

Modellierung der Termintreue in der Produktion

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

von

Arif Kuyumcu

aus

Saarbrücken

2013

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

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

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juni 2013

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 18:

Arif Kuyumcu

Modellierung der Termintreue in der Produktion

1. Auflage

Hamburg 2013

ISSN 1613-8244

Copyright Arif Kuyumcu 2013

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT) der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding, für die fachliche Betreuung dieser Arbeit. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis für die Erstellung des Zweitgutachtens. Ich danke der Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie der Freien und Hansestadt Hamburg für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die finanzielle Unterstützung.

Ich bedanke mich bei Herrn Friedhelm Nyhuis und dem gesamten Team der Gesellschaft für Technologie Transfer mbH für die Bereitstellung von Daten zur Simulation. Ebenso danke ich Herrn Marco Allemann und allen Mitarbeitern der TRUMPF Grösch AG für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse und die tatkräftige Unterstützung bei der Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis.

Großer Dank gilt allen meinen Kollegen am IPMT, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Axel Friedewald, die mir stets ein konstruktives und ermunterndes Umfeld zur wissenschaftlichen Arbeit boten. Aus dem Kreis der Studenten gilt Herrn Andreas Piontek für seine unermüdliche Unterstützung ein besonderer Dank.

Hamburg, im August 2013

Arif Kuyumcu

Kurzfassung

Die Termintreue ist eine der wichtigsten Zielgrößen in der Produktion. Eine hohe Termintreue ist ein Eckpfeiler für unternehmerischen Erfolg und steht für eine logistisch beherrschte Fertigung. Vielen Betrieben fällt es jedoch schwer, die Termintreue gezielt zu beeinflussen. Ein Grund hierfür ist das mangelnde Verständnis darüber, wovon die Termintreue einer Fertigung abhängt und wie die Entscheidungen der Fertigungssteuerung sie beeinflussen. Es fehlt ein Modell, das die Ursachen mangelhafter Termintreue erklärt und es ermöglicht, Arbeitssysteme und Fertigungsbereiche systematisch zu analysieren und zu verbessern.

Die Termintreue hängt von den beiden Einflussgrößen Rückstand und Reihenfolgeabweichung ab. Im ersten Schritt zeigt diese Arbeit, wie die beiden Einflussgrößen die Terminabweichung einzelner Aufträge beeinflussen. Das dabei vorgestellte Analyseverfahren deckt die Ursachen mangelhafter Termintreue auf und unterstützt bei der Auswahl von Gegenmaßnahmen in der Fertigung. In der anschließenden Modellierung der Termintreue leitet die Arbeit deduktiv den grundsätzlichen Modellaufbau, der die Wirkbeziehungen zwischen der Termintreue und ihren Einflussgrößen erklärt, her. Die Erklärungslogik wird durch eine analytische Ableitung in eine Näherungsgleichung zur Berechnung der Termintreue überführt. Mittels Produktionssimulation wird die Berechnungsgenauigkeit der analytischen Näherungsgleichung überprüft und durch Ergänzung von Parametern korrigiert. Das Ergebnis ist das Modell der Termintreue. Es ist in der Lage, die Termintreue einer gesamten Fertigung oder eines einzelnen Arbeitssystems auf Basis regelbarer Kennzahlen zu berechnen. Das Modell ermöglicht quantitative Aussagen über das Verhalten der Termintreue in Abhängigkeit betrieblicher Entscheidungen. Die Modellzusammenhänge lassen sich grafisch in Form von Termintreuekennlinien darstellen. Damit knüpft die Modellierung der Termintreue an die bestehende logistische Kennlinientheorie und das Hannoveraner Trichtermodell an. Die Anwendung des erarbeiteten Modells zur Analyse und Verbesserung der Termintreue in einem produzierenden Betrieb für Fertigungs- und Medizintechnik bestätigt seine Funktionsfähigkeit.

Abstract

Schedule reliability ranges amongst the most important logistic targets in operations management. Successful businesses aim to achieve high schedule reliability as a result of logistically sound production processes. However, many producing companies struggle to control schedule reliability systematically. This can be traced back to a lack of understanding of what determines schedule reliability and how decisions in production control impact those influencing factors. This creates the need for a model that explains the root causes of low schedule reliability and enables managers and engineers to analyze and improve the schedule reliability of workstations and production facilities systematically.

Schedule reliability is determined by the influencing factors backlog and sequence deviation. The first step of this work shows how both influencing factors determine the output lateness of single orders within the production. A newly introduced analysis method traces low schedule reliability back to its root causes and supports the responsible employees in finding countermeasures to assure a timely completion of the orders. The second step of this work is to model schedule reliability itself. The modelling starts with a deductive creation of the modelling framework. This framework explains the cause and effect principles between schedule reliability and its influencing variables. The model logic is being transformed into an equation that is able to calculate the schedule reliability. The accuracy of this equation is tested through comparison with the results of production simulation. Corrections are being made through the introduction of three parameters to the equation. The resulting formula represents the model of schedule reliability. This model is capable of making quantitative estimations on the behaviour of schedule reliability as a result of management decisions in production control. The model principles can be visualized through logistic operating curves. This connects the model of schedule reliability to the Hanover funnel model and the well established logistic operating curves. The work demonstrates the usability and capability of the newly developed schedule reliability model through case study analysis in a German production and medical technology company.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	15
1.1	Motivation	15
1.2	Problemstellung und Ziel der Arbeit	17
1.3	Vorgehen und Aufbau der Arbeit	17
2	Grundlagen und Stand der Technik.....	20
2.1	Definition der Termintreue und Begriffsabgrenzung	20
2.2	Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung.....	23
2.2.1	Die Termintreue im Modell der Fertigungssteuerung.....	23
2.2.2	Produktionskennlinien.....	28
2.3	Ansätze und Lücken der bisherigen Modellierung der Termintreue	30
2.3.1	Analyse der Terminabweichung	30
2.3.2	Vorarbeiten zur Modellierung der Termintreue	32
2.3.3	Lücken im Stand der Technik und daraus abgeleiteter Forschungsbedarf.....	34
3	Analyse der Terminabweichung	36
3.1	Definition und Messung der Reihenfolgeabweichung.....	36
3.1.1	Messung der Reihenfolgeabweichung	37
3.1.2	Messung der gewichteten Reihenfolgeabweichung	39
3.2	Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung	42
3.3	Terminabweichung aus Rückstand	44
3.4	Zerlegung der Terminabweichung.....	46
4	Modellierung der Termintreue.....	51
4.1	Deduktive Modellbildung.....	51
4.2	Analytische Modellbildung	55
4.2.1	Grundgedanke der Formalisierung	55

4.2.2	Stochastische Faltung der Terminabweichungsverteilung	57
4.2.3	Approximation der Terminabweichungsverteilung	62
4.2.4	Synthese des analytischen Modells	69
4.3	Simulationsexperimente.....	71
4.3.1	Vorbereitung	72
4.3.2	Experiment eins: Variation des mittleren Rückstands.....	79
4.3.3	Experiment zwei: Variation der Rückstandsstreuung	82
4.3.4	Experiment drei: Variation der Reihenfolgeabweichung	87
4.3.5	Experiment vier: kombinierte Variation aller Einflussgrößen.....	92
4.4	Modellsynthese.....	97
5	Zusammenfassung der Modellierungserkenntnisse	108
5.1	Die Bedeutung von Streuung und Mittelwert der Terminabweichung	
	für die Termintreue	108
5.2	Termintreue in Abhängigkeit des Rückstands.....	110
5.3	Termintreue in Abhängigkeit der Reihenfolgeabweichung.....	113
6	Einflussgrößen der Reihenfolgeabweichung	116
6.1	Einfluss der Reihenfolgedisziplin auf die Termintreue	116
6.2	Einfluss des Bestands und der Reihenfolgedisziplin	
	auf die Reihenfolgeabweichung.....	117
6.3	Termintreuegerechte Bestandspositionierung	123
6.4	Termintreuekennlinie über dem mittleren Bestand	125
7	Anwendungsbeispiel zur Analyse und Verbesserung der	
	Termintreue in der Produktion	127
7.1	Einführung	127
7.2	Ist-Analyse.....	130
7.2.1	Produktionseinheit Fertigung	131
7.2.2	Arbeitssysteme	133
7.3	Ist-Analyse an den Arbeitssystemen und Soll-Konzept	135

7.3.1	Laserbeschriftungseinrichtung TGSKL01.....	135
7.3.2	Schleifmaschine TGSSU06	136
7.3.3	CNC-Drehmaschine TGSDZ03.....	137
7.4	Konzeptevaluation mittels Simulation.....	138
7.4.1	Validierung.....	139
7.4.2	Konzeptsimulation	139
7.5	Ergebnis	141
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	148
8.1	Zusammenfassung	148
8.2	Ausblick	149
	Literaturverzeichnis.....	152
	Anhang I	155
	Anhang II	156
	Anhang III	162
	Anhang IV.....	166
	Anhang V.....	168

Verzeichnis der im Text verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

°	Grad
α	Verteilungsparameter, Modellparameter
β	Verteilungsparameter, Modellparameter
γ	Modellparameter
a	Wert, den eine stochastische Größe X+Y annimmt
AB _{Ist}	Ist-Abgang [Std]
AB _{Plan}	Plan-Abgang [Std]
AnzAuf	Anzahl Aufträge [-]
B	Bestand [Std]
BDE	Betriebsdatenerfassung
BKT	Betriebskalendertage
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
ERP	Enterprise-Resource-Planning (Unternehmensressourcenplanung)
FIFO	first in first out
FPE	frühestes Plan-Ende
FPS	frühester Plan-Start
KOZ	kürzeste Operationszeit
LOZ	längste Operationszeit
M _X	Merkmalraum von X
M _{X+Y}	Merkmalraum von Y
$p_X(\cdot)$	Punktwahrscheinlichkeit der stochastischen Größe X für den Wert ·
$p_Y(\cdot)$	Punktwahrscheinlichkeit der stochastischen Größe Y für den Wert ·
$p_{X+Y}(\cdot)$	Punktwahrscheinlichkeit der stochastischen Größe X+Y für den Wert ·
PE	Produktionseinheit
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PR	Prioritätsrang
PR _{Ist}	Ist-Rang

PR_{Plan}	Plan-Rang
RA	Reihenfolgeabweichung [-]
RA_g	gewichtete Reihenfolgeabweichung [Std]
RD	Reihenfolgedisziplin [%]
RS	Rückstand [Std]
RS_m	mittlerer Rückstand [Std]
RS_s	Rückstandsstreuung [Std]
RWTH	Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen
TAA	Terminabweichung im Abgang [BKT]
TAA_m	mittlere Terminabweichung im Abgang [BKT]
$TAA_{m,g}$	mittlere gewichtete Terminabweichung im Abgang [BKT]
TAA_{OG}	Obergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung [BKT]
TAA_{RA}	Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung [BKT]
TAA_{RS}	Terminabweichung aus Rückstand [BKT]
TAA_s	Streuung der Terminabweichung im Abgang [BKT]
TAA_{UG}	Untergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung [BKT]
TAB	Bearbeitungsanfang Auftrag [BKT]
TAE	Bearbeitungsende Auftrag [BKT]
TAR	relative Terminabweichung [BKT]
TAZ	Terminabweichung im Zugang [BKT]
TT	Termintreue [%]
TT_α	berechnete Termintreue mit α -Parameter [-]
TT_{MIN}	Mindesttermintreue [%]
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
X	stochastische Größe
x	Wert, den eine stochastische Größe X annimmt

$X+Y$	Summe zweier stochastischer Größen
Y	stochastische Größe
y	Wert, den eine stochastische Größe Y annimmt
ZAU	Auftragszeit [Std]
ZDA	Durchlaufzeit [BKT]
ZDL_m	mittlere Durchlaufzeit [BKT]
ZU_{Ist}	Ist-Zugang [Std]
ZU_{Plan}	Plan-Zugang [Std]

1 Einleitung

Die Termintreue ist eine bedeutende logistische Zielgröße produzierender Unternehmen. Produkte pünktlich herzustellen und auszuliefern ist eine Aufgabe, der im Betrieb viel Beachtung geschenkt wird. Für die verantwortlichen Manager und Ingenieure erscheint die Termintreue aber häufig als Resultat vieler sich gegenseitig beeinflussender Einzelbemühungen. Eine gezielte Steuerung der Termintreue wird auf Grund der komplexen Zusammenhänge und unterschiedlichen Verantwortungsbereiche als schwierig empfunden. Die vorliegende Arbeit zeigt ein Modell, welches die Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Termintreue erklärt.

1.1 Motivation

Die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) von Industriebetrieben verfolgt mehrere Ziele gleichzeitig. Neben einer hohen und gleichmäßigen Kapazitätsauslastung sind u. a. auch kurze Durchlaufzeiten, geringe Lager- und Werkstattbestände, eine hohe Flexibilität und eine hohe Termintreue Ziele der PPS [Schuh-06, S. 28]. Zum Teil widersprechen sich diese Zielgrößen: Der Markt verlangt kurze Lieferzeiten und eine pünktliche Lieferung, während die Unternehmen die hohe gleichmäßige Auslastung der Betriebsmittel und möglichst niedrige Bestände anstreben, um die Kosten zu senken [Wiendahl-97, S. 3]. Kurze Lieferzeiten sind zudem nicht ausreichend, wenn sie nicht mit hoher Liefertreue eingehalten werden [Gudehus-06, S. 55].

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

12194

Abbildung 1: Zielgrößen der Logistikleistung und der Logistikkosten [Lödding-08, S. 19]

Abbildung 1 gibt einen Gesamtüberblick über die logistischen Zielgrößen, getrennt nach Logistikleistung und Logistikkosten. Die Literatur nennt unterschiedliche Begriffe,

die teilweise synonym zur Termintreue gebraucht werden. Das zweite Kapitel erklärt den Unterschied zwischen Termintreue, Liefertermineinhaltung und Liefertreue.

Eine Studie der RWTH Aachen und des VDMA [Brosze et al.-11, S. 18] belegt, dass die logistischen Leistungsmerkmale Lieferfähigkeit, Lieferzeit und Termintreue den Kundennutzen bestimmen. Die wichtigste logistische Zielgröße ist dabei die Liefertreue gegenüber dem Kunden. Sie ist für zwei Drittel der an der Studie beteiligten Unternehmen die führende logistische Zielgröße.

