchen resultierenden Betriebspunkte des Arbeitssystems. Die Grafik verdeutlicht zusätzlich, dass der Rückstand im Zugang zu einer Annäherung an den idealen Mindestbestand führt. Dies wird durch die weiteren Simulationsreihen mit anderen Auftragszeitverteilungen ( $ZAU_v \approx 0,4$  und  $ZAU_v \approx 1,6$ ) bestätigt (vgl. Ergebnisse im Anhang).



13695

**Bild 51: Auswirkungen des Rückstands im Zugang an einem Arbeitssystem**

Tabelle 12 listet die zu Bild 51a gehörenden Werte auf und verifiziert in der fünften Spalte Gleichung (41) aus Abschnitt 3.3.1. Wie erwartet, lässt sich der mittlere Ist-Bestand (Spalte 4) durch den Plan-Bestand, den Rückstand im Zugang (Spalte 2) und Rückstand im Abgang (Spalte 3) ermitteln.

**Tabelle 12: Versuchsergebnisse zu Bild 51a (Plan-Bestand 8 Stunden)**

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
ID	Rückstand im Zugang [Std]	Rückstand im Abgang [Std]	Bestand [Std]	$B = B_{\text{Plan}} - RS_{\text{ZU}} + RS_{\text{AB}}$
10	0,0	0,0	8,0	8,0
11	1,5	0,0	6,5	6,5
12	3,2	0,1	4,9	4,9
13	4,3	0,4	4,1	4,1
14	5,6	0,9	3,3	3,3
15	6,8	1,9	3,1	3,1
16	7,8	2,8	2,8	2,8
17	9,5	4,6	3,1	3,1
18	10,8	6,0	3,3	3,3

B: Bestand

RS: Rückstand

ZU: Zugang

AB: Abgang

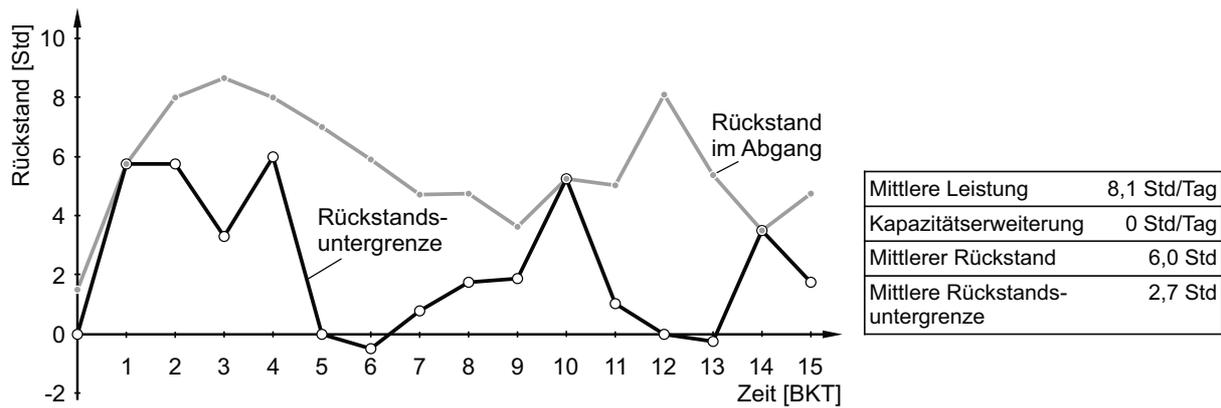
Fest steht, dass der Rückstand im Zugang zu einem Rückstand im Abgang führt, sobald Auslastungsverluste entstehen. Eine aktive Kapazitätssteuerung kann die entstehenden Rückstände im Abgang auch bei sehr hohen Rückständen im Zugang zumindest zum Teil ausgleichen. Wie viel

Potenzial zur Verfügung steht, verdeutlicht die in Abschnitt 3.3.1 beschriebene Untergrenze des Rückstands im Abgang.

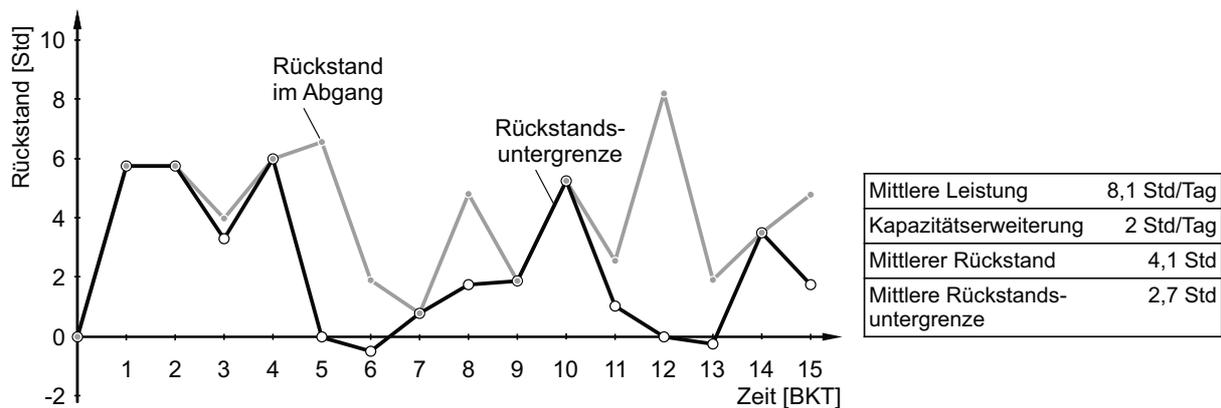
Bild 52a) zeigt für Versuchs-ID 18 aus Tabelle 12 den gemessenen Rückstand und die dazugehörige berechnete Untergrenze des Rückstands für einen ausgewählten Zeitabschnitt. Der Versuch lief ohne aktive Kapazitätssteuerung. Es ist zu erkennen, dass zum einen die Untergrenze des Rückstands überwiegend im positiven Bereich liegt, d. h. ein Rückstand im Abgang war für das Arbeitssystem unvermeidbar. Zum anderen liegt der gemessene Rückstand größtenteils deutlich über der berechneten Untergrenze. Dies ist nicht verwunderlich, da keine zusätzliche Kapazität zur Verfügung stand, um Rückstände auszugleichen. Für den gesamten Simulationszeitraum lag ein mittlerer Rückstand im Abgang von 6 Stunden vor, während die Untergrenze einen möglichen mittleren Rückstand von 2,7 Stunden anzeigt.

Bild 52b) zeigt den Verlauf des Rückstands und die Rückstandsuntergrenze für denselben Versuch und denselben Zeitraum jedoch mit einer aktiven Kapazitätssteuerung. Die in dem Versuch verwendete Kapazitätssteuerung war hierbei mit einer niedrigen Kapazitätsflexibilität (bis zu 2 Stunden zusätzlich pro Tag) eingestellt. Es wird deutlich, dass es dem Arbeitssystem mit der gewählten Einstellung gelingt, den Rückstand im Zugang teilweise zu dämpfen. Im Vergleich zu dem Simulationsversuch ohne Kapazitätssteuerung erreicht das Arbeitssystem einen mittleren Rückstand von 4,1 Stunden und liegt damit rund 1,4 Stunden über der Untergrenze des Rückstands.

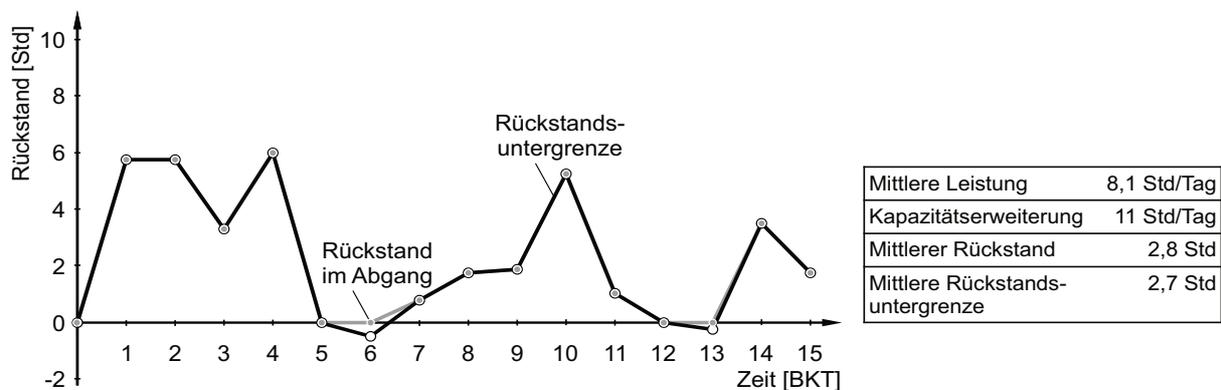
Bild 52c) zeigt im Vergleich hierzu einen Versuch mit einer sehr hohen Kapazitätsflexibilität (bis zu 11 Stunden zusätzlich pro Tag). Die Kapazitätssteuerung regelt die auftretenden Rückstände im Zugang soweit wie möglich aus. Daher entspricht der gemessene Rückstandsverlauf in dem betrachteten Zeitraum entweder null oder der berechneten Untergrenze des Rückstands. Der mittlere Rückstand liegt in diesem Fall bei 2,8 Stunden und das Arbeitssystem schöpft nahezu das gesamte Potenzial des Bestands aus, um die Rückstände im Zugang zu dämpfen.



a) Rückstand im Abgang und Rückstandsuntergrenze ohne Kapazitätssteuerung



b) Rückstand im Abgang und Rückstandsuntergrenze mit aktiver Kapazitätssteuerung (niedrige Kapazitätsflexibilität)



c) Rückstand im Abgang und Rückstandsuntergrenze mit aktiver Kapazitätssteuerung (hohe Kapazitätsflexibilität)

13696

### Bild 52: Untergrenze des Rückstands und gemessener Rückstand bei unterschiedlicher Kapazitätsflexibilität

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Rückstand im Zugang eines Arbeitssystems den Bestand zum idealen Mindestbestand bewegt und Rückstände im Abgang verursachen kann, die aufgrund von Auslastungsverlusten auftreten. Des Weiteren ist die in Abschnitt 3.3.1 gezeigte Gleichung zur Berechnung der Untergrenze des Rückstands im Abgang nutzbar, um den minimalen Einfluss eines Rückstands im Zugang auf den Rückstand im Abgang eines Arbeitssystems

abzuschätzen. Sie eignet sich darüber hinaus, um zu beurteilen, wie gut eine vorhandene Kapazitätssteuerung den Bestandspuffer zum Dämpfen von Zugangsrückständen nutzt.

### 4.3.2 Rückstandsbedingte Terminabweichung eines Fertigungsbereichs

Dieser Abschnitt untersucht zwei Hypothesen zum Einfluss des Rückstands im Zugang auf die rückstandsbedingte Terminabweichung (bzw. den Rückstand) eines Fertigungsbereichs:

1. Der Einfluss des Rückstands im Zugang eines Fertigungsbereichs auf seinen Rückstand im Abgang nimmt mit zunehmendem Auftragsdurchlauf bzw. Pufferbestand innerhalb des Fertigungsbereichs ab.
2. Der Rückstand im Zugang eines Arbeitssystems kann durch die Rückstände seiner Vorgänger gewichtet mit dem Materialflusskoeffizienten ermittelt werden.

Für die Untersuchung beider Hypothesen wurde das in Abschnitt 4.1 beschriebene Simulationsmodell verwendet. Der Fertigungsbereich im Simulationsmodell weist einen komplexen Materialfluss mit 10 Arbeitssystemen auf und die Aufträge durchlaufen 2–5 Arbeitsvorgänge. Der Planbestand des Fertigungsbereichs liegt bei 70 Aufträgen und die Plan-Leistung beträgt im Mittel 20 Aufträge pro Tag, sodass eine mittlere Plan-Durchlaufzeit von 3,5 Tagen resultiert.

Bild 53 zeigt den Verlauf des Rückstands für alle Arbeitssysteme bei zwei unterschiedlichen Rückstandsverteilungen im Zugang des Fertigungsbereichs. Die vierte Spalte zeigt den Verlauf bei einem Rückstand im Zugang zum Fertigungsbereich von 20 Aufträgen. Über den Auftragsdurchlauf wird dieser Rückstand vollständig durch die Arbeitssysteme aufgefangen. Die Auftragsfreigabe versorgt die Arbeitssysteme 1 – 5 direkt. Daher verteilt sich der Rückstand im Zugang des Fertigungsbereichs auf diese. Den ersten Arbeitssystemen im Auftragsdurchlauf gelingt es, den Großteil des Rückstands zu dämpfen.

Spalte 5 zeigt analog die Auswirkungen bei einem Rückstand im Zugang des Fertigungsbereichs von 60 Aufträgen. Auch in diesem Fall verteilt sich der Rückstand im Zugang auf die Arbeitssysteme 1–5, jedoch gelingt es den Arbeitssystemen nicht, den Rückstand vollständig zu dämpfen. Daher treten auch nennenswerte Rückstände im Zugang der übrigen Arbeitssysteme auf. Hierbei ist insbesondere das Arbeitssystem 7 hervorzuheben, das für einen Großteil der Aufträge den zweiten Arbeitsvorgang bearbeitet und daher vergleichsweise starke Auswirkungen durch den Rückstand im Zugang des Fertigungsbereichs erfährt. Dem Fertigungsbereich gelingt es dennoch, den Rückstand im Zugang – ohne zusätzliche Kapazitätssteuerung – von 60 Aufträgen auf 6,8 Aufträge durch die Pufferwirkung des Bestands zu dämpfen.

AS	Anteil als erstes Arbeitssystem	Anteil als letztes Arbeitssystem	Rückstand im Zugang und Abgang (RSA <sub>ZU,FE</sub> = 20 Aufträge)		Rückstand im Zugang und Abgang (RSA <sub>ZU,FE</sub> = 60 Aufträge)	
			RSA <sub>ZU</sub>	RSA <sub>AB</sub>	RSA <sub>ZU</sub>	RSA <sub>AB</sub>
1	24 %	0 %	4,6		14,2	
				0,2		9,9
2	27 %	0 %	5,0		15,6	
				0,3		11,0
3	38 %	0 %	7,0		21,9	
				0,1		15,1
4	9 %	10 %	1,8		11,1	
				0,1		6,0
5	2 %	9 %	1,0		9,1	
				0,0		5,3
6	0 %	15 %	rückstandsfrei		13,6	
					5,5	
7	0 %	12 %	0,4		21,1	
				0,0		12,7
8	0 %	0 %	rückstandsfrei		5,7	
					1,8	
9	0 %	0 %	rückstandsfrei		5,2	
					2,3	
10	0 %	54 %	rückstandsfrei		3,5	
					0,1	

Fertigung		RSA <sub>ZU</sub>	RSA <sub>AB</sub>	RSA <sub>ZU</sub>	RSA <sub>AB</sub>
		20		60	
			0,0		6,8

RSA Rückstand in Anzahl Aufträgen [-]      ZU Zugang      AB Abgang      FE Fertigung

13697

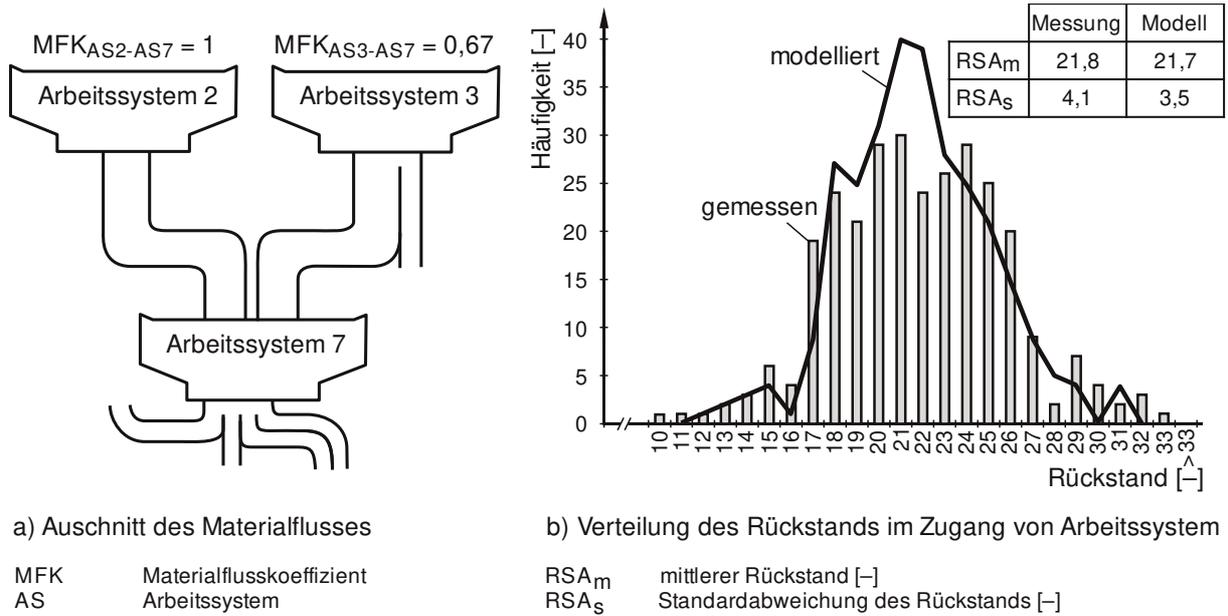
**Bild 53: Verlauf des Rückstands bei unterschiedlichen Rückständen im Zugang des Fertigungsbereichs**

Beide vorgestellten Versuche zeigen, dass Fertigungsbereiche über den Auftragsdurchlauf Rückstände im Zugang reduzieren. Wie auch bei einem Arbeitssystem (vgl. Tabelle 12) senkt der Rückstand im Zugang den Bestand des Fertigungsbereichs.

Für die Evaluierung von Gleichung (50) wurde in den durchgeführten Versuchen für einzelne Arbeitssysteme der Rückstand im Zugang durch die Rückstände im Abgang der Vorgänger berechnet und mit den gemessenen Werten verglichen. Zusätzlich wurde der Rückstand eines Fertigungsbereichs über die Rückstände der Arbeitssysteme berechnet, die die letzten Arbeitsvorgänge der Aufträge bearbeiten.

Bild 54 zeigt beispielhaft für ein Arbeitssystem die Verteilung des berechneten und des gemessenen Rückstands. In dem Beispiel beliefern zwei Arbeitssysteme (2 und 3) das untersuchte Arbeitssystem (7) mit unterschiedlichen Anteilen (Bild 54a). Von Arbeitssystem 2 gehen alle abgehenden Aufträge und von Arbeitssystem 3 zwei Drittel der abgehenden Aufträge an Arbeitssystem 7 zu. Bild 54b zeigt die dazugehörige gemessene und berechnete Verteilung des Rückstands im Zugang von Arbeitssystem 7.

Das Beispiel veranschaulicht, dass die Berechnung des Rückstands im Zugang über die Rückstände im Abgang der Vorgänger möglich ist.



a) Ausschnitt des Materialflusses

b) Verteilung des Rückstands im Zugang von Arbeitssystem

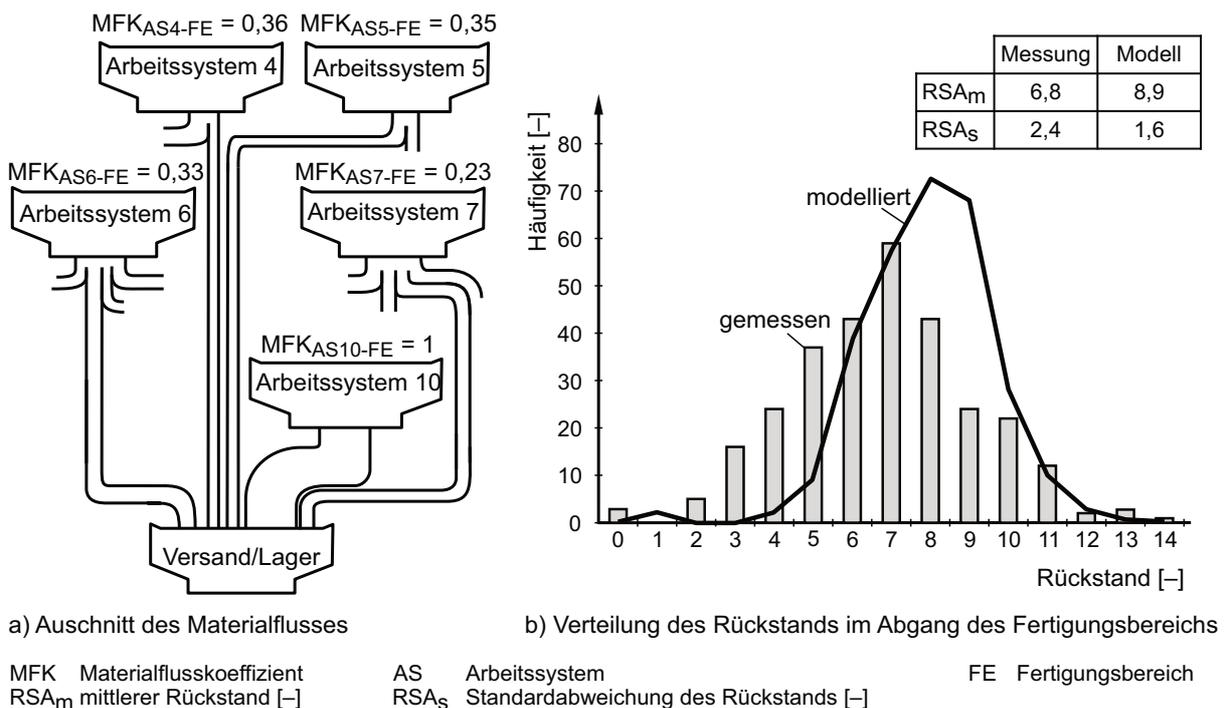
MFK Materialflusskoeffizient  
AS Arbeitssystem

RSA<sub>m</sub> mittlerer Rückstand [-]  
RSA<sub>s</sub> Standardabweichung des Rückstands [-]

13698

**Bild 54: Materialfluss und Rückstandsverteilung an Arbeitssystem 7**

Bild 55 zeigt die Verteilung des berechneten und des gemessenen Rückstands eines Fertigungsbereichs. Fünf Arbeitssysteme tragen direkt zu dem Abgang des Fertigungsbereichs bei (Bild 55a). Die Materialflusskoeffizienten geben an, welcher Anteil des Abgangs des Arbeitssystems zum Abgang des Fertigungsbereichs beiträgt. Bild 55b stellt die dazugehörige gemessene und berechnete Verteilung des Rückstands im Abgang des Fertigungsbereichs dar. Die berechnete Verteilung ermittelt sich durch die Rückstände der einzelnen Arbeitssysteme und deren Gewichtung mit den dazugehörigen Materialflusskoeffizienten (Gleichung (50)).



a) Ausschnitt des Materialflusses

b) Verteilung des Rückstands im Abgang des Fertigungsbereichs

MFK Materialflusskoeffizient  
RSA<sub>m</sub> mittlerer Rückstand [-]

AS Arbeitssystem  
RSA<sub>s</sub> Standardabweichung des Rückstands [-]

FE Fertigungsbereich

13699

**Bild 55: Ausschnitt des Materialflusses und Rückstandsverteilung der Fertigung**

Das Beispiel zeigt analog zu dem vorherigen, dass eine Schätzung des Rückstands im Abgang eines Fertigungsbereichs über die Rückstände im Abgang der relevanten Arbeitssysteme möglich ist. Die modellierte Verteilung weicht in diesem Fall jedoch stärker von der gemessenen Verteilung ab und überschätzt hierbei den Einfluss des Rückstands der Arbeitssysteme auf den Rückstand des Fertigungsbereichs.

### 4.3.3 Simulationsexperimente zum Einfluss des Rückstands auf die Reihenfolgeabweichung im Zugang nachfolgender Arbeitssysteme

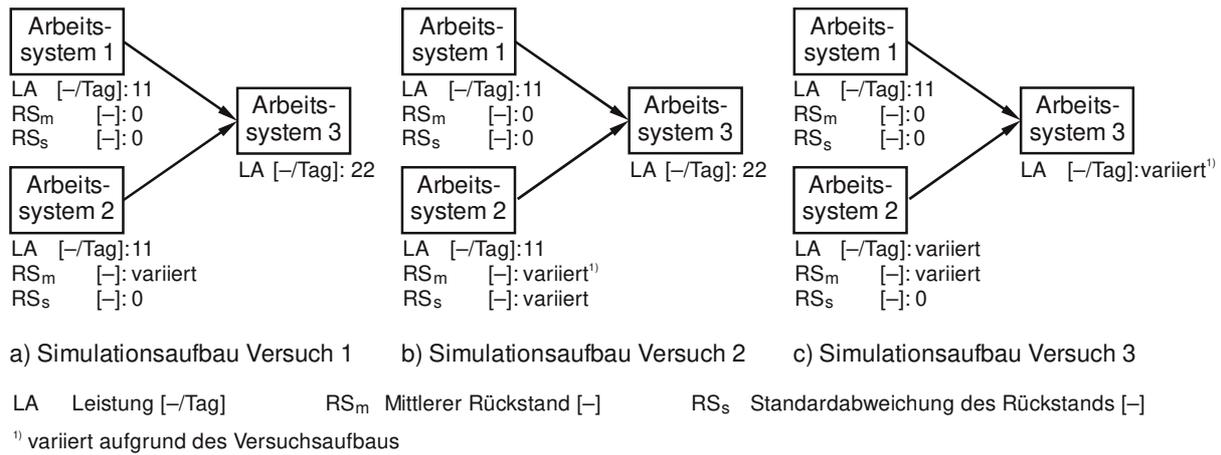
Die folgenden Ergebnisse aus Simulationsversuchen zeigen, dass Rückstände einzelner Arbeitssysteme zu Zugangsreihenfolgeabweichungen an nachfolgenden Arbeitssystemen führen. Des Weiteren bestätigen die Ergebnisse die Hypothese aus Abschnitt 3.3.3, dass die Rückstandsverteilung der Vorgänger und ihr Anteil am Zugang zum betrachteten Arbeitssystem die rückstandsbedingte Reihenfolgeabweichung im Zugang dieses Arbeitssystems maßgeblich beeinflussen.

Der Anteil am Zugang lässt sich in dem Simulationsmodell mit dem Materialflusskoeffizienten und der Leistung der Vorgängerarbeitssysteme variieren und ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$\text{Anteil am Zugang zum AS}_j = \frac{\text{MFK}_{i,j} \cdot \text{LA}_i}{\sum_i^n \text{MFK}_{i,j} \cdot \text{LA}_i} \quad (51)$$

AS <sub>j</sub>	Arbeitssystem j
MFK <sub>i,j</sub>	Materialflusskoeffizient zwischen Arbeitssystem i und j [-]
LA <sub>i</sub>	Leistung an Arbeitssystem j [-/Tag]

Die durchgeführten Versuche beschränken sich auf zwei zuliefernde Arbeitssysteme, die einen Nachfolger versorgen. Die variierten Einflussgrößen sind die Rückstandsverteilung eines Vorgängers und der Anteil am Zugang des Nachfolgers durch die Vorgänger. Bild 56a–c veranschaulicht den Versuchsaufbau für die drei im Folgenden beschriebenen Versuchsreihen. Der oben beschriebene Anteil am Zugang wird hierbei über die Anpassung der Leistung in Anzahl Aufträgen von Arbeitssystem 2 variiert (vgl. Bild 56c).



13700

**Bild 56: Simulationsaufbau für die Ermittlung der rückstandsbedingten Reihenfolgeabweichung im Zugang**

Tabelle 13 zeigt die variierten Parameter und die untersuchten Ausprägungen. Die gemessene Größe in jedem Versuch ist die Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang des untersuchten Arbeitssystems.

**Tabelle 13: Versuchsparameter zur Untersuchung der rückstandsbedingten Reihenfolgeabweichung**

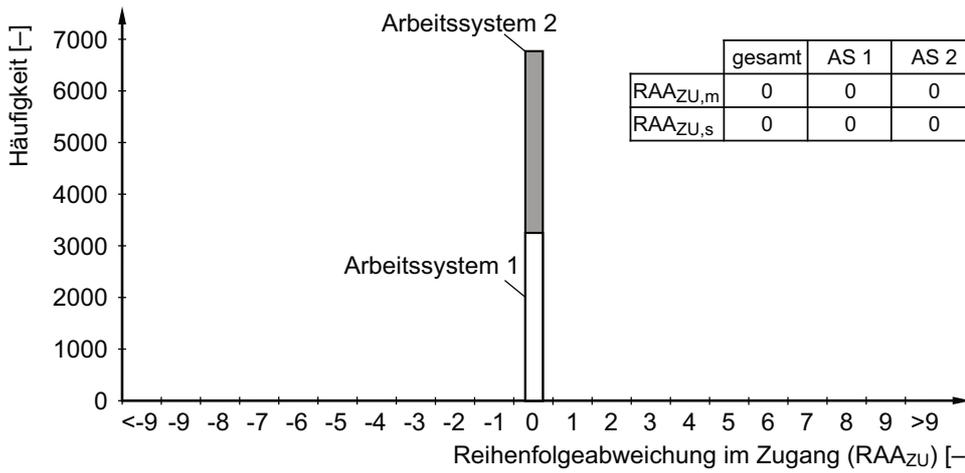
Parameter	Arbeitssystem 1	Arbeitssystem 2
Mittlerer Rückstand [-]	0	0 – 9
Standardabweichung des Rückstands [-]	0	0 – 6
Anteil am Zugang zum untersuchten Arbeitssystem	35 % / 50 % / 65 %	65 % / 50 % / 35 %

Im Folgenden sind für jede Versuchsreihe die Verteilungen der resultierenden Zugangsreihenfolgeabweichung des untersuchten Arbeitssystems dargestellt.