Pünktlich belieferte Kunden bauen Vertrauen zu ihren Lieferanten auf, so dass die Wahrscheinlichkeit zur Konkurrenz zu wechseln sinkt. Häufig berücksichtigen Unternehmen die Termintreue bei der Lieferantenauswahl. Die Normen zur Qualitätszertifizierung EN ISO 9001:2008 [DIN-08] und VDA-Empfehlung 5001 [VDA-94] legen es Unternehmen nahe, Lieferanten nach deren Fähigkeiten zu beurteilen und daraufhin ihre Lieferantenauswahl zu treffen. Die Unternehmen legen die Kriterien für die Auswahl, Beurteilung und Neubeurteilung eines Lieferanten zwar selbst fest, in der Literatur finden sich aber Termintreue und Liefertreue häufig als empfohlene Faktoren [Nebel-07, S. 262; Melzer-Ridinger-07, S. 227; Hess-08, S. 265].

Neben dem Verlust an Kundenbindung sind weitere Kosten mit einer zu niedrigen Termintreue verbunden. In bestandsarmen Wertschöpfungsketten kann die mangelhafte Termintreue eines Zulieferers zu einer verminderten Termintreue des Kunden oder gar zum Produktionsausfall führen. Häufig wird eine niedrige Termintreue durch kostspielige Expresslieferungen kompensiert, sofern dies möglich ist. Kunden reagieren auf eine verspätete Belieferung oft auch durch Bestellungen mit Lieferterminen, die vor dem eigentlichen Bedarfstermin liegen. So werden entlang der Wertschöpfungskette Sicherheitsbestände aufgebaut, um Produktionsausfällen vorzubeugen. Eine niedrige Termintreue auf Grund von verfrühter Fertigstellung der Aufträge wirkt ebenfalls negativ. Dies äußert sich in Form von Kapitalbindungskosten, verursacht durch den Fertigwarenbestand beim Produzenten. [Lödding-08, S. 26 f.]

Für produzierende Unternehmen lässt sich die Bedeutung einer hohen Termintreue in zwei Wirkrichtungen zusammenfassen. Einerseits senkt sie die Logistikkosten, indem sie die Zuverlässigkeit entlang der Lieferkette steigert, andererseits können Unternehmen mit hoher Termintreue auf dem Markt tendenziell höhere Preise für ihre Produkte fordern. Den Vorteilen einer hohen Termintreue stehen aber auch Kosten gegenüber. Aufträge nach ihrer terminlichen Dringlichkeit zu bearbeiten steht möglicherweise einer

rüsto optimalen Zusammenfassung im Wege und mindert die Leistung der Arbeitssysteme. Viele Unternehmen veranlassen Überstunden oder Wochenendschichten, um eine hohe Termintreue zu gewährleisten. Dies ist in der Regel ebenfalls mit hohen Kosten verbunden. [Lödding-08, S. 26 f.]

Eine niedrige Termintreue ist eine mangelhafte Logistikleistung. Eine hohe Termintreue ist mit Kosten verbunden. Für jede Produktion gibt es ein Gleichgewicht aus ausreichender Logistikleistung und vertretbaren Kosten. Die vorliegende Arbeit stellt durch die Modellbildung ein Werkzeug zur Analyse der Termintreue und ihrer Verbesserung bis zum angestrebten Niveau vor. Sie zeigt allgemein, wie die Termintreue durch gezielte Beeinflussung ihrer logistischen Einflussgrößen steuerbar ist. Den Zielgrößenkonflikt zwischen Termintreue und Kosten löst dies zwar nicht auf, ein vollständiges Modell der Termintreue ist jedoch der erste Schritt zu einer sinnvollen Positionierung im Spannungsfeld dieses Dilemmas.

1.2 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Die Bedeutung der Termintreue in der Produktion ist hoch. Eine Steigerung der Termintreue ist häufig mit einer Beeinflussung anderer logistischer Zielgrößen verbunden. Dennoch fehlt bisher ein analytisches Modell, das die Verbindung zwischen der Termintreue und ihren Einflussgrößen quantitativ erklärt. Ein solches Modell erfüllt zwei Funktionen. Zum einen bildet es die Grundlage dafür, die Parameter der Fertigungssteuerung im Einklang mit der logistischen Zielsetzung einer hohen Termintreue festlegen zu können und zum anderen ist es möglich, aus dem Modell grundsätzliche Erkenntnisse über die Gestaltung von Fertigungssteuerungsverfahren zum Erreichen einer hohen Termintreue zu gewinnen [Lödding-08, S. 39]. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Modellierung der Termintreue. Hierbei ist der Einfluss des Rückstands und der Reihenfolgeabweichung auf die Termintreue systematisch dargestellt.

1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit

Als Grundlage dieser Arbeit erläutert Kapitel 2 die angewandten Modelle der Produktion und zeigt die Lücken im Stand der Technik auf. Das Kapitel stellt heraus, dass die Verteilung der Terminabweichung im Abgang der Fertigung die Termintreue bestimmt.

Kapitel 3 entwickelt ein Verfahren zur Analyse der Terminabweichung. Ein wesentliches Element ist dabei eine Methode zur Messung der Reihenfolgeabweichung. Mit dem

vorgestellten Verfahren ist es möglich, die Termintreue bzw. die Terminabweichung auf ihre Einflussgrößen zurückzuführen.

Kapitel 4 modelliert die Termintreue in vier Schritten. Der erste Schritt leitet aus den bekannten qualitativen Wirkbeziehungen die grundlegenden Modellzusammenhänge her. Der zweite Schritt überführt die Logik dieser Grundannahmen in analytische Formeln zur Berechnung der Termintreue. Der dritte Schritt erzeugt durch systematische Veränderung der Einflussgrößen in der Produktionssimulation verschiedene Termintreuwerte und stellt diese den Grundannahmen des Modells und den Berechnungsergebnissen der analytischen Formeln gegenüber. Der letzte Schritt, die Modellsynthese, führt durch Vergleich und Anpassung des zweiten und dritten Schritts die Modellierung der Termintreue zusammen. Dabei ergänzt er die analytischen Formeln um entsprechende Korrekturparameter und erzeugt auf diese Weise das Modell der Termintreue.

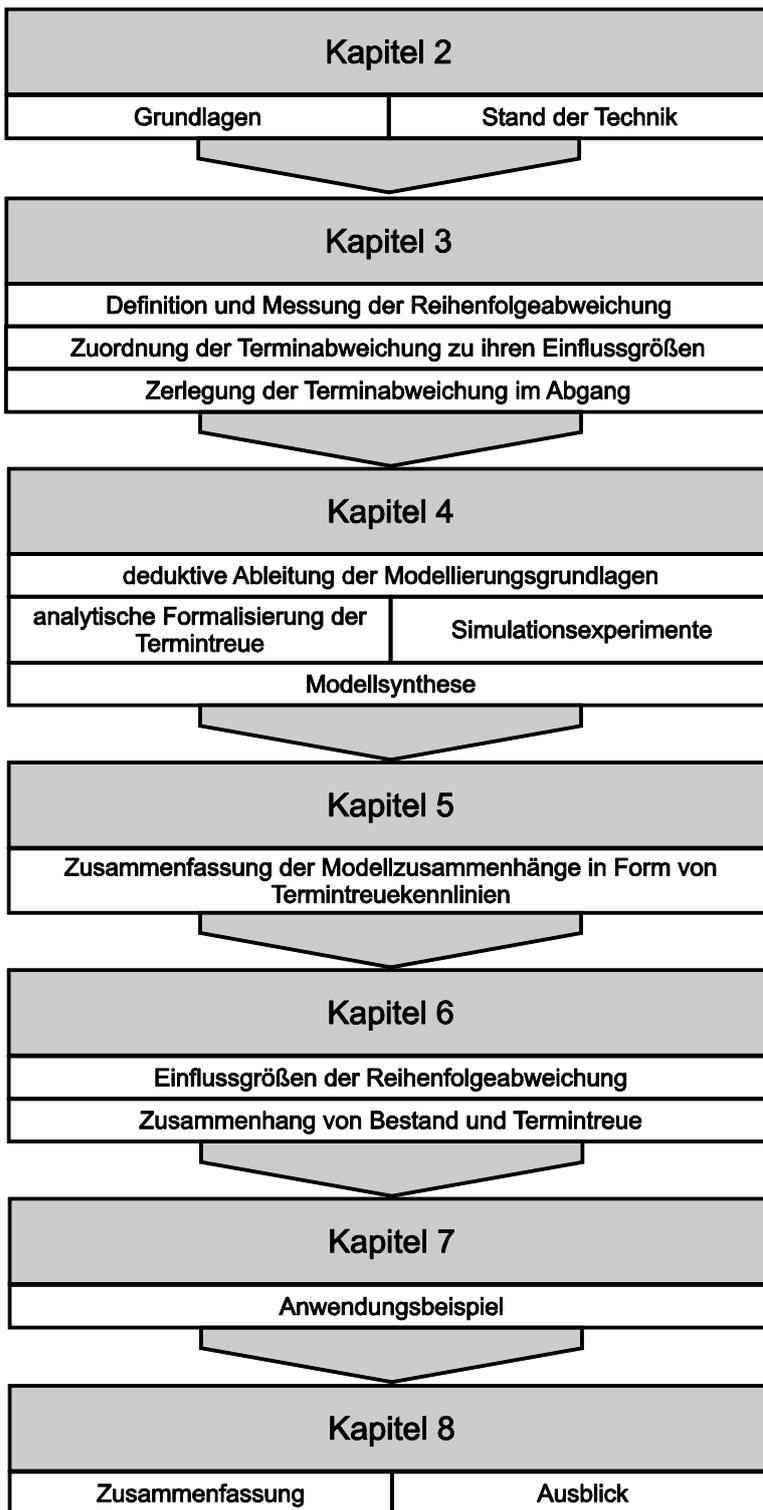
Kapitel 5 fasst die Erkenntnisse aus der Modellierung der Termintreue zusammen und stellt sie grafisch als Termintreuekennlinien dar.

Kapitel 6 untersucht die Reihenfolgeabweichung, die ihrerseits von weiteren Einflussgrößen abhängt. Das Kapitel geht dabei über die Modellierung der Termintreue hinaus und trägt zum Erkenntnisgewinn über die Herkunft von Reihenfolgeabweichungen bei. Es stellt durch Aufzeigen des Zusammenhangs zwischen Bestand und Termintreue die Verwandtschaft dieser Arbeit zur Kennlinientheorie her.

Kapitel 7 erläutert das Vorgehen zur Analyse und Verbesserung der Termintreue im Betrieb und veranschaulicht die Anwendung der Modellierung der Termintreue an einem Praxisbeispiel.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 8.

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht über den Aufbau der Arbeit:



12195

Abbildung 2: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen und Stand der Technik

Für ein besseres Verständnis und zur sprachlichen Vereinheitlichung des Textes definiert und erklärt Abschnitt 2.1 den Begriff Termintreue und die damit verbundenen Terminabweichungsgrößen. Abschnitt 2.2 beschreibt die Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung, um das Modell fachlich einzuordnen. Abschnitt 2.3 erläutert schließlich den Stand der Technik in der Modellierung der Termintreue und beschreibt den Forschungsbedarf.

2.1 Definition der Termintreue und Begriffsabgrenzung

Die Termintreue bezeichnet den prozentualen Anteil der termintreu fertiggestellten Aufträge. Als termintreu gelten dabei alle Aufträge, die innerhalb einer definierten Termin-toleranz um ihren Plan-Fertigstellungstermin fertiggestellt wurden [Yu-01, S. 12]. Man berechnet die Termintreue gemäß folgender Formel [Lödding-08, S. 31]:

$$TT = \frac{\text{AnzAuf mit } TAA_{UG} \leq TAA \leq TAA_{OG}}{\text{AnzAuf}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

mit TT : Termintreue [%]
 AnzAuf : Anzahl Aufträge [-]
 TAA_{UG} : Untergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung [BKT]
 TAA : Abgangsterminabweichung [BKT]
 TAA_{OG} : Obergrenze für die zulässige Abgangsterminabweichung [BKT]

Die Formel verdeutlicht, dass die zentrale Messgröße zur Bestimmung der Termintreue die Terminabweichung im Abgang der Fertigung ist. Für einen einzelnen Auftrag hat Dombrowski die folgenden Terminabweichungsgrößen definiert (Abbildung 3) [Dombrowski-88, S. 49; Yu-01, S. 18]:

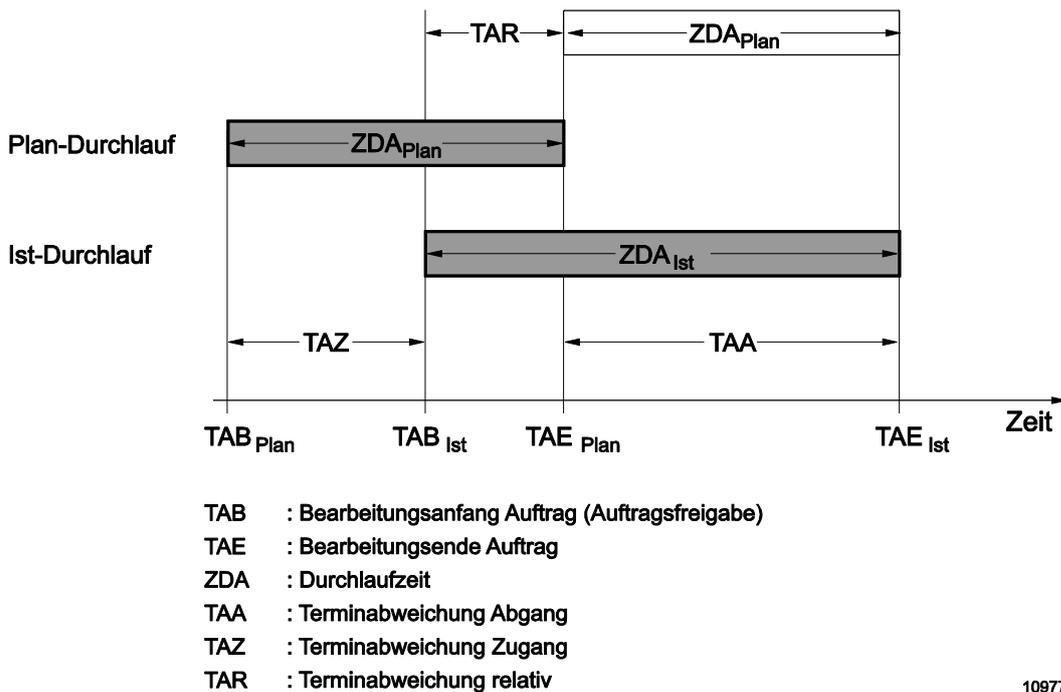


Abbildung 3: Definition der Terminabweichungsgrößen in Anlehnung an [Dombrowski-88], [Yu-01, S. 18]

Die Terminabweichung entsteht durch Abweichungen zwischen geplantem und tatsächlichem Auftragsdurchlauf. Zu Beginn der Bearbeitung steht der Bearbeitungsanfang (TAB). Weicht der tatsächliche vom geplanten Bearbeitungsanfang ab, kommt es zu einer Terminabweichung im Zugang der Fertigung (TAZ). Eine negative Terminabweichung kennzeichnet einen verfrühten Bearbeitungsbeginn, eine positive Terminabweichung bedeutet eine Verspätung gegenüber dem geplanten Bearbeitungsbeginn. Am Ende der Auftragsbearbeitung steht das Bearbeitungsende (TAE). Auch hier kann der Ist-Termin vom Plan-Termin abweichen. Eine solche Abweichung bezeichnet man als Terminabweichung im Abgang einer Fertigung (TAA). Es gilt folgende Formel [Dombrowski-88, S. 49]:

$$TAA = TAE_{Ist} - TAE_{Plan} \quad (2.2)$$

mit TAA : Terminabweichung im Abgang [BKT]
 TAE_{Ist} : Ist-Bearbeitungsende des Auftrags [BKT]
 TAE_{Plan} : Plan-Bearbeitungsende des Auftrags [BKT]

Der Zeitraum zwischen Auftragsfreigabe und Bearbeitungsende ist die Durchlaufzeit des Auftrags. Weicht sie von der geplanten Durchlaufzeit ab, spricht man von einer relativen Terminabweichung.