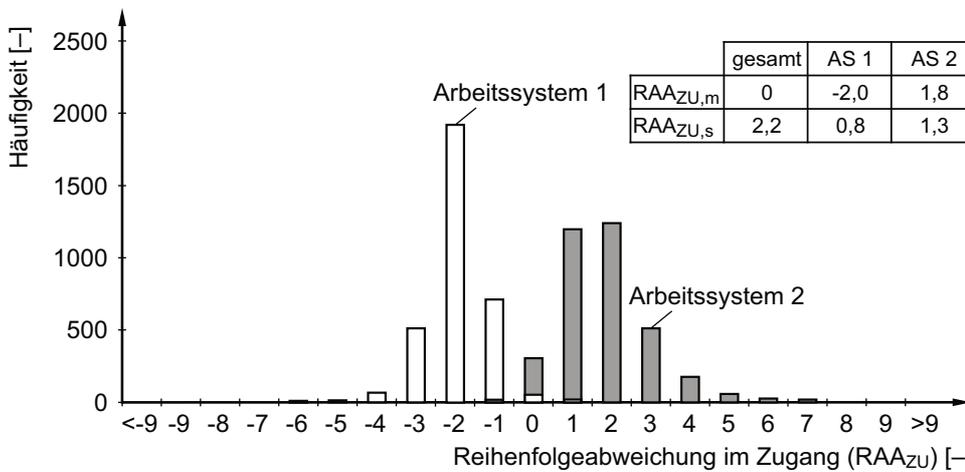
**Versuchsreihe 1: Variation des mittleren Rückstands an Arbeitssystem 2**

Bild 57 zeigt, wie sich die Reihenfolgeabweichung im Zugang an Arbeitssystem 3 mit zunehmendem mittlerem Rückstand an Arbeitssystem 2 verändert. Die beiden Vorgänger machen hierbei jeweils nahezu 50 % am Zugang des untersuchten Arbeitssystems aus. Arbeitssystem 1 hat einen Anteil von 48 % und Arbeitssystem 2 einen Anteil von 52 % am Zugang von Arbeitssystem 3.

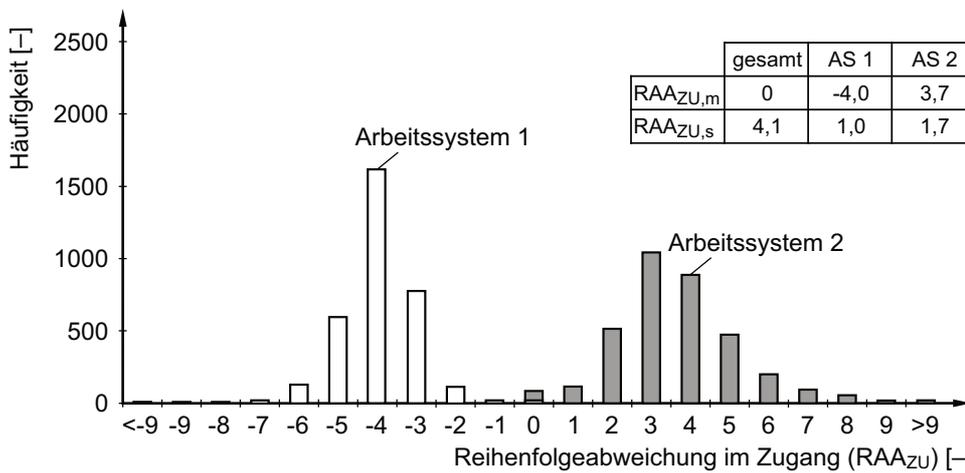
Mit steigendem Rückstand an Arbeitssystem 2 stellt sich eine bimodale Verteilung ein, deren lokale Maxima um den Rückstandswert von Arbeitssystem 2 liegen. Dies deckt sich mit der beschriebenen Annahme aus Abschnitt 3.3.3.



a) Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang (mittlerer Rückstand eines Vorgängers = 0)



b) Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang (mittlerer Rückstand eines Vorgängers = 2)



c) Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang (mittlerer Rückstand eines Vorgängers = 4)

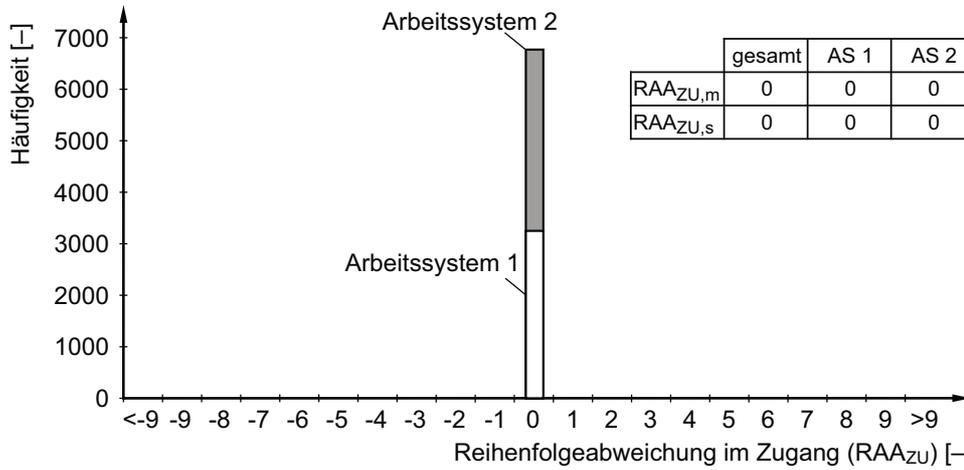
13701

**Bild 57: Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang eines Arbeitssystems bei unterschiedlichen Werten des mittleren Rückstands eines Vorgängers**

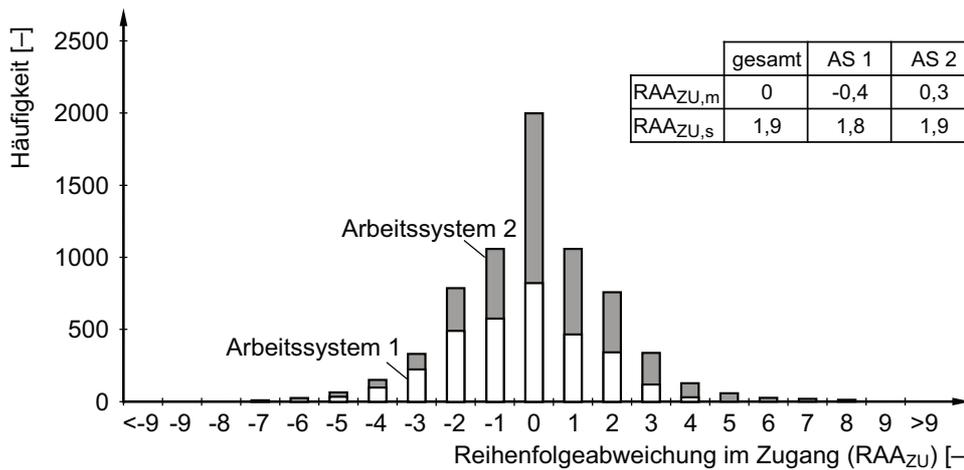
Das Bild stellt darüber hinaus jeweils dar, welche Reihenfolgeabweichung im Zugang die Aufträge von welchem Vorgänger haben. Dies verdeutlicht, wodurch sich die lokalen Maxima ausbilden.

**Versuchsreihe 2: Variation der Standardabweichung des Rückstands an Arbeitssystem 2**

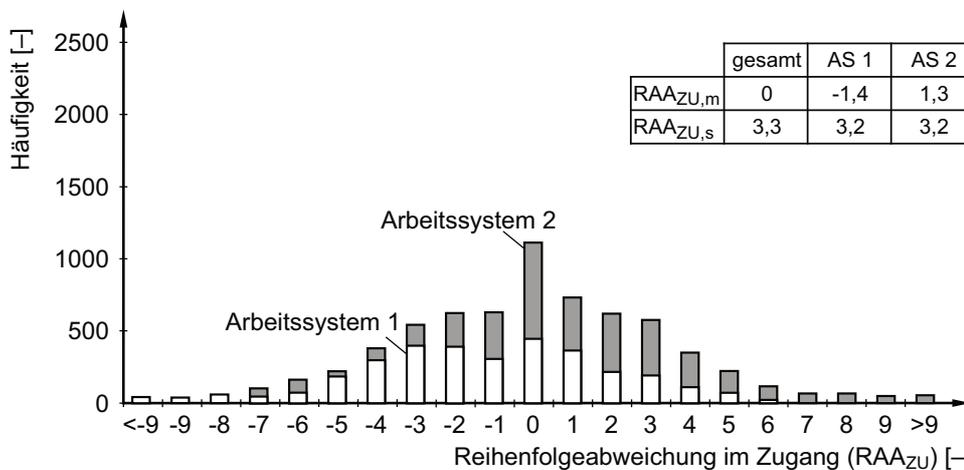
Bild 58 zeigt die Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang von Arbeitssystem 3, die durch die Streuung des Rückstands an einem Vorgänger entsteht. Im Mittel arbeitet der Vorgänger hierbei für die dargestellten Versuche nahezu rückstandsfrei.



a) Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang (Rückstandsstreuung eines Vorgängers = 0)



b) Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang (Rückstandsstreuung eines Vorgängers = 2)



c) Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang (Rückstandsstreuung eines Vorgängers = 4)

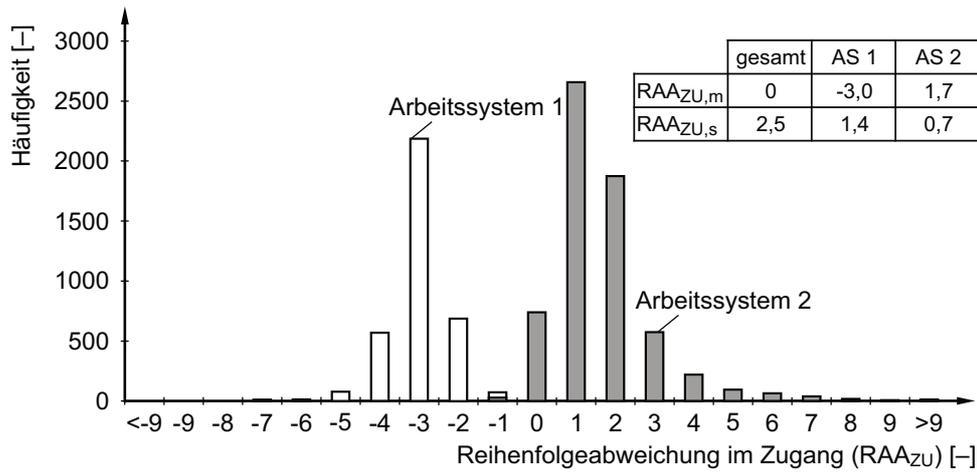
**Bild 58: Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang eines Arbeitssystems bei unterschiedlich streuendem Rückstand eines Vorgängers**

Mit zunehmender Streuung des Rückstands steigt erwartungsgemäß auch die Streuung der Reihenfolgeabweichung im Zugang des untersuchten Arbeitssystems. Hierbei erreicht die Streuung der Reihenfolgeabweichung im Zugang ungefähr die Streuung des Rückstands des Vorgängers.

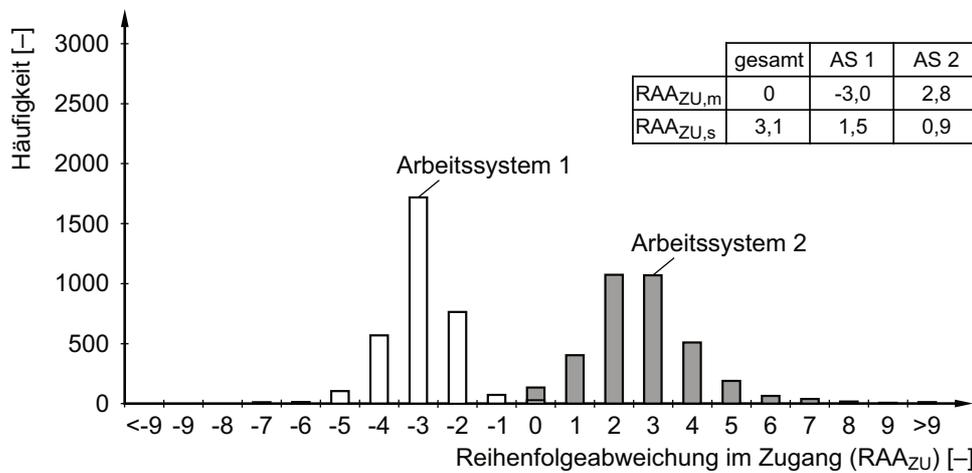
### **Versuchsreihe 3: Variation des Anteils am Zugang**

Der Anteil am Zugang eines Arbeitssystems ist durch die Leistung der Vorgänger und den Materialflusskoeffizienten zwischen dem Vorgänger und dem betrachteten Arbeitssystem bestimmt. Die Leistung in Anzahl Aufträgen erhöht sich entweder durch mehr Kapazität (z. B. zwei Schichten statt einer) oder eine geringere mittlere Auftragszeit der bearbeiteten Aufträge – anders ausgedrückt: Eine geringere mittlere Auftragszeit ermöglicht in einer festgelegten Zeit eine höhere Leistung in Anzahl Aufträgen. In den durchgeführten Versuchen wurde der Anteil am Zugang über die Auftragszeit bzw. Leistung in Anzahl Aufträgen variiert.

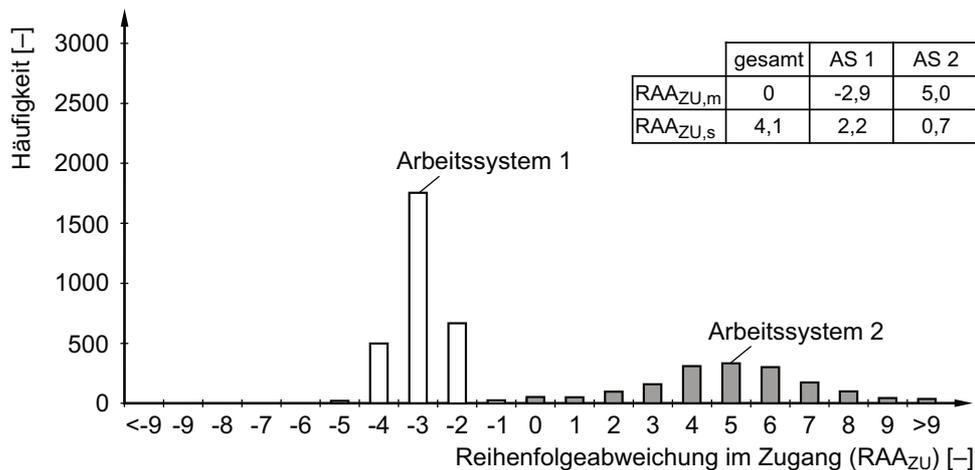
Bild 59 zeigt die Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang am untersuchten Arbeitssystem. In dieser Versuchsreihe variiert der Anteil am Zugang durch das Vorgängerarbeitssystem mit dem Rückstand. Das Arbeitssystem 2 weist in dem dargestellten Versuch einen mittleren Rückstand von 3 Aufträgen auf. Mit abnehmendem Anteil am Zugang wirkt der Rückstand von Arbeitssystem 2 stärker auf die Streuung der Reihenfolgeabweichung im Zugang von Arbeitssystem 3.



a) Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang (Anteil am Zugang durch Arbeitssystem 2: 65 %)



b) Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang (Anteil am Zugang durch Arbeitssystem 2: 50%)



c) Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang (Anteil am Zugang durch Arbeitssystem 2: 35 %)

13703

**Bild 59: Verteilung der Reihenfolgeabweichung im Zugang eines Arbeitssystems bei variierendem Anteil am Zugang durch die Vorgänger**

Die durchgeführten Versuche bestätigen, die Hypothese, dass Rückstände einzelner Vorgänger sich auf die Reihenfolgeabweichung im Zugang eines Arbeitssystems auswirken. Im Detail zeigen

die Versuche, dass bei einer Belieferung eines Arbeitssystems durch zwei Vorgänger, von denen einer einen konstanten Rückstand aufweist, bimodale Verteilungen der Reihenfolgeabweichung im Zugang entstehen (vgl. Versuchsreihe 1). Sofern die Verteilung des Rückstands im Mittel null beträgt, jedoch eine Streuung aufweist, verhält sich die Reihenfolgeabweichung im Zugang analog hierzu (vgl. Versuchsreihe 2). Zudem zeigt sich in den ausgewerteten Versuchen, dass mit abnehmendem Anteil am Zugang durch das Arbeitssystem mit Rückstand eine zunehmende Streuung der Reihenfolgeabweichung im Zugang folgt (Versuchsreihe 3).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Form der Verteilung von drei Größen abhängt: der Verteilung des Rückstands der Vorgängerarbeitssysteme, ihrem Materialflusskoeffizienten und ihrem Anteil am Zugang des betrachteten Arbeitssystems. In der vorliegenden Arbeit blieben die aus diesen Simulationsexperimenten gewonnenen Erkenntnisse in der Modellierung unberücksichtigt. Der folgende Abschnitt zeigt jedoch, dass auch ohne die Berücksichtigung dieser Erkenntnisse beim gleichzeitigen Auftreten von Rückstand und Reihenfolgeabweichung das entwickelte Modell die Terminabweichung in einem Auftragsdurchlauf aufzeigen kann.

#### **4.4 Evaluierung der Abschätzung einer resultierenden Terminabweichungsverteilung**

Die folgenden Abschnitte evaluieren die Kopplung der Terminabweichungsanteile aus Reihenfolgeabweichung und aus Rückstand. Die reihenfolgebedingte Terminabweichung wird hierbei nach dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Modell ermittelt und für die rückstandsbedingte Terminabweichung wird jeweils eine geschätzte Verteilung verwendet.

##### **4.4.1 Resultierende Terminabweichungsverteilung für ein Arbeitssystem**

Die bearbeiteten Aufträge haben in allen durchgeführten Versuchen dieses Abschnitts einen Variationskoeffizienten der Auftragszeit von 0,7 ( $ZAU_m=0,9$  Stunden;  $ZAU_s=0,6$  Stunden). Das Arbeitssystem hat lediglich eine Maschine und erreicht eine mittlere Plan-Leistung von 13 Aufträgen pro Tag ( $LA_s=2$  Aufträge).

In den durchgeführten Versuchen variieren die Verteilung des Rückstands, die Standardabweichung der Terminabweichung im Zugang und der Plan-Bestand. Die Auswertung erfolgt in vier Schritten:

1. Ermittlung der gemessenen Terminabweichungsanteile,
2. Berechnung der modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichungsverteilung,
3. Kopplung der modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichungsverteilung mit den geschätzten rückstandsbedingten Terminabweichungsverteilungen sowie
4. Messung und Gegenüberstellung der Abweichung zwischen der gemessenen und den modellierten Terminabweichungsverteilungen.

Tabelle 14 zeigt die innerhalb der Versuche variierten Parameter und ihre Ausprägungen.

**Tabelle 14: Variierte Einflussgrößen für die Versuche zur Kopplung der Terminabweichungsanteile**

Einflussgröße	Ausprägung		
Mittlerer Rückstand [-]	-20	0	20
Standardabweichung des Rückstands [-]	0	10	20
Plan-Bestand [-]	15		30
Standardabweichung der Terminabweichung im Zugang	1 Tag		3 Tage

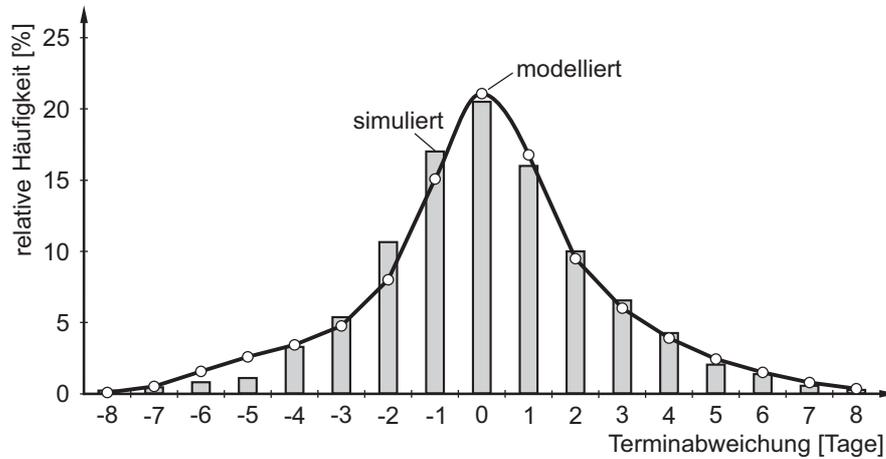
Die Auswertung der Versuche zeigt, dass zum einen die Schätzung der Rückstandsverteilung (bzw. rückstandsbedingten Terminabweichungsverteilung) und zum anderen die grobe Schätzung der negativen reihenfolgebedingten Terminabweichung (vgl. Abschnitt 3.2.3) in vielen Fällen ausreichen, um die Termineinhaltung und Termintreue für ein Arbeitssystem aufwandsarm und mit guter Genauigkeit abzuschätzen (vgl. Anhang zu Abschnitt 4.4.1).

Zwar treten vereinzelt auch hohe Abweichungen (12 Prozentpunkte) zwischen simulierter und modellierter Termineinhaltung auf (vgl. Versuchs-ID 16), jedoch weist die Modellierung innerhalb des Großteils der durchgeführten Versuche eine geringe Abweichung zwischen den Verteilungen der simulierten und modellierten Termineinhaltung auf. Im Mittel liegt ein absoluter mittlerer Fehler von 4 Prozentpunkten vor.

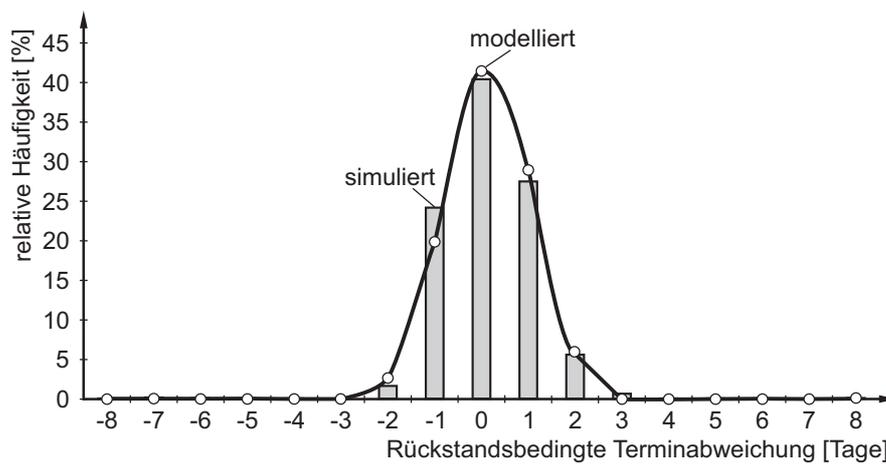
Bild 60 zeigt die simulierte und modellierte Terminabweichungsverteilung und ihre Anteile aus Rückstand und Reihenfolgeabweichung für einen ausgewählten Versuch (Versuchs-ID 11,  $TAZ_{RA,s}=3$  Tage,  $BA_m=7$  Aufträge). Es ist deutlich zu erkennen, dass die modellierte Verteilung der Terminabweichungsverteilung innerhalb dieses Versuchs sehr gut mit der simulierten übereinstimmt (Bild 60a). Innerhalb des Simulationsversuchs arbeitet das Arbeitssystem zwar im Mittel rückstandsfrei, besitzt jedoch um diesen Mittelwert streuende Rückstände. Die Rückstandsverteilung ist hierbei über normalverteilte Zufallszahlen abgeschätzt, die den simulierten Mittelwert und die simulierte Streuung des Rückstands als Parameter haben. Die rückstandsbedingte Terminabweichung wird, wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, über den Quotienten aus Rückstand und mittlerer Leistung abgeleitet. Die Sensitivität gegenüber einer mit abweichenden Parametern abgeschätzten Rückstandsverteilung ist in diesem Fall als gering einzustufen. Selbst bei einer Abweichung um 25 % von der tatsächlich auftretenden Streuung des Rückstands erzielt die Schätzung sehr gute Ergebnisse (siehe Anhang Bild 78a–c).

Bild 60c zeigt die Verteilung der simulierten und modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichung. Auch hier erzielt die Modellierung sehr gute Ergebnisse. Lediglich die Schätzung der

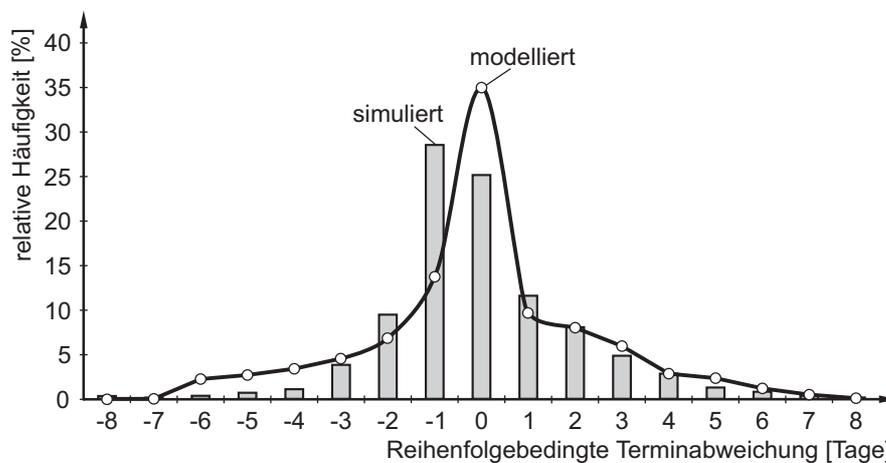
negativen Klassen der reihenfolgebedingten Terminabweichung zeigt nennenswerte Abweichungen zwischen simulierter und modellierter Häufigkeit. Die Auswirkungen dieser Abweichungen auf die resultierende Terminabweichungsverteilung sind jedoch geringfügig.



a) Vergleich der simulierten und modellierten Verteilung der Terminabweichung



b) Vergleich der simulierten und modellierten Verteilung der rückstandsbedingten Terminabweichung



c) Vergleich der simulierten und modellierten Verteilung der reihenfolgebedingten Terminabweichung

13704

**Bild 60: Vergleich der simulierten und modellierten Terminabweichung (Versuchs-ID 11)**

Die Auswertung jeder Abweichung zwischen der simulierten und modellierten Häufigkeit der Terminabweichung zeigt über alle Versuche hinweg eine mittlere absolute Abweichung von 1,3 Prozentpunkten. Das heißt, im Mittel wird die relative Häufigkeit einer Terminabweichungsklasse durch die modellierte Terminabweichungsverteilung um 1,3 Prozentpunkte verfehlt. Hierbei ist jedoch zu erwähnen, dass die maximale Abweichung bei 12,1 Prozentpunkten und die minimale Abweichung bei -22,1 Prozentpunkten liegen. Die hohen Abweichungen treten insbesondere dann auf, wenn eine geringe Streuung des Rückstands und gleichzeitig ein mittlerer Rückstand ungleich null vorliegen.

#### 4.4.2 Resultierende Terminabweichungsverteilung für Fertigungsbereiche

Die Evaluierung für Fertigungsbereiche basiert auf dem Simulationsmodell aus Abschnitt 4.2.2. In den durchgeführten Versuchen variieren wie bereits in Abschnitt 4.4.1 die Verteilung des Rückstands, die Standardabweichung der Terminabweichung im Zugang und der Plan-Bestand. Der Rückstand des Fertigungsbereichs ist hierbei durch die Rückstände einzelner Arbeitssysteme geregelt. Die Auswertung erfolgt analog zum vorangehenden Abschnitt in vier Schritten:

1. Ermittlung der gemessenen Terminabweichungsanteile,
2. Berechnung der modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichungsverteilung,
3. Kopplung der modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichungsverteilung mit unterschiedlichen rückstandsbedingten Terminabweichungsverteilungen sowie
4. Messung und Gegenüberstellung der Abweichung zwischen der gemessenen und den modellierten Terminabweichungsverteilungen.

Tabelle 15 zeigt die innerhalb der Versuche variierten Parameter und ihre Ausprägungen.

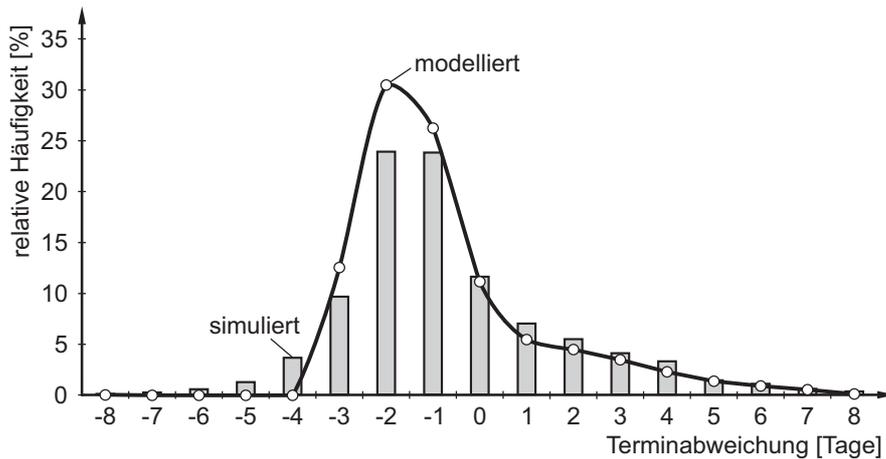
**Tabelle 15: Variierte Einflussgrößen für die Versuche zur Kopplung der Terminabweichungsanteile**

Einflussgröße	Ausprägung		
Mittlerer Rückstand [-]	-15	0	15
Standardabweichung des Rückstands [-]	0	5	10
Plan-Bestand [-]	80		145
Standardabweichung der Terminabweichung im Zugang	2 Tage		4 Tage

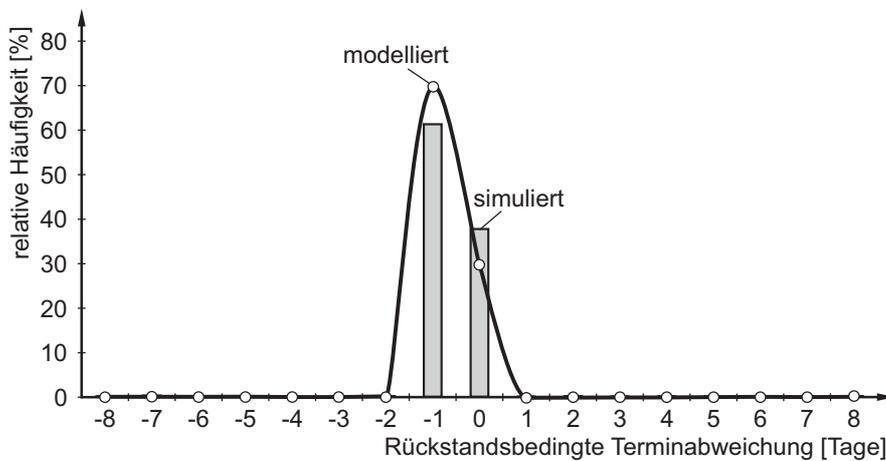
Die Auswertung der Versuche zeigt, dass die Modellierung für Fertigungsbereiche auch nach der Kopplung mit Rückstandsverteilungen nur eine grobe Schätzung ermöglicht. Der mittlere absolute Fehler für die Vorhersage der Termineinhaltung liegt bei 7,7 Prozentpunkten. Die Schwankungsbreite streut mit -27 bis 13 Prozentpunkten erwartungsgemäß stärker als bei der Modellierung für ein Arbeitssystem (vgl. Abschnitt 4.4.1).

Bild 61 zeigt die simulierte und modellierte Terminabweichungsverteilung und ihre Anteile aus Rückstand und Reihenfolgeabweichung für einen ausgewählten Versuch (Versuchs-ID 14,  $TAZ_{RA,s}=4$  Tage,  $BA_m=71$  Aufträge). Die modellierte Verteilung der Terminabweichungsverteilung stimmt für positive Terminabweichungen sehr gut mit der simulierten Verteilung überein (Bild 61a). Innerhalb des Simulationsversuchs arbeitet der Fertigungsbereich mit einem negativen mittleren Rückstand und streut um diesen nur gering. Die Rückstandsverteilung ist hierbei über normalverteilte Zufallszahlen abgeschätzt, die den simulierten Mittelwert und die simulierte Streuung des Rückstands als Parameter haben. Die rückstandsbedingte Terminabweichung wird, wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, über den Quotienten aus Rückstand und mittlerer Leistung abgeleitet. Die Sensitivität gegenüber einer mit abweichenden Parametern geschätzten Rückstandsverteilung ist auch im Fall von Fertigungsbereichen als gering einzustufen. Selbst bei einer Abweichung um 25 % von der tatsächlich auftretenden Streuung des Rückstands erzielt die Schätzung gute Ergebnisse (siehe Anhang Bild 79a-c).

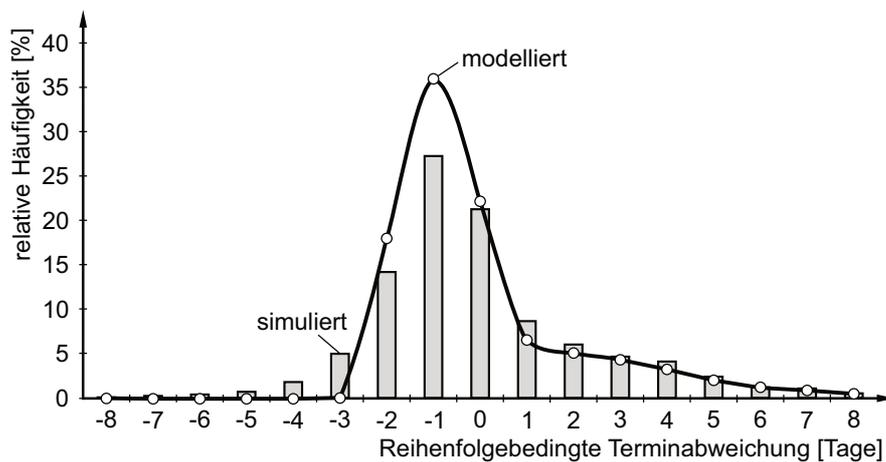
Bild 61c zeigt die Verteilung der simulierten und modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichung. Auch hier haben die modellierten Werte für positive Terminabweichungsklassen eine sehr geringe Abweichung von den simulierten Werten. Die Schätzung für die negativen Klassen der reihenfolgebedingten Terminabweichung zeigt nennenswerte Abweichungen zwischen simulierter und modellierter Häufigkeit.



a) Vergleich der simulierten und modellierten Verteilung der Terminabweichung



b) Vergleich der simulierten und modellierten Verteilung der rückstandsbedingten Terminabweichung



c) Vergleich der simulierten und modellierten Verteilung der reihenfolgebedingten Terminabweichung

13705

**Bild 61: Vergleich der simulierten und modellierten Terminabweichung (Versuchs-ID 14)**

Die Auswertung jeder Abweichung zwischen der simulierten und modellierten Häufigkeit der Terminabweichung zeigt über alle Versuche hinweg eine mittlere absolute Abweichung von 4 Prozentpunkten. Das heißt, im Mittel wird die relative Häufigkeit einer Terminabweichungs-

klasse durch die modellierte Terminabweichungsverteilung um 4 Prozentpunkte verfehlt. Auch für Fertigungsbereiche ist jedoch zu beachten, dass die maximale (36 Prozentpunkte) und die minimale Abweichung (-27 Prozentpunkte) hohe Werte aufweisen.

## 5 Erkenntnisse der Modellierung

Die Modellierung zeigt, dass eine Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin Zugangsreihenfolgeabweichungen sehr effektiv ausgleichen kann. Für einzelne Arbeitssysteme ist hierbei der Bestand des Arbeitssystems die entscheidende Größe: Je größer der vorliegende Bestand, umso stärker kann das Arbeitssystem Zugangsreihenfolgeabweichungen dämpfen. Für Fertigungsbereiche ist neben dem Bestand die Anzahl der durchlaufenen Arbeitssysteme maßgeblich für das Verbesserungspotenzial, um Zugangsreihenfolgeabweichungen auszugleichen. Je mehr Arbeitsvorgänge durchlaufen werden, desto eher kann eine Fertigung Zugangsreihenfolgeabweichungen vollständig dämpfen.

Das entwickelte Modell kann für eine vorgegebene Verteilung der Zugangsreihenfolgeabweichung die (minimale) Reihenfolgeabweichung im Abgang bestimmen, die eine Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin erreicht. Mit Hilfe des Modells können Unternehmen somit feststellen, welchen Einfluss die Reihenfolgebildung zur Verbesserung der Termintreue besitzt.

Grundsätzlich stehen Unternehmen hierbei drei Stellhebel zur Verfügung, um die Liefertreue zu erhöhen:

1. Die Zugangsreihenfolge besser einhalten,
2. die Reihenfolgebildung nach Termin bilden bzw. die Reihenfolgedisziplin erhöhen,
3. den Lieferzeitpuffer erhöhen.

In der Regel ist die Erhöhung der Reihenfolgedisziplin die kostengünstigste Maßnahme, um die Termintreue zu erhöhen. Untersuchungen in Unternehmen (vgl. hierzu auch Abschnitt 6.2) bestätigen zwar Forschungsergebnisse (z. B. Conway et al., 1967, S. 232, Blackstone Jr., Phillips & Hogg, 1982, S. 29) die besagen, dass die Reihenfolgebildung nach Termin nicht immer die höchste Termintreue erzielt. Jedoch wird die Verbesserung der Termintreue bei Anwendung anderer Reihenfolgeregeln durch die extreme Verzögerung einiger Aufträge erreicht, die wiederum zur Steigerung der Standardabweichung der Terminabweichung führt.

Neben der Bedeutung der Reihenfolgebildung haben das vorangehende Kapitel gezeigt, dass der Rückstand im Zugang eines Arbeitssystems nur einen Einfluss auf den Rückstand im Abgang besitzt, sofern hierdurch Auslastungsverluste auftreten. Jedoch hat ein Rückstand im Zugang in komplexen Materialflüssen oftmals einen Einfluss auf die Reihenfolgeabweichung im Zugang einzelner Arbeitssysteme. Dieser Einfluss wurde innerhalb der Arbeit zwar nicht modelliert, jedoch durch Simulationsexperimente bestätigt und beschrieben.

Um den Einfluss von Rückständen auf die Termintreue zu beherrschen, sollten Unternehmen daher ihre Kapazitätssteuerung am Rückstand der Arbeitssysteme ausrichten (Rückstandsregelung). Reicht die Kapazitätsflexibilität der Arbeitssysteme nicht aus, um vorhandene Rückstände auszugleichen, sollte die Auftragsannahme und -terminierung mit gezielten Eingriffen gegensteuern. Dies ist beispielsweise möglich, wenn die Terminierung bereits innerhalb des Kapazitätsabgleichs bestehende Rückstände berücksichtigt und die planbare Kapazität reduziert.

Die Kopplung der Terminabweichungsanteile über die stochastische Faltung funktioniert in ausreichender Genauigkeit, sofern die Verteilungen der reihenfolge- und rückstandsbedingten Terminabweichung bekannt sind. Für die Modellierung der reihenfolgebedingten Terminabweichungsverteilung nutzt das Modell zwei Prämissen. Diese sind, dass erstens die mittlere reihenfolgebedingte Terminabweichung null beträgt und somit eine auftragszeitunabhängige Reihenfolgebildung stattfindet, und zweitens die negativen Terminabweichungsklassen den gleichen Anteil am Ausgleich der Summe der positiven Terminabweichungen besitzen. Diese stark vereinfachte Abschätzung erweist sich in den simulierten Fällen als ausreichend, um gute Ergebnisse bei der Faltung der beiden Terminabweichungsanteile zu erzielen.

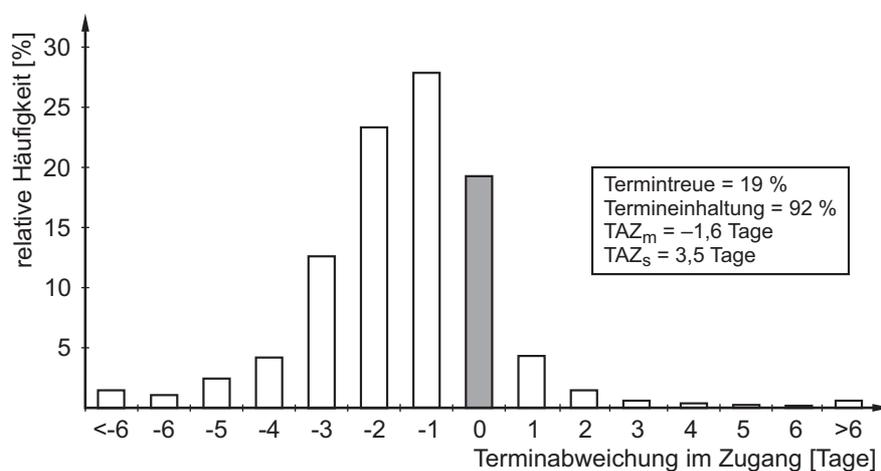
Das folgende Kapitel zeigt, wie Unternehmen das Modell in der Praxis erfolgreich einsetzen können, um mögliche Verbesserungen der Termineinhaltung und -treue durch die Reihenfolgebildung zu quantifizieren.

## 6 Anwendungsbeispiel zur Analyse und Verbesserung der Termintreue

Unternehmen können das Modell nutzen, um das Verbesserungspotenzial der Fertigung durch eine strikte Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin abzuschätzen. Die folgenden Abschnitte legen dies anhand zweier Anwendungsbeispiele aus der Praxis dar. Das erste Beispiel zeigt für ein Arbeitssystem mit vernachlässigbarem Rückstand das Potenzial, die Termintreue durch die Reihenfolgebildung zu verbessern (Abschnitt 6.1). Das zweite Beispiel verdeutlicht, dass auch für einen Fertigungsbereich zum einen die Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin die Termintreue verbessert und zum anderen wie ein reduzierter Rückstand weitere Verbesserungen ermöglicht (Abschnitt 6.2).

### 6.1 Anwendungsbeispiel für ein Arbeitssystem

Das betrachtete Arbeitssystem ist ein Beschriftungslaser mit einem Arbeitsplatz, der im Betrachtungszeitraum über 4.500 Aufträge bearbeitete. Ein ausreichend hoher Bestand am Arbeitssystem war im gesamten Betrachtungszeitraum gewährleistet, wodurch bestandsbedingte Auslastungsverluste ausgeschlossen werden können. Die Aufträge gingen in der Regel rechtzeitig zu (Bild 62) und lediglich ein geringer Anteil von knapp unter 8 Prozent der Aufträge erreichte das Arbeitssystem verspätet. Dabei ist zu beachten, dass für alle folgenden Berechnungen der Termintreue eine Termintoleranz von 0 Tagen gilt.

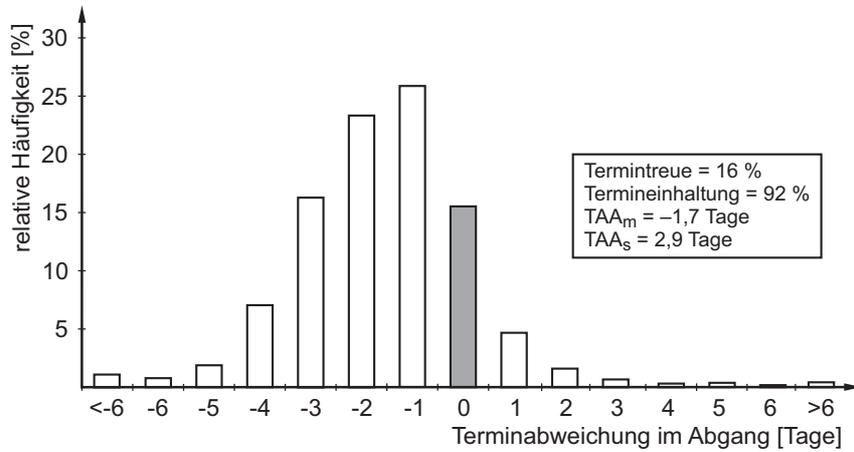


13706

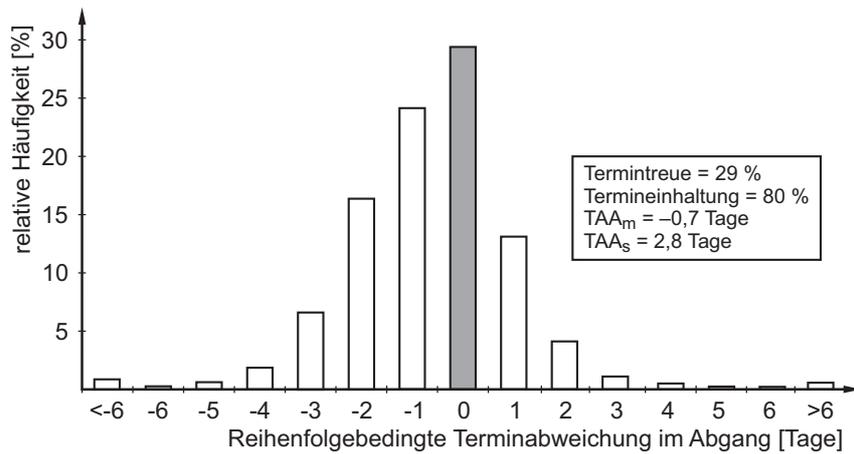
**Bild 62: Zugangsterminabweichung des Beschriftungslasers**

Im Abgang des Arbeitssystems verschlechtert sich die Terminabweichungsverteilung verglichen mit dem Zugang geringfügig (Bild 63a) – knapp über 8 Prozent der Aufträge verlassen das Arbeitssystem verspätet. Die Aufteilung der Terminabweichung zeigt, dass die Reihenfolgebildung die Streuung verursacht (Bild 63b). Der Rückstand ist überwiegend negativ, daher hat er keinen negativen Einfluss auf die verspäteten Aufträge (Bild 63c). Die rückstandsbedingte Termineinhaltung liegt mit 99 Prozent auf einem sehr guten Niveau und zeigt, dass das Arbeitssystem Aufträge

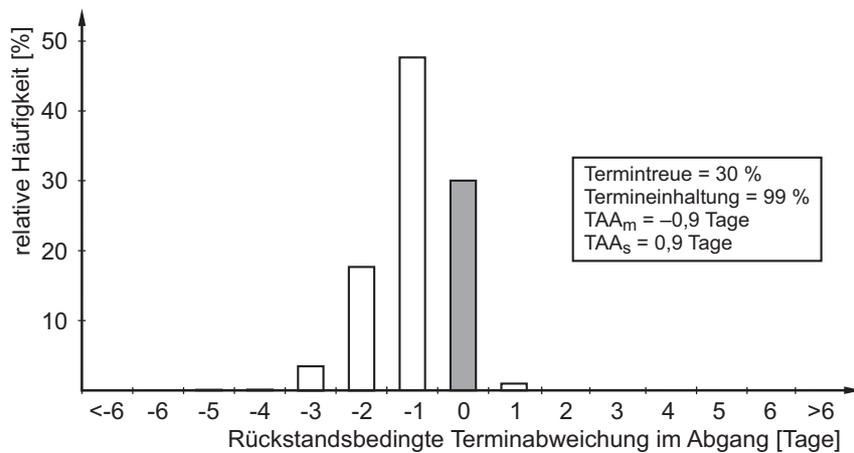
nicht aufgrund von Rückstand verspätet fertigstellt. Die Kapazitätssteuerung an dem Arbeitssystem erfolgt terminorientiert, d. h. die Summe der Auftragszeiten der verspäteten Aufträge bestimmen die zusätzlich benötigte Kapazität.



a) Terminabweichungsverteilung des Beschriftungslasers



b) Reihenfolgebedingte Terminabweichung des Beschriftungslasers



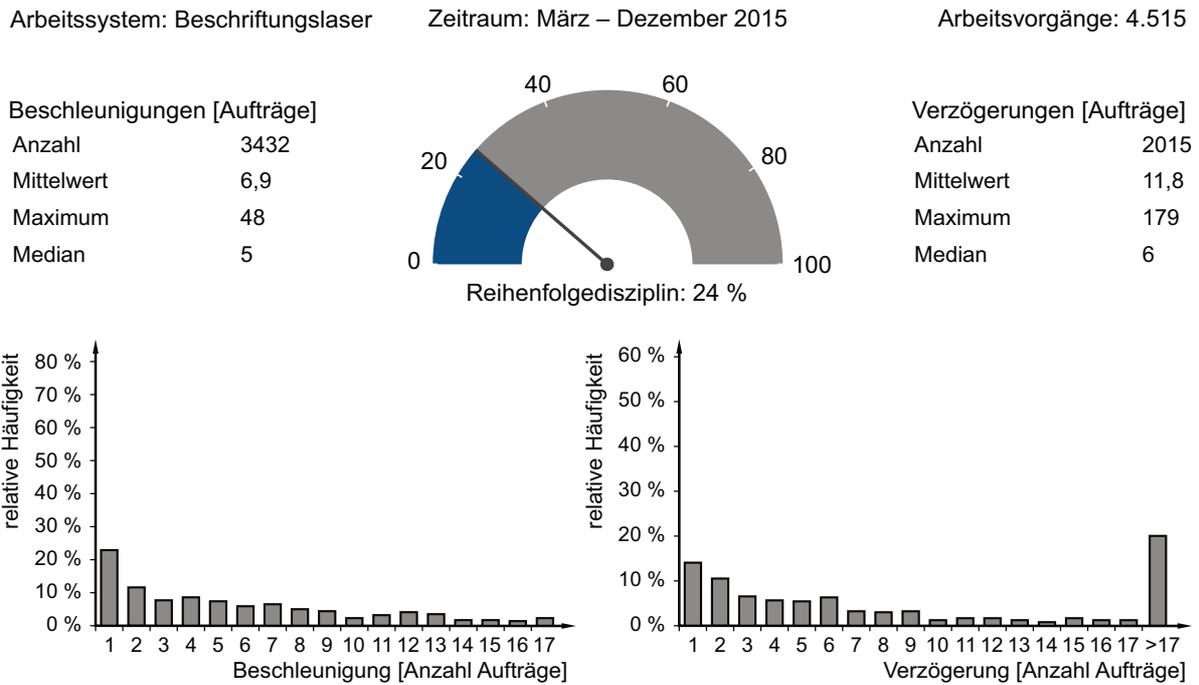
c) Rückstandsbedingte Terminabweichung des Beschriftungslasers

13707

**Bild 63: Terminabweichungsverteilungen im Abgang des Beschriftungslasers**

Die Mitarbeiter haben die Vorgabe, die Aufträge nach Termin zu bearbeiten. Bild 64 zeigt jedoch, dass eine geringe Reihenfolgedisziplin vorliegt und diese Vorgabe somit nur in 22 Prozent der

Fälle eingehalten wurde – vier von fünf Aufträgen wurden nach einem anderen Kriterium ausgewählt. Zudem führte jede falsche Entscheidung im Mittel zu einer Beschleunigung von 7 Aufträgen. Durch die falschen Entscheidungen wurden die übrigen Aufträge im Mittel um 12 Aufträge verzögert. Die Verteilungen der Beschleunigung und Verzögerung deuten aufgrund ihrer Breite auf eine zufällige Reihenfolgebildung hin. Für das Unternehmen stellt sich die Frage, wie weit die Reihenfolgebildung die Terminabweichung im Abgang reduzieren kann.

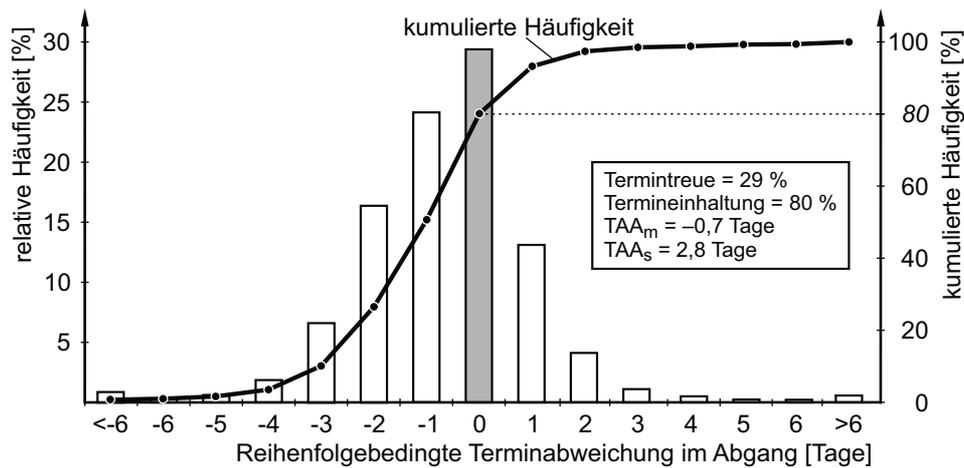


13708

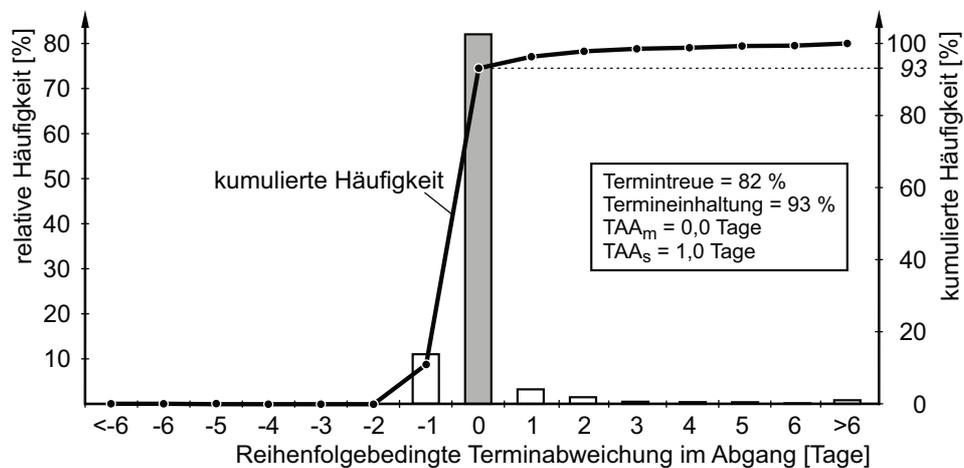
**Bild 64: Analyse der Reihenfolgebildung am Beschriftungslaser**

Mit Hilfe des entwickelten Modells wird abgeschätzt, welche Terminabweichungsverteilung bei einer Reihenfolgebildung nach Termin mit sehr hoher Reihenfolgedisziplin erreichbar wäre. Die hierzu benötigten Rückmeldedaten beschränken sich für jeden Auftrag im Betrachtungszeitraum auf die Auftragsnummer, die Plan- und Ist-Zugangstermine sowie die Plan- und Ist-Endtermine. Diese Daten bilden bereits die Grundlage für die oben beschriebene Analyse.

Bild 65 vergleicht die tatsächliche mit der modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichung für das Arbeitssystem. Eine hohe Reihenfolgedisziplin reduziert die Streuung der Terminabweichung von 2,8 Tagen auf rund 1 Tag. Zudem erhöht sich die reihenfolgebedingte Termintreue deutlich von 29 auf 82 Prozent.



a) Tatsächliche reihenfolgebedingte Terminabweichung des Beschriftungslasers



b) Modellierte reihenfolgebedingte Terminabweichung des Beschriftungslasers

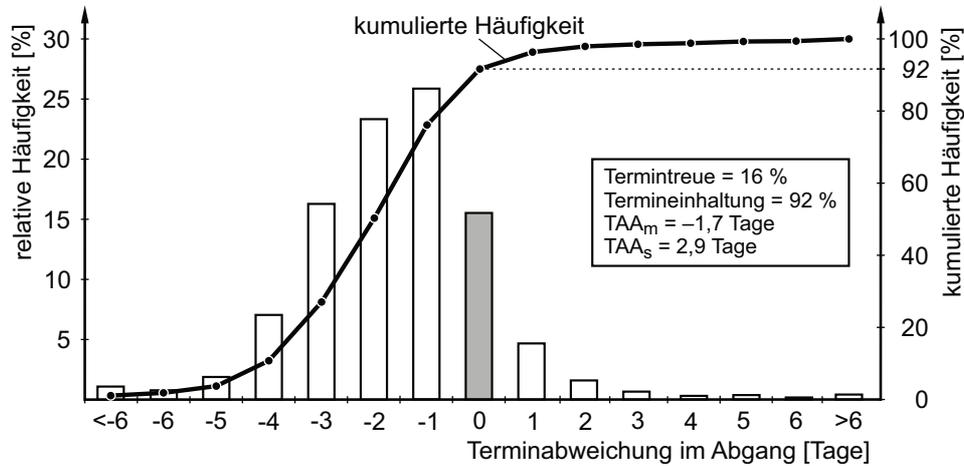
13709

### Bild 65: Vergleich der modellierten und tatsächlichen reihenfolgebedingten Terminabweichung

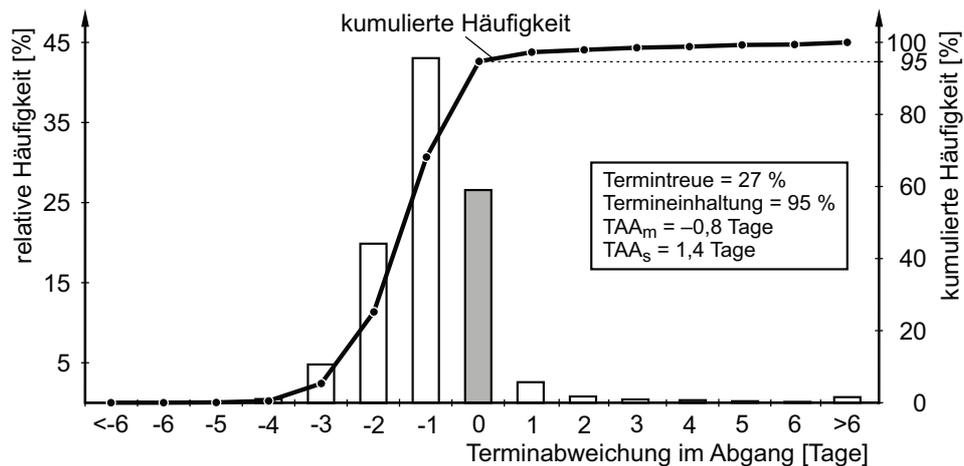
Die Faltung der modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichung mit der tatsächlich aufgetretenen rückstandsbedingten Terminabweichung schätzt eine mögliche resultierende Terminabweichung ab. Bild 66 vergleicht die modellierte Terminabweichung für das Arbeitssystem mit der tatsächlich aufgetretenen Terminabweichungsverteilung. Eine hohe Reihenfolgedisziplin kann den Anteil der verspäteten Aufträge um knapp 40 Prozent reduzieren – von 8 Prozent auf 5 Prozent – und vor allem die Streuung der Terminabweichung von 2,9 Tagen auf 1,4 Tage halbieren und somit deutlich senken. Darüber hinaus erhöht sich die Termintreue bei einer Termintoleranz von 0 Tagen von 16 auf 27 Prozent.