Die Termintreue ist eine vergangenheitsbezogene Kennzahl. Um die Termintreue nach Gleichung 2.1 berechnen zu können, sind die Abgangsterminabweichungen aller Aufträge im untersuchten Bereich über den gesamten Auswertzeitraum zu bestimmen. Dazu ist es notwendig, die Plan- und die Ist-Termine des Auftragsdurchlaufs aufzuzeichnen und Abweichungen zu ermitteln (Gleichung 2.2). Zusätzlich ist eine zulässige Termintoleranz festzulegen.

Die Termintreue spiegelt die Unternehmenssicht auf eine logistisch beherrschte Produktion wider und gilt damit als interne logistische Zielgröße (vgl. Abbildung 1). Auf die Termintreue wirkt sich eine zu frühe Auftragsfertigstellung ebenso negativ aus, wie eine verspätete. Es existieren neben der Termintreue zwei weitere terminliche Zielgrößen. Um Missverständnissen vorzubeugen, sind sie vom Begriff Termintreue abzugrenzen. Die Liefertermineinhaltung und die Liefertreue sind externe logistische Zielgrößen. Sie spiegeln die Marktsicht wider. Die Liefertermineinhaltung gibt an, ob die dem Kunden zugesagten Liefertermine eingehalten wurden [Yu-01, S. 12 ff.]. Lediglich verspätete Auslieferungen wirken sich negativ auf die Liefertermineinhaltung aus. Die Liefertreue hingegen ist der prozentuale Anteil der innerhalb einer definierten Liefertermintoleranz an den Kunden gelieferten Aufträge [Lödding-08, S. 24]. Ihre Definition weist starke Ähnlichkeiten zur Termintreue auf. Die Liefertreue berücksichtigt aber auch Terminabweichungen in der Fertigwarendistribution.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ausschließlich die Termintreue die von der Produktion direkt beeinflussbare logistische Leistung erfasst. Mit einer hohen Termintreue ist es leichter möglich eine hohe Liefertreue zu erreichen. Ebenso wird eine hohe Liefertermineinhaltung nur dann mit einem niedrigen mittleren Fertigwarenbestand erreicht, wenn die Termintreue in der Produktion hoch ist. Eine Steuerung der Produktion mit dem Ziel einer hohen Termintreue beeinflusst also indirekt die logistische Leistung gegenüber dem Kunden. Die Modellierung in dieser Arbeit beschränkt sich daher auf die Termintreue.

An dieser Stelle sind alle Begriffe zur Definition der Termintreue eingeführt. Gleichung 2.1 drückt aus, dass die Termintreue von der Terminabweichung einzelner Aufträge abhängt. Zur Modellierung der Termintreue für einzelne Arbeitssysteme sind demnach Betriebsdaten auf Arbeitsvorgangsebene erforderlich. Diese Daten entstammen meist den betrieblichen Datenerfassungs- und Planungssystemen. Beeinflusst werden sie von der Fertigungssteuerung. Der nächste Abschnitt beschreibt in den Grundlagen der

Produktionsplanung und -steuerung das Zusammenspiel dieser Systeme im Hinblick auf eine hohe Termintreue.

2.2 Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung

Ausgangspunkt und Grundstruktur für die Annahmen bei der Modellierung der Termintreue ist das Hannoveraner Trichtermodell. Dieses Modell hat sich in Industrie, Lehre und Forschung bewährt und wurde seit den 1970er Jahren stetig weiterentwickelt [Lödding-08, S. 39]. Abschnitt 2.2.1 beschreibt das Modell der Fertigungssteuerung nach Lödding [Lödding-08]. Das Modell der Fertigungssteuerung verdichtet die wesentlichen Erkenntnisse der Modellierung der logistischen Zielgrößen aus dem Trichtermodell. Zur Darstellung der logistischen Größen im zeitlichen Verlauf ist das Durchlaufdiagramm nach Bechte und Wiendahl [Wiendahl-97] erläutert. Eine weitere wichtige Grundlage zur Modellierung der Termintreue sind die aus dem Trichtermodell abgeleiteten Produktionskennlinien von Nyhuis [Nyhuis-99] (Abschnitt 2.2.2). Das Vorgehen zu ihrer Entwicklung und die grafische Darstellung logistischer Zusammenhänge in Form von Kennlinien dienen als Vorlage für die Modellierung der Termintreue in Abhängigkeit ihrer Regelgrößen.

2.2.1 Die Termintreue im Modell der Fertigungssteuerung

Das Modell der Fertigungssteuerung beschreibt den Zusammenhang zwischen den logistischen Zielgrößen der Fertigung und den Aufgaben der Fertigungssteuerung. Es ist in Abbildung 4 grafisch zusammengefasst. Die logistischen Zielgrößen sind die Durchlaufzeit, die Auslastung, der Bestand und die Termintreue. Zur Beeinflussung ihrer Ist-Werte stehen die Auftragsfreigabe, die Kapazitätssteuerung und die Reihenfolgebildung zur Verfügung. Diese drei Aufgaben bilden die Fertigungssteuerung. Ihnen steht die Produktionsplanung gegenüber. Sie erzeugt die Plan-Werte der Fertigung. [Lödding-08, S. 6 ff.]

Die Aufgaben der Produktionsplanung lassen sich mit Hilfe des Aachener PPS-Modells genauer differenzieren [Lödding-08, S. 81]. Die für die Modellierung der Termintreue entscheidenden Planungsschritte sind die Feinterminierung und die Reihenfolgeplanung. Die Feinterminierung plant die Arbeitsvorgänge zeitgenau auf die Betriebsmittel ein. Aus den vergebenen Terminen entsteht neben dem Plan-Abgang auch die Plan-Reihenfolge, in der die Aufträge bearbeitet werden sollen [Lödding-08, S. 90]. Die Reihenfolgeplanung gibt unabhängig von der Feinterminierung eine Plan-Reihenfolge vor. Sie ist nur dann notwendig, wenn keine Feinterminierung erfolgt, oder die Plan-

Reihenfolge bewusst von der Terminierung abweichen soll. Das Ergebnis der Planung ist in der Regel ein Produktionsplan, der möglichst viele Planungsbeschränkungen der Produktion und des Marktes berücksichtigt.

Neben der logistischen Betrachtung der Produktion (Trichtermodell) existieren noch weitere Forschungsansätze. Dabei hervorzuheben ist das Forschungsgebiet des Operations Research. Es befasst sich u. a. damit, einen möglichst guten Produktionsplan zu erstellen [Pinedo-09, S. 95 ff.] und diesen bei Abweichungen des tatsächlichen Produktionsablaufs zu aktualisieren. Diese Arbeit unterstellt, dass der Produktionsplan den tatsächlichen Kundenbedarf reflektiert. Sie nimmt ihn als gegeben und unveränderlich an. Ziel der Fertigungssteuerung ist es, den Produktionsplan mit Hilfe ihrer Aufgaben, trotz unvermeidlicher Störungen, so gut wie möglich umzusetzen. Der untersuchte Handlungsspielraum ist dementsprechend die Umsetzung der Planung mit Hilfe der Aufgaben der Fertigungssteuerung. [Lödding-08, S. 6 ff.]

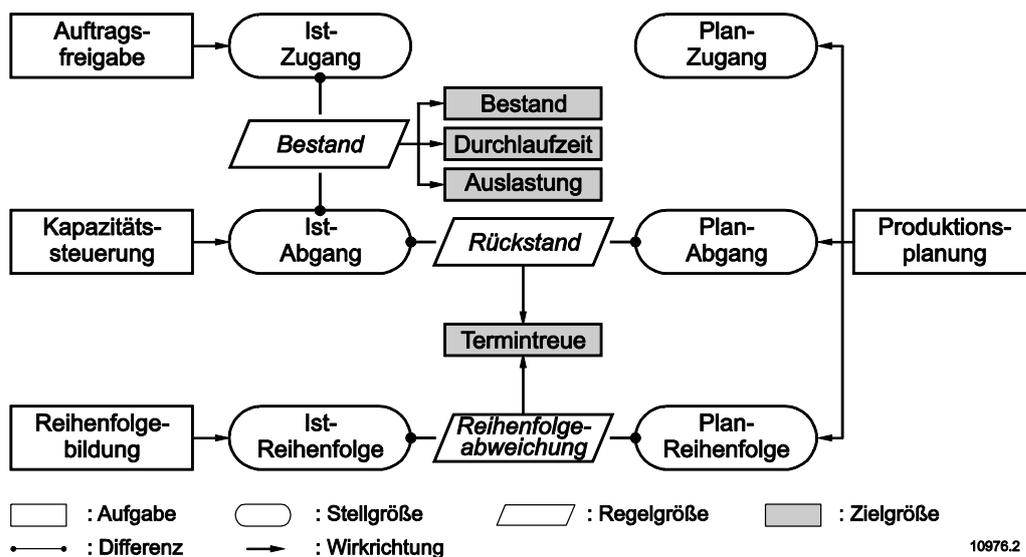


Abbildung 4: Modell der Fertigungssteuerung [Lödding-11]

Hinter den einzelnen Verbindungen im Modell der Fertigungssteuerung verbergen sich jeweils eigene Modelle, die die Wirkbeziehungen der logistischen Zielgrößen erklären. Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung hängen demnach vom Bestand der Fertigung ab. Diesen Zusammenhang hat Nyhuis untersucht und in Form von logistischen Kennlinien modelliert [Nyhuis-99] (vgl. Abschnitt 2.2.2). Gemäß des Modells der Fertigungssteuerung hängt die Termintreue von den Regelgrößen Rückstand und Reihenfolgeabweichung ab. Es existiert noch keine vollständige Modellierung der Termintreue in Abhängigkeit ihrer Regelgrößen aus dem Modell der Fertigungssteuerung. Die nächs-

ten beiden Abschnitte erläutern daher zunächst diese Größen. Vorhandene Arbeiten zur Modellierung der Termintreue erläutert Abschnitt 2.3.

2.2.1.1 Rückstand

Rückstand ist die Differenz von Plan-Abgang und Ist-Abgang. Der Plan-Abgang bezeichnet den Arbeitsinhalt, der innerhalb eines Bezugszeitraums vom Arbeitssystem oder aus der gesamten Fertigung abgehen soll. Entsprechend bezeichnet der Ist-Abgang den Arbeitsinhalt, der im Bezugszeitraum tatsächlich fertiggestellten Aufträge. Der Arbeitsinhalt eines Auftrags lässt sich als Summe seiner Auftragszeiten (ZAU) erfassen. Die Auftragszeit ist die zum Rüsten und zum Bearbeiten des Auftrags notwendige Dauer. Sie ist in Stunden angegeben [Nyhuis-99, S. 17]. Sowohl Plan- als auch Ist-Abgang sind als kumulativ erfasste Werte über der Zeit im Durchlaufdiagramm aufgetragen (Abbildung 5 a). In seiner hier nicht dargestellten, ursprünglichen Form, zeigt das Durchlaufdiagramm den Verlauf von Zugang und Abgang eines Arbeitssystems, um den Bestandsverlauf sichtbar zu machen [Wiendahl-97, S. 83 f.].