Sollte es an dem Arbeitssystem gelingen, den negativen Rückstand vollständig zu vermeiden, würde die Terminabweichungsverteilung der reihenfolgebedingten Terminabweichungsverteilung aus Bild 65b entsprechen. Da der negative Rückstand sich auf die Termineinhaltung begünstigend auswirkt, wäre eine rückstandsfreie Fertigung an diesem Arbeitssystem nachteilig für die

Termineinhaltung, könnte jedoch die Termintreue deutlich erhöhen. Für weitere Verbesserungen ist es notwendig die zuliefernden Arbeitssysteme näher zu untersuchen, um die Zugangsterminabweichung zu beschränken.



a) Tatsächliche Terminabweichungsverteilung des Beschriftungslasers



b) Modellierte Terminabweichungsverteilung des Beschriftungslasers

13710

### Bild 66: Vergleich der modellierten und tatsächlichen Terminabweichung für den Beschriftungslaser

Zur Durchsetzung einer hohen Reihenfolgedisziplin benötigen die Fertigungsmitarbeiter geeignete Hilfsmittel. Diese sollten zum einen den dringendsten Auftrag anzeigen und zum anderen die Suche des dazugehörigen Materials vereinfachen. In dem zuvor beschriebenen Fall stand den Fertigungsmitarbeitern ein Bildschirm mit einer aktuellen Liste der dringendsten Aufträge zur Verfügung. Die Liste ist nach dem Plan-Endtermin sortiert und zeigt, welche Aufträge bereits an Vorgängerarbeitssystemen bearbeitet sind und somit im Umlaufbestand des Arbeitssystems vorliegen. Jeder Auftrag bzw. jedes Material besitzt zudem eine Auftragsbegleitkarte, die eine Zuordnung des physischen Auftrags zu der digitalen Liste ermöglicht. Trotz der gut gewählten Hilfsmittel lag im vorliegenden Fall mit 22 Prozent eine verbesserungswürdige Reihenfolgedisziplin

vor (Bild 64). Daher ist es notwendig, den für die Reihenfolgebildung verantwortlichen Mitarbeitern nicht nur die Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen, sondern auch die vorgegebene Reihenfolgeregel zu kommunizieren und die Folgen von Abweichungen verständlich aufzuzeigen.

## 6.2 Anwendungsbeispiel für eine Fertigung

Die in diesem Abschnitt untersuchte Fertigung gehört zu einem Unternehmen, das Leiterplatten im Werkstattprinzip herstellt. Die Fertigung besteht aus rund 130 Arbeitssystemen, die grob in 17 Bereiche (z. B. Zuschnitt, Bohrererei oder Galvanik) eingeteilt sind. Bild 67 zeigt die relevantesten Materialflüsse durch die Bereiche der Fertigung.

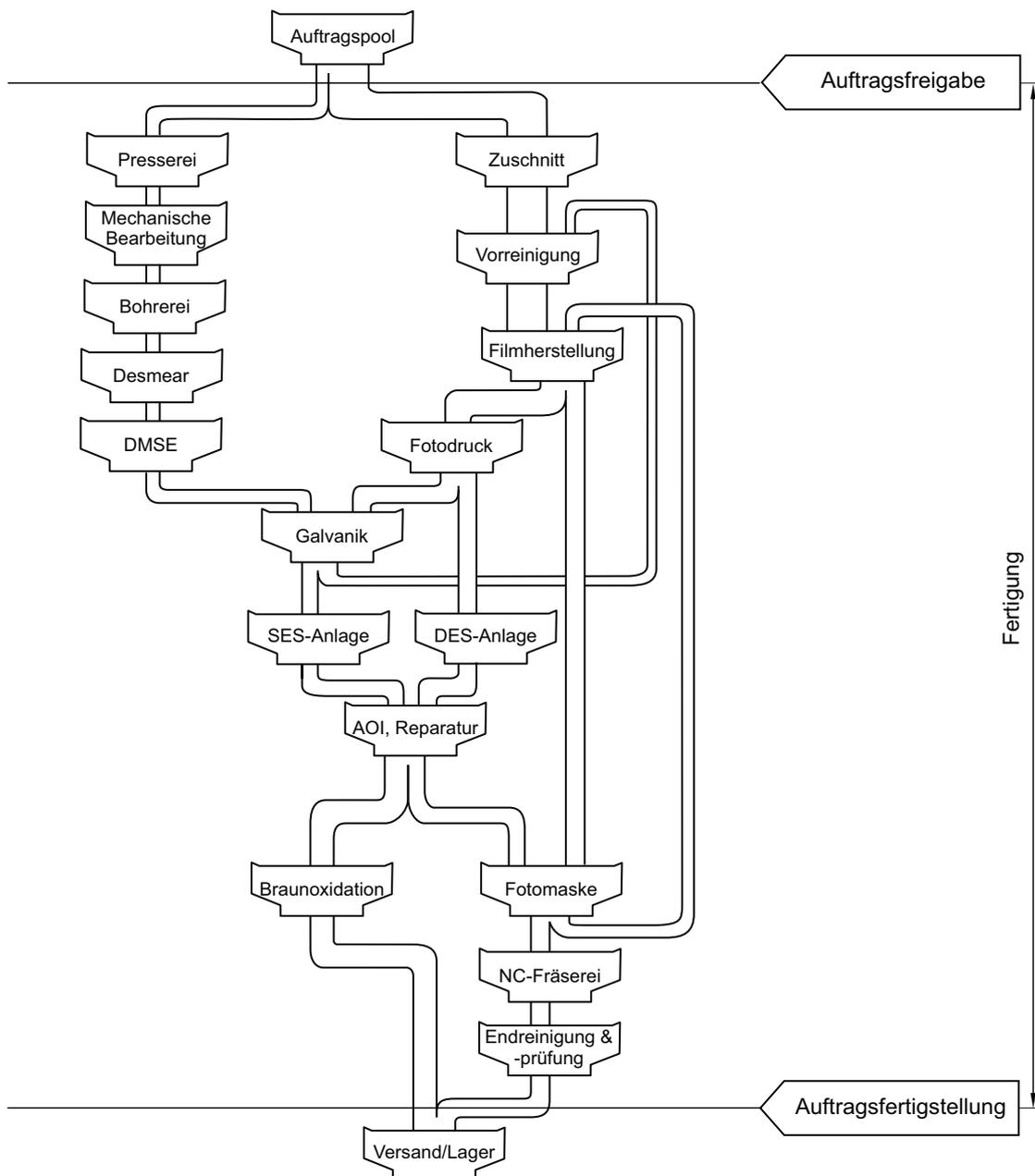


Bild 67: Vereinfachter Materialfluss der betrachteten Fertigung

13711

Die Anwendung des entwickelten Modells erlaubt eine Prognose der erreichbaren Verbesserung der Termineinhaltung durch eine höhere Reihenfolgedisziplin. Die folgenden Abschnitte untersuchen drei unterschiedliche Anwendungsszenarien:

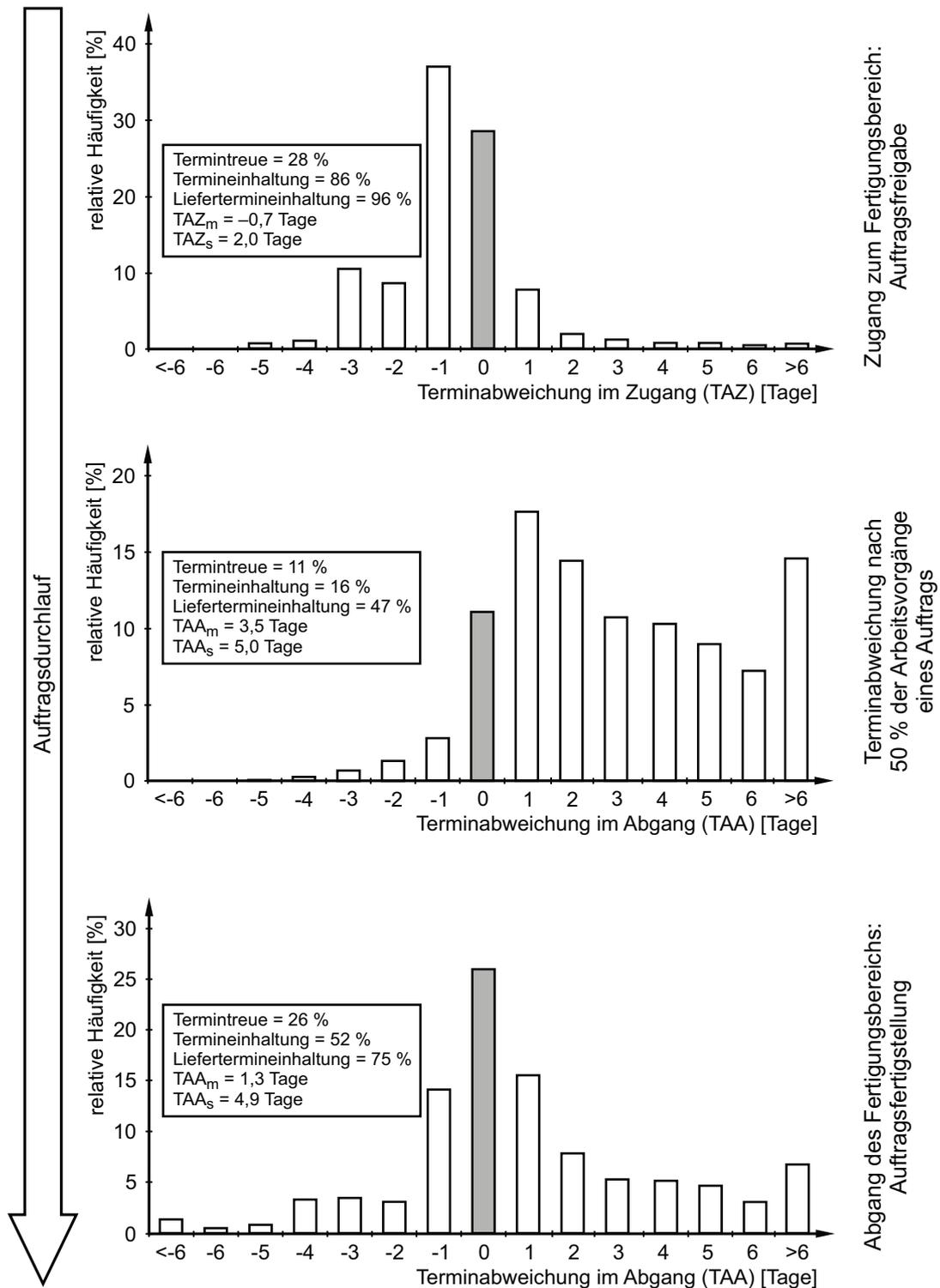
1. Betrachtung von der Auftragsfreigabe bis zur Auftragsfertigstellung,
2. Betrachtung von der Auftragsfreigabe bis zur halben Bearbeitung der Aufträge (50 Prozent der Arbeitsvorgänge abgeschlossen) und
3. Betrachtung von der halben Bearbeitung der Aufträge bis zur Auftragsfertigstellung.

Das Unternehmen hat für die Fertigung einen Lieferzeitpuffer von zwei Tagen festgelegt. In den folgenden Ausführungen wird daher neben der Termineinhaltung auch die Liefertermineinhaltung dargestellt und diskutiert.

Bild 68 zeigt drei Messpunkte der auftretenden Terminabweichungen in der Fertigung. Die Zugangsterminabweichung liegt im Mittel bei  $-0,7$  Tagen und streut mit 2 Tagen um diesen Mittelwert. Es folgt eine Termineinhaltung im Zugang von 86 Prozent und eine Liefertermintreue von 98 Prozent.

Die ersten 50 Prozent des Fertigungsdurchlaufs senken die Termineinhaltung, sodass lediglich 16 Prozent der Aufträge rechtzeitig ihren 50-Prozentpunkt erreichen. Hierbei steigt der Mittelwert der Terminabweichung um 4 Tage, sodass Aufträge im Schnitt 3,5 Tage verspätet sind. Darüber hinaus ist auch eine stärkere Streuung (5 Tage) zu verzeichnen. Die Liefertermineinhaltung sinkt zwischen dem Zugang bis zum 50-Prozentpunkt von 98 auf 47 Prozent.

Verglichen mit dem 50-Prozentpunkt verbessert sich die Fertigung bis zum Zeitpunkt der vollständigen Auftragsfertigstellung. Der Mittelwert der Abgangsterminabweichung reduziert sich im Vergleich zum 50-Prozentpunkt um 2,2 Tage auf 1,3 Tage. Die Streuung der Terminabweichung bleibt jedoch mit ca. 5 Tagen hoch. Dies weist darauf hin, dass die Reihenfolgebildung einige Aufträge beschleunigt, um diese termintreu zu fertigen und dafür einzelne Aufträge stark verzögert. Zwischen der Auftragsfreigabe und der Auftragsfertigstellung sinkt sowohl die Termineinhaltung (von 86 auf 52 Prozent) als auch die Liefertermineinhaltung (von 98 auf 75 Prozent) deutlich.



**Bild 68: Übersicht der Terminabweichung im Auftragsdurchlauf**

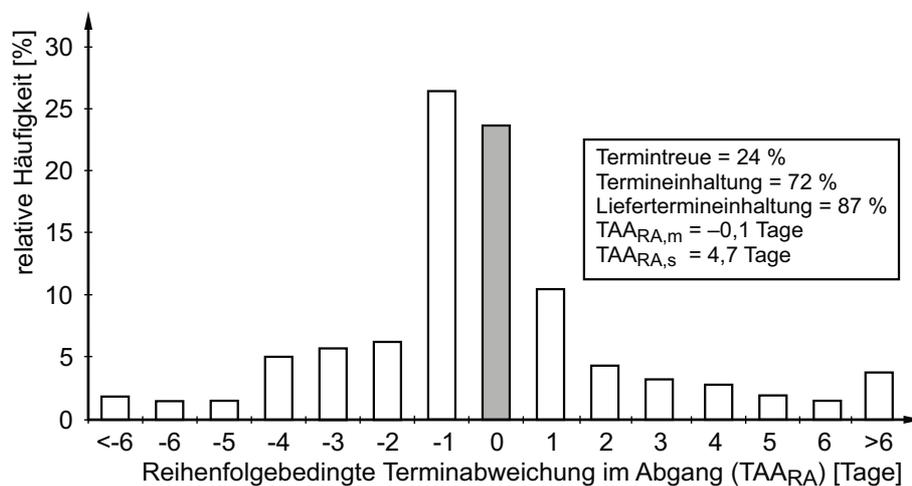
13712

Der folgende Abschnitt zeigt, welche Terminabweichungsverteilung die Fertigung erreicht hätte, wenn die Reihenfolgebildung über den gesamten Auftragsdurchlauf nach Plan-Endtermin erfolgt wäre.

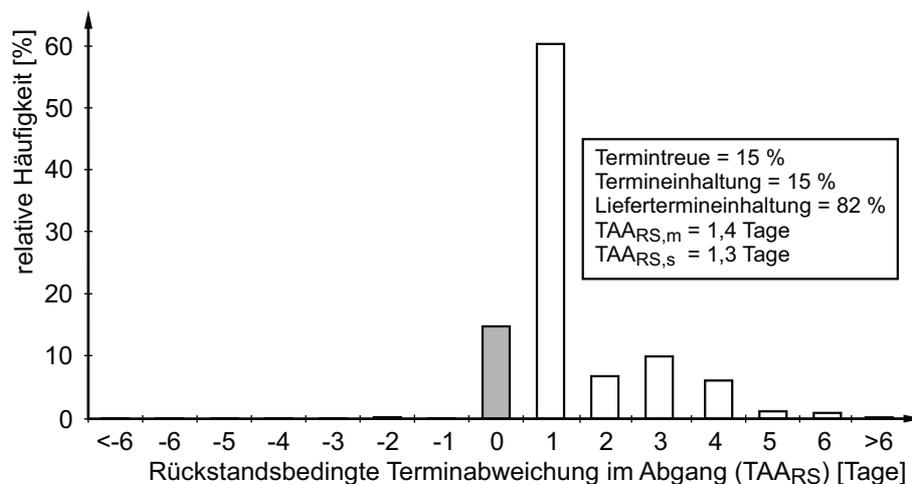
### Anwendung des Modells auf den gesamten Auftragsdurchlauf

Wie bereits beschrieben und in Bild 68 dargestellt, vertauscht die Auftragsfreigabe die Reihenfolge der Aufträge und befindet sich ca. einen halben Tag im Vorlauf (negativer Rückstand). Dennoch gehen rund 14 Prozent der Aufträge mit einer Verspätung zu, die durch die Fertigung auszugleichen ist, um die betroffenen Aufträge rechtzeitig fertigzustellen.

Bild 69 zeigt wie die reihenfolge- und rückstandsbedingte Terminabweichung im Abgang verteilt sind. Die Reihenfolgeabweichung bestimmt hierbei maßgeblich die Streuung der Terminabweichung. Die durchgeführte Reihenfolgebildung beschleunigt einen Großteil der Aufträge um einen Tag und verzögert dafür einige Aufträge sehr stark ( $>6$  Tage). Der Rückstand beeinflusst die Streuung hingegen nur geringfügig und bestimmt stattdessen den Mittelwert der Terminabweichung, sodass sich die Aufträge im Mittel um 1,4 Tage verspäten.



a) Reihenfolgebedingte Terminabweichungsverteilung im Abgang der Fertigung

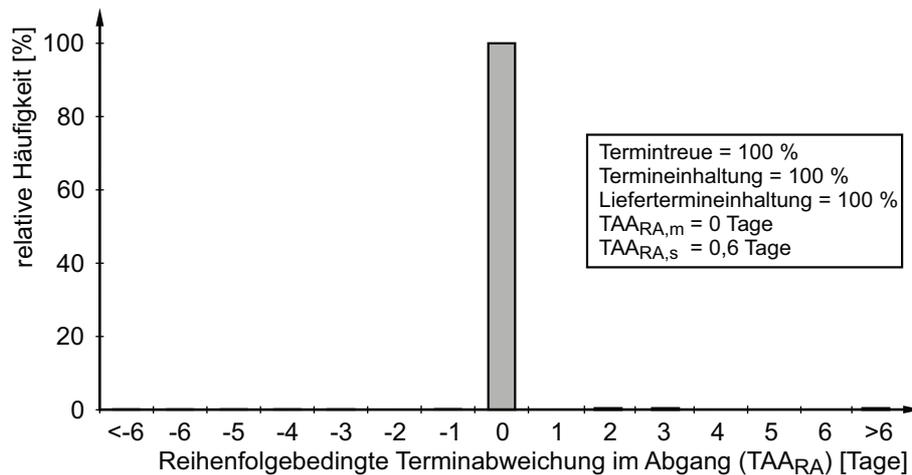


b) Rückstandsbedingte Terminabweichungsverteilung im Abgang der Fertigung

**Bild 69: Reihenfolge- und rückstandsbedingte Terminabweichung der Fertigung**

13713

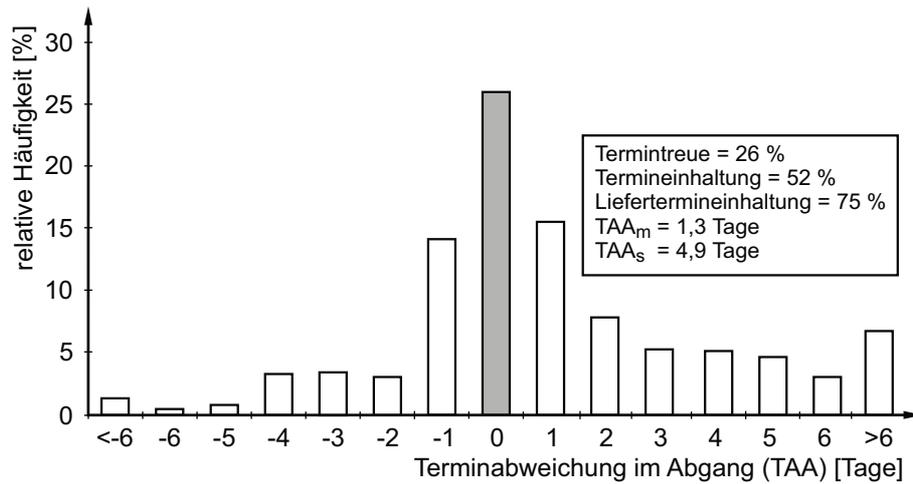
Die Modellanwendung verdeutlicht, dass die Fertigung nahezu 100 Prozent der Zugangsreihenfolgeabweichungen über den Auftragsdurchlauf ausgleichen kann. Lediglich 15 von über 12.000 Aufträgen würden aufgrund ihrer sehr hohen Reihenfolgeabweichung im Zugang eine reihenfolgebedingte Verspätung im Abgang erfahren. Die Reihenfolgeabweichungen, die sich nicht ausgleichen lassen, sind sehr hoch und führen dazu, dass die Terminabweichung mit 0,6 Tagen streut (vgl. Bild 70).



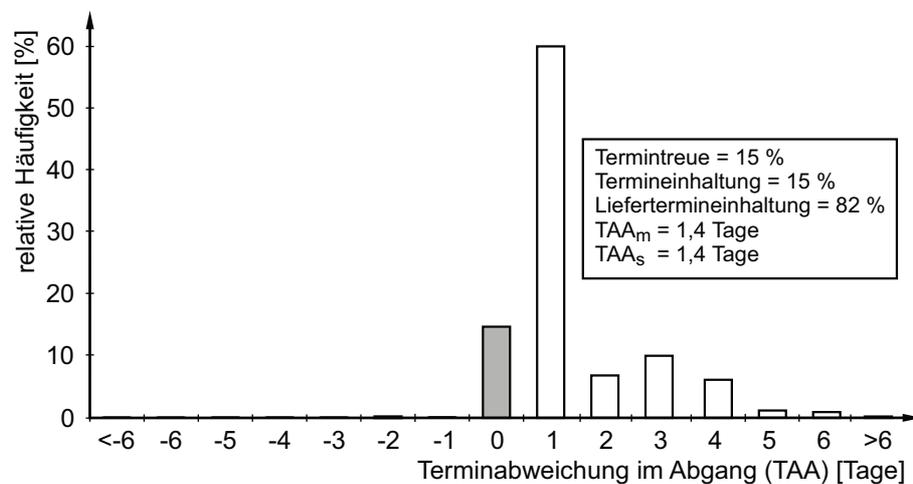
13714

**Bild 70: Modellierter reihenfolgebedingte Terminabweichung der Fertigung**

Bild 71b zeigt die resultierende Terminabweichung unter der Annahme, dass eine hohe Reihenfolgedisziplin vorliegt und der Rückstand der Fertigung unverändert bleibt. Es wird deutlich, dass die Terminabweichungsverteilung nahezu der ursprünglichen Verteilung der rückstandsbedingten Terminabweichung (Bild 69b) gleicht. Die Termintreue und -einhaltung der Fertigung würden sich durch eine Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin zwar verschlechtern, jedoch wäre zum einen die Anzahl stark verspäteter Aufträge geringer und zum anderen würde sich die Streuung der Terminabweichung deutlich reduzieren. Dies führt schließlich dazu, dass die Liefertermineinhaltung von 75 auf 82 Prozent steigen würde (Bild 71).



a) Terminabweichungsverteilung im Abgang der Fertigung

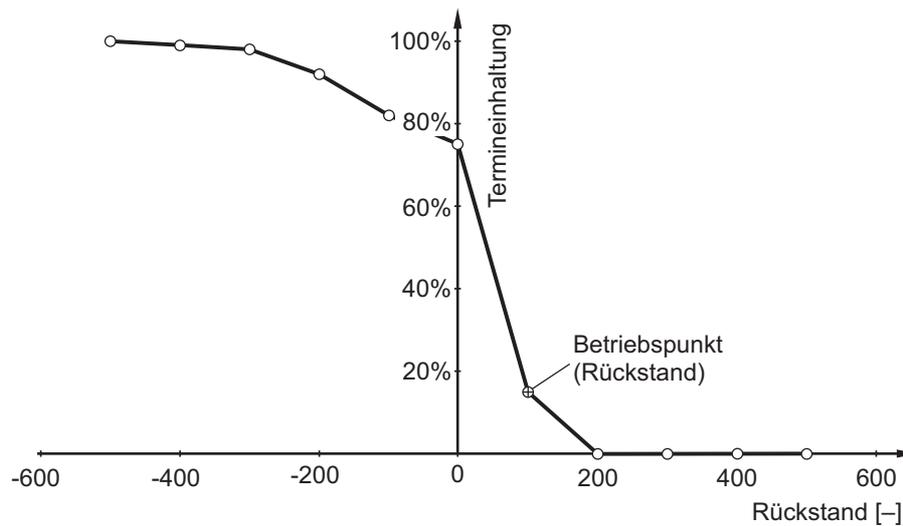


b) Modellierter Terminabweichungsverteilung im Abgang der Fertigung (bei hoher Reihenfolgedisziplin)

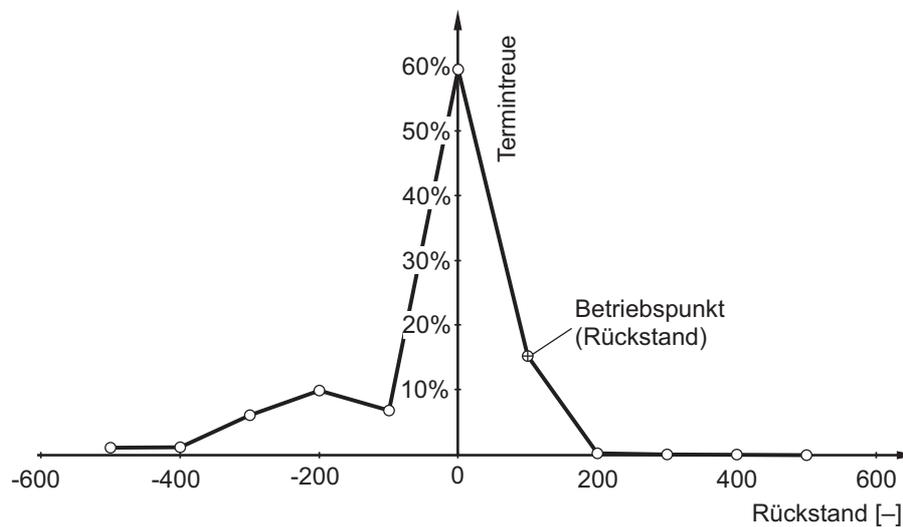
13715

**Bild 71: Tatsächliche und modellierte Terminabweichung im Abgang der Fertigung**

Mit einer funktionierenden Rückstandsregelung oder einem gezielten Eingriff durch die Auftragsannahme und -terminierung könnte die Fertigung den Rückstand abbauen und dadurch die Termineinhaltung auf über 75 Prozent und die Liefertermineinhaltung auf über 95 Prozent erhöhen. Bild 72 zeigt eine Termineinhaltungs- und Termintreuekennlinie für die Fertigung in Abhängigkeit des mittleren Rückstands. Sollte es zudem gelingen, die Streuung des Rückstands zu kontrollieren, wären weitere Verbesserungen möglich.



a) Modellierter Termineinhaltungskennlinie für die Fertigung



b) Modellierter Termintreuekennlinie für die Fertigung

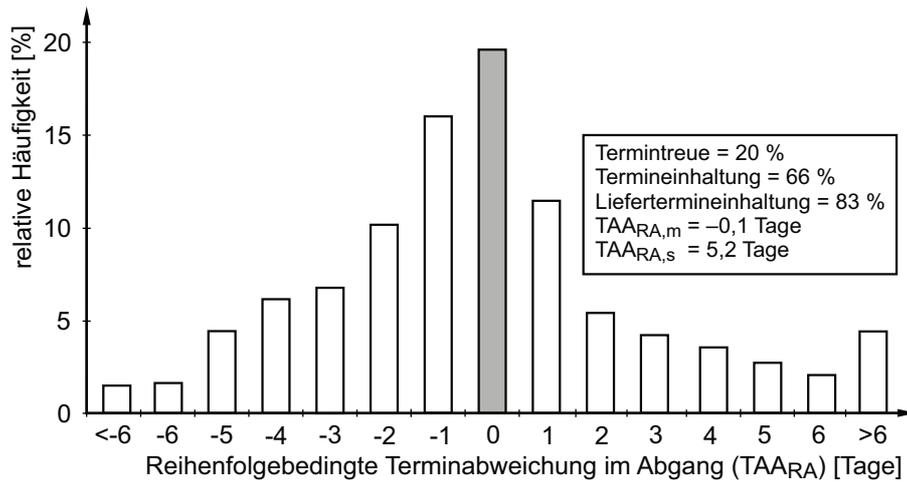
**Bild 72: Termineinhaltungskennlinie für die Fertigung**

13716

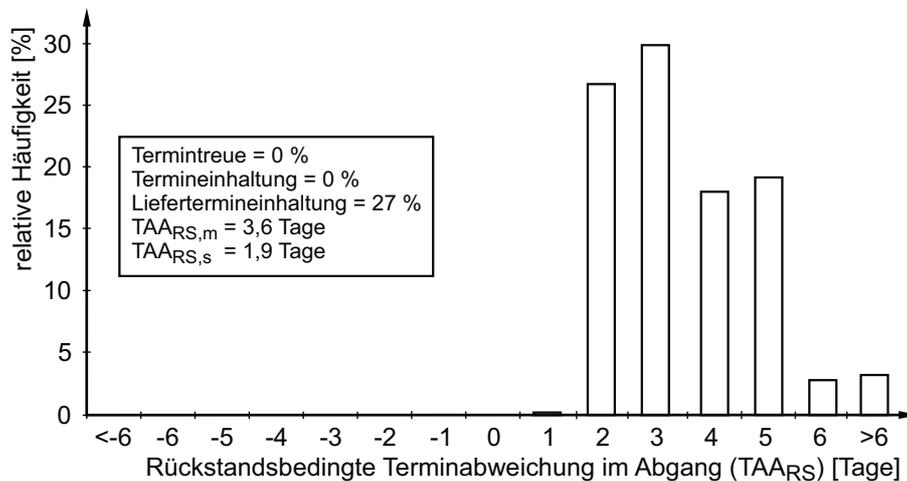
Die beiden folgenden Abschnitte zeigen, dass für die betrachtete Fertigung ein Eingriff in die Fertigungssteuerung nicht zwangsläufig über den gesamten Auftragsdurchlauf notwendig wäre, um die Zugangsreihenfolgeabweichungen auszugleichen.

**Anwendung des Modells auf die ersten 50 Prozent des Auftragsdurchlaufs**

Da das Potenzial, Verspätungen aufzuholen, mit der Anzahl der Arbeitsvorgänge zunimmt, betrachtet dieser Abschnitt, ob die ersten 50 Prozent der Arbeitsvorgänge eines jeden Auftrags ausgereicht hätten, um die Reihenfolgeabweichungen aus der Auftragsfreigabe auszugleichen. Bild 73 zeigt, welche reihenfolge- und rückstandsbedingte Terminabweichung nach 50 Prozent der Arbeitsvorgänge der betrachtete Fertigungsbereich tatsächlich erreicht hat. Es liegt sowohl eine hohe Streuung der reihenfolgebedingten Terminabweichung (5 Tage) vor als auch ein Rückstand, der Aufträge im Schnitt um 3,6 Tage verspätet.



a) Reihenfolgebedingte Terminabweichungsverteilung nach 50 % bearbeiteter Arbeitsvorgänge

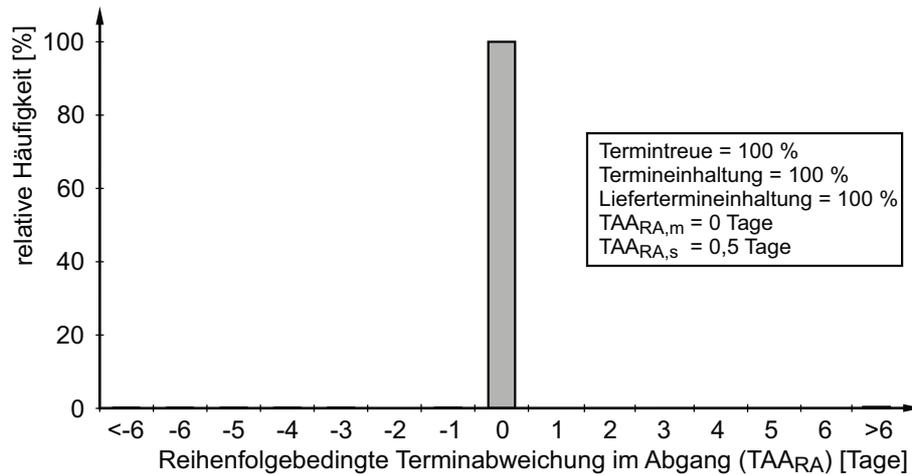


b) rückstandsbedingte Terminabweichungsverteilung nach 50 % bearbeiteter Arbeitsvorgänge

13717

**Bild 73: Reihenfolge- und rückstandsbedingte Terminabweichung des Fertigungsreichs nach 50 % der Arbeitsvorgänge**

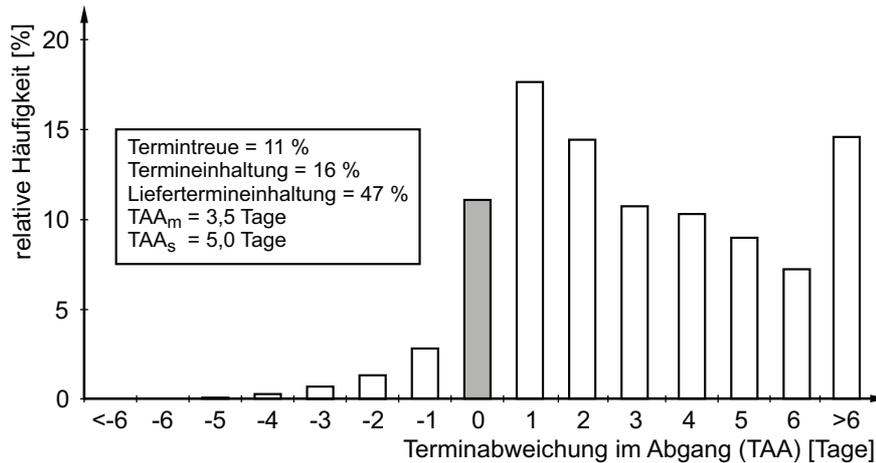
Die Anwendung des Modells auf die ersten 50 Prozent des Auftragsdurchlaufs zeigt, dass lediglich 36 von über 12.000 Aufträgen eine Reihenfolgeabweichung im Abgang (nach 50 Prozent der Arbeitsvorgänge) erfahren hätten, wenn die Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin erfolgt wäre. Auch hier lassen sich einige sehr hohe Zugangsreihenfolgeabweichungen nicht ausgleichen und führen zu einer Streuung der reihenfolgebedingten Terminabweichung von 0,5 Tagen (vgl. Bild 74).



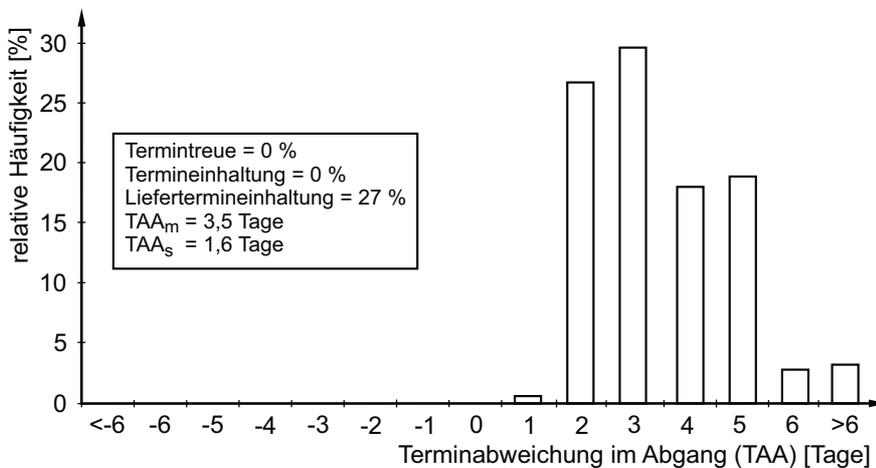
13718

**Bild 74: Modellierte Reihenfolgebedingte Terminabweichung des Fertigungsbereichs nach 50 % der Arbeitsvorgänge**

Bild 75 stellt die tatsächliche und modellierte resultierende Terminabweichungsverteilung gegenüber. Auch in diesem Fall führt die Reihenfolgebildung nach Termin nicht zu einer Verbesserung der Termintreue, jedoch erstens zu einer deutlichen Verringerung der Streuung der Terminabweichung und zweitens zu einem deutlich kleineren Anteil an extrem verspäteten Aufträgen. In diesem Fall gelingt es jedoch nicht lediglich mit der Reihenfolgebildung die Liefertermineinhaltung zu verbessern. Sie verschlechtert sich trotz des positiven Effekts der Reihenfolgebildung auf die Streuung der Terminabweichung von 47 auf 27 Prozent. Dies liegt an dem hohen mittleren Rückstand, der zu einer mittleren Terminabweichung von 3,5 Tagen führt. Um eine hohe Termintreue zu erreichen, haben Unternehmen zwei Aufgaben: die Reihenfolgebildung und die Regelung des Rückstands. In diesem Fall ist es notwendig, den hohen Rückstand mit geeigneten Maßnahmen zu senken, um nicht nur die Termintreue, sondern auch die Liefertermineinhaltung zu erhöhen.



a) Terminabweichungsverteilung nach 50 % bearbeiteter Arbeitsvorgänge



b) Modellierter Terminabweichungsverteilung nach 50 % bearbeiteter Arbeitsvorgänge

13719

### Bild 75: Tatsächliche und modellierte Terminabweichungsverteilung nach 50 % der Arbeitsvorgänge

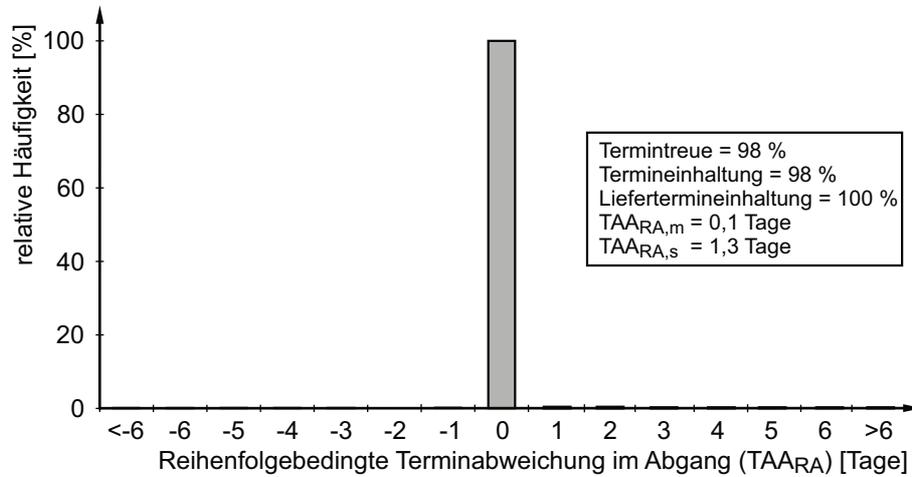
Der nachfolgende Abschnitt zeigt, ob die Reihenfolgeabweichungen, die nach 50 Prozent der Arbeitsvorgänge vorlagen, durch die nachfolgenden Arbeitssysteme mit einer Reihenfolgebildung nach Termin ausgleichbar wären.

#### Anwendung des Modells auf die letzten 50 Prozent des Auftragsdurchlaufs

Der vorhergehende Abschnitt zeigt die Terminabweichungsverteilung (Bild 75a) und ihre Anteile aus Reihenfolgeabweichung und Rückstand (Bild 73), die nach der Hälfte der Arbeitsvorgänge vorlagen. Diese entsprechen der Zugangsterminabweichung für die letzten 50 Prozent der Arbeitsvorgänge. Die auszugleichenden Reihenfolgeabweichungen sind in diesem Fall größer als die aus der Auftragsfreigabe resultierenden Reihenfolgeabweichungen (vgl. Bild 68a).

Die Anwendung des Modells verdeutlicht, dass eine Reihenfolgebildung nach Termin auch diese stärkeren Reihenfolgeabweichungen nahezu vollständig ausgleichen kann. Lediglich 2 Prozent der Aufträge hätten eine positive Reihenfolgeabweichung erfahren. Einige davon weisen jedoch eine

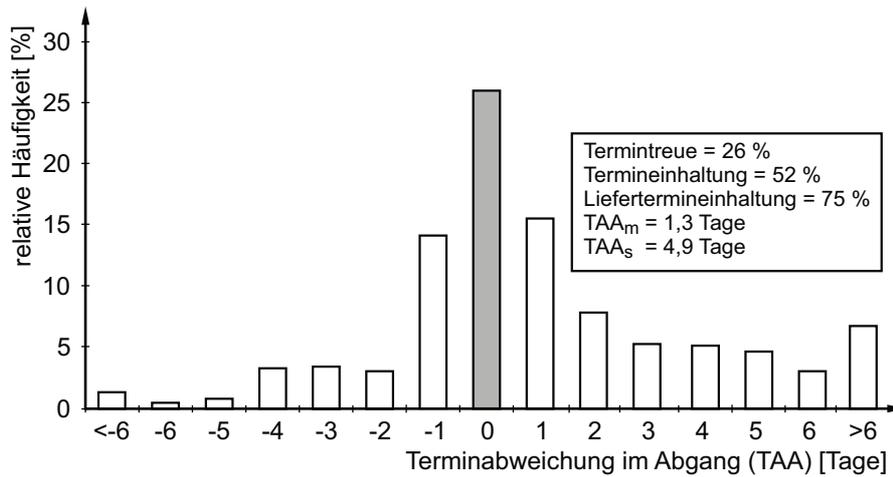
so hohe Reihenfolgeabweichung auf, dass die Streuung der reihenfolgebedingten Terminabweichung 1,3 Tage beträgt (vgl. Bild 76).



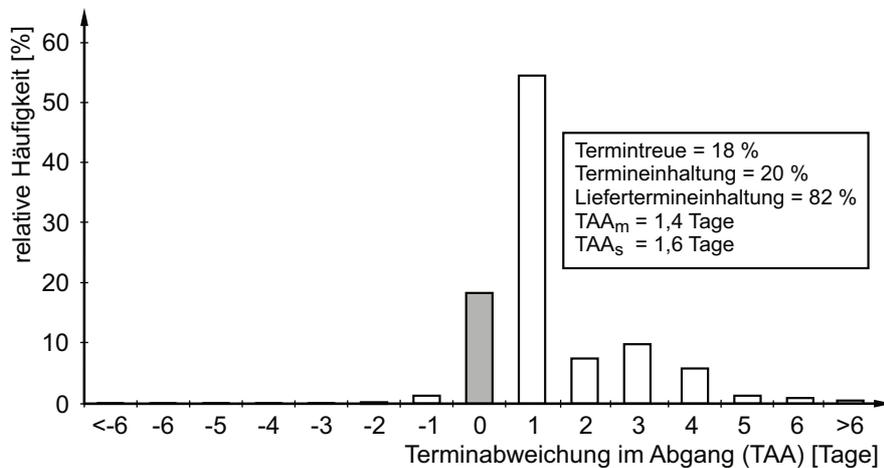
13720

**Bild 76: Modellierter reihenfolgebedingte Terminabweichung im Abgang für die letzten 50 % der Arbeitsvorgänge**

Auch hier zeigt die Faltung der modellierten reihenfolgebedingten Terminabweichung mit der tatsächlichen rückstandsbedingten Terminabweichung, welche resultierende Terminabweichungsverteilung zu erwarten wäre, wenn die Reihenfolgebildung keinen Einfluss auf den entstandenen Rückstand hätte. Bild 77 vergleicht die tatsächliche mit der modellierten Terminabweichungsverteilung und zeigt abermals, dass die Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin die Streuung der Terminabweichung und die Anzahl stark verspäteter Aufträge deutlich reduziert.



a) Terminabweichungsverteilung im Abgang für die letzten 50 Prozent der Arbeitsvorgänge



b) Modellierte Terminabweichungsverteilung im Abgang für die letzten 50 Prozent der Arbeitsvorgänge

13721

### Bild 77: Tatsächliche und modellierte Terminabweichungsverteilung letzte 50 % der Arbeitsvorgänge

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Fertigung versucht hat, die vorhandene rückstandsbedingte Terminabweichung mit der Reihenfolgebildung zu reduzieren. Dies gelingt aufgrund der logistischen Gesetze lediglich für eine ausgewählte Anzahl an Aufträgen und führt zu starken Verzögerungen anderer Aufträge. Folglich steigen zwar die Termineinhaltung und Termintreue aber als negative Nebeneffekte steigen auch die Streuung der Terminabweichung sowie die Anzahl der stark verspäteten Aufträge. Das Potenzial der Fertigung, Terminabweichungen im Zugang auszugleichen, bleibt weitestgehend ungenutzt.

Die Aufgaben, um eine hohe Termintreue zu erreichen, sind die Reihenfolgebildung und die Kapazitätssteuerung. Aus der Modellanwendung ergibt sich daher folgende Handlungsempfehlung für die betrachtete Fertigung: Sofern keine Leistungssteigerung durch rüstop optimale Reihenfolgen in der Auftragsterminierung berücksichtigt sind, sollten die Mitarbeiter an allen Arbeitssystemen

die Reihenfolge nach frühestem Plan-Endtermin bilden. Darüber hinaus sollte an jedem Arbeitssystem eine Messung des Rückstands erfolgen, um den Rückstand in einem vertretbaren Korridor über die Kapazitätsflexibilität regeln zu können. Steht keine ausreichende Kapazitätsflexibilität zur Verfügung, um den Rückstand abzubauen, ist es notwendig den Rückstand über die Auftragsannahme und -terminierung zu regeln. Um eine hohe Termintreue für alle Aufträge zu gewährleisten und starke Verspätungen zu vermeiden, sollte unbedingt vermieden werden, einzelne Aufträge durch Beschleunigungen pünktlich fertigzustellen und dafür andere Aufträge stark zu verzögern.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Mit diesem Kapitel schließt die Arbeit ab. Während Abschnitt 7.1 das Vorgehen und die gewonnenen Erkenntnisse zusammenfasst, zeigt Abschnitt 7.2, welche Aspekte für eine vollständige Modellierung der Termintreue offen geblieben sind.

### 7.1 Zusammenfassung

Die Termintreue ist für viele Unternehmen die wichtigste logistische Zielgröße. Um eine hohe Termintreue zu erreichen, müssen Unternehmen Reihenfolgeabweichungen und Rückstände vermeiden. In der industriellen Praxis ist dies jedoch nicht immer möglich, da beispielsweise fehlendes Material zu Reihenfolge- und Terminabweichungen im Zugang führen.

Diese Arbeit zeigt, inwieweit die Reihenfolgebildung an einzelnen Arbeitssystemen und in Fertigungsbereichen diese Abweichungen ausgleichen kann. Das entwickelte Modell quantifiziert den Einfluss der Reihenfolgebildung. Innerhalb der Modellentwicklung wurde zunächst die Reihenfolgeabweichung im Abgang für ein Arbeitssystem in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen modelliert. Die Einflussgrößen sind die Zugangsreihenfolgeabweichung, der Bestand am Arbeitssystem, die Anzahl der Maschinen am Arbeitssystem sowie die verwendete Reihenfolgeregel. Im zweiten Schritt wurde das Modell auf Fertigungsbereiche erweitert. Für beide Fälle lag der Fokus auf einer Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin. Eine wesentliche Erkenntnis des Modells ist, dass die sehr einfache Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin Zugangsreihenfolgeabweichungen sehr gut ausgleicht.

Darüber hinaus zeigt die Arbeit den Einfluss des Rückstands im Zugang auf den Rückstand im Abgang von Arbeitssystemen und Fertigungsbereichen. Für Fertigungsbereiche mit komplexen Materialflüssen beschreibt die Arbeit auch die Wirkung von Rückständen auf die Reihenfolgeabweichung.

Die durchgeführten Simulationsversuche evaluieren das Modell und bestätigen dessen Anwendbarkeit und Robustheit des Modells. Hierbei sind die Ergebnisse für einzelne Arbeitssysteme sehr gut. Für Fertigungsbereiche zeigt das Modell für die meisten Fälle gute Ergebnisse, sofern keine relevanten Rückstände innerhalb des Fertigungsbereichs vorliegen.

Die erfolgreiche Anwendung bei zwei Unternehmen mit unterschiedlichen Szenarien (ein Arbeitssystem und ein Fertigungsbereich) bestätigt die Praxistauglichkeit der erarbeiteten Modelle. Die benötigten Daten für die Modellanwendung sind in gängigen ERP-Systemen vorhanden oder werden aus diesen Daten ermittelt. Das Modell ist einfach verständlich und dennoch genau genug, sodass die Hürden der Modellanwendung gering sind.

## 7.2 Ausblick

Das entwickelte Modell ist für die Forschung und die Industrie eine sinnvolle Ergänzung, um sowohl das Verständnis als auch die Beherrschung der Termintreue zu verbessern. Dennoch besteht noch Forschungsbedarf in einigen Aspekten. So ist die Abschätzung der Verteilung der negativen reihenfolgebedingten Terminabweichung sehr rudimentär und könnte verbessert werden, um die Genauigkeit des Modells zu erhöhen.

Das entwickelte Modell geht davon aus, dass sich innerhalb eines Auftragsdurchlaufs alle Arbeitssysteme strikt an eine Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin halten (Reihenfolgedisziplin = 100 %). Diese Prämisse ist nicht immer haltbar, da einige Unternehmen daraufsetzen, die Leistung einzelner Arbeitssysteme z. B. durch eine rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung zu erhöhen. Diese kann zum Teil auch sehr stark von einer Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin abweichen und somit das Potenzial schmälern, Zugangsreihenfolgeabweichungen zu dämpfen. In diesem Zielkonflikt zwischen einer hohen Streuung der Terminabweichung und einer Leistungssteigerung ist es notwendig zunächst die Rüstaufwände möglichst weit zu reduzieren. Liegen dennoch hohe Rüstaufwände vor, die durch eine rüstoptimale Reihenfolgebildung zu Leistungssteigerungen führen, ist es ratsam, sinnvolle Vorgaben für die Reihenfolgebildung zu treffen, um die Streuung der Terminabweichung zu beherrschen (Engehausen & Löd- ding, 2017, S. 515).

Darüber hinaus ist die Wirkung von Rückständen einzelner Arbeitssysteme innerhalb von Fertigungsbereichen auf die Reihenfolgeabweichung im Zugang zwar in der Arbeit beschrieben, jedoch nicht modelliert. Hierbei liegt die Herausforderung darin, ein Modell zu entwickeln, das diesen Einfluss beschreibt und dennoch ausreichend einfach ist, um in der industriellen Praxis anwendbar zu sein.

In der bisherigen Literatur zur Termintreue fehlt zudem ein Vorgehen, das zur ökonomischen Bewertung der Termintreue anwendbar ist. Dieses sollte eine Positionierung zwischen der Höhe eines Lieferzeitpuffers, des Umlaufbestands innerhalb einer Fertigung, der Gestaltung der Kapazitätssteuerung und -flexibilität und einer Regelung von Rückständen durch die Auftragsannahme und -terminierung berücksichtigen.

## 8 Literaturverzeichnis

- Allahverdi, A. (2015). The third comprehensive survey on scheduling problems with setup times/costs. *European Journal of Operational Research: EJOR*, 246(2), S. 345–378.
- Baker, K. R. & Trietsch, D. (2009). *Principles of sequencing and scheduling*. Hoboken, N.J: John Wiley.
- Bechte, W. (1984). *Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Beichelt, F. (2003). *Teubner-Taschenbuch der Stochastik. Wahrscheinlichkeitstheorie, stochastische Prozesse, mathematische Statistik*. Stuttgart: Teubner.
- Bertsch, S. (2015). *Modellbasierte Berechnung der Termintreue*. Garbsen: PZH Verlag.
- Blackstone Jr., J. H., Phillips, D. T. & Hogg, G. L. (1982). A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations. *International Journal of Production Research*, 20(1), S. 27–45.
- Conway, R. W., Maxwell, W. L. & Miller, L. W. (1967). *Theory of scheduling*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
- Dombrowski, U. (1988). *Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Eley, M. (2012). *Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung Ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation"*. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.
- Engehausen, F. & Lödding, H. (2017). Modeling Lateness for Workstations with Setup Cycles. In H. Lödding, R. Riedel, K.-D. Thoben, G. von Cieminski & D. Kiritsis (Hrsg.), *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing* (S. 509–517). Cham: Springer International Publishing.
- Geissbauer, R., Roussel, J., Schrauf, S. & Strom, M. A. (2012). *Global Supply Chain Survey 2013. Next-generation supply chains: Efficient, fast and tailored* (pwc - PricewaterhouseCoopers LLP, Hrsg.). Zugriff am 18.10.2019. Verfügbar unter <https://www.pwc.com/gx/en/consulting-services/supply-chain/global-supply-chain-survey/assets/global-supply-chain-survey-2013.pdf>
- Graham, R. L., Lawler, E. L., Lenstra, J. K. & Kan, A.H.G.R. (1979). Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey. In *Annals of Discrete Mathematics* (Discrete Optimization II, Bd. 5, S. 287–326). Amsterdam: Elsevier.

- Grigutsch, M. (2016). *Modellbasierte Bewertung der logistischen Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit des Kundenauftragsentkopplungspunktes*. Garbsen: PZH Verlag.
- Hopp, W. J. & Spearman, M. L. (1996). *Factory physics. Foundations of Manufacturing Management*. New York: McGraw-Hill/Irwin.
- Jäger, M. (2000). *Kennliniengestützte Parametereinstellung von PPS-Systemen*. Dissertation. Universität Hannover, Hannover.
- Jodlbauer, H. & Gmainer, R. (2006). Erfolgsfaktor Liefertreue – Hohe Liefertreue sichert Wettbewerbsvorteile. Eine empirische Untersuchung österreichischer Produktionsunternehmen. *PPS-Management: Zeitschrift für ERP-Systeme in Produktion und Logistik*, 11(4), S. 44–47.
- Kuyumcu, A. (2013). *Modellierung der Termintreue in der Produktion*. Dissertation. Technische Universität Hamburg, Hamburg.
- Lödding, H. (2016). *Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration* (VDI-Buch, 3. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Lödding, H. & Kuyumcu, A. (2014). Modelling schedule reliability. *International Journal of Production Research*, 53(9), S. 2871–2884.
- Lödding, H. & Piontek, A. (2017). The surprising effectiveness of earliest operation due-date sequencing. *Production Planning & Control*, 28(5), S. 459–471.
- Lödding, H. & Piontek, A. (2018). Extending Little’s Law to single order throughput times. *Production Planning & Control*, 29(1), S. 1–8.
- Meißner, S. (2009). *Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung*. Dissertation. Technische Universität München, München.
- Nyhuis, P., Engehausen, F., Mayer, J., Pielmeier, J., Berger, C., Hempel, T. et al. (2016). *Aktuellen Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen* (Berichte aus dem IFA, Erstausgabe). Garbsen: TEWISS.
- Nyhuis, P., Engehausen, F., Rost, R., Quirico, M., Härtel, L., Hübner, M. et al. (2018). *PPS-Report 2017/18. Umfrageergebnisse* (Berichte aus dem IFA, Erstausgabe). Garbsen: TEWISS.
- Nyhuis, P. & Wiendahl, H.-P. (2012). *Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen* (VDI-Buch, 3. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Petermann, D. (1996). *Modellbasierte Produktionsregelung*. Düsseldorf: VDI-Verlag.

- Rabe, M., Spieckermann, S. & Wenzel, S. (2008). *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgebensemodelle und Techniken* (VDI-Buch). Berlin: Springer.
- Schneider, M. (2004). *Logistische Fertigungsbereichskennlinien*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Schuh, G. & Stich, V. (2013). *Produktion am Standort Deutschland. Ergebnisse der Untersuchung 2013*. Aachen: FIR an der RWTH Aachen.
- Soepenber, G. D., Land, M. J. & Gaalman, G. J. C. (2008). The order progress diagram: A supportive tool for diagnosing delivery reliability performance in make-to-order companies. *International Journal of Production Economics*, 112(1), S. 495–503.
- Thürer, M., Stevenson, M. & Silva, C. (2011). Three decades of workload control research: a systematic review of the literature. *International Journal of Production Research*, 49(23), S. 6905–6935.
- Trzyna, D. (2015). *Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion*. Dissertation. Technische Universität Hamburg, Hamburg.
- VDI - Verein Deutscher Ingenieure. *VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*. Düsseldorf: Beuth.
- Wiendahl, H.-P. (1997). *Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells*. München: Hanser.
- Wiendahl, H.-P. (2010). *Betriebsorganisation für Ingenieure* (7. Auflage). München: Hanser.
- Windt, K. (2001). *Engpaßorientierte Fremdvergabe in Produktionsnetzen*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Yu, K.-W. (2001). *Terminkennlinie. Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich*. Düsseldorf: VDI-Verlag.

## Anhang

### Ergebnisse der Simulationsversuche zu Abschnitt 4.2.1

Die folgenden Tabellen fassen die Versuchsergebnisse der innerhalb von Abschnitt 4.2.1 durchgeführten Versuche zusammen. Folgende Abkürzungen werden innerhalb der Tabellen verwendet:

$TAZ_{RA,s}$ :	Standardabweichung der reihenfolgebedingten Terminabweichung im Zugang [Tage]
$BA_m$ :	Mittlerer Bestand [-]
$BA_s$ :	Standardabweichung des Bestands [-]
$RAA_{ZU,s}$ :	Standardabweichung der Reihenfolgeabweichung im Zugang [-]
$RAA$ -Fehler:	Fehler der prognostizierten Reihenfolgeabweichung [-] mit Min: minimaler Fehler, Mittel: mittlerer absoluter Fehler, Max: maximaler Fehler
Zugang:	Im Simulationslauf gemessene Termineinhaltung im Zugang [-]
Sim.:	Simulierte Termineinhaltung [-]
Modell:	Modellierte Termineinhaltung [-]
Fehler:	Fehler zwischen modellierter und simulierter Termineinhaltung in Prozentpunkten [-]
$ZAU_v$ :	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]

Für alle durchgeführten Versuche gilt, dass die Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin erfolgt und eine Reihenfolgedisziplin von 100 % vorliegt. Darüber hinaus wird in jeder Versuchsreihe die Zugangsterminabweichung variiert.