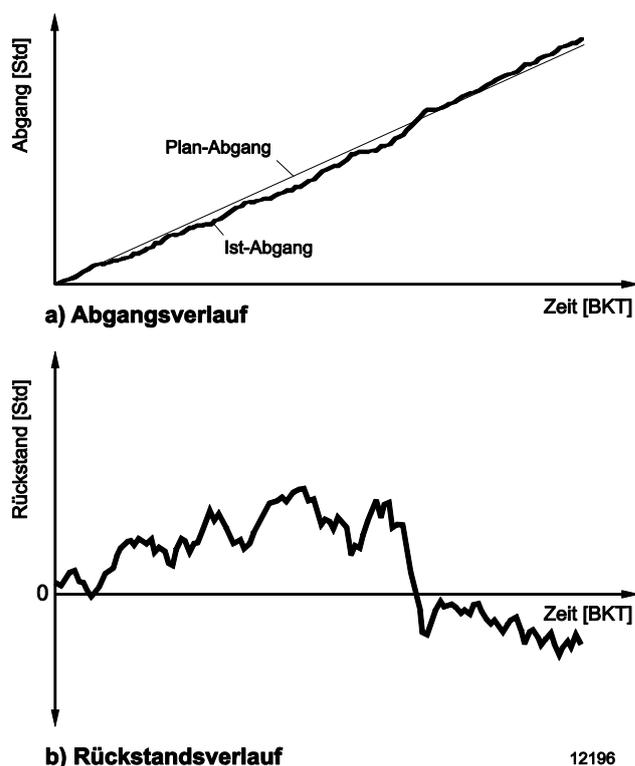


Abbildung 5: Durchlaufdiagramm mit Plan- und Ist-Abgang sowie Rückstandsverlaufdiagramm nach [Lödding-08, S. 480]

In dem hier dargestellten Durchlaufdiagramm (Bildteil a) ist der Rückstand zu jedem Zeitpunkt der vertikale Abstand zwischen der Plan-Abgangs- und der Ist-Abgangskurve

[Petermann-96, S. 65]. Der Rückstand ist als Differenz aus Plan- und Ist-Abgang in Abbildung 5 b eingezeichnet. Die Formel für den Rückstand zum Zeitpunkt t lautet [Lödding-08, S. 56; nach Petermann-96]:

$$RS(t) = AB_{\text{Plan}}(t) - AB_{\text{Ist}}(t) \quad (2.3)$$

mit RS : Rückstand [Std]
 AB_{Plan} : Plan-Abgang [Std]
 AB_{Ist} : Ist-Abgang [Std]

Der Rückstand kann sowohl einen positiven als auch einen negativen Wert annehmen. Ein positiver Rückstand bedeutet, dass das Arbeitssystem oder die Fertigung einen geringeren Abgang erreicht hat, als geplant war. Für die Aufträge, die das System dadurch später durchlaufen als geplant, bedeutet dies eine positive Terminabweichung. Je nach Höhe des Rückstands droht die Termintreue zu sinken. Ein negativer Rückstand entsteht, wenn das Arbeitssystem oder die Fertigung über den Betrachtungszeitraum einen höheren Abgang erzeugt hat als geplant war. In diesem Fall werden die Aufträge früher fertig als vorgesehen. Die dadurch resultierende negative Terminabweichung der Aufträge kann ebenfalls die Termintreue senken.

Schwankt der Rückstand um den Wert Null, entstehen Phasen positiven wie negativen Rückstands. Dementsprechend ergeben sich Phasen mit positiver und Phasen mit negativer Terminabweichung. Um diese Schwankungen zu erfassen, ist es sinnvoll, die Einflussgröße Rückstand durch den mittleren Rückstand (RS_m) und die Rückstandsstreuung (RS_s) zu beschreiben.

2.2.1.2 Reihenfolgeabweichung

Die Reihenfolgeabweichung (RA) bezeichnet Abweichungen zwischen der Plan-Reihenfolge und der Ist-Reihenfolge. Die Plan-Reihenfolge entsteht, wie oben beschrieben, durch die Feinterminierung der Aufträge. Sie wird im Allgemeinen dezentral, durch die Vorgabe von Prioritätsregeln an die Arbeitssysteme durchgesetzt. Die Ist-Reihenfolge ist das Resultat der tatsächlichen Reihenfolgeentscheidungen am Arbeitssystem. Werden Aufträge nicht nach ihrer Priorität, sondern nach anderen Kriterien ausgewählt, kommt es zu Reihenfolgeabweichungen. Voraussetzung für eine hohe Termintreue ist eine Prioritätsregel, die die terminliche Dringlichkeit der Aufträge berücksichtigt. Dies sind zum Beispiel Reihenfolgen, die nach kleinstem Plan-Start des Arbeitsvorgangs oder nach der kürzesten Schlupfzeit des Auftrags gebildet werden

[Moser & Engell-92, S. 395]. Das Liegenlassen der dringendsten Aufträge und Vorziehen von weniger dringenden Aufträgen führt zu Terminabweichungen und kann die Termintreue senken. Dies ist möglich, selbst wenn kein Rückstand auftritt [Lödding-08, S. 58 f.].

Es gibt zahlreiche Gründe, die zur Auswahl von weniger dringenden Aufträgen an einem Arbeitssystem führen können: Möglicherweise fehlt Material oder ein Werkzeug, um den dringendsten Auftrag zu bearbeiten. Um nicht in Rückstand zu geraten, wird dann mit dem nächst dringenderen Auftrag, für den Material verfügbar ist, fortgefahren. Manchmal ist nicht jeder Mitarbeiter qualifiziert jeden Auftrag zu bearbeiten und der dringendste Auftrag muss übersprungen werden. Häufig kann der dringendste Auftrag zwar ausgewählt werden, jedoch erscheint es dem Mitarbeiter nach einem langen Rüstvorgang oft sinnvoll auch andere Aufträge mit der gleichen Rüstkonfiguration aus dem Bestand am Arbeitssystem vorzuziehen. Auf diese Weise kann er mehrmaliges Rüsten vermeiden und die Leistung am Arbeitssystem steigern.

Ein praktisches Maß zur Beurteilung der Qualität der dezentralen Reihenfolgeentscheidungen ist die Reihenfolgedisziplin (RD) [Lödding-08, S. 456]. Sie beschreibt den Anteil der richtig getroffenen Reihenfolgeentscheidungen, also Entscheidungen, bei denen die Priorität der Aufträge eingehalten wurde. Die Reihenfolgedisziplin ist direkt in der Fertigung messbar und ein niedriger Wert ist eine direkte Ursache für Reihenfolgeabweichungen. Es kann aber auch zu Reihenfolgeabweichungen an Arbeitssystemen mit einer Reihenfolgedisziplin von 100 Prozent kommen. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn es einen dringenderen als den ausgewählten Auftrag gibt, der sich zum Zeitpunkt der Auswahl jedoch nicht im Bestand des Arbeitssystems befindet. Die Ursachen dieser Reihenfolgeabweichung sind dann entweder Rückstand oder Reihenfolgevertauschungen in vorgelagerten Arbeitssystemen oder in der Auftragsfreigabe.

Die Reihenfolgedisziplin bezieht sich nur auf die tatsächlich zur Auswahl stehenden Aufträge. Sie kann die durch andere Arbeitssysteme verursachten Reihenfolgeabweichungen nicht erfassen. Ebenso sagt die Reihenfolgedisziplin nichts über die Höhe der Reihenfolgeabweichung aus. Da es von Bedeutung für die Terminabweichung ist, ob ein Auftrag sehr viele oder nur wenige Aufträge übersprungen hat, ist ein Maß für die Reihenfolgeabweichung notwendig. Die Höhe der möglichen Reihenfolgeabweichung, also wie viele Aufträge übersprungen werden können, hängt vom Bestand am Arbeitssystem ab [Nyhuis-99, S. 87]. Zur Bestimmung der Reihenfolgeabweichung existiert

bisher keine Berechnungsvorschrift. Ein neues Verfahren zur Berechnung der Reihenfolgeabweichung erklärt Abschnitt 3.1.

2.2.2 Produktionskennlinien

Die Modellierung der Termintreue beschreibt den Zusammenhang zwischen der Termintreue und ihren Einflussgrößen, der Reihenfolgeabweichung und dem Rückstand. Vorlage für die Modellierung sind die Produktionskennlinien nach Nyhuis. Sie modellieren die Abhängigkeit der Auslastung, der Durchlaufzeit und des Bestands eines Arbeitssystems von seinem mittleren Bestand.

Die Leistungskennlinie (Abbildung 6) zeigt, dass oberhalb eines kritischen Bestands keine Leistungszunahme des Arbeitssystems durch Erhöhung des mittleren Bestands möglich ist. In diesem Fall ist immer ein ausreichender Arbeitsvorrat vorhanden. Senkt man den Bestand im Mittel aber unter diesen kritischen Wert, kommt es zu Materialflussabbrissen. Das Arbeitssystem steht zeitweilig still, da kein ausreichender Arbeitsvorrat vorliegt, in Folge sinkt die Leistung. In diesen Fällen ist die Durchlaufzeit jedes Auftrags genau die Zeit, die zum Rüsten und Bearbeiten gebraucht wird. Steigt der Bestand an, so kommt es zu einer Warteschlangenbildung am Arbeitssystem. Die Durchlaufzeit steigt dem mittleren Bestand entsprechend kontinuierlich an, da Aufträge nun auf ihre Bearbeitung warten müssen. Letzterer Zusammenhang ist als Durchlaufzeitkennlinie eingezeichnet. [Nyhuis-99, S. 37]

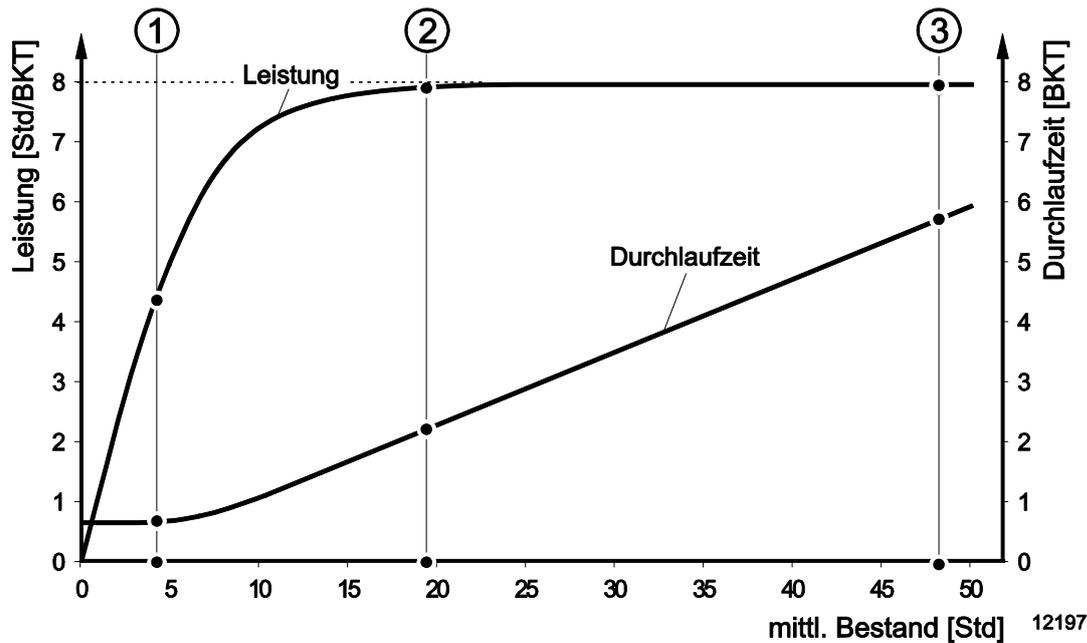


Abbildung 6: Darstellung unterschiedlicher Betriebszustände in Produktionskennlinien [Lödding-08, S. 73] nach [Nyhuis-99, S. 37]

Jeder Zustand eines Systems entspricht einem Betriebspunkt auf der Kennlinie. In Abbildung 6 markiert Betriebspunkt ① ein System, bei dem die Leistung zugunsten einer niedrigen Durchlaufzeit ebenfalls niedrig ist. Die maximale Leistung beträgt acht Stunden pro Betriebskalendertag. Punkt ② gilt für ein System, bei dem eine recht kurze Durchlaufzeit bei annähernd voller Auslastung eingestellt ist. Betriebspunkt ③ zeigt ein System im Überlastbereich. Die Auslastung ist maximal und die Durchlaufzeit ist bestandsbedingt erhöht. Die Kennlinien zeigen, wie sich das logistische System verändert, wenn nur der Bestand variiert wird. Auf diese Weise ist es möglich, den Ist-Zustand eines Arbeitssystems abzubilden und das Veränderungspotenzial durch Bestandsvariation sichtbar zu machen. [Nyhuis-99, S. 36]

Kennlinien unterstützen grafisch die Entscheidung darüber, welcher mittlere Bestand für ein Arbeitssystem die höchste Zielerreichung bedeutet. Sie machen die logistischen Zusammenhänge sichtbar. Sie existieren für die Größen Auslastung, Leistung, Durchlaufzeit, Übergangszeit und Reichweite [Lödding-08, S. 59]. Die Modellierung der Termintreue fügt sich in die bestehende Kennlinientheorie [Nyhuis-99, S. 61] ein. Die ebenfalls bestehenden Kennlinien zur relativen Termintreue und relativen Terminabweichung beschreibt der nächste Abschnitt. Es soll, ähnlich der Funktionsweise der Produktionskennlinie, möglich sein, eine Fertigung hinsichtlich ihrer Termintreue logistisch zu positionieren. In der Entstehung der Kennlinientheorie hat sich die deduktiv-

experimentelle Modellbildung bewährt. Diese Form der Modellbildung kommt auch zur Modellierung der Termintreue zum Einsatz. Das gewählte Vorgehen ist zu Beginn von Kapitel 4 erläutert.

2.3 Ansätze und Lücken der bisherigen Modellierung der Termintreue

Dieser Abschnitt fasst die wesentlichen Vorarbeiten auf dem Gebiet der Modellierung der Termintreue zusammen. Zunächst geht er auf die grafische Aufbereitung der Terminabweichung ein (Abschnitt 2.3.1); danach zeigt er den Stand der Technik in der Modellierung der Termintreue anhand der wichtigsten Arbeiten (Abschnitt 2.3.2). Der letzte Abschnitt des Kapitels fasst die Lücken im Stand der Technik und den daraus entstehenden Forschungsbedarf zusammen.

2.3.1 Analyse der Terminabweichung

Die Termintreue hängt direkt von der Terminabweichung ab (vgl. Abschnitt 2.1). Um die Termintreue zu analysieren, beginnen viele Projekte damit, die Terminabweichung der einzelnen Aufträge eines Betrachtungszeitraums zum besseren Verständnis in Diagrammen darzustellen. Wiendahl [Wiendahl-97, S. 107] stellt die Terminabweichung im Durchlaufdiagramm dar (Abbildung 7). Er trägt von der Ist-Abgangslinie aus einen horizontal verlaufenden Balken, die sog. Terminabweichungsfläche, für jeden Auftrag bis zu seinem Plan-Abgangstermin ein. Balken, die vom Abgangstermin aus in Richtung Vergangenheit laufen, kennzeichnen eine positive Terminabweichung; Balken, die in die Zukunft weisen, kennzeichnen eine negative Terminabweichung. Die Darstellungsform erschwert durch die versetzte Anordnung der Balken einen Vergleich der Terminabweichungen verschiedener Aufträge. Ein wesentlicher Vorteil dieser Darstellungsform liegt darin, dass der zeitliche Verlauf der Veränderung der Terminabweichungen zum Vorschein kommt. Es lassen sich Phasen vermehrter negativer Terminabweichungen von Phasen vermehrter positiver Terminabweichungen unterscheiden. Ebenso ist durch die Höhe der Balken, welche die Auftragszeit widerspiegelt, eine Korrelation zwischen der Größe eines Auftrags und seiner Terminabweichung festzustellen, sofern ein Zusammenhang besteht.

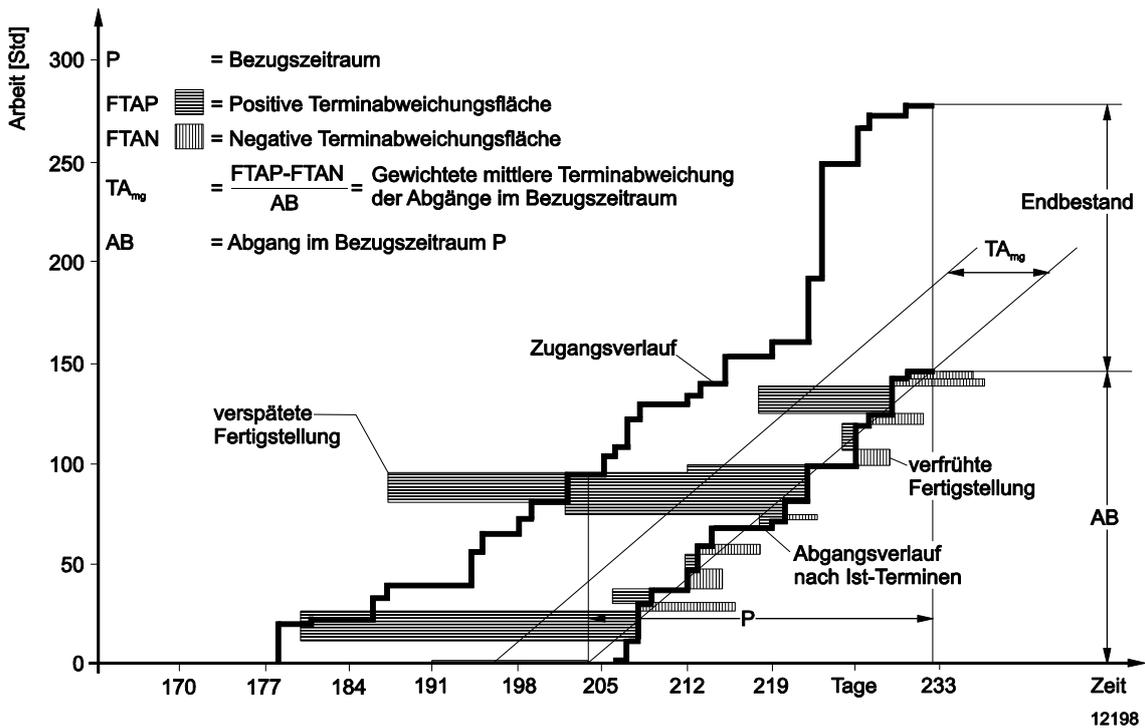


Abbildung 7: Terminabweichung der Abgänge im Durchlaufdiagramm [Wiendahl-97, S. 107]

Neben der Darstellung der Terminabweichung im Durchlaufdiagramm nach Wiendahl existieren weitere Formen zur grafischen Aufbereitung der Terminabweichung. Die am häufigsten anzutreffende Form ist das Histogramm (Abbildung 8). Es veranschaulicht die Häufigkeit der in einem Untersuchungszeitraum auftretenden Terminabweichungen. Die Auftragszeit findet darin keine Berücksichtigung.

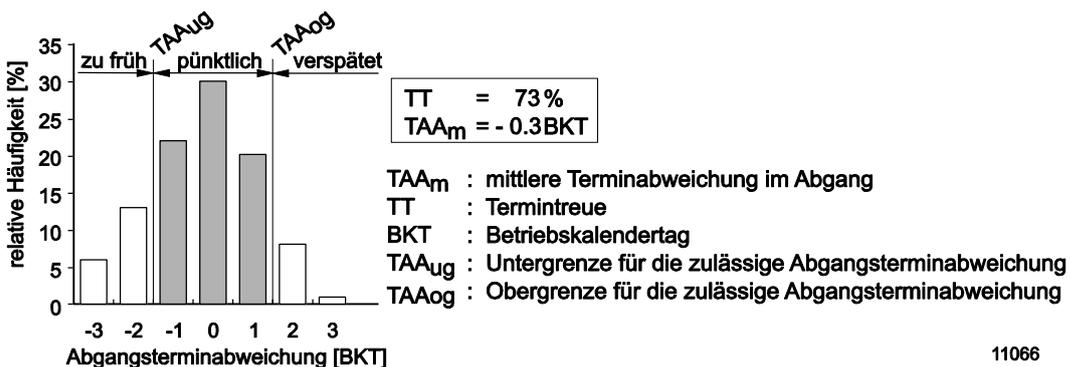


Abbildung 8: Verteilung der Abgangsterminabweichung im Histogramm

Die Stärke des Histogramms ist die Sichtbarmachung der Verteilung der Terminabweichung. Der Mittelwert der Verteilung ist eine nützliche Zusatzinformation. Es ist möglich, die Termintoleranz einzuzeichnen und so einen Überblick über die Anzahl der termintreu fertiggestellten Aufträge zu erhalten. Um die Terminabweichung grafisch dar-

zustellen, kommt in dieser Arbeit das Histogramm zur Anwendung. Charakteristische Balken im Histogramm, z. B. solche, die in das Termintoleranzintervall fallen, sind im Folgenden dunkel eingefärbt.

2.3.2 Vorarbeiten zur Modellierung der Termintreue

Es existieren bereits Ansätze zur Modellierung der Termintreue. Das bisher detaillierteste Modell der Termintreue ist die Terminkennlinie von Yu [Yu-01]. Er betrachtet die Wirkung des Bestands auf die relative Termintreue und erkennt den Einfluss des Rückstands auf die Abgangsterminabweichung (vgl. Abschnitt 2.3.2.1). Die Reihenfolge als Einflussgröße auf die Termintreue wurde bereits von Conway et al. [Conway et al.-67] untersucht (vgl. Abschnitt 2.3.2.2).

2.3.2.1 Die Terminkennlinie nach Yu

Yu modelliert die Terminabweichung im Abgang der Fertigung als Verkettung der Terminabweichung im Zugang zur Fertigung und der relativen Terminabweichung während des Auftragsdurchlaufs. Da die Zugangsterminabweichung als Grundlage für seine Modellierung weder berechnet noch gemessen werden konnte, hat er sie vernachlässigt und betrachtet ausschließlich die relative Terminabweichung [Yu-01, S. 43].

Yu benutzt den Einfluss des Bestands auf die Durchlaufzeit, um die Termintreue als Funktion der relativen Terminabweichung zu modellieren. Liegt der Bestand über seinem geplanten Niveau, ist die Durchlaufzeit länger als geplant und es treten positive relative Terminabweichungen auf. Sinkt der Bestand hingegen unter das geplante Niveau, verkürzt sich die Durchlaufzeit und die relative Terminabweichung wird negativ. Diesen Sachverhalt hat Yu zur Terminkennlinie aufbereitet:

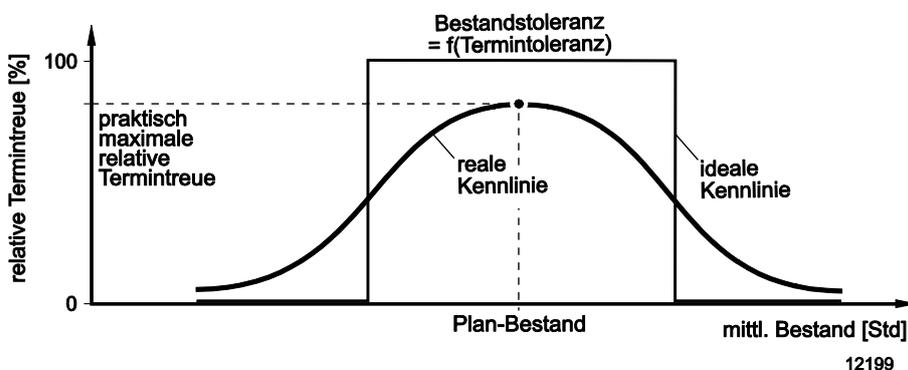


Abbildung 9: Terminkennlinie für die relative Termintreue [Lödding-08, S. 62] nach [Yu-01, S. 63]

Die Terminabweichung im Abgang definiert Yu als das Verhältnis von mittlerem Rückstand und mittlerer Leistung [Yu-01, S. 41; Lödding-08, S. 57]:

$$TAA_{m,g} = \frac{RS_m}{L_m} \quad (2.4)$$

mit $TAA_{m,g}$: mittlere gewichtete Terminabweichung im Abgang [BKT]
 RS_m : mittlerer Rückstand [Std]
 L_m : mittlere Leistung [Std/BKT]

Einige Quellen bezeichnen diese Formel auch als die zweite Trichterformel. Sie gilt sowohl für ein einzelnes Arbeitssystem als auch auf Auftragsebene für die gesamte Fertigung. Genau genommen berechnet Gleichung 2.4 die mit Auftragszeiten gewichtete mittlere Terminabweichung. Eine Beschreibung dieser Gewichtung findet sich bei Lödding [Lödding-08, S. 57]. Die Termintreue richtet sich in der vorliegenden Arbeit nur nach der Anzahl der termintreu fertiggestellten Aufträge und nicht nach deren Größe (vgl. Gleichung 2.1). Die Terminabweichung im Abgang bezieht sich daher im weiteren Verlauf der Arbeit auf den ungewichteten Wert. Bei statistischer Unabhängigkeit von Terminabweichung und Auftragsgröße entspricht die mittlere gewichtete Terminabweichung im Abgang dem ungewichteten Wert [Yu-01, S. 42].

2.3.2.2 Reihenfolgeuntersuchungen von Conway et al.

Den Einfluss unterschiedlicher Reihenfolgeregeln auf die logistischen Zielgrößen haben in den sechziger Jahren bereits Conway, Maxwell und Miller [Conway et al.-67] mit Hilfe der Simulationstechnik untersucht. Sie kommen zu dem Schluss, dass Reihenfolgeregeln, welche die terminliche Dringlichkeit der Aufträge berücksichtigen, positiv auf die Liefertreue wirken [Conway et al.-67, S. 232]. Überraschend ist für sie das Ergebnis, dass neben der Reihenfolgebildung nach dem frühesten Plan-Endtermin der Arbeitsvorgänge (FPE-Regel) und der Schlupfzeitregel auch die Kürzeste-Operationszeitregel (KOZ) gute Ergebnisse hinsichtlich der Termintreue liefert, obwohl diese Regel die Dringlichkeit der Aufträge nicht berücksichtigt. Eine Modellierung der Termintreue nehmen Conway et al. nicht vor.

2.3.3 Lücken im Stand der Technik und daraus abgeleiteter Forschungsbedarf

Die Vorarbeiten zur Modellierung der Termintreue zeigen Lücken: Yu untersucht ausschließlich die relative Terminabweichung und diese nur arbeitssystembezogen [Yu-01, S. 43]. Zugangsterminabweichungen schließt er aus. Zwar sind diese am Startarbeitsgang organisatorisch, also durch die Auftragsfreigabe, zu korrigieren [Yu-01, S. 55]; aber an Arbeitssystemen, die nicht direkt auf die Auftragsfreigabe folgen, kann die Zugangsterminabweichung von den Vorgängerarbeitssystemen herrühren. Letztgenannte Arbeitssysteme betrachtet Yu in seiner Arbeit nicht. Er erwähnt zwar den Einfluss von Reihenfolgeregeln auf die Terminabweichung, vernachlässigt aber in der analytischen Modellierung der mittleren Terminabweichung den Einfluss der Reihenfolgeabweichung. Sollte die Reihenfolgeabweichung einen Einfluss auf den Mittelwert der Terminabweichung haben, kann die zweite Trichterformel (Gleichung 2.4) nur dort gelten, wo Reihenfolgeabweichungen nicht auftreten. Wie zuvor Nyhuis [Nyhuis-99, S. 87], weist auch Yu auf die Bestandsabhängigkeit des Zusammenhangs zwischen Reihenfolgeabweichungen und Terminabweichungen hin, ohne diesen näher zu untersuchen [Yu-01, S. 54 ff.].

Über die Einflussgröße Reihenfolgeabweichung existieren Studien zur Untersuchung der Wirkung unterschiedlicher Reihenfolgeregeln, z. B. [Fischer-07]. Zahlreiche Arbeiten bestätigen die Ergebnisse von Conway et al. [Day & Hottenstein-70, S. 20; Ramasesh-90, S. 51; Jungwattanakit et al.-08, S. 364]. Meißner [Meißner-09, S. 76 ff.] definiert und berechnet die Reihenfolgeabweichung für Fahrzeuge in getakteten Automobilaußbastraßen, stellt aber keine Verbindung zur daraus resultierenden Terminabweichung her. Bisher fehlt eine Untersuchung der Wirkung auf die Liefertreue bzw. Termintreue, wenn gezielte Abweichungen von einer terminorientierten Prioritätsregel auftreten.

Folgende Fragen lässt der Stand der Technik offen:

1. Damit die Modellierung sämtliche Einflussgrößen, also auch die Reihenfolgeabweichung quantitativ berücksichtigen kann, ist zunächst eine Möglichkeit zu finden, die Reihenfolgeabweichung zu messen und die daraus resultierende Terminabweichung zu ermitteln. Wie kann man die Reihenfolgeabweichung messen und wie wirkt sich der Bestand auf die Höhe der maximal möglichen Reihenfolgeabweichung aus?