**Versuchsreihen 1-5:**

<b>Eilaufträge</b>	Keine	<b>Anzahl Maschinen</b>	1 Maschine
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	1 Stunde (konstant)	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	0

**Versuchsreihe 1: mittlerer Plan-Bestand 3,8 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
1	0	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
2	1	2,7	2,0	8,6	-24,2	2,7	8,8	53%	54%	53%	-1%
3	2	3,4	2,9	17,4	-44,8	4,9	17,2	51%	52%	53%	1%
4	3	4,0	3,5	26,2	-70,3	6,9	23,7	50%	52%	52%	0%
5	4	4,6	4,2	34,7	-74,2	8,9	29,8	50%	52%	53%	1%
6	5	5,0	4,5	42,5	-70,4	10,3	33,6	51%	52%	53%	1%

**Versuchsreihe 2: mittlerer Plan-Bestand 12,3 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
7	0	12,3	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
8	1	10,6	2,3	8,6	-9,6	1,1	7,6	53%	85%	84%	-1%
9	2	11,1	3,4	17,4	-36,5	3,1	11,5	51%	69%	71%	2%
10	3	11,6	4,1	26,2	-52,6	4,7	17,4	50%	63%	65%	2%
11	4	12,1	4,9	34,7	-78,7	6,4	22,3	50%	61%	62%	1%
12	5	12,4	5,5	42,5	-73,8	7,8	27,2	51%	59%	60%	1%

**Versuchsreihe 3: mittlerer Plan-Bestand 21,2 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
13	0	21,2	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
14	1	19,5	2,7	8,6	-6,5	0,2	4,5	53%	98%	98%	0%
15	2	19,9	3,6	17,4	-10,1	1,8	9,9	51%	86%	84%	-2%
16	3	20,4	4,3	26,2	-13,0	3,5	10,4	50%	76%	77%	1%
17	4	20,9	5,0	34,7	-19,5	4,9	12,9	50%	71%	71%	0%
18	5	21,1	5,5	42,5	-36,9	6,1	18,1	51%	68%	68%	0%

**Versuchsreihe 4: mittlerer Plan-Bestand 30 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
19	0	30,0	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
20	1	28,3	3,5	8,6	-1,7	0,0	1,0	53%	100%	100%	0%
21	2	28,7	4,2	17,4	-9,3	0,8	7,7	51%	95%	93%	-2%
22	3	29,2	4,7	26,2	-13,0	2,3	10,2	50%	86%	86%	0%
23	4	29,7	5,3	34,7	-16,0	4,0	11,7	50%	79%	79%	0%
24	5	29,9	5,7	42,5	-19,0	5,4	13,9	51%	75%	75%	0%

**Versuchsreihe 5: mittlerer Plan-Bestand 38,8 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
25	0	38,8	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
26	1	37,1	4,4	8,6	0,0	0,0	0,0	53%	100%	100%	0%
27	2	37,5	5,0	17,4	-8,5	0,3	3,5	51%	98%	98%	0%
28	3	38,0	5,4	26,2	-10,0	1,3	10,0	50%	93%	92%	-1%
29	4	38,5	5,8	34,7	-13,5	3,0	11,5	50%	86%	86%	0%
30	5	38,6	6,1	42,5	-16,0	4,5	13,6	51%	81%	81%	0%

**Versuchsreihen 6-10:**

<b>Eilaufträge</b>	Keine	<b>Anzahl Maschinen</b>	1 Maschine
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	0,85 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	0,65

**Versuchsreihe 6: mittlerer Plan-Bestand 4,2 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
31	0	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
32	1	3,1	2,3	11,1	-28,6	3,3	11,4	52%	53%	56%	3%
33	2	3,8	3,5	21,7	-55,8	6,0	23,2	50%	52%	52%	0%
34	3	4,5	4,2	32,8	-78,5	8,5	32,5	50%	52%	53%	1%
35	4	5,3	4,8	43,9	-96,4	11,0	38,6	50%	52%	53%	1%
36	5	5,7	5,4	53,7	-97,0	12,8	45,0	50%	52%	53%	1%

**Versuchsreihe 7: mittlerer Plan-Bestand 14,9 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
37	0	14,9	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
38	1	12,9	3,3	10,9	-15,2	1,4	7,9	52%	85%	84%	-1%
39	2	13,4	4,2	21,8	-41,8	3,8	12,4	51%	70%	70%	0%
40	3	13,9	5,1	32,9	-78,4	5,8	20,6	51%	63%	65%	2%
41	4	14,6	6,2	43,6	-89,6	7,9	28,4	50%	60%	62%	2%
42	5	14,5	6,6	52,8	-88,6	9,7	35,4	51%	58%	60%	2%

**Versuchsreihe 8: mittlerer Plan-Bestand 25,6 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
43	0	25,6	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
44	1	23,9	4,3	11,1	-10,1	0,3	9,0	52%	98%	97%	-1%
45	2	24,4	4,7	21,9	-11,6	2,3	12,4	51%	86%	85%	-1%
46	3	25,1	5,6	33,1	-17,6	4,5	14,1	50%	76%	77%	1%
47	4	25,0	5,9	43,3	-25,7	5,9	16,3	50%	71%	71%	0%
48	5	25,5	6,3	53,8	-42,4	7,2	23,6	50%	67%	68%	1%

**Versuchsreihe 9: mittlerer Plan-Bestand 37 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
49	0	37,0	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
50	1	34,5	5,3	10,9	-5,5	0,0	2,5	52%	100%	100%	0%
51	2	35,5	5,8	22,2	-17,5	1,1	11,5	50%	94%	93%	-1%
52	3	35,7	6,3	33,1	-15,3	3,1	13,7	50%	86%	84%	-2%
53	4	36,2	6,7	44,1	-19,0	5,3	17,2	50%	79%	79%	0%
54	5	36,1	7,1	53,5	-22,0	6,6	17,1	51%	74%	74%	0%

**Versuchsreihe 10: mittlerer Plan-Bestand 48,1 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
55	0	48,1	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
56	1	46,1	6,6	11,1	0,0	0,0	0,0	52%	100%	100%	0%
57	2	45,6	7,0	21,8	-10,4	0,4	8,6	51%	98%	97%	-1%
58	3	46,2	7,1	32,8	-15,8	1,8	11,2	50%	92%	91%	-1%
59	4	46,6	7,5	43,8	-18,4	4,0	14,6	50%	86%	85%	-1%
60	5	46,7	7,7	53,6	-20,3	5,8	15,7	50%	81%	80%	-1%

**Versuchsreihen 11-15:**

<b>Eilaufträge</b>	Keine	<b>Anzahl Maschinen</b>	1 Maschine
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	0,85 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	1

**Versuchsreihe 11: mittlerer Plan-Bestand 4,5 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
61	0	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0 %
62	1	3,3	2,7	11,3	-32,8	3,4	10,2	51%	74%	73%	-1%
63	2	4,0	3,6	22,3	-59,6	6,2	21,4	52%	52%	53%	1%
64	3	4,8	4,4	33,2	-77,6	8,7	31,4	52%	52%	53%	1%
65	4	5,5	5,4	44,9	-92,0	11,1	39,0	52%	52%	53%	1%
66	5	5,7	5,5	53,6	-95,0	12,9	45,0	52%	52%	52%	0%

**Versuchsreihe 12: mittlerer Plan-Bestand 15 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
67	0	15,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
68	1	13,6	3,6	11,5	-11,4	1,5	8,6	51%	93%	93%	0%
69	2	13,8	4,3	22,5	-42,7	3,7	13,8	51%	78%	79%	1%
70	3	14,7	5,5	34,4	-76,8	6,1	19,2	51%	70%	72%	2%
71	4	14,9	6,4	44,5	-99,2	8,1	32,8	52%	65%	67%	2%
72	5	15,2	6,6	54,6	-85,7	9,8	39,3	52%	62%	64%	2%

**Versuchsreihe 13: mittlerer Plan-Bestand 26,4 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
73	0	26,4	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
74	1	24,9	5,1	11,6	-13,1	0,3	9,0	51%	98%	97%	-1%
75	2	24,7	5,1	22,1	-17,3	2,3	12,7	51%	86%	85%	-1%
76	3	25,6	5,7	34,0	-20,4	4,6	16,6	51%	76%	76%	0%
77	4	26,1	6,3	44,8	-22,0	6,1	19,5	52%	70%	72%	2%
78	5	26,1	6,4	54,6	-46,4	7,5	28,6	52%	67%	68%	1%

**Versuchsreihe 14: mittlerer Plan-Bestand 38,6 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
79	0	38,6	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
80	1	36,0	6,3	11,7	-10,0	0,0	1,0	51%	100%	100%	0%
81	2	36,1	5,9	23,0	-14,9	1,1	13,1	51%	94%	93%	-1%
82	3	36,7	6,7	33,8	-16,3	3,2	20,7	51%	86%	85%	-1%
83	4	37,0	6,9	44,6	-20,0	5,2	18,0	52%	79%	79%	0%
84	5	37,5	7,4	54,9	-24,0	6,9	17,4	52%	75%	75%	0%

**Versuchsreihe 15: mittlerer Plan-Bestand 49,2 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZU <sub>s</sub>	RAA-Fehler			Zugang	Termineinhaltung		
					Min	Mittel	Max		Sim.	Modell	Fehler
85	0	49,2	7,3	0,0	0,0	0,0	0,0	100%	100%	100%	0%
86	1	48,2	7,5	11,7	-3,8	0,0	0,0	51%	100%	100%	0%
87	2	47,9	7,5	23,2	-12,1	0,4	11,0	51%	98%	98%	0%
88	3	48,6	7,5	34,5	-19,4	2,0	13,6	51%	92%	91%	-1%
89	4	48,2	8,1	45,2	-19,8	4,1	15,2	51%	86%	85%	-1%
90	5	48,0	7,5	54,4	-20,0	5,8	22,0	52%	81%	80%	-1%

**Versuchsreihen 16-20:**

<b>Eilaufträge</b>	10 %	<b>Anzahl Maschinen</b>	1 Maschine
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	0,8 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	1

**Versuchsreihe 16: mittlerer Plan-Bestand 4,2 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
91	0	4,2	0,1	0,0	-4,0	0,4	8,0	100%	100%	100%	0%
92	1	3,2	2,7	11,6	-28,4	3,6	16,6	52%	53%	57%	4%
93	2	3,8	3,8	23,4	-76,0	6,6	24,0	52%	53%	54%	1%
94	3	4,1	3,7	34,6	-85,5	9,2	31,5	51%	52%	54%	2%
95	4	4,5	4,4	45,4	-109,6	12,0	40,4	51%	52%	52%	0%
96	5	4,5	4,3	56,3	-99,3	14,7	45,7	51%	52%	53%	1%

**Versuchsreihe 17: mittlerer Plan-Bestand 14,3 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
97	0	14,3	2,8	0,0	-2,0	0,0	2,0	100%	100%	100%	0%
98	1	12,4	3,9	11,6	-22,4	1,9	12,4	52%	80%	81%	1%
99	2	12,8	4,7	23,4	-50,2	4,3	15,8	51%	66%	68%	2%
100	3	13,2	5,5	34,7	-76,4	6,8	25,6	50%	61%	64%	3%
101	4	13,2	6,3	45,5	-102,2	9,0	40,8	51%	59%	61%	2%
102	5	13,0	6,7	56,6	-108,8	11,1	38,2	51%	57%	59%	2%

**Versuchsreihe 18: mittlerer Plan-Bestand 24,8 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
103	0	24,8	4,2	0,0	-2,0	0,0	3,0	100%	100%	100%	0%
104	1	23,2	4,7	12,1	-22,8	1,0	9,0	52%	93%	93%	0%
105	2	23,1	5,1	23,1	-14,9	3,0	14,2	50%	81%	81%	0%
106	3	23,4	6,2	34,7	-23,6	5,3	21,7	51%	72%	73%	1%
107	4	24,2	6,9	46,8	-76,4	7,0	27,6	50%	67%	69%	2%
108	5	23,6	7,9	56,3	-90,1	8,2	37,9	51%	65%	66%	1%

**Versuchsreihe 19: mittlerer Plan-Bestand 35,1 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
109	0	35,1	5,3	0,0	-3,0	0,0	1,0	100%	100%	100%	0%
110	1	32,7	5,4	11,8	-13,3	0,8	20,7	52%	95%	95%	0%
111	2	34,1	6,2	24,1	-24,5	2,2	12,1	50%	89%	88%	-1%
112	3	34,3	6,4	35,8	-23,7	4,3	21,3	50%	81%	81%	0%
113	4	33,6	6,5	45,6	-23,0	5,9	22,9	51%	75%	76%	1%
114	5	34,3	7,1	57,5	-30,0	7,7	33,7	51%	70%	71%	1%

**Versuchsreihe 20: mittlerer Plan-Bestand 45 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
115	0	45,0	6,8	0,0	-7,0	0,0	2,0	100%	100%	100%	0%
116	1	42,7	7,4	11,8	-20,3	1,0	13,7	51%	94%	95%	1%
117	2	44,0	7,2	23,6	-26,6	1,6	12,0	50%	93%	93%	0%
118	3	43,6	7,1	34,5	-26,6	3,2	16,6	50%	87%	87%	0%
119	4	44,4	7,4	46,4	-23,0	5,3	21,4	50%	81%	81%	0%
120	5	45,2	7,7	58,0	-31,0	7,1	22,1	51%	76%	77%	1%

**Versuchsreihen 21-25:**

<b>Eilaufträge</b>	20 %	<b>Anzahl Maschinen</b>	1 Maschine
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	0,8 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	1

**Versuchsreihe 21: mittlerer Plan-Bestand 4,2 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
121	0	4,2	0,1	0,0	-7,0	1,0	8,0	100%	100%	100%	0%
122	1	3,2	2,7	13,0	-37,6	4,0	16,4	53%	73%	73%	0%
123	2	3,4	3,1	25,1	-71,0	7,2	25,0	53%	64%	64%	0%
124	3	3,6	3,4	37,1	-96,4	10,6	32,6	53%	61%	62%	1%
125	4	3,8	3,9	49,0	-116,9	13,7	42,1	53%	59%	60%	1%
126	5	3,7	3,7	58,2	-119,6	16,1	49,4	54%	58%	59%	1%

**Versuchsreihe 22: mittlerer Plan-Bestand 14 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
127	0	14,0	2,9	0,0	-2,0	0,0	1,0	100%	100%	100%	0%
128	1	11,6	3,9	12,6	-25,3	2,5	12,7	51%	89%	88%	-1%
129	2	11,8	4,9	24,2	-61,0	5,2	23,0	51%	73%	74%	1%
130	3	11,5	5,7	35,8	-82,5	7,7	31,5	51%	67%	68%	1%
131	4	11,2	6,2	46,0	-102,5	10,2	37,5	51%	63%	65%	2%
132	5	10,5	6,9	56,2	-108,7	12,4	45,3	52%	61%	63%	2%

**Versuchsreihe 23: mittlerer Plan-Bestand 23,3 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
133	0	23,3	3,8	0,0	-2,0	0,0	22,0	100%	100%	100%	0%
134	1	20,9	4,5	12,5	-20,8	1,6	16,2	51%	93%	94%	1%
135	2	21,4	5,6	24,7	-24,8	3,9	20,2	51%	83%	84%	1%
136	3	21,6	6,3	37,0	-49,0	6,0	21,0	51%	74%	75%	1%
137	4	21,2	7,1	47,5	-81,1	7,9	37,9	51%	70%	71%	1%
138	5	20,3	6,4	57,5	-93,1	9,0	47,9	52%	67%	68%	1%

**Versuchsreihe 24: mittlerer Plan-Bestand 32,2 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
139	0	32,2	5,8	0,0	-6,0	0,0	30,0	100%	100%	100%	0%
140	1	30,1	5,9	12,5	-25,0	1,5	26,0	52%	94%	94%	0%
141	2	30,7	6,3	25,0	-29,5	3,3	21,5	50%	89%	88%	-1%
142	3	30,5	6,3	36,4	-22,7	5,2	23,3	50%	81%	81%	0%
143	4	30,5	7,8	48,0	-29,0	7,2	32,9	51%	76%	76%	0%
144	5	30,6	8,7	59,7	-66,3	9,2	41,7	51%	72%	72%	0%

**Versuchsreihe 25: mittlerer Plan-Bestand 42,1 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
145	0	42,1	6,3	0,0	-11,0	0,0	2,0	100%	100%	100%	0%
146	1	40,5	6,8	12,8	-27,8	1,8	38,2	51%	94%	93%	-1%
147	2	40,6	7,1	25,2	-31,2	2,9	34,8	51%	91%	90%	-1%
148	3	41,0	8,2	37,5	-24,0	4,9	25,0	50%	85%	86%	1%
149	4	40,2	8,6	48,7	-27,0	7,0	38,2	51%	79%	79%	0%
150	5	39,4	7,9	58,0	-36,0	8,4	39,2	51%	76%	76%	0%

**Versuchsreihen 26-30:**

<b>Eilaufträge</b>	keine	<b>Anzahl Maschinen</b>	2 Maschinen
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	0,9 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	1

**Versuchsreihe 26: mittlerer Plan-Bestand 7,2 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
151	0	7,2	0,0	0,0	-1,0	0,4	10,0	100%	100%	100%	0%
152	1	4,6	4,1	20,6	-66,7	6,0	22,3	51%	73%	72%	-1%
153	2	5,4	5,7	41,4	-115,2	10,9	39,8	51%	62%	62%	0%
154	3	6,3	6,8	62,0	-171,6	15,6	53,4	51%	59%	59%	0%
155	4	6,9	7,9	82,0	-166,6	20,6	67,4	51%	57%	58%	1%
156	5	7,3	8,6	99,7	-158,2	24,3	80,8	51%	56%	56%	0%

**Versuchsreihe 27: mittlerer Plan-Bestand 27,7 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
157	0	27,7	4,3	0,0	-1,0	0,4	9,0	100%	100%	100%	0%
158	1	23,7	5,5	21,1	-21,3	2,7	16,7	51%	93%	93%	0%
159	2	23,8	6,9	41,3	-46,9	6,2	23,8	51%	77%	77%	0%
160	3	24,0	8,2	61,1	-160,0	9,7	37,0	51%	66%	67%	1%
161	4	24,6	9,1	82,3	-167,1	12,8	55,9	51%	65%	66%	1%
162	5	24,7	10,2	101,3	-167,3	16,3	73,7	52%	62%	63%	1%

**Versuchsreihe 28: mittlerer Plan-Bestand 48,2 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
163	0	48,2	6,6	0,0	-1,0	0,4	10,0	100%	100%	100%	0%
164	1	44,7	7,3	21,2	-17,3	0,8	12,7	51%	99%	99%	0%
165	2	44,4	7,5	41,7	-24,6	4,0	19,4	51%	90%	89%	-1%
166	3	44,5	8,4	61,8	-26,0	7,5	28,5	51%	80%	80%	0%
167	4	45,0	9,5	82,1	-40,1	10,1	32,0	51%	74%	74%	0%
168	5	45,7	10,3	103,1	-66,1	12,2	46,9	51%	70%	70%	0%

**Versuchsreihe 29: mittlerer Plan-Bestand 67,4 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
169	0	67,4	8,6	0,0	-1,0	0,4	8,0	100%	100%	100%	0%
170	1	65,2	9,5	21,2	-11,8	0,4	10,0	51%	100%	100%	0%
171	2	65,2	9,4	41,7	-25,8	1,9	20,2	51%	96%	96%	0%
172	3	65,0	9,7	62,1	-27,0	5,5	24,0	51%	88%	88%	0%
173	4	65,1	10,0	82,1	-36,0	9,0	26,1	51%	82%	81%	-1%
174	5	65,3	11,2	101,3	-46,0	11,7	38,3	51%	76%	77%	1%

**Versuchsreihe 30: mittlerer Plan-Bestand 88,8 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
175	0	88,8	11,6	0,0	-1,0	0,4	8,0	100%	100%	100%	0%
176	1	85,7	11,9	21,1	-13,3	0,4	10,0	51%	100%	100%	0%
177	2	85,1	10,9	41,5	-24,9	0,9	11,1	51%	99%	98%	-1%
178	3	85,4	10,5	62,1	-22,6	3,3	27,4	51%	93%	93%	0%
179	4	85,5	11,3	82,1	-28,5	6,9	29,5	51%	87%	87%	0%
180	5	85,8	11,8	101,8	-36,0	10,6	35,8	52%	82%	82%	0%

**Versuchsreihen 31-35:**

<b>Eilaufträge</b>	keine	<b>Anzahl Maschinen</b>	4 Maschinen
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	0,9 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	1

**Versuchsreihe 31: mittlerer Plan-Bestand 5,4 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
181	0	5,4	0,0	0,0	-3,0	0,9	13,0	100%	100%	100%	0%
182	1	3,8	3,9	20,7	-59,9	6,6	30,1	51%	71%	68%	-3%
183	2	4,5	5,7	41,9	-118,8	11,5	45,2	51%	61%	60%	-1%
184	3	5,2	6,6	61,6	-179,9	16,1	72,1	51%	58%	57%	-1%
185	4	6,2	8,1	83,0	-171,1	21,0	70,9	51%	56%	56%	0%
186	5	6,3	8,5	101,0	-159,7	25,3	93,3	51%	55%	55%	0%

**Versuchsreihe 32: mittlerer Plan-Bestand 22,1 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
187	0	22,1	4,3	0,0	-3,0	1,5	16,0	100%	100%	100%	-1%
188	1	21,0	5,2	20,6	-33,9	3,8	21,0	51%	90%	90%	0%
189	2	21,7	6,3	41,4	-99,3	7,3	28,7	51%	74%	75%	1%
190	3	21,9	7,7	61,8	-164,5	11,0	45,5	51%	64%	65%	1%
191	4	22,5	9,3	82,1	-184,2	15,0	58,8	51%	63%	64%	1%
192	5	22,7	10,3	102,7	-176,2	19,2	74,8	51%	60%	62%	2%

**Versuchsreihe 33: mittlerer Plan-Bestand 42,5 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
193	0	42,5	6,1	0,0	-3,0	1,5	15,0	100%	100%	100%	0%
194	1	42,4	7,4	21,1	-19,6	1,8	20,4	51%	98%	98%	0%
195	2	42,5	7,2	41,7	-23,5	4,9	24,5	51%	87%	87%	0%
196	3	43,1	7,8	63,1	-34,9	8,2	31,1	51%	78%	78%	0%
197	4	43,0	8,7	82,8	-55,3	10,3	35,0	51%	72%	73%	1%
198	5	42,9	10,3	101,5	-74,3	12,6	55,7	52%	68%	69%	1%

**Versuchsreihe 34: mittlerer Plan-Bestand 63,4 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
199	0	63,4	8,8	0,0	-3,0	1,5	16,0	100%	100%	100%	0%
200	1	62,1	8,9	20,8	-10,9	1,6	19,1	51%	99%	100%	1%
201	2	62,2	9,8	41,0	-27,8	2,8	19,2	51%	95%	95%	0%
202	3	62,8	9,3	62,1	-31,2	6,3	28,8	51%	87%	86%	-1%
203	4	64,0	9,9	83,2	-34,0	9,7	31,0	51%	80%	80%	0%
204	5	64,2	10,7	103,2	-50,0	12,4	41,2	51%	75%	76%	1%

**Versuchsreihe 35: mittlerer Plan-Bestand 83,5 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	RAAZ <sub>U,s</sub>	RAA-Fehler			Termineinhaltung			
					Min	Mittel	Max	Zugang	Sim.	Modell	Fehler
205	0	83,5	11,0	0,0	-3,0	1,5	17,0	100%	100%	100%	0%
206	1	82,2	11,6	20,8	-4,0	1,5	15,0	51%	100%	100%	0%
207	2	83,2	11,4	41,6	-19,8	1,8	19,0	51%	98%	98%	0%
208	3	82,6	11,1	61,8	-30,4	4,1	26,6	51%	92%	92%	0%
209	4	83,5	11,7	82,3	-30,5	7,7	32,5	51%	86%	86%	0%
210	5	84,3	11,9	102,6	-43,0	11,3	37,3	51%	81%	80%	-1%

### Ergebnisse der Simulationsversuche zu Abschnitt 4.2.2

Die folgenden Versuchsergebnisse haben den Materialfluss aus Bild 41 als Grundlage. Die darin dargestellte Fertigung besteht aus 10 Arbeitssystemen und fertigt 40 unterschiedliche Produkte mit variierenden Arbeitsplänen, die aus 2-5 Arbeitsvorgängen bestehen.

Die Berechnung der reihenfolgebedingten Termineinhaltung erfolgt auf Basis der drei entwickelten Modelle zur Berechnung der minimalen Reihenfolgeabweichung (Gleichungen (37)–(39)). Die Gleichungen sind im Folgenden nochmal aufgeführt und den verwendeten Indizes zugeordnet.

---

Modell ZDF Gleichung (37): 
$$RAA_{\min} = \left( \sum_{j=1}^{\text{AnzAVG}} \frac{\text{ZDF}_{\text{mg},j}}{2} + \text{ZDF}_{i,j} \right) \cdot LA_{\text{FE},m} - RgA_{\text{Plan}}$$

---

Modell ZAU<sub>v</sub> Gleichung (38): 
$$RAA_{\min} = \sum_{j=1}^{\text{AnzAVG}} \frac{LA_{m,FE}}{LA_{m,j}} \cdot (0,5 \cdot \text{ZAU}_{v,j}^2 + 1,5) - RgA_{\text{Plan}}$$

---

Modell ZAU<sub>v</sub> = 1 Gleichung (39): 
$$RAA_{\min} = \sum_{j=1}^{\text{AnzAVG}} 2 \cdot \frac{LA_{\text{FE},m}}{LA_{j,m}} - RgA_{\text{Plan}}$$

---

Die folgenden Tabellen fassen die Versuchsergebnisse der innerhalb von Abschnitt 4.2.2 durchgeführten Versuche zusammen. Folgende Abkürzungen werden innerhalb der Tabellen verwendet:

TAZ <sub>RA,s</sub> :	Standardabweichung der reihenfolgebedingten Terminabweichung im Zugang [Tage]
BA <sub>m</sub> :	Mittlerer Bestand [-]
BA <sub>s</sub> :	Standardabweichung des Bestands [-]
TE <sub>ZU</sub> :	Termineinhaltung im Zugang [-]
TE <sub>RA</sub> :	Im Simulationslauf gemessene reihenfolgebedingte Termineinhaltung [-]
Modell ZDF:	Modellierte Termineinhaltung auf Basis von Gleichung (37) [-]
Modell ZAU <sub>v</sub> :	Modellierte Termineinhaltung auf Basis von Gleichung (38) [-]
Modell ZAU <sub>v</sub> =1:	Modellierte Termineinhaltung auf Basis von Gleichung (39) [-]

Für alle durchgeführten Versuche gilt, dass die Reihenfolgebildung an jedem Arbeitssystem nach frühestem Plan-Endtermin erfolgt und eine Reihenfolgedisziplin von 100 % vorliegt. Darüber hinaus wird in jeder Versuchsreihe die Zugangsterminabweichung variiert.

Die Werte für die Termineinhaltung sind auf eine Stelle hinter dem Komma gerundet. Die berechneten Fehler sind mit den exakten Werten der Termineinhaltung berechnet und daraufhin auf eine Stelle hinter dem Komma gerundet. Daher sind einige Fehlerwerte innerhalb der Tabellen nicht nachrechenbar (Bspw. Versuchsreihe 1, Versuch mit TAZ<sub>RA,s</sub>=1, TE<sub>Fehler 1</sub>).

**Versuchsreihen 1-6:**

<b>Eilaufträge</b>	keine	<b>Plan-Leistung</b>	20 Aufträge
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	2,5 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	1,2

**Versuchsreihe 1: mittlerer Plan-Bestand 10 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
1	0	10	3	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
2	1	22	7	69%	75%	73%	-2,3%	72%	-3,0%	75%	-0,3%
3	2	23	7	60%	64%	63%	-0,7%	63%	-1,0%	65%	1,0%
4	3	24	8	57%	60%	60%	-0,4%	59%	-0,7%	61%	0,4%
5	4	26	9	56%	58%	58%	0,1%	58%	-0,6%	58%	0,3%
6	5	27	9	54%	56%	57%	0,6%	57%	0,6%	57%	1,0%
7	6	28	10	54%	56%	56%	0,2%	56%	-0,1%	56%	0,5%

**Versuchsreihe 2: mittlerer Plan-Bestand 68 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
8	0	68	17	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
9	1	78	20	69,8%	99,7%	99,4%	-0,4%	99,4%	-0,3%	99,6%	-0,1%
10	2	77	19	60,2%	94,7%	94,3%	-0,4%	94,8%	0,1%	95,5%	0,8%
11	3	78	19	57,0%	86,0%	86,7%	0,7%	86,7%	0,8%	87,7%	1,7%
12	4	78	20	55,3%	77,6%	80,2%	2,6%	80,0%	2,4%	80,9%	3,2%
13	5	80	21	54,6%	72,9%	75,5%	2,6%	75,8%	2,9%	76,6%	3,7%
14	6	79	20	53,6%	69,7%	72,3%	2,6%	72,3%	2,6%	72,9%	3,3%

**Versuchsreihe 3: mittlerer Plan-Bestand 133 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
15	0	133	35	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
16	1	143	37	69,4%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
17	2	143	36	60,4%	99,7%	99,4%	-0,2%	99,4%	-0,3%	99,5%	-0,2%
18	3	143	37	56,9%	98,2%	97,3%	-0,8%	97,3%	-0,9%	97,6%	-0,5%
19	4	143	36	55,4%	93,9%	93,2%	-0,8%	93,3%	-0,7%	93,7%	-0,2%
20	5	143	36	54,3%	89,9%	89,7%	-0,2%	89,6%	-0,3%	90,1%	0,3%
21	6	147	36	54,0%	85,7%	85,7%	0,0%	85,8%	0,1%	86,1%	0,5%

**Versuchsreihe 4: mittlerer Plan-Bestand 200 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
22	0	200	54	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
23	1	209	56	69,5%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
24	2	206	56	60,2%	100%	99,9%	-0,1%	99,9%	-0,1%	99,9%	0,0%
25	3	206	55	56,9%	99,7%	99,2%	-0,5%	99,2%	-0,5%	99,3%	-0,4%
26	4	205	54	55,4%	98,5%	97,5%	-0,9%	97,4%	-1,1%	97,6%	-0,9%
27	5	207	55	54,3%	96,6%	95,5%	-1,1%	95,4%	-1,3%	95,6%	-1,1%
28	6	205	53	53,6%	94,5%	93,3%	-1,2%	93,4%	-1,1%	93,7%	-0,8%

**Versuchsreihe 5: mittlerer Plan-Bestand 262 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
29	0	262	74	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
30	1	270	76	69,5%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
31	2	273	76	60,1%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
32	3	269	76	56,9%	99,9%	99,8%	-0,1%	99,8%	-0,1%	99,8%	-0,1%
33	4	274	77	55,6%	99,7%	99,3%	-0,4%	99,2%	-0,4%	99,3%	-0,3%
34	5	272	76	54,3%	98,9%	98,0%	-0,9%	98,0%	-0,9%	98,1%	-0,8%
35	6	269	74	53,6%	97,6%	96,3%	-1,3%	96,3%	-1,4%	96,4%	-1,2%

**Versuchsreihe 6: mittlerer Plan-Bestand 318 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
36	0	318	95	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
37	1	331	98	69,5%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
38	2	332	98	60,4%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
39	3	331	98	56,9%	100%	100%	0,0%	99,9%	0,0%	99,9%	0,0%
40	4	330	98	55,4%	99,9%	99,7%	-0,2%	99,7%	-0,3%	99,7%	-0,3%
41	5	335	97	54,2%	99,7%	99,1%	-0,6%	99,0%	-0,6%	99,1%	-0,6%
42	6	331	98	53,8%	98,9%	98,0%	-0,9%	98,0%	-0,9%	98,1%	-0,8%

**Versuchsreihen 7-12:**

<b>Eilaufträge</b>	keine	<b>Plan-Leistung</b>	25 Aufträge
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	1,8 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	2