2. Aus verschiedenen Gründen kann es in der Produktion zu Rückständen und Reihenfolgeabweichungen an einzelnen Arbeitssystemen kommen. Wie viel Reihenfolgeabweichung und wie viel Rückstand sind für eine Fertigung vertretbar, bevor die daraus resultierenden Terminabweichungen die Termintreue unter den vom Unternehmen selbst gewählten Zielwert absenken?
3. Die Beantwortung dieser Frage fordert ein vollständiges Modell der Termintreue. Wie kann ein Modell die Termintreue im Abgang der Fertigung unter Berücksichtigung aller bekannten Einflussgrößen beschreiben?
4. Welche Erkenntnisse bringt die Erweiterung der Einzelsystembetrachtungen von Yu auf die gesamte Fertigung?
5. Wie sehen Termintreuekennlinien aus und wie lässt sich ein logistisches System damit positionieren?

Aus diesen Fragestellungen leitet sich das Ziel der vorliegenden Arbeit, die Termintreue umfassend zu modellieren, ab. Die Aufgabe besteht darin, mit Hilfe eines neuen Berechnungsansatzes die Reihenfolgeabweichung mit der resultierenden Terminabweichung zu verbinden und damit die Voraussetzungen zu schaffen, die Termintreue analytisch zu modellieren. Die Simulationstechnik validiert mit Hilfe von bereitgestellten Betriebsdaten die analytisch hergeleitete Termintreueformel und passt die Modellparameter an, um ein realitätsnahes Modell zu erhalten. Die aus den Ergebnissen ableitbaren Termintreuekennlinien ermöglichen es, ein logistisches System hinsichtlich seiner Termintreue zu positionieren und sein Verbesserungspotenzial zu erkennen.

3 Analyse der Terminabweichung

Abschnitt 2.3.1 erläuterte den Stand der Technik zur Analyse der Terminabweichung. Demnach werden die Terminabweichungen aller Aufträge eines in der Vergangenheit liegenden Erfassungszeitraums berechnet und in Form eines Histogramms dargestellt. Grundlage zur Interpretation dieser Daten sind in der Regel zwei Kennzahlen: Die Termintreue gibt Auskunft über die logistische Leistung des Untersuchungsbereichs und die mittlere Terminabweichung kennzeichnet, ob die Aufträge im Mittel zu früh oder zu spät fertiggestellt wurden. Einen direkten Rückschluss auf die Ursachen der Terminabweichung lässt dieses Vorgehen nicht zu. Dieses Kapitel erweitert die Analyse und Interpretation der Terminabweichung, so dass eine verursachungsgerechte Zuordnung zu den Einflussgrößen Reihenfolgeabweichung und Rückstand möglich ist.

Abschnitt 3.1 definiert die Reihenfolgeabweichung und stellt eine Methode zu deren Messung vor. Abschnitt 3.2 leitet darauf aufbauend die Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung her. Analog ermittelt Abschnitt 3.3 die Terminabweichung aus Rückstand. Abschnitt 3.4 zeigt, dass es durch diese Zuordnung möglich ist, die Terminabweichung im Abgang einer Fertigung in ihre Bestandteile aus Reihenfolgeabweichung und aus Rückstand zu zerlegen und getrennt zu interpretieren.

3.1 Definition und Messung der Reihenfolgeabweichung

Während der Rückstand in Zeiteinheiten messbar ist, ist die Reihenfolgeabweichung bislang nur unzureichend mathematisch definiert. Voraussetzung für eine analytische Modellbildung der Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung ist daher eine quantitative Definition der Reihenfolgeabweichung. Reihenfolgeabweichungen (RA) sind Abweichungen zwischen der Plan- und der Ist-Reihenfolge. Die Reihenfolgeabweichung tritt erst mit der Bearbeitung der geplanten Aufträge auf. Dementsprechend findet die Berechnung der Reihenfolgeabweichung ex post mit Hilfe des Produktionsplans und der Rückmeldedaten statt. Diese Arbeit betrachtet zur Modellierung der Termintreue nur solche Reihenfolgen, die die terminliche Dringlichkeit der Aufträge berücksichtigen. Abweichungen von anderen Plan-Reihenfolgen (z.B. FIFO, KOZ, etc.) lassen sich analog zum vorgestellten Vorgehen ermitteln. Dieser Abschnitt stellt die Berechnung der Reihenfolgeabweichung anhand von Beispieldaten aus einem Lehrbuch [Wiendahl-97, S. 106] für ein einzelnes Arbeitssystem vor. Dieses Vorgehen untermauert, dass das vorgestellte Verfahren aufwandsarm unter Verwendung von Daten, die in den meisten Fertigungen verfügbar sind, durchführbar ist.

3.1.1 Messung der Reihenfolgeabweichung

Betrachtet man den Produktionsplan, so ist in den meisten Fällen eine eindeutige Reihenfolge der Aufträge aus ihren Plan-Endterminen herauszulesen. Stellt man den Plan-Endterminen die Ist-Endtermine gegenüber, erkennt man Abweichungen. Die reine Betrachtung von Abweichungen der Endtermine reicht jedoch nicht aus, da diese auch durch Rückstand entstehen können. Um den Rückstand auszublenden, ist es notwendig, den Fokus auf die reine Reihenfolgeabweichung zu legen. Dies gelingt analog dem Vorgehen von Meißner [Meißner-09, S. 78] durch die Vergabe von Prioritätsrängen für die einzelnen Aufträge. Als Vorbereitung zum Priorisieren der Aufträge dient Tabelle 1, die den Produktionsplan mit den Rückmeldedaten vereint. In den Spalten drei und vier stehen das Plan- und das Ist-Bearbeitungsende jedes Auftrags. Zuerst ordnet man die Aufträge nach ihrer geplanten Priorität. Dazu sortiert man die Tabelle aufsteigend nach dem Plan-Bearbeitungsende. Da an einem Betriebskalendertag der Abgang von mehr als einem Auftrag eingeplant sein kann, bedarf es noch eines zweiten Sortierkriteriums, um die terminliche Dringlichkeit der Aufträge zu unterscheiden. Ein guter Indikator für die tatsächliche Dringlichkeit ist das Ist-Bearbeitungsende. Dies folgt aus der Annahme, dass die Fertigung einen positiven Willen zur Auswahl des dringendsten Auftrags besitzt. Stimmen für mehrere Aufträge sowohl das Plan- als auch das Ist-Bearbeitungsende überein, ist es zweckmäßig, den Auftrag als dringender einzustufen, den die Fertigung zuerst zurückmeldete. Der Index in Spalte eins markiert die Position des Auftrags in der Rückmeldedatei. Mit Hilfe der drei Sortierkriterien, erst nach Plan-Endtermin, dann nach Ist-Endtermin und dann nach Index, ist die geplante Priorität der Aufträge eindeutig ermittelbar. Diese Priorität heißt Plan-Rang (PR_{Plan}) eines Auftrags. Zur Vergabe der Plan-Ränge werden die Aufträge in der sortierten Liste in Spalte fünf, beginnend bei eins, fortlaufend nummeriert (Die Sortierung zur Vergabe der Plan-Ränge ist in Tabelle 1 nicht mehr erhalten, sie ist bereits für die Bestimmung des Ist-Rangs sortiert.). Anhand des Plan-Rangs erkennt man, in welcher Reihenfolge die Aufträge gemäß Produktionsplan zur Bearbeitung vorgesehen waren. Berücksichtigen Planung und Auftragsrückmeldung zusätzlich zu den Betriebskalendertagen auch die Uhrzeit, kann das dritte Sortierkriterium meist entfallen und die Ermittlung der Plan-Ränge vereinfacht sich.

Tabelle 1: Vergabe von Ist- und Plan-Rängen

1	2	3	4	5	6	7
Index	Auftragsnummer	TAE _{Plan}	TAE _{Ist}	Plan-Rang	Ist-Rang	Reihenfolgeabweichung
[-]	[-]	[BKT]	[BKT]	[-]	[-]	[-]
1	115	191	206	3	1	-2
2	119	204	207	5	2	-3
3	110	180	208	1	3	2
4	125	216	208	11	4	-7
5	120	204	209	6	5	-1
6	124	215	212	10	6	-4
7	118	212	213	7	7	0
8	127	218	213	12	8	-4
9	121	214	214	9	9	0
10	126	218	219	13	10	-3
12	116	202	220	4	11	7
11	131	223	220	15	12	-3
13	108	187	222	2	13	11
14	117	212	222	8	14	6
16	132	225	226	16	15	-1
15	135	229	226	17	16	-1
17	140	232	227	18	17	-1
18	123	218	229	14	18	4
19	145	237	229	20	19	-1
20	142	236	230	19	20	1

$\Sigma = 0$

Um die Plan- mit der Ist-Reihenfolge vergleichen zu können, benötigt jeder Auftrag zusätzlich einen Ist-Rang. Zur Ermittlung der Ist-Ränge sortiert man die Tabelle nach der den Aufträgen von der Fertigung tatsächlich beigemessenen Priorität. Dazu ist die Tabelle nach Ist-Bearbeitungsende, dann nach Plan-Bearbeitungsende und als letztes nach Index zu sortieren. In dieser Form ist die Tabelle eindeutig nach der höchsten Priorität der Aufträge bei der Bearbeitung sortiert. Durch Nummerieren der Aufträge in Spalte sechs entstehen die Ist-Ränge der Aufträge. Die Reihenfolgeabweichung in Spalte sieben ist die Differenz von Ist- und Plan-Rang eines Auftrags [Meißner-09, S. 78]:

$$RA_i = PR_{i,Ist} - PR_{i,Plan} \quad (3.1)$$

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

Die Reihenfolgeabweichung gibt an, um wie viele Ränge die Fertigung die Bearbeitung des Auftrags verzögert ($RA_i > 0$) bzw. beschleunigt hat ($RA_i < 0$). Ihr Mittelwert und ihre Summe sind immer null. Dies drückt aus, dass sich für jeden vorgezogenen Auftrag ein anderer verzögert. Ist die Reihenfolgeabweichung eines Auftrags negativ, bedeutet dies ein Vorziehen gegenüber dem Plan. Eine positive Reihenfolgeabweichung drückt einen zurückgestellten Auftrag aus. Die Reihenfolgeabweichung ist einheitenlos und berücksichtigt nicht die Größe der Aufträge. Wird ein Auftrag von einem großen Auftrag übersprungen, führt dies zu einer stärkeren Terminabweichung für den übersprungenen Auftrag, als wenn ihn ein kleiner Auftrag überspringt. Eine Aussage über die Wirkung der Reihenfolgeabweichung auf die Terminabweichung trifft daher nur die mit Auftragszeiten gewichtete Reihenfolgeabweichung.

3.1.2 Messung der gewichteten Reihenfolgeabweichung

Die Ermittlung der gewichteten Reihenfolgeabweichung beginnt ebenfalls mit einer Tabelle, die den Produktionsplan und die Rückmeldedaten vereint. Zusätzlich zu den Informationen in Tabelle 1 führt Tabelle 2 die Auftragszeiten (ZAU) auf. Zur Vergabe der gewichteten Plan-Ränge sind die Einträge in der Tabelle wie bei der Vergabe der ungewichteten Plan-Ränge nach der geplanten Priorität der Aufträge zu ordnen. In der sechsten Spalte steht die Summe der Auftragszeiten des jeweiligen Auftrags und aller seiner geplanten Vorgänger. Diese Summe ist der gewichtete Plan-Rang des Auftrags. Nach Ermittlung des gewichteten Plan-Rangs wird die Tabelle gemäß der tatsächlichen Bearbeitung der Aufträge umsortiert. Analog zum ungewichteten Ist-Rang sortiert man zunächst nach Ist-Fertigstellungstermin, dann nach Plan-Fertigstellungstermin und schließlich nach der Position in der Rückmeldeliste. Der gewichtete Ist-Rang in Spalte sieben gibt die kumulierte Plan-Auftragszeit an, die zur Fertigstellung des Auftrags und seiner Vorgänger bearbeitet wurde. Die Differenz von gewichtetem Ist-Rang und gewichtetem Plan-Rang in der achten Spalte heißt gewichtete Reihenfolgeabweichung (RA_g):

$$RA_{g,i} = PR_{g,i,Ist} - PR_{g,i,Plan} \quad (3.2)$$

mit $RA_{g,i}$: gewichtete Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [Std]

$PR_{g,i,Ist}$: gewichteter Ist-Prioritätsrang von Auftrag i [Std]

$PR_{g,i,Plan}$: gewichteter Plan-Prioritätsrang von Auftrag i [Std]

Die gewichtete Reihenfolgeabweichung gibt die Anzahl der Stunden an, die die Fertigung den Auftrag gegenüber dem Plan vorgezogen (negatives Vorzeichen) oder zurückgestellt (positives Vorzeichen) hat.

Tabelle 2: Vergabe von gewichteten Ist- und Plan-Rängen

1	2	3	4	5	6	7	8
Index	Auftragsnummer	TAE_{Plan}	TAE_{Ist}	ZAU	gewichteter Plan-Rang	gewichteter Ist-Rang	gewichtete Reihenfolgeabweichung
[-]	[-]	[BKT]	[BKT]	[Std]	[Std]	[Std]	[Std]
1	115	191	206	0,5	29,7	0,5	-29,2
2	119	204	207	11,4	48,5	11,9	-36,6
3	110	180	208	15,4	15,4	27,3	11,9
4	125	216	208	3,8	89,4	31,1	-58,3
5	120	204	209	6,8	55,3	37,9	-17,4
6	124	215	212	9,6	85,6	47,5	-38,1
7	118	212	213	7,7	63,0	55,2	-7,8
8	127	218	213	5,3	94,7	60,5	-34,2
9	121	214	214	8,8	76,0	69,3	-6,7
10	126	218	219	2,6	97,3	71,9	-25,4
12	116	202	220	7,4	37,1	79,3	42,2
11	131	223	220	2,1	113,0	81,4	-31,6
13	108	187	222	13,8	29,2	95,2	66,0
14	117	212	222	4,2	67,2	99,4	32,2
16	132	225	226	13,8	126,8	113,2	-13,6
15	135	229	226	6,9	133,7	120,1	-13,6
17	140	232	227	5,1	138,8	125,2	-13,6
18	123	218	229	13,6	110,9	138,8	27,9
19	145	237	229	5,1	146,0	143,9	-2,1
20	142	236	230	2,1	140,9	146,0	5,1

$\Sigma = -142,9$

Die mittlere gewichtete Reihenfolgeabweichung entspricht dem Mittelwert der gewichteten Reihenfolgeabweichungen aller Aufträge:

$$RA_{g,m} = \frac{\sum_{i=1}^n RA_{g,i}}{n} \quad (3.3)$$

mit $RA_{g,m}$: mittlere gewichtete Reihenfolgeabweichung [Std]
 $RA_{g,i}$: gewichtete Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [Std]
 n : Anzahl Aufträge [-]

Im Gegensatz zur ungewichteten Reihenfolgeabweichung sind Summe und Mittelwert der gewichteten Reihenfolgeabweichung über alle Aufträge nicht immer null. Die Summe der gewichteten Reihenfolgeabweichungen aller Aufträge drückt aus, wie die Reihenfolgeabweichungen den Produktionsablauf gegenüber der Planung verändert haben. In diesem Beispiel erzeugte das Vorziehen von Aufträgen mit kleiner Auftragszeit eine Beschleunigung von insgesamt 142,9 Stunden. Je nach Leistung des Arbeitssystems resultiert daraus eine entsprechende Verkürzung der mittleren Durchlaufzeit. Eine Erläuterung dieses Effekts folgt im nächsten Abschnitt (Abschnitt 3.2).

Analog zur Berechnung des Mittelwerts entspricht die Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung der Standardabweichung der Werte von $RA_{g,i}$. Da das Vorziehen eines Auftrags immer positive wie negative gewichtete Reihenfolgeabweichungen auslöst, tritt bei Reihenfolgeabweichungen immer eine Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung auf. Je größer die Auftragszeiten sind, desto höher fällt die Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung aus.

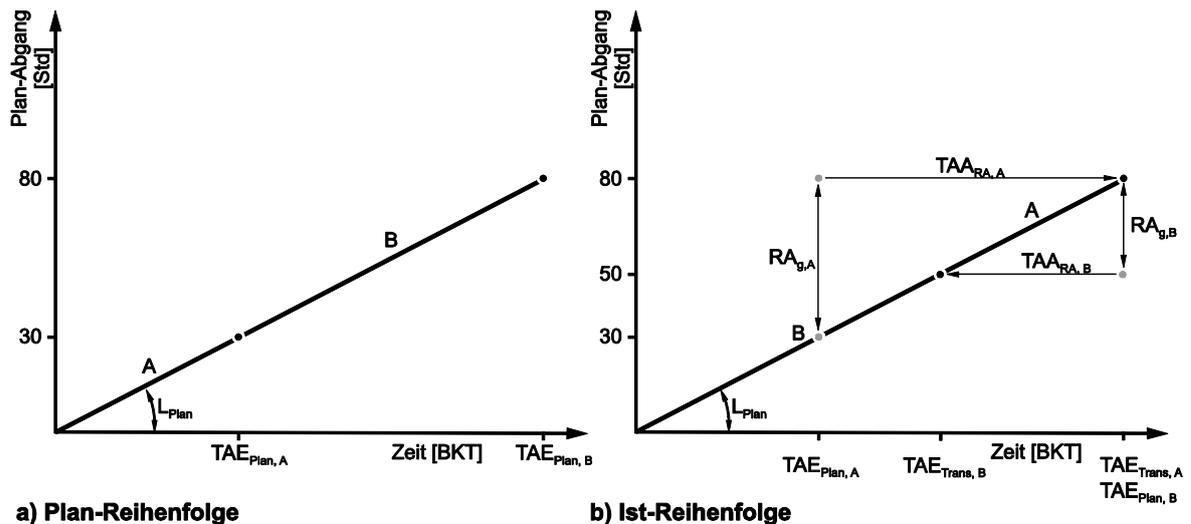
Generell ist die Berechnung der Reihenfolgeabweichung für einzelne Arbeitssysteme und ganze Fertigungen anwendbar. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass es bei mehrmaschinigen Arbeitssystemen zu Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Reihenfolgeabweichung kommen kann. Dies ist möglich, da der wichtigste Auftrag zuerst ausgewählt und bearbeitet werden kann, während ihn auf einer Parallelmaschine ein unwichtigerer kleinerer Auftrag überholt. In der Auswertung ergäbe dieses Systemverhalten eine messbare Reihenfolgeabweichung im Abgang, obwohl der dringendste Auftrag zuerst zur Bearbeitung kam. Eine präzisere Ermittlung der Reihenfolgeabweichung ist möglich, wenn der Ist- und der Plan-Bearbeitungsbeginn der Aufträge verfügbar sind und man die Reihenfolgeabweichung mit diesen Werten berechnet. Dies ist jedoch nur in wenigen Produktionen möglich, da übliche Betriebsdatenerfassungssysteme das Bearbeitungsende aufzeichnen und nicht den Bearbeitungsbeginn. Um die Übertragbarkeit auf reale Produktionsbetriebe zu ermöglichen, misst diese Arbeit die Reihenfol-

geabweichung ebenfalls im Abgang. Die daraus entstehende Unschärfe der Messergebnisse ist in aller Regel vernachlässigbar.

In netzwerkartigen Produktionsstrukturen können Reihenfolgeabweichungen trotz Abarbeitung der Aufträge nach Dringlichkeit entstehen. Dieser Fall kann z. B. eintreten, wenn ein Auftrag an einem gestörten Arbeitssystem liegt und das nachfolgende Arbeitssystem die Arbeit mit einem weniger dringenden Auftrag fortsetzt, um sich vor Rückstand zu schützen. Die Reihenfolgedisziplin gibt an, ob die Auswahl an einem Arbeitssystem entsprechend der verfügbaren Aufträge nach geplanter Priorität erfolgte. Sie misst den Anteil der richtig getroffenen Reihenfolgeentscheidungen an allen Reihenfolgeentscheidungen (vgl. Abschnitt 2.2.1.2). Sie kann einen Hinweis auf die Quelle der Reihenfolgeabweichungen geben. Eine niedrige Reihenfolgedisziplin führt immer zu Reihenfolgeabweichungen. Verursacher der Reihenfolgeabweichung ist dann das Arbeitssystem selbst. Treten Reihenfolgeabweichungen bei einer hohen Reihenfolgedisziplin auf, ist ihre Ursache an vorgelagerten Arbeitssystemen oder in der Auftragsfreigabe zu suchen. Die Reihenfolgeabweichung im Zugang zum Arbeitssystem gibt Gewissheit über diesen Sachverhalt. Ihre Ermittlung verläuft analog zum vorgestellten Verfahren, basiert jedoch auf den Plan- und Ist-Zugangsterminen der Aufträge.

3.2 Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung

Mit Hilfe der gewichteten Reihenfolgeabweichung ist es möglich, die Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung zu berechnen. Im Durchlaufdiagramm sind entlang der Plan-Abgangsgeraden die Aufträge in ihrer geplanten Reihenfolge aufgetragen (Abbildung 10 a). Die Steigung der Plan-Abgangsgeraden entspricht der Plan-Leistung. Der y-Wert gibt die Summe der Auftragszeit der eingeplanten Aufträge an, die zum entsprechenden Zeitpunkt (x-Wert) abgegangen sein sollten. Für jeden Auftrag ist es möglich, den Plan-Rang abzulesen. Auftrag A hat einen gewichteten Plan-Rang von 30 Stunden, Auftrag B von 80 Stunden. Abbildung 10 b zeigt die Ist-Reihenfolge der Bearbeitung. Die Aufträge A und B sind gegenüber dem Plan vertauscht. Der gewichtete Ist-Rang von Auftrag B ist 50 Stunden und der von Auftrag A 80 Stunden. Die gewichtete Reihenfolgeabweichung beträgt somit für Auftrag A 50 Stunden und für Auftrag B -30 Stunden (vgl. Gleichung 3.2). Die sich aus der Verschiebung der Aufträge ergebenden neuen Plan-Bearbeitungsenden sind als transformierte Bearbeitungsenden (TAE_{Trans}) der Aufträge definiert.



- $TAA_{RA,i}$: Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung von Auftrag i
- TAE_{Plan} : Plan-Bearbeitungsende Auftrag
- TAE_{Trans} : Transformatiertes Bearbeitungsende des Auftrags
- L : Leistung
- $RA_{g,i}$: Gewichtete Reihenfolgeabweichung von Auftrag i
- BKT : Betriebskalendertage

11936

Abbildung 10: Berechnung der Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung

Die Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung entspricht für einen einzelnen Auftrag dem Quotienten aus gewichteter Reihenfolgeabweichung und geplanter Leistung:

$$TAA_{RA,i} = \frac{RA_{g,i}}{L_{Plan}} \quad (3.4)$$

- mit $TAA_{RA,i}$: Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [BKT]
- $RA_{g,i}$: gewichtete Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [Std]
- L_{Plan} : Plan-Leistung [Std/BKT]

Der Mittelwert der Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung entspricht der mittleren gewichteten Reihenfolgeabweichung geteilt durch die mittlere Plan-Leistung.

$$TAA_{RA,m} = \frac{RA_{g,m}}{L_{Plan,m}} \quad (3.5)$$

- mit $TAA_{RA,m}$: mittlere Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung [BKT]
- $RA_{g,m}$: mittlere gewichtete Reihenfolgeabweichung [Std]
- $L_{Plan,m}$: mittlere Plan-Leistung [Std/BKT]

Die mittlere Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung kann sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Ein negativer Wert entsteht durch das Vorziehen von Aufträgen mit geringer Auftragszeit gegenüber der Planung. Ein solches Verhalten beschleunigt viele kleine Aufträge, während nur wenige große Aufträge eine Verzögerung erfahren. Die mittlere Durchlaufzeit sinkt. Diesen Effekt beschreiben Conway et al. als durchlaufzeitverkürzende Wirkung der KOZ-Regel [Lödding-08, S. 452]. Entsprechend führt die Anwendung der LOZ-Regel zu positiver mittlerer Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung.

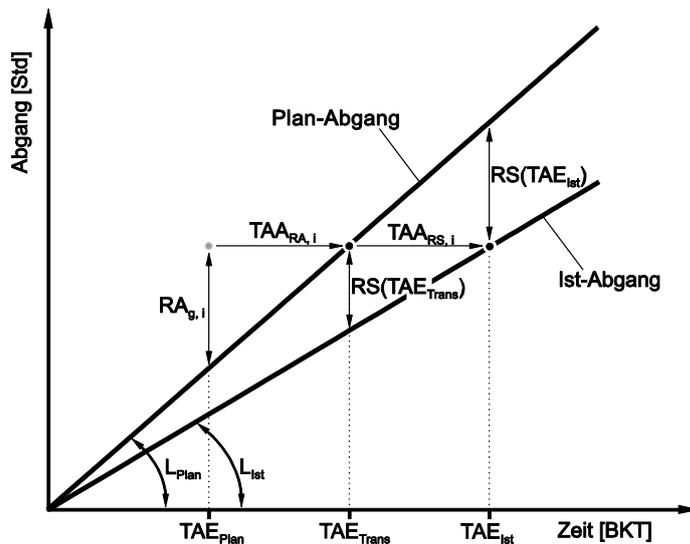
Die Streuung der Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung entspricht der Standardabweichung. Die Formel zu ihrer Berechnung lautet:

$$TAA_{RA,s} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{RA_{g,i}}{L_{Plan,m}} \right)^2 - TAA_{RA,m}^2} \quad (3.6)$$

- mit
- $TAA_{RA,s}$: Streuung der Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung [BKT]
 - $TAA_{RA,m}$: mittlere Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung [BKT]
 - $RA_{g,i}$: gewichtete Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [Std]
 - $L_{Plan,m}$: mittlere Plan-Leistung [Std/BKT]
 - n : Anzahl der Aufträge [-]

3.3 Terminabweichung aus Rückstand

Abweichungen der Ist- von der Plan-Leistung entsprechen Abweichungen zwischen Plan- und Ist-Abgang im Betrachtungszeitraum. Die Terminabweichung aus Rückstand entsteht aus Differenzen zwischen der Plan- und der Ist-Leistung des Arbeitssystems. Man vergleicht das transformierte Plan-Bearbeitungsende der Aufträge mit dem Ist-Bearbeitungsende, um den Einfluss der Reihenfolgeabweichung auszublenden. Auf diese Weise wird der Zeitpunkt ermittelt, zu dem der gewichtete Ist-Rang des Auftrags im Plan-Abgang hätte erreicht werden sollen und wann er tatsächlich im Ist-Abgang erreicht wurde. Die Differenz aus beiden Zeitpunkten ist die Terminabweichung aus Rückstand. Der trigonometrische Zusammenhang zwischen Rückstand, Leistung und Terminabweichung ist in Abbildung 11 dargestellt.



- $TAA_{RA,i}$: Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung von Auftrag i
- $TAA_{RS,i}$: Terminabweichung aus Rückstand von Auftrag i
- TAE_{Plan} : Plan-Bearbeitungsende Auftrag
- TAE_{Trans} : Transformatiertes Bearbeitungsende des Auftrags
- TAE_{Ist} : Ist-Bearbeitungsende des Auftrags
- L : Leistung
- $RA_{g,i}$: Gewichtete Reihenfolgeabweichung von Auftrag i
- BKT : Betriebskalendertage
- $RS(t)$: Rückstand zum Zeitpunkt t

11938

Abbildung 11: Berechnung der Terminabweichung aus Rückstand

Die Terminabweichung aus Rückstand lässt sich ebenfalls analytisch bestimmen. Es ist möglich, die Terminabweichung einzelner Aufträge auf zwei Wegen zu berechnen. Misst man den Rückstand am transformierten Bearbeitungsende des Auftrags, so ergibt sich die Terminabweichung als Quotient aus Rückstand und Ist-Leistung des Arbeitssystems.

$$TAA_{RS,i} = \frac{RS(TAE_{Trans,i})}{L_{Ist}} \quad (3.7)$$

- mit $TAA_{RS,i}$: Terminabweichung aus Rückstand von Auftrag i [BKT]
- $RS(t)$: Rückstand zum Zeitpunkt t [Std]
- L_{Ist} : Ist-Leistung [Std/BKT]

Misst man den Rückstand zum Ist-Bearbeitungsende des Auftrags, so ist die Terminabweichung aus Rückstand der Quotient aus Rückstand und Plan-Leistung des Arbeitssystems:

$$TAA_{RS,i} = \frac{RS(TAE_{Ist,i})}{L_{Plan}} \quad (3.8)$$

mit $TAA_{RS,i}$: Terminabweichung aus Rückstand von Auftrag i [BKT]
 $RS(t)$: Rückstand zum Zeitpunkt t [Std]
 L_{Plan} : Plan-Leistung [Std/BKT]

Für die mittlere Terminabweichung gilt die von Yu bereits erkannte zweite Trichterformel (vgl. Gleichung 2.4). Sie bezieht sich aber nicht auf die gesamte Terminabweichung im Abgang, sondern nur auf den Anteil aus Rückstand:

$$TAA_{RS,m} = \frac{RS_m}{L_m} \quad (3.9)$$

mit $TAA_{RS,m}$: mittlere Terminabweichung aus Rückstand [BKT]
 RS_m : mittlerer Rückstand [Std]
 L_m : mittlere Leistung [Std/BKT]

Die Streuung der Terminabweichung aus Rückstand entspricht ebenfalls der Standardabweichung der Einzelwerte:

$$TAA_{RS,s} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{RS_i}{L_m}\right)^2 - TAA_{RS,m}^2} \quad (3.10)$$

mit $TAA_{RS,s}$: Streuung der Terminabweichung aus Rückstand [BKT]
 $TAA_{RS,m}$: mittlere Terminabweichung aus Rückstand [BKT]
 RS_i : Rückstand an Betriebskalendertag i [Std]
 L_m : mittlere Leistung [Std/BKT]
 n : Anzahl der Betriebskalendertage im Erfassungszeitraum [-]

3.4 Zerlegung der Terminabweichung

Es ist möglich die Terminabweichung im Abgang getrennt nach Einflussgrößen zu berechnen. Ein Auftrag kann sowohl eine Terminabweichung aus Rückstand (TAA_{RS}), als auch eine Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung (TAA_{RA}) besitzen. Die Terminabweichung im Abgang entspricht der Summe beider Abweichungen:

$$TAA = TAA_{RS} + TAA_{RA} \quad (3.11)$$

mit TAA : Terminabweichung im Abgang [BKT]
 TAA_{RS} : Terminabweichung aus Rückstand [BKT]

TAA_{RA} : Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung [BKT]

Umgekehrt kann die Terminabweichung im Abgang auch in ihre Bestandteile zerlegt werden. Im Folgenden wird exemplarisch die Verteilung der Terminabweichung des Beispieldatensatzes (vgl. Tabelle 1 und Tabelle 2) in die Bestandteile aus Reihenfolgeabweichung und aus Rückstand zerlegt.

Die Zerlegung der Terminabweichung beginnt mit der Berechnung des transformierten Plan-Endtermins für jeden Auftrag. Dies ist mit einem Tabellenkalkulationsprogramm auch für große Datensätze aufwandsarm möglich. Zusätzlich zu Tabelle 2, die die Terminalsituation aus Auftragssicht widerspiegelt, ist für die Berechnung eine weitere Tabelle notwendig, die die Betriebskalendertage der Fertigung mit ihrem jeweiligen Plan-Abgang aufführt. Sowohl der Plan-Abgang als auch der gewichtete Ist-Rang sind kumulierte Auftragszeiten. Sie lassen sich daher direkt vergleichen. Es ist zu ermitteln, an welchem Betriebskalendertag das Arbeitssystem den Plan-Abgang in Höhe des gewichteten Ist-Rangs des Auftrags erreicht oder erstmals überschritten hat. Dieser Betriebskalendertag ist der transformierte Plan-Endtermin des Auftrags. Mit Hilfe der trigonometrischen Zusammenhänge aus Abbildung 11 ist es möglich, TAA_{RA} und TAA_{RS} für jeden Auftrag zu berechnen. Es gilt:

$$TAA_{RA, i} = TAE_{Trans, i} - TAE_{Plan, i} \quad (3.12)$$

und

$$TAA_{RS, i} = TAE_{Ist, i} - TAE_{Trans, i} \quad (3.13)$$

mit $TAA_{RA, i}$: Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [BKT]

$TAA_{RS, i}$: Terminabweichung aus Rückstand von Auftrag i [BKT]

$TAE_{Trans, i}$: Transformiertes Bearbeitungsende von Auftrag i [BKT]

$TAE_{Plan, i}$: Plan-Bearbeitungsende von Auftrag i [BKT]

$TAE_{Ist, i}$: Ist-Bearbeitungsende von Auftrag i [BKT]

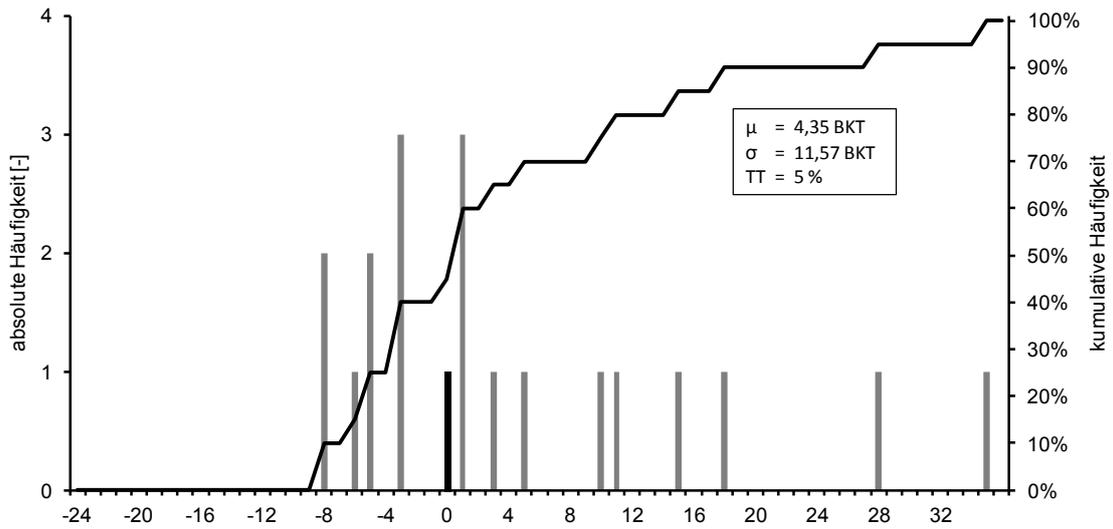
Die Verteilungen von TAA_{RA} und TAA_{RS} sind ebenfalls in Histogrammen darstellbar. Abbildung 12 zeigt das Ergebnis der Zerlegung. Bildteil a zeigt die Verteilung der Terminabweichung im Abgang des Arbeitssystems. Deutlich zu erkennen ist die hohe Streuung der Terminabweichung und ein Mittelwert, der mit 4,35 BKT anzeigt, dass an diesem Arbeitssystem Aufträge tendenziell zu spät fertiggestellt wurden. Da von diesem Arbeitssystem keine Termintoleranz bekannt ist, können nur Aufträge mit einer Termin-

abweichung von null Betriebskalendertagen als termintreu gelten. Die Termintreue ist mit fünf Prozent entsprechend der Verteilung sehr niedrig. Abbildung 12 b zeigt die Verteilung der Terminabweichung aus Rückstand. Sie verursacht einen großen Teil der Streuung der Gesamtterminabweichung. Dominierend ist aber der Einfluss des Rückstands auf den Mittelwert der Terminabweichung. Der zeitweilig hohe Rückstand des Arbeitssystems verursachte im Mittel eine Terminabweichung von 5,6 Betriebskalendertagen. Abbildung 12 c zeigt, dass das Arbeitssystem die mittlere Terminabweichung aus Rückstand durch Abweichungen von der geplanten Bearbeitungsreihenfolge um -1,25 BKT reduzieren konnte. Dieses Vorgehen verursachte aber eine zusätzliche Erhöhung der Streuung der Terminabweichung.

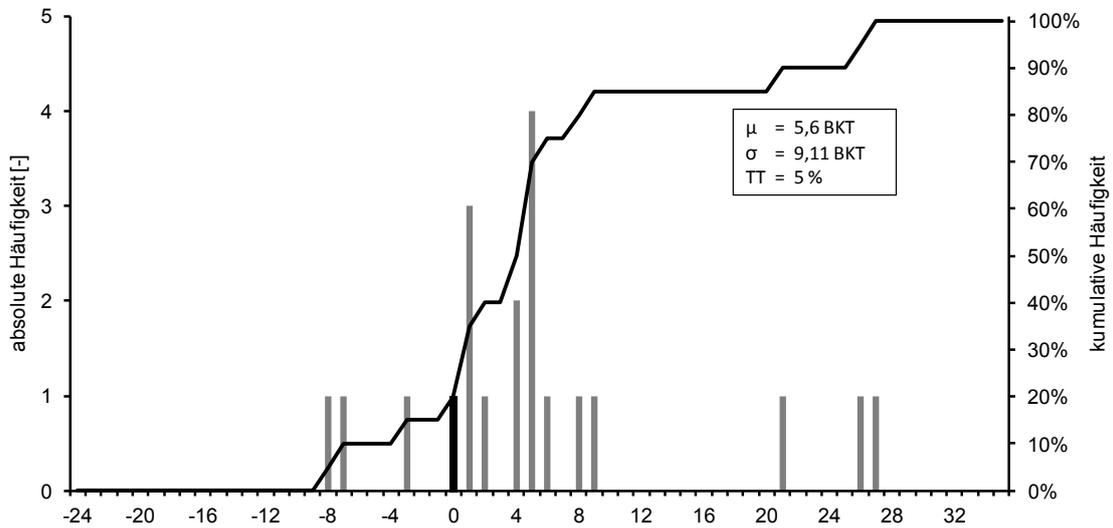
Nachdem die Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung und die Terminabweichung aus Rückstand getrennt erfassbar sind, sind analog zur Termintreue (Gleichung 2.1) die Rückstandstreue und die Reihenfolgetreue einer Fertigung bzw. eines Arbeitssystems definierbar. Demnach ist ein Auftrag reihenfolgetreu, wenn seine Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung innerhalb des Termintoleranzintervalls liegt. Ein Auftrag gilt als rückstandstreu, wenn die Terminabweichung aus Rückstand innerhalb des Termintoleranzintervalls liegt. In diesem Beispiel beträgt die Termintreue fünf Prozent, die Rückstandstreue ebenfalls fünf Prozent und die Reihenfolgetreue 15 Prozent.

Halbiert man das Termintoleranzintervall für die Berechnung der Reihenfolge- bzw. Rückstandstreue und begrenzt es auf $\left[\frac{TAA_{UG}}{2}; \frac{TAA_{OG}}{2}\right]$, dann gilt: Aufträge, die reihenfolgetreu und rückstandstreu sind, sind auch termintreu.

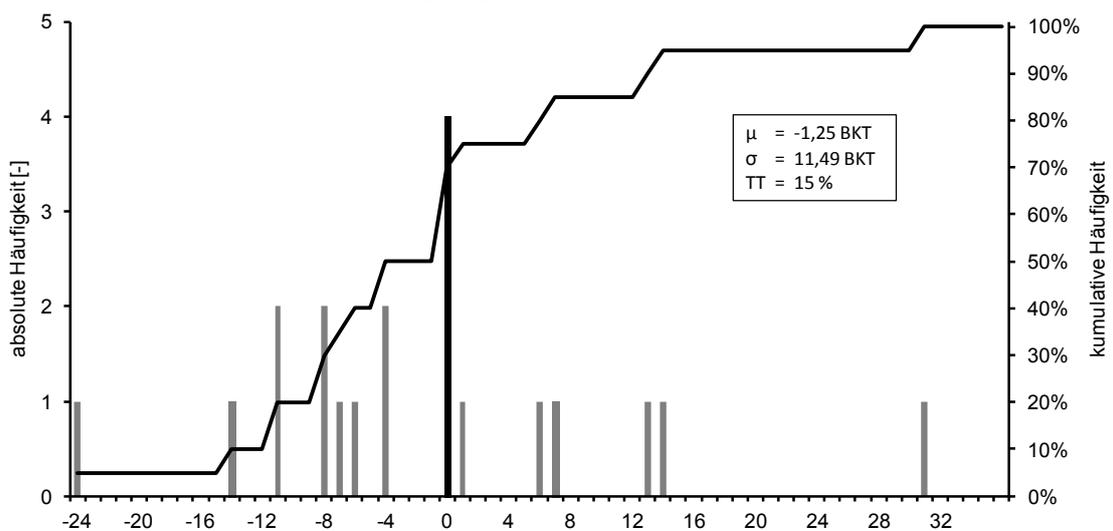
Die Zerlegung der Terminabweichung an diesem Arbeitssystem zeigt nur schwach die Tendenzen der einzelnen Einflussgrößen auf. Dies liegt vor allem daran, dass nur Daten von wenigen Aufträgen über einen sehr kurzen Erfassungszeitraum von 58 BKT vorliegen. Der Datensatz ist ausreichend, um das Vorgehen bei der Messung der Reihenfolgeabweichung und der Zerlegung der Terminabweichung zu demonstrieren. Allgemeingültige Aussagen über das Verhalten der Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen lassen sich auf ihm aber nicht begründen. Die folgenden Kapitel führen daher umfangreichere Datensätze auf Fertigungsebene realer Betriebe als Datengrundlage ein.



a) Terminabweichung im Abgang [BKT]



b) Terminabweichung aus Rückstand [BKT]



c) Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung [BKT]

12206

Abbildung 12: Terminabweichung im Abgang eines Arbeitssystems; Daten: [Wiendahl-97, S. 106]

Die vorgestellte Analyse und Interpretation der Terminabweichung ist eine ex post-Betrachtung. Sie erklärt das Entstehen der Termintreue in der Vergangenheit. Aussagen über die zukünftige Entwicklung der Termintreue sind damit nicht möglich. Ohne eine weitergehende Modellierung ist es nicht möglich, vorherzusagen, wie sich die Veränderung von Rückstand und Reihenfolgeabweichung in Folge betrieblicher Entscheidungen in der Fertigungssteuerung auf die Termintreue auswirken.

Mit der Messung der Reihenfolgeabweichung und der Zerlegung der Terminabweichung hat dieses Kapitel die Grundlage für ein systematisches Verständnis der Termintreue geschaffen. Das nachfolgende Kapitel modelliert die Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen. Vor allem die formalen Zusammenhänge zwischen Reihenfolgeabweichung und Terminabweichung sowie zwischen Rückstand und Terminabweichung, gehen in die analytische Modellbildung ein.

4 Modellierung der Termintreue

Dieses