**Versuchsreihe 7: mittlerer Plan-Bestand 12 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
43	0	11	4	100%	97%	100%	2,7%	100%	2,7%	100%	2,7%
44	1	27	8	70%	78%	69%	-9,1%	63%	-15,2%	80%	1,2%
45	2	28	9	60%	65%	61%	-3,6%	58%	-7,2%	68%	2,4%
46	3	29	10	57%	60%	58%	-2,6%	56%	-4,7%	62%	2,0%
47	4	31	10	55%	58%	57%	-1,4%	55%	-3,0%	60%	1,8%
48	5	33	11	55%	57%	56%	-1,1%	55%	-2,2%	59%	1,6%
49	6	34	12	54%	56%	55%	-0,4%	54%	-1,2%	58%	2,1%

**Versuchsreihe 8: mittlerer Plan-Bestand 78 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
50	0	78	20	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
51	1	91	23	69,6%	99,8%	98,3%	-1,5%	99,1%	-0,6%	99,7%	0%
52	2	89	22	60,2%	94,4%	91,8%	-2,6%	92,4%	-2,0%	95,5%	1,1%
53	3	91	23	57,1%	84,9%	83,8%	-1,1%	84,3%	-0,6%	88,4%	3,5%
54	4	91	23	55,5%	76,5%	78,1%	1,6%	78,3%	1,8%	81,9%	5,4%
55	5	91	22	54,3%	71,8%	73,2%	1,5%	73,5%	1,7%	76,8%	5,1%
56	6	92	23	53,8%	69,4%	70,6%	1,2%	70,7%	1,3%	73,6%	4,2%

**Versuchsreihe 9: mittlerer Plan-Bestand 155 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
57	0	155	41	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
58	1	167	43	69,4%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
59	2	167	43	60,3%	99,7%	99,1%	-0,6%	99,1%	-0,6%	99,5%	-0,2%
60	3	166	42	57,0%	97,7%	95,8%	-1,9%	95,9%	-1,8%	97,0%	-0,7%
61	4	166	42	55,4%	94,2%	91,8%	-2,4%	92,1%	-2,2%	93,9%	-0,3%
62	5	165	41	54,3%	89,9%	88,0%	-1,9%	87,8%	-2,1%	90,0%	0,1%
63	6	167	41	53,7%	85,6%	84,0%	-1,6%	83,8%	-1,9%	86,0%	0,3%

**Versuchsreihe 10: mittlerer Plan-Bestand 231 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
64	0	231	62	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
65	1	242	65	69,3%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
66	2	240	63	60,4%	100%	99,9%	-0,1%	99,9%	-0,1%	99,9%	-0,1%
67	3	243	64	57,1%	99,6%	98,8%	-0,7%	98,8%	-0,8%	99,0%	-0,5%
68	4	239	64	55,3%	98,5%	97,0%	-1,5%	97,0%	-1,5%	97,6%	-0,9%
69	5	239	63	54,3%	96,3%	94,4%	-1,9%	94,4%	-1,9%	95,3%	-1,0%
70	6	242	64	53,8%	93,3%	91,1%	-2,2%	91,0%	-2,3%	92,2%	-1,1%

**Versuchsreihe 11: mittlerer Plan-Bestand 300 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
71	0	300	84	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
72	1	310	87	69,7%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
73	2	311	88	60,2%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
74	3	313	87	56,9%	100%	99,7%	-0,3%	99,8%	-0,2%	99,7%	-0,1%
75	4	314	87	55,3%	99,6%	98,9%	-0,7%	98,9%	-0,8%	98,9%	-0,5%
76	5	311	86	54,3%	98,7%	97,2%	-1,5%	97,2%	-1,5%	97,2%	-1,1%
77	6	318	86	53,8%	97,3%	95,7%	-1,5%	95,8%	-1,5%	95,7%	-1,0%

**Versuchsreihe 12: mittlerer Plan-Bestand 374 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
78	0	374	111	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
79	1	387	114	69,6%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
80	2	387	114	60,2%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
81	3	384	111	57,0%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
82	4	389	113	55,4%	99,9%	99,5%	-0,4%	99,6%	-0,3%	99,6%	-0,3%
83	5	385	110	54,4%	99,6%	98,8%	-0,8%	98,9%	-0,7%	99,0%	-0,6%
84	6	385	113	53,8%	99,0%	97,7%	-1,3%	97,7%	-1,3%	97,9%	-1,1%

**Versuchsreihen 13-18:**

<b>Eilaufträge</b>	keine	<b>Plan-Leistung</b>	15 Aufträge
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	3,4 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	0,5

**Versuchsreihe 13: mittlerer Plan-Bestand 7 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
85	0	7	2	100%	99,7%	100%	0,3%	100%	0,3%	100%	0,3%
86	1	16	5	69,5%	75,2%	71,2%	-4,1%	68,7%	-6,5%	63,2%	-12,1%
87	2	17	6	60,2%	62,8%	61,9%	-0,9%	60,8%	-2,0%	57,1%	-5,7%
88	3	18	7	56,6%	59,4%	59,3%	-0,1%	58,3%	-1,1%	56,0%	-3,4%
89	4	20	7	54,9%	58,0%	57,6%	-0,4%	56,9%	-1,1%	55,2%	-2,8%
90	5	21	7	54,3%	56,7%	56,7%	0,0%	56,2%	-0,5%	54,7%	-1,9%
91	6	22	8	53,8%	56,2%	56,0%	-0,2%	55,9%	-0,3%	54,6%	-1,6%

**Versuchsreihe 14: mittlerer Plan-Bestand 48 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
92	0	48	12	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
93	1	56	14	69,4%	99,8%	99,7%	-0,1%	99,7%	-0,1%	99,6%	-0,2%
94	2	57	14	60,2%	94,2%	94,9%	0,8%	94,8%	0,6%	93,5%	-0,7%
95	3	57	14	56,6%	85,7%	87,6%	1,8%	87,3%	1,6%	85,7%	0%
96	4	57	14	55,0%	78,8%	81,2%	2,3%	81,0%	2,1%	79,8%	1,0%
97	5	57	15	54,0%	73,3%	76,7%	3,4%	76,3%	2,9%	74,9%	1,5%
98	6	58	14	53,6%	70,0%	73,0%	3,0%	72,7%	2,6%	71,9%	1,9%

**Versuchsreihe 15: mittlerer Plan-Bestand 96 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
99	0	96	24	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
100	1	104	26	69,7%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
101	2	104	26	60,2%	99,6%	99,4%	-0,2%	99,4%	-0,2%	99,3%	-0,3%
102	3	103	26	56,6%	97,6%	97,0%	-0,5%	97,1%	-0,5%	96,7%	-0,8%
103	4	103	26	55,1%	94,2%	93,8%	-0,4%	93,5%	-0,7%	93,1%	-1,1%
104	5	102	26	54,2%	90,2%	89,6%	-0,6%	89,2%	-1,0%	88,5%	-1,7%
105	6	105	26	53,4%	85,9%	86,3%	0,4%	86,0%	0,1%	85,4%	-0,5%

**Versuchsreihe 16: mittlerer Plan-Bestand 143 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
106	0	143	39	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
107	1	150	41	69,5%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
108	2	150	40	60,3%	100%	99,9%	-0,1%	99,9%	-0,1%	99,9%	-0,1%
109	3	150	41	56,7%	99,6%	99,4%	-0,2%	99,3%	-0,3%	99,3%	-0,3%
110	4	150	40	55,2%	98,4%	97,6%	-0,8%	97,6%	-0,8%	97,4%	-1,0%
111	5	146	40	54,1%	96,6%	94,9%	-1,6%	94,8%	-1,7%	94,6%	-2,0%
112	6	148	38	53,6%	94,3%	93,1%	-1,1%	93,2%	-1,1%	92,9%	-1,4%

**Versuchsreihe 17: mittlerer Plan-Bestand 186 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
113	0	186	53	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
114	1	196	55	69,7%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
115	2	194	54	60,3%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
116	3	196	55	56,5%	100%	99,9%	-0,1%	99,9%	-0,1%	99,8%	-0,1%
117	4	196	55	54,8%	99,5%	99,1%	-0,4%	99,0%	-0,5%	99,0%	-0,5%
118	5	189	54	54,1%	98,7%	97,3%	-1,4%	97,3%	-1,4%	97,2%	-1,5%
119	6	198	54	53,6%	97,3%	96,2%	-1,1%	96,2%	-1,1%	96,1%	-1,2%

**Versuchsreihe 18: mittlerer Plan-Bestand 230 Aufträge**

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
				TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
120	0	230	69	100%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
121	1	239	71	69,5%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
122	2	241	71	60,3%	100%	100%	0%	100%	0%	100%	0%
123	3	239	71	56,8%	100%	99,9%	-0,1%	99,9%	-0,1%	99,9%	-0,1%
124	4	238	69	55,0%	99,9%	99,8%	-0,2%	99,8%	-0,2%	99,8%	-0,2%
125	5	229	70	53,9%	99,5%	98,7%	-0,7%	98,7%	-0,8%	98,7%	-0,8%
126	6	241	69	53,5%	99,0%	98,0%	-1,1%	98,0%	-1,0%	97,9%	-1,1%

**Versuchsreihen 19-20:**

<b>Eilaufträge</b>	10 %	<b>Plan-Leistung</b>	20 Aufträge
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	2 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	1,2

**Versuchsreihe 19: Standardabweichung der reihenfolgebedingten Terminabweichung im Zugang 3 Tage**

ID	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
			TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
127	23	8	57,4%	59,0%	57,9%	1,0%	58,2%	0,8%	59,5%	-0,5%
128	73	19	57,4%	83,1%	83,7%	-0,5%	84,3%	-1,2%	85,6%	-2,5%
129	130	33	57,4%	94,9%	93,8%	1,1%	94,0%	1,0%	94,4%	0,5%
130	188	51	57,0%	97,7%	97,0%	0,7%	96,9%	0,9%	97,1%	0,6%
131	247	69	57,1%	98,3%	97,7%	0,6%	97,6%	0,6%	97,6%	0,6%
132	307	91	57,0%	98,4%	97,9%	0,5%	97,9%	0,6%	97,9%	0,6%

**Versuchsreihe 20: Standardabweichung der reihenfolgebedingten Terminabweichung im Zugang 6 Tage**

ID	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
			TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
133	26	10	54,1%	56,2%	55,8%	0,4%	55,9%	0,4%	56,6%	-0,4%
134	72	18	53,9%	67,4%	69,9%	-2,5%	70,6%	-3,2%	71,4%	-4,1%
135	131	32	54,0%	83,5%	83,6%	-0,1%	83,9%	-0,4%	84,4%	-0,9%
136	190	48	53,6%	91,6%	90,5%	1,1%	90,7%	0,9%	91,1%	0,5%
137	248	67	53,6%	95,5%	94,3%	1,2%	94,3%	1,1%	94,5%	1,0%
138	300	86	53,6%	97,0%	95,8%	1,2%	95,8%	1,2%	95,9%	1,1%

**Versuchsreihen 21-22:**

<b>Eilaufträge</b>	20 %	<b>Plan-Leistung</b>	20 Aufträge
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	2 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	1,2

**Versuchsreihe 21: Standardabweichung der reihenfolgebedingten Terminabweichung im Zugang 3 Tage**

ID	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
			TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
139	22	7	57,9%	60,8%	58,8%	2,0%	58,6%	2,2%	59,9%	0,9%
140	66	16	58,7%	78,2%	80,7%	-2,5%	81,3%	-3,0%	82,4%	-4,2%
141	118	30	58,5%	90,0%	90,1%	-0,1%	89,9%	0,1%	90,3%	-0,4%
142	171	45	58,5%	91,3%	91,1%	0,2%	90,9%	0,5%	91,1%	0,2%
143	222	63	58,4%	92,0%	91,6%	0,4%	91,5%	0,5%	91,8%	0,2%
144	271	81	58,4%	91,9%	91,9%	0,1%	91,7%	0,2%	91,8%	0,1%

**Versuchsreihe 22: Standardabweichung der reihenfolgebedingten Terminabweichung im Zugang 6 Tage**

ID	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Simuliert		Modell ZDF		Modell ZAU <sub>v</sub>		Modell ZAU <sub>v=1</sub>	
			TE <sub>ZU</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>	TE <sub>RA</sub>	TE <sub>Fehler</sub>
145	23	10	55,4%	56,6%	56,0%	0,6%	55,7%	0,8%	56,6%	-0,1%
146	67	18	55,1%	65,8%	68,4%	-2,6%	68,7%	-2,9%	69,6%	-3,8%
147	119	29	54,6%	79,2%	80,1%	-0,9%	80,1%	-0,9%	80,7%	-1,5%
148	171	44	54,4%	85,3%	85,5%	-0,2%	85,6%	-0,3%	86,0%	-0,7%
149	223	60	54,3%	89,0%	88,5%	0,5%	88,5%	0,5%	88,7%	0,3%
150	273	80	54,1%	90,4%	90,2%	0,2%	90,1%	0,2%	90,2%	0,1%

### Ergebnisse der Simulationsversuche zu Abschnitt 4.2.3

Für alle durchgeführten Versuche gilt, dass die Reihenfolgebildung an jedem Arbeitssystem nach frühestem Plan-Endtermin erfolgt und eine Reihenfolgedisziplin von 100 % vorliegt.

#### Versuchsreihe 1:

<b>Eilaufträge</b>	keine	<b>Plan-Leistung</b>	20 Aufträge
<b>Mittlerer Plan-Bestand</b>	variiert	<b>TAZ<sub>RA,s</sub></b>	variiert
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	2,3 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	1,2

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Termtoleranz: 0 Tage			Termtoleranz: ±1 Tag			Termtoleranz: ±2 Tage		
				RFB-Termtreue			RFB-Termtreue			RFB-Termtreue		
				Sim.	Mod.	Fehler	Sim.	Mod.	Fehler	Sim.	Mod.	Fehler
1	3	78	19	65%	59%	-6%	91%	93%	1%	96%	96%	0%
2	4	78	20	29%	26%	-3%	78%	87%	9%	89%	91%	3%
3	5	80	21	14%	31%	17%	59%	59%	0%	80%	74%	-5%
4	6	79	20	11%	24%	14%	41%	50%	9%	66%	64%	-2%
5	6	147	36	43%	47%	4%	83%	76%	-7%	91%	92%	1%
6	6	205	53	85%	70%	-15%	95%	95%	0%	97%	96%	0%
7	6	269	74	95%	86%	-9%	98%	98%	-1%	99%	98%	0%
8	6	331	98	98%	92%	-6%	99%	99%	-1%	99%	99%	0%
9	1	22	7	51%	37%	-13%	93%	93%	1%	99%	98%	-1%
10	2	23	7	26%	19%	-7%	65%	59%	-6%	86%	82%	-4%
11	3	24	8	16%	10%	-7%	47%	44%	-3%	68%	64%	-4%
12	4	26	9	12%	9%	-3%	35%	36%	1%	54%	54%	0%
13	5	27	9	9%	7%	-2%	27%	31%	4%	44%	47%	2%
14	6	27	10	8%	7%	0%	22%	29%	6%	38%	42%	5%
				Mittelwert = -3%			Mittelwert = 1%			Mittelwert = 0%		

RFB Reihenfolgebedingte

**Versuchsreihe 2:**

<b>Eilaufträge</b>	keine	<b>Plan-Leistung</b>	25 Aufträge
<b>Mittlerer Plan-Bestand</b>	variiert	<b>TAZ<sub>RA,s</sub></b>	variiert
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	1,8 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	2

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Termtoleranz: 0 Tage			Termtoleranz: ±1 Tag			Termtoleranz: ±2 Tage		
				RFB-Termtreue			RFB-Termtreue			RFB-Termtreue		
				Sim.	Mod.	Fehler	Sim.	Mod.	Fehler	Sim.	Mod.	Fehler
15	3	91	23	64%	50%	-14%	90%	91%	1%	96%	95%	0%
16	4	91	23	31%	16%	-14%	75%	85%	10%	88%	90%	2%
17	5	91	22	14%	24%	10%	57%	54%	-3%	78%	71%	-7%
18	6	92	23	10%	24%	14%	40%	47%	7%	64%	61%	-3%
19	6	167	41	44%	26%	-18%	81%	88%	7%	91%	91%	1%
20	1	27	8	55%	22%	-33%	93%	89%	-4%	99%	96%	-3%
21	2	28	9	27%	18%	-9%	67%	54%	-13%	86%	75%	-10%
22	3	29	10	16%	8%	-8%	47%	40%	-7%	69%	60%	-9%
23	4	31	10	12%	7%	-5%	35%	33%	-2%	54%	50%	-4%
24	5	33	11	10%	6%	-4%	27%	29%	2%	44%	45%	0%
25	6	34	12	8%	6%	-2%	23%	27%	4%	37%	40%	4%
26	3	91	23	64%	50%	-14%	90%	91%	1%	96%	95%	0%
27	4	91	23	31%	16%	-14%	75%	85%	10%	88%	90%	2%
28	5	91	22	14%	24%	10%	57%	54%	-3%	78%	71%	-7%
				Mittelwert = -7%			Mittelwert = 1%			Mittelwert = -2%		

**Versuchsreihe 3:**

<b>Eilaufträge</b>	keine	<b>Plan-Leistung</b>	15 Aufträge
<b>Mittlerer Plan-Bestand</b>	variiert	<b>TAZ<sub>RA,s</sub></b>	variiert
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	3,4 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	0,5

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Termtoleranz: 0 Tage			Termtoleranz: ±1 Tag			Termtoleranz: ±2 Tage		
				RFB-Termtreue			RFB-Termtreue			RFB-Termtreue		
				Sim.	Mod.	Fehler	Sim.	Mod.	Fehler	Sim.	Mod.	Fehler
29	3	57	14	65%	59%	-6%	91%	93%	2%	96%	97%	1%
30	4	57	14	33%	29%	-3%	79%	87%	8%	89%	92%	3%
31	5	57	15	15%	34%	19%	58%	60%	1%	80%	75%	-5%
32	6	58	14	64%	50%	-14%	90%	91%	1%	96%	95%	0%
33	3	103	26	96%	91%	-5%	99%	99%	0%	100%	99%	0%
34	6	105	26	47%	37%	-10%	84%	90%	6%	91%	93%	1%
35	3	150	41	99%	98%	-1%	100%	100%	0%	100%	100%	0%
36	3	196	55	100%	99%	0%	100%	100%	0%	100%	100%	0%
37	3	239	71	100%	100%	0%	100%	100%	0%	100%	100%	0%
38	1	16	5	51%	35%	-15%	93%	94%	1%	99%	99%	0%
39	2	17	6	25%	17%	-8%	65%	58%	-6%	86%	82%	-4%
40 <sup>1)</sup>	3	18	7	15,7%	10,8%	-4,8%	48,5%	43,7%	-4,8%	68,8%	63,4%	-5,4%
41	4	20	7	12%	9%	-3%	36%	37%	1%	55%	55%	-1%
42	5	21	7	10%	8%	-2%	29%	32%	4%	45%	48%	3%
				Mittelwert = -4%			Mittelwert = 1%			Mittelwert = 0%		

1) Dargestellt in Bild 49

**Versuchsreihe 4:**

<b>Eilaufträge</b>	10 %	<b>Plan-Leistung</b>	20 Aufträge
<b>Mittlerer Plan-Bestand</b>	variiert	<b>TAZ<sub>RA,s</sub></b>	variiert
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	2 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	1,2

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Termtoleranz: 0 Tage			Termtoleranz: ±1 Tag			Termtoleranz: ±2 Tage		
				RFB-Termtreue			RFB-Termtreue			RFB-Termtreue		
				Sim.	Mod.	Fehler	Sim.	Mod.	Fehler	Sim.	Mod.	Fehler
43	3	23	8	15%	8%	-7%	45%	41%	-4%	66%	60%	-5%
44	3	73	19	53%	48%	-5%	88%	91%	3%	95%	95%	0%
45	6	26	10	8%	7%	-1%	23%	27%	5%	37%	41%	4%
46	6	72	18	9%	20%	11%	34%	45%	11%	60%	59%	-1%
47	6	131	32	31%	34%	3%	79%	70%	-8%	88%	90%	1%
				Mittelwert = 0%			Mittelwert = 1%			Mittelwert = 0%		

**Versuchsreihe 5:**

<b>Eilaufträge</b>	20 %	<b>Plan-Leistung</b>	20 Aufträge
<b>Mittlerer Plan-Bestand</b>	variiert	<b>TAZ<sub>RA,s</sub></b>	variiert
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	2 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	1,2

ID	TAZ <sub>RA,s</sub>	BA <sub>m</sub>	BA <sub>s</sub>	Termtoleranz: 0 Tage			Termtoleranz: ±1 Tag			Termtoleranz: ±2 Tage		
				RFB-Termtreue			RFB-Termtreue			RFB-Termtreue		
				Sim.	Mod.	Fehler	Sim.	Mod.	Fehler	Sim.	Mod.	Fehler
48	3	22	7	17%	11%	-6%	45%	43%	-3%	67%	62%	-6%
49	3	66	16	37%	35%	-2%	82%	88%	6%	92%	93%	1%
50	6	23	10	8%	6%	-2%	23%	27%	4%	38%	41%	3%
51	6	67	18	9%	20%	12%	29%	44%	15%	55%	58%	3%
52	6	119	29	13%	34%	21%	66%	60%	-7%	82%	74%	-8%
53	6	171	44	22%	17%	-6%	82%	88%	6%	89%	90%	1%
				Mittelwert = 3%			Mittelwert = 4%			Mittelwert = -1%		

**Ergebnisse der Simulationsversuche zu Abschnitt 4.3.1****Versuchsreihe 1 mit ZAU<sub>v</sub> = 0,4**

Versuchsreihe 1 (ZAU <sub>m</sub> = 1,28 ; ZAU <sub>s</sub> = 0,51 ; ZAU <sub>v</sub> = 0,4)							
ID	RSA <sub>ZU,m</sub>	BA <sub>m</sub>	RSA <sub>AB,m</sub>	L <sub>m</sub>	RS <sub>ZU,m</sub> (Std)	B <sub>m</sub> (Std)	RS <sub>AB,m</sub> (Std)
1	0,0	6,2	0,0	7,9	0,0	7,9	0,0
2	1,2	5,1	0,0	7,8	1,5	6,4	0,0
3	2,2	4,0	0,0	7,9	2,8	5,1	0,0
4	3,3	2,8	0,0	7,8	4,2	3,7	0,0
5	4,3	1,9	0,0	7,8	5,5	2,4	0,1
6	5,4	1,4	0,6	7,8	6,9	1,8	0,9
7	6,3	1,3	1,5	7,8	8,1	1,8	2,0
8	7,3	1,4	2,4	7,9	9,3	1,9	3,2
9	8,3	1,3	3,4	7,8	10,6	1,8	4,5

**Versuchsreihe 2 mit  $ZAU_v = 1,0$** 

Versuchsreihe 2 ( $ZAU_m = 1,16$ ; $ZAU_s = 1,14$ ; $ZAU_v = 1,0$ )							
ID	RSA <sub>ZU,m</sub>	BA <sub>m</sub>	RSA <sub>AB,m</sub>	L <sub>m</sub>	RS <sub>ZU,m</sub> (Std)	B <sub>m</sub> (Std)	RS <sub>AB,m</sub> (Std)
10	0,0	6,9	0,0	8,0	0,0	8,0	0,0
11	1,3	5,6	0,0	8,0	1,5	6,5	0,0
12	2,5	4,4	0,0	8,0	3,2	4,9	0,1
13	3,7	3,6	0,2	8,0	4,3	4,1	0,4
14	4,6	2,9	0,5	8,0	5,6	3,3	0,9
15	5,6	2,6	1,3	8,0	6,8	3,1	1,9
16	6,7	2,1	1,9	7,9	7,8	2,8	2,8
17	7,7	2,2	3,1	8,1	9,5	3,1	4,6
18	8,8	2,3	4,3	8,1	10,8	3,3	6,0

**Versuchsreihe 3 mit  $ZAU_v = 1,6$** 

Versuchsreihe 3 ( $ZAU_m = 0,78$ ; $ZAU_s = 1,25$ ; $ZAU_v = 1,6$ )							
ID	RSA <sub>ZU,m</sub>	BA <sub>m</sub>	RSA <sub>AB,m</sub>	L <sub>m</sub>	RS <sub>ZU,m</sub> (Std)	B <sub>m</sub> (Std)	RS <sub>AB,m</sub> (Std)
19	0,0	9,8	0,0	7,7	0,0	7,7	0,0
20	2,2	7,7	0,1	7,6	1,7	6,0	0,1
21	3,6	6,9	0,4	7,6	2,7	5,4	0,4
22	3,6	6,9	0,4	7,6	2,7	5,4	0,4
23	5,7	5,5	1,5	7,6	4,7	4,7	1,9
24	6,6	5,1	2,1	7,5	5,4	4,5	2,4
25	7,5	4,9	2,6	7,6	6,0	4,5	2,9
26	8,7	4,8	3,7	7,6	6,9	4,5	3,8
27	9,7	5,1	4,9	7,7	7,8	4,7	4,9

**Ergänzung zur Versuchsreihe 2 zur Untersuchung der Untergrenze des Rückstands**

Versuchsreihe 2 ( $ZAU_m = 1,16$ ; $ZAU_s = 1,14$ ; $ZAU_v = 1,0$ )							
ID	RSA <sub>ZU,m</sub>	BA <sub>m</sub>	RSA <sub>AB,m</sub>	L <sub>m</sub>	RS <sub>ZU,m</sub> (Std)	B <sub>m</sub> (Std)	RS <sub>AB,m</sub> (Std)
18 (ohne Kapaflex.)	8,8	2,3	4,3	8,1	10,8	3,3	6,0
18 (Kapaflex. 2 Std)	8,8	0,9	2,9	8,1	10,8	1,4	4,1
18 (Kapaflex. 5 Std)	8,8	0,2	2,2	8,1	10,8	0,4	3,1
18 (Kapaflex. 11 Std)	8,8	0,1	2,1	8,1	10,8	0,1	2,8

(Mittelwert der Untergrenze des Rückstands 2,7 Stunden bzw. 2 Aufträge)

### Ergebnisse der Simulationsversuche zu Abschnitt 4.3.2

In den durchgeführten Versuchen liegt derselbe Materialfluss vor wie in den Versuchen aus Abschnitt 4.2.2.

Arbeits- system	RSA <sub>ZU,m,FE</sub> = 20 Aufträge RSA <sub>ZU,s,FE</sub> = 3 Aufträge		RSA <sub>ZU,m,FE</sub> = 40 Aufträge RSA <sub>ZU,s,FE</sub> = 4,5 Aufträge		RSA <sub>ZU,m,FE</sub> = 60 Aufträge RSA <sub>ZU,s,FE</sub> = 6 Aufträge	
	RSA <sub>ZU</sub>	RSA <sub>AB</sub>	RSA <sub>ZU</sub>	RSA <sub>AB</sub>	RSA <sub>ZU</sub>	RSA <sub>AB</sub>
1	4,7	0,3	9,7	5,3	14,6	10,2
2	5,1	0,3	10,6	5,8	16,1	11,3
3	7,2	0,1	14,9	7,9	22,6	15,6
4	1,8	0,0	6,3	1,1	11,4	6,2
5	1,0	0,0	4,3	0,7	9,3	5,4
6	0,1	0,0	4,9	0,0	14,1	5,7
7	0,4	0,0	11,1	2,3	21,8	13,0
8	0,0	0,0	1,2	0,0	5,9	1,8
9	0,0	0,0	1,4	0,0	5,3	2,3
10	0,0	0,0	-0,8	0,0	3,7	0,0

RSA<sub>ZU,m,FE</sub>: mittlerer Rückstand im Zugang des Fertigungsbereichs

RSA<sub>ZU,s,FE</sub>: Standardabweichung des Rückstands im Zugang des Fertigungsbereichs

### Ergebnisse der Simulationsversuche zu Abschnitt 4.3.3

#### Versuchsreihe 1: Variation des mittleren Rückstands (Rückstandsstreuung=0)

Arbeitssystem 1				Arbeitssystem 2				Arbeitssystem 3	
RSA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	LA <sub>m</sub> [-]	Anteil ZU AS3	RSA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	LA <sub>m</sub> [-]	Anteil ZU AS3	BA <sub>m</sub> [-]	LA <sub>m</sub> [-]
0	11	11	0,5	variiert	variiert	11	0,5	variiert	22

ID	Arbeitssystem 2		Arbeitssystem 3		
	RSA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	RSA <sub>ZU,m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	RAA <sub>ZU,s</sub> [-]
1 <sup>1)</sup>	0,0	12	0,0	23	0,0
2	1,0	13	1,0	22	1,3
3 <sup>1)</sup>	1,9	14	1,9	21	2,2
4 <sup>2)</sup>	2,9	15	2,9	20	3,2
5 <sup>1)</sup>	3,8	16	3,8	19	4,1
6	4,8	17	4,8	18	5,0
7	5,8	18	5,8	17	5,9
8	6,7	19	6,7	16	6,8
9	7,7	20	7,7	15	7,7
10	8,6	21	8,6	14	8,7

<sup>1)</sup> Verteilungen in Bild 57a-c dargestellt

<sup>2)</sup> Verteilung in Bild 59b dargestellt

**Versuchsreihe 2: Variation der Standardabweichung des Rückstands**

Arbeitssystem 1				Arbeitssystem 2				Arbeitssystem 3	
RSA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	LA <sub>m</sub> [-]	Anteil ZU AS3	RSA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	LA <sub>m</sub> [-]	Anteil ZU AS3	BA <sub>m</sub> [-]	LA <sub>m</sub> [-]
0	11	11	0,5	variiert	variiert	11	0,5	variiert	22

ID	Arbeitssystem 2			Arbeitssystem 3		
	RSA <sub>m</sub> <sup>1)</sup> [-]	RSA <sub>s</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	RS <sub>ZU,m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	RAA <sub>ZU,s</sub> [-]
11 <sup>2)</sup>	0,0	0,0	12	0,0	23	0,0
12	0,2	0,9	12	0,2	23	1,1
13 <sup>2)</sup>	0,3	1,7	12	0,3	22	1,9
14	0,7	2,4	13	0,7	22	2,5
15 <sup>2)</sup>	1,2	3,1	13	1,2	22	3,3
16	1,7	3,8	14	1,7	21	4,0
17	2,1	4,2	14	2,1	21	4,5
18	2,8	4,7	15	2,8	20	5,2
19	3,3	5,1	15	3,3	19	5,9
20	4,0	5,4	16	4,0	19	6,6

<sup>1)</sup> Der mittlere Rückstand variiert zwangsläufig aufgrund der Streuung des Rückstands. Die vorhandene Kapazitätsflexibilität erlaubt bei hoher Streuung im Mittel keine rückstandsfreie Fertigung.

<sup>2)</sup> Verteilungen in Bild 58a-c dargestellt

**Versuchsreihe 3: Variation des Anteils am Zugang zu Arbeitssystem 3 (Rückstandsstreuung=0)**

Arbeitssystem 1				Arbeitssystem 2				Arbeitssystem 3	
RSA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	LA <sub>m</sub> [-]	Anteil ZU AS3	RSA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	LA <sub>m</sub> [-]	Anteil ZU AS3	BA <sub>m</sub> [-]	LA <sub>m</sub> [-]
0	12	12	0,35	variiert	variiert	21	0,65	variiert	33

ID	Arbeitssystem 2		Arbeitssystem 3		
	RSA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	RS <sub>ZU,m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	RAA <sub>ZU,s</sub> [-]
21	0,0	22	0,0	34	0,0
22	1,0	23	1,0	33	1,0
23	1,9	24	1,9	32	1,8
24 <sup>1)</sup>	2,9	25	2,9	31	2,5
25	3,8	26	3,8	30	3,3
26	4,8	27	4,8	29	4,0
27	5,8	28	5,8	28	4,8
28	6,7	29	6,7	27	5,5
29	7,7	30	7,7	26	6,2
30	8,6	31	8,6	25	7,0

<sup>1)</sup> Verteilung in Bild 59a dargestellt

Arbeitssystem 1				Arbeitssystem 2				Arbeitssystem 3	
RSA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	LA <sub>m</sub> [-]	Anteil ZU AS3	RSA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	LA <sub>m</sub> [-]	Anteil ZU AS3	BA <sub>m</sub> [-]	LA <sub>m</sub> [-]
0	10	10	0,65	variiert	variiert	6	0,35	variiert	16

ID	Arbeitssystem 2		Arbeitssystem 3		
	RSA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	RS <sub>ZU,m</sub> [-]	BA <sub>m</sub> [-]	RAA <sub>ZU,s</sub> [-]
31	0,0	6	0,0	16	0,0
32	1,0	7	1,0	15	1,5
33	1,9	8	1,9	14	2,8
34 <sup>1)</sup>	2,9	9	2,9	13	4,1
35	3,8	10	3,8	12	5,4
36	4,8	11	4,8	11	6,7
37	5,8	12	5,8	10	8,0
38	6,7	13	6,7	9	9,3
39	7,7	14	7,7	8	10,6
40	8,6	15	8,6	7	11,9

<sup>1)</sup> Verteilung in Bild 59c dargestellt

### Ergebnisse der Simulationsversuche zu Abschnitt 4.4.1

Für alle durchgeführten Versuche gilt, dass die Reihenfolgebildung an jedem Arbeitssystem nach frühestem Plan-Endtermin erfolgt und eine Reihenfolgedisziplin von 100 % vorliegt. Die Termintreue ist mit einer Termintoleranz von 0 Tagen berechnet.

#### Versuchsreihe 1-2:

<b>Eilaufträge</b>	keine	<b>Plan-Leistung</b>	13 Aufträge
<b>Plan-Bestand</b>	15 Aufträge	<b>TE<sub>zu</sub></b>	51 %
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	0,9 Stunde	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	0,7

#### Versuchsreihe 1: variierender Rückstand, TAZ<sub>RA,s</sub> 1 Tag

ID	BA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>s</sub> [-]	RSA <sub>m</sub> [-]	RSA <sub>s</sub> [-]	Termineinhaltung			Termintreue			TAA-Fehler			
					Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Min. [-]	Abs. Mittel [-]	Max. [-]	
1	15,4	3,6	0,0	0,0	90,5%	86,5%	-4,0%	79,8%	72,7%	-7,2%	1,3%	-7,2%	3,1%	
2	19,5	11,8	2,0	11,6	61,5%	62,4%	0,9%	35,2%	36,3%	1,1%	0,6%	-2,5%	1,5%	
3	23,2	15,8	5,1	15,7	52,4%	53,4%	1,0%	26,8%	28,5%	1,7%	0,5%	-1,3%	1,6%	
4	1,8	1,4	-16,9	2,9	96,5%	86,0%	-10,5%	17,1%	25,9%	8,8%	4,8%	-22,1%	10,9%	
5	6,7	7,6	-11,2	8,0	89,9%	82,4%	-7,4%	25,6%	24,6%	-1,0%	1,8%	-6,8%	3,9%	
6	11,3	11,1	-6,7	11,3	80,1%	75,9%	-4,1%	29,2%	27,1%	-2,1%	0,6%	-1,7%	1,4%	
7	35,4	4,7	19,8	2,1	0,0%	0,2%	0,2%	0,0%	4,6%	4,6%	0,1%	-0,3%	0,2%	
8	38,9	12,9	21,2	12,4	12,7%	12,0%	-0,8%	11,0%	14,5%	3,4%	1,0%	-3,1%	4,9%	
9	39,4	18,2	21,0	17,9	20,2%	23,4%	3,2%	13,3%	19,2%	5,9%	2,0%	-7,8%	5,1%	
							Mittelwert = 2,4%					Mittelwert = 1,7%		

Hinweis: Der Plan-Bestand wird in den Versuchen 2-9 aufgrund des Rückstands nicht erreicht

**Versuchsreihe 2: variierender Rückstand, TAZ<sub>RA,s</sub> 3 Tage**

ID	BA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>s</sub> [-]	RSA <sub>m</sub> [-]	RSA <sub>s</sub> [-]	Termineinhaltung			Termintreue			TAA-Fehler		
					Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Min. [-]	Abs. Mittel [-]	Max. [-]
10	16,2	5,4	0,0	0,0	68%	64%	-4%	16,8%	28,7%	11,9%	3,1%	-15,2%	11,3%
11 <sup>1)</sup>	20,3	12,4	2,1	11,5	59%	57%	-2%	20,5%	20,8%	0,4%	0,8%	-2,6%	1,5%
12	23,4	16,3	4,7	15,8	52%	52%	1%	17,5%	18,5%	1,0%	0,6%	-1,8%	1,5%
13	2,2	2,8	-16,9	3,5	73%	66%	-7%	12,3%	12,3%	0,0%	1,2%	-3,2%	2,0%
14	7,0	8,1	-11,7	8,5	69%	65%	-4%	12,7%	14,7%	2,0%	1,3%	-4,5%	3,2%
15	11,8	11,7	-7,0	12,1	65%	62%	-3%	13,8%	17,0%	3,2%	1,3%	-4,5%	3,9%
16	36,0	6,0	19,8	2,1	6%	18%	12%	6,4%	2,7%	-3,7%	2,5%	-18,9%	12,1%
17	39,3	13,6	21,0	12,6	22%	23%	1%	14,5%	17,9%	3,3%	1,0%	-3,9%	3,2%
18	40,0	19,1	21,2	18,3	25%	31%	5%	12,7%	18,3%	5,6%	2,3%	-6,4%	6,3%
Mittelwert = 0%							Mittelwert = 2,6%						

Hinweis: Der Plan-Bestand wird in den Versuchen 11-18 aufgrund des Rückstands nicht erreicht

<sup>1)</sup> Verteilungen in Bild 60 dargestellt

**Versuchsreihe 3-4:**

<b>Eilaufträge</b>	keine	<b>Plan-Leistung</b>	13 Aufträge
<b>Plan-Bestand</b>	30 Aufträge	<b>TE<sub>zu</sub></b>	51 %
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	0,9 Stunde	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	0,7

**Versuchsreihe 3: variierender Rückstand, TAZ<sub>RA,s</sub> 1 Tag**

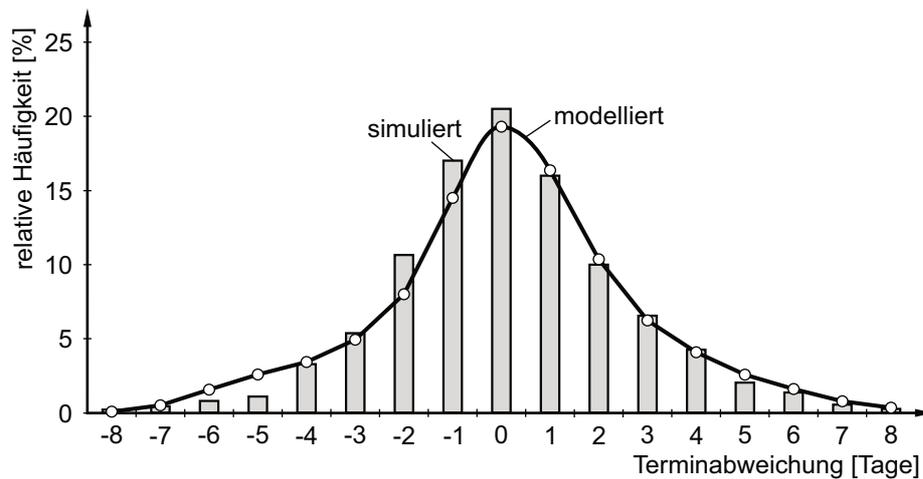
ID	BA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>s</sub> [-]	RSA <sub>m</sub> [-]	RSA <sub>s</sub> [-]	Termineinhaltung			Termintreue			TAA-Fehler		
					Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Min. [-]	Abs. Mittel [-]	Max. [-]
19	28,4	4,5	0,0	0,0	99%	98%	-1%	97,5%	96,3%	-1,3%	0,2%	-1,3%	0,7%
20	32,1	12,9	1,4	12,4	64%	65%	1%	37,5%	39,6%	2,1%	0,4%	-1,9%	1,2%
21	33,0	17,5	1,7	17,3	58%	58%	0%	26,0%	27,9%	1,9%	0,6%	-2,0%	2,2%
22	8,6	4,2	-19,9	0,8	99%	97%	-1%	7,9%	7,9%	0,0%	2,8%	-9,9%	8,0%
23	14,2	10,5	-16,4	10,4	96%	84%	-11%	19,2%	20,9%	1,7%	1,1%	-4,0%	1,5%
24	18,7	13,9	-12,6	13,8	88%	78%	-10%	23,9%	24,0%	0,1%	0,8%	-4,5%	0,2%
25	48,3	5,6	19,8	2,1	0%	0%	0%	0,0%	4,7%	4,7%	0,0%	-0,2%	0,1%
26	51,8	13,3	20,9	12,6	13%	12%	-1%	11,3%	15,2%	3,9%	0,9%	-3,2%	5,0%
27	50,9	19,2	19,5	18,9	23%	27%	4%	13,7%	18,7%	5,0%	1,6%	-8,2%	4,7%
Mittelwert = -2%							Mittelwert = 2%						

Hinweis: Der Plan-Bestand wird in den Versuchen 20-27 aufgrund des Rückstands nicht erreicht

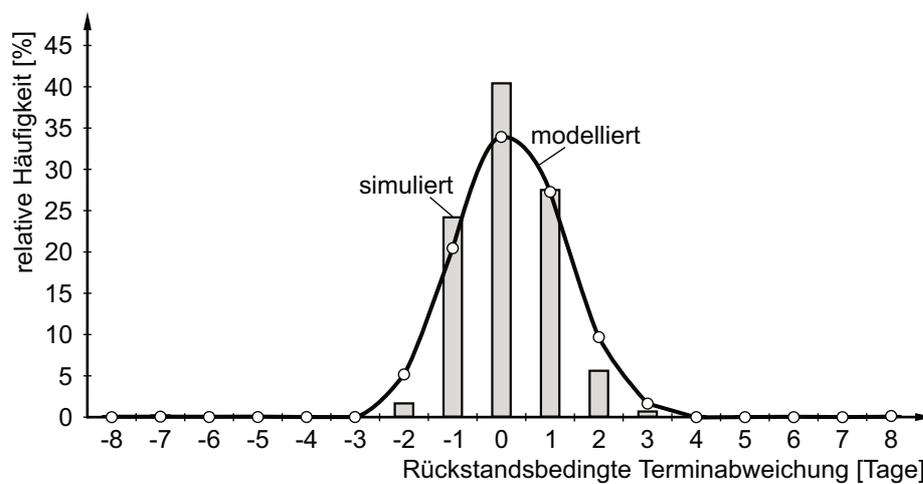
**Versuchsreihe 4: variierender Rückstand, TAZ<sub>RA,s</sub> 3 Tage**

ID	BA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>s</sub> [-]	RSA <sub>m</sub> [-]	RSA <sub>s</sub> [-]	Termineinhaltung			Termintreue			TAA-Fehler		
					Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Min. [-]	Abs. Mittel [-]	Max. [-]
28	29,1	5,8	0,0	0,0	79%	76%	-4%	33,4%	35,6%	2,2%	2,3%	-15,9%	10,6%
29	32,3	13,3	1,1	12,6	63%	65%	2%	26,6%	25,8%	-0,8%	0,9%	-2,7%	2,4%
30	33,0	18,0	1,3	17,7	55%	60%	4%	19,2%	21,2%	2,0%	1,6%	-3,7%	3,5%
31	9,4	5,7	-19,9	0,5	80%	81%	1%	10,7%	10,2%	-0,5%	0,9%	-4,0%	2,5%
32	14,8	11,0	-16,5	10,8	77%	68%	-9%	12,8%	13,1%	0,3%	0,9%	-3,0%	0,6%
33	19,1	14,4	-12,8	14,4	74%	63%	-11%	16,5%	15,5%	-1,0%	1,0%	-2,5%	0,2%
34	48,8	6,6	19,8	2,1	1%	7%	6%	0,9%	5,5%	4,6%	3,0%	-19,3%	12,1%
35	52,4	13,5	21,0	12,6	18%	18%	0%	13,6%	16,5%	2,8%	0,6%	-2,3%	3,0%
36	51,1	20,2	19,2	19,5	25%	32%	7%	13,4%	18,6%	5,1%	2,0%	-6,1%	5,0%
Mittelwert = 0%							Mittelwert = 1,6%						

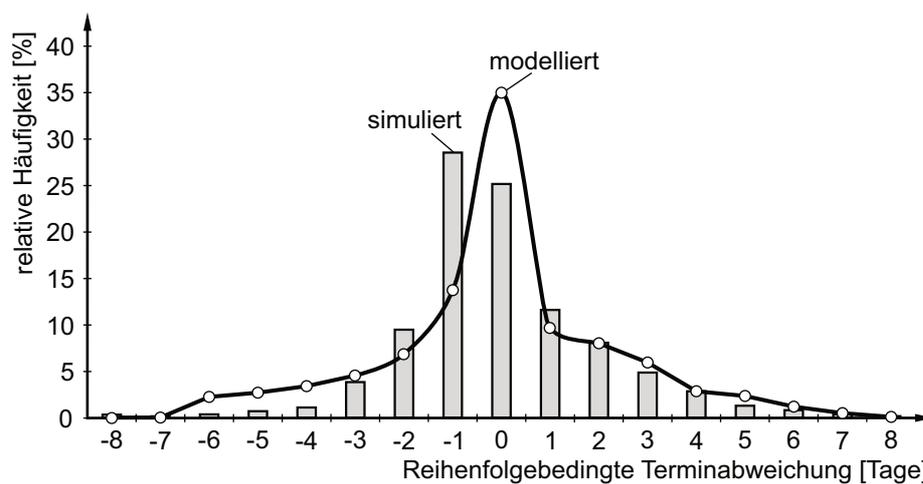
Hinweis: Der Plan-Bestand wird in den Versuchen 31-36 aufgrund des Rückstands nicht erreicht



a) Vergleich der simulierten und modellierten Verteilung der Terminabweichung



b) Vergleich der simulierten und modellierten Verteilung der rückstandsbedingten Terminabweichung



c) Vergleich der simulierten und modellierten Verteilung der reihenfolgebedingten Terminabweichung

**Bild 78: Versuchs-ID 11 mit 25 % stärkerer Streuung der geschätzten Rückstandsverteilung (25 % Abweichung von der tatsächlichen Rückstandsverteilung)**

### Ergebnisse der Simulationsversuche zu Abschnitt 4.4.2

Für alle durchgeführten Versuche gilt, dass die Reihenfolgebildung an jedem Arbeitssystem nach frühestem Plan-Endtermin erfolgt und eine Reihenfolgedisziplin von 100 % vorliegt. Die Termintreue ist mit einer Termintreuetoleranz von 0 Tagen berechnet.

#### Versuchsreihe 1-2:

<b>Eilaufträge</b>	keine	<b>Plan-Leistung</b>	22 Aufträge
<b>Plan-Bestand</b>	73 Aufträge	<b>TEzu</b>	51 %
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	2,5 Stunde	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	1,1

#### Versuchsreihe 1: variierender Rückstand, TAZ<sub>RA,S</sub> 2 Tage

ID	BA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>s</sub> [-]	RSA <sub>m</sub> [-]	RSA <sub>s</sub> [-]	Termineinhaltung			Termintreue			TAA-Fehler		
					Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Min. [-]	Abs. Mittel [-]	Max. [-]
1	83	15	-0,3	1,7	90,0%	94,2%	4,2%	73,8%	85,9%	12,1%	-7,4%	3,1%	12,2%
2	83	16	-0,1	5,0	81,7%	92,5%	10,8%	59,0%	82,8%	23,8%	-11,8%	4,4%	23,8%
3	83	17	0,0	8,0	74,0%	86,2%	12,2%	45,0%	70,6%	25,6%	-10,4%	4,3%	25,6%
4	68	12	-14,8	3,4	91,6%	95,6%	4,0%	23,1%	13,0%	-10,1%	-10,2%	2,5%	12,3%
5	70	13	-13,5	5,0	90,9%	94,8%	3,9%	28,1%	25,0%	-3,1%	-3,1%	1,5%	8,6%
6	71	14	-11,9	6,8	87,6%	94,4%	6,8%	30,8%	35,2%	4,4%	-4,9%	2,1%	8,1%
7	97	17	13,7	3,0	40,4%	17,4%	-23,0%	39,6%	16,8%	-22,8%	-22,7%	6,3%	25,1%
8	98	18	14,0	5,8	43,3%	28,8%	-14,5%	41,0%	27,7%	-13,3%	-13,3%	5,5%	21,3%
9	97	19	13,2	9,2	46,7%	39,3%	-7,4%	38,0%	37,7%	-0,3%	-10,7%	3,6%	19,3%

#### Versuchsreihe 2: variierender Rückstand, TAZ<sub>RA,S</sub> 4 Tage

ID	BA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>s</sub> [-]	RSA <sub>m</sub> [-]	RSA <sub>s</sub> [-]	Termineinhaltung			Termintreue			TAA-Fehler		
					Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Min. [-]	Abs. Mittel [-]	Max. [-]
10	84	15	0,1	2,8	75,2%	81,5%	6,3%	23,4%	40,2%	16,8%	-9,5%	2,9%	16,7%
11	84	15	0,5	5,6	73,4%	79,7%	6,3%	25,0%	38,0%	13,0%	-3,3%	2,1%	13,1%
12	84	17	0,5	8,0	70,3%	77,0%	6,6%	24,1%	35,3%	11,2%	-3,7%	2,0%	11,1%
13	69	13	-14,3	3,7	76,5%	81,3%	4,8%	10,4%	8,6%	-1,8%	-3,7%	2,1%	8,5%
14	71	14	-13,1	5,1	76,2%	80,4%	4,2%	11,6%	11,1%	-0,5%	-3,6%	1,6%	6,5%
15	72	14	-11,5	6,9	74,7%	79,2%	4,5%	13,9%	14,2%	0,3%	-4,0%	1,8%	5,7%
16	98	17	14,2	3,7	57,7%	48,6%	-9,1%	40,3%	41,9%	1,6%	-7,0%	2,2%	11,5%
17	98	17	14,4	6,0	56,3%	52,1%	-4,2%	35,5%	41,6%	6,1%	-5,6%	2,3%	8,5%
18	98	19	13,7	9,2	55,1%	56,5%	1,5%	29,1%	41,3%	12,2%	-6,1%	2,9%	12,2%

**Versuchsreihe 3-4:**

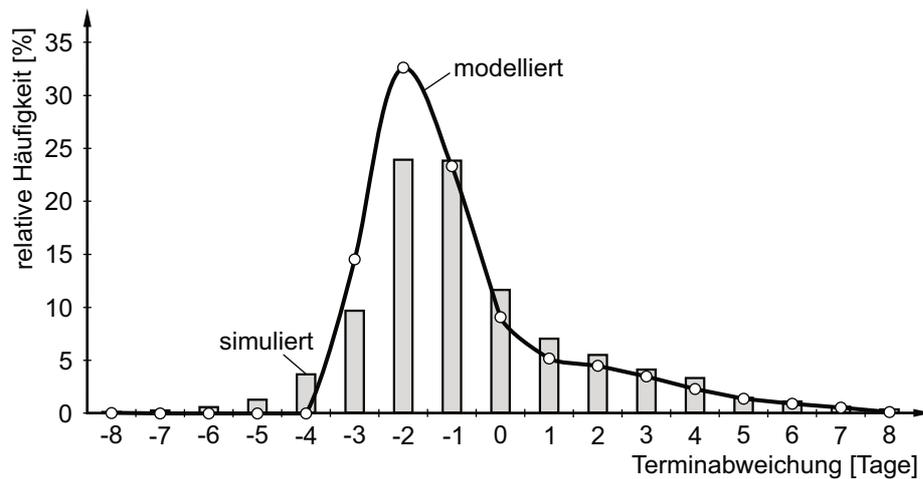
<b>Eilaufträge</b>	keine	<b>Plan-Leistung</b>	22 Aufträge
<b>Plan-Bestand</b>	140 Aufträge	<b>TE<sub>zu</sub></b>	51 %
<b>Mittlere Auftragszeit</b>	2 Stunden	<b>ZAU<sub>v</sub></b>	0,8

**Versuchsreihe 3: variierender Rückstand, TAZ<sub>RA,s</sub> 2 Tage**

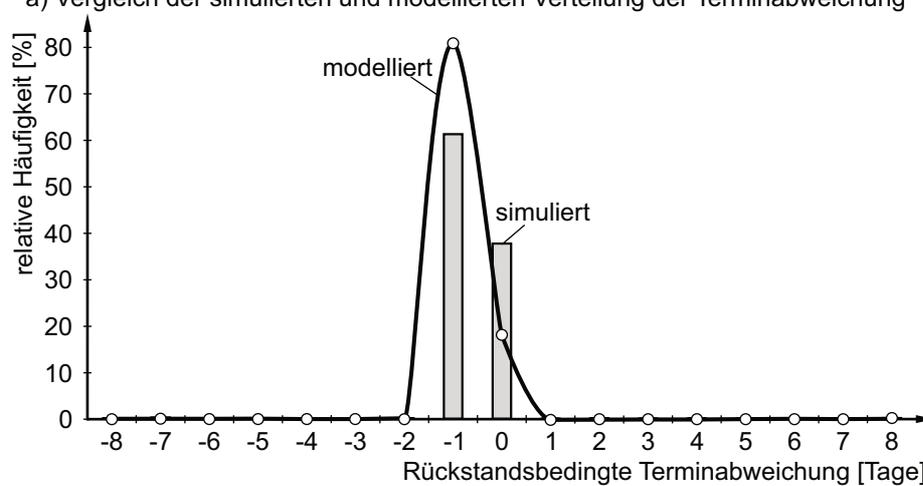
ID	BA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>s</sub> [-]	RSA <sub>m</sub> [-]	RSA <sub>s</sub> [-]	Termineinhaltung			Termintreue			Min. [-]	TAA-Fehler	
					Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]		Abs. Mittel [-]	Max. [-]
19	150	23	-0,4	0,8	99,1%	99,8%	0,7%	95,7%	99,2%	3,5%	-2,9%	1,1%	3,4%
20	150	23	-0,6	5,1	86,9%	99,2%	12,2%	71,2%	97,2%	26,0%	-13,0%	6,5%	26,0%
21	148	24	-2,1	8,4	80,3%	92,9%	12,6%	53,9%	80,1%	26,2%	-12,6%	6,8%	26,2%
22	133	20	-16,7	3,3	99,0%	99,6%	0,5%	31,5%	6,2%	-25,3%	-25,3%	6,3%	34,5%
23	134	21	-16,4	5,5	98,8%	99,1%	0,3%	36,5%	18,7%	-17,8%	-17,8%	5,6%	30,6%
24	134	21	-16,2	7,6	96,4%	96,1%	-0,3%	37,6%	25,8%	-11,8%	-16,3%	6,1%	28,9%
25	166	26	15,8	3,5	37,9%	10,9%	-27,0%	37,9%	10,9%	-27,0%	-27,0%	14,4%	35,6%
26	166	26	15,4	6,0	42,4%	24,8%	-17,6%	42,0%	24,7%	-17,3%	-17,3%	9,6%	27,9%
27	163	27	13,3	9,4	48,2%	42,0%	-6,2%	41,8%	41,8%	0,0%	-9,3%	5,1%	17,3%

**Versuchsreihe 4: variierender Rückstand, TAZ<sub>RA,s</sub> 4 Tage**

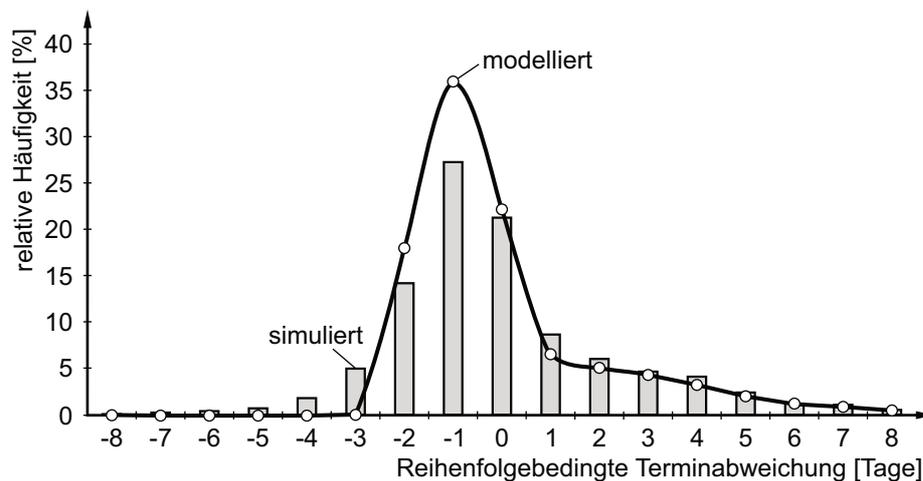
ID	BA <sub>m</sub> [-]	BA <sub>s</sub> [-]	RSA <sub>m</sub> [-]	RSA <sub>s</sub> [-]	Termineinhaltung			Termintreue			Min. [-]	TAA-Fehler	
					Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]	Sim. [-]	Modell [-]	Fehler [-]		Abs. Mittel [-]	Max. [-]
28	147	22	-1,8	2,3	91,2%	92,1%	0,9%	62,5%	74,6%	12,1%	-9,8%	2,5%	12,1%
29	147	23	-2,0	5,5	84,1%	92,0%	7,9%	48,8%	71,3%	22,5%	-11,6%	4,1%	22,5%
30	145	24	-3,5	8,8	80,0%	90,3%	10,3%	39,6%	58,6%	19,0%	-6,8%	2,7%	19,0%
31	130	20	-18,1	4,0	91,1%	92,8%	1,7%	13,1%	6,4%	-6,7%	-6,7%	1,6%	8,6%
32	131	20	-17,9	5,9	90,8%	91,5%	0,8%	17,4%	12,1%	-5,3%	-5,4%	1,9%	11,7%
33	131	21	-17,7	7,9	89,3%	87,7%	-1,6%	20,7%	14,0%	-6,7%	-6,7%	2,9%	15,9%
34	163	25	14,4	3,3	50,4%	27,9%	-22,5%	44,8%	25,6%	-19,2%	-19,3%	7,1%	32,1%
35	163	25	14,3	6,1	52,5%	39,4%	-13,1%	44,7%	35,4%	-9,3%	-10,2%	5,6%	25,3%
36	161	26	12,2	9,6	56,0%	50,9%	-5,1%	40,9%	44,6%	3,7%	-8,9%	4,1%	16,3%



a) Vergleich der simulierten und modellierten Verteilung der Terminabweichung



b) Vergleich der simulierten und modellierten Verteilung der rückstandsbedingten Terminabweichung



c) Vergleich der simulierten und modellierten Verteilung der reihenfolgebedingten Terminabweichung

**Bild 79: Versuchs-ID 14, mit 25 % stärkerer Streuung der geschätzten Rückstandsverteilung (25 % Abweichung von der tatsächlichen Rückstandsverteilung)**

## Lebenslauf

<b>Name</b>	Piontek
<b>Vorname</b>	Andreas
<b>Staatsangehörigkeit</b>	deutsch
<b>Geburtsdatum</b>	18.09.1986
<b>Geburtsort, -land</b>	Gdynia, Polen
<b>08.1993 – 07.1997</b>	Katholische Grundschule Bonifatiusstraße in Hamburg
<b>08.1997 – 07.2006</b>	Gymnasium Kirchdorf/Wilhelmsburg in Hamburg
<b>10.2006 – 05.2013</b>	Studium im Hochschulübergreifenden Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen in Hamburg Abschluss: Diplom-Wirtschaftsingenieur (Dipl.-Ing. oec.)
<b>04.2013 – 01.2014</b>	Berufliche Auszeit im Ausland
<b>05.2014 – 04.2018</b>	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg
<b>08.2018 – heute</b>	Assistenz der Geschäftsleitung bei der Mankiewicz Gebr. & Co GmbH, Hamburg

## **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**

Dauids, 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 kohlenstofffaserverstärkter 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**

Brüggmann, 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 Bahngenauigkeit und dynamischer Stabilität beim robotergeführten Fräsen, 2019.

**Band 40**

Piontek, Andreas: Modellierung der Termintreue im Auftragsdurchlauf, 2020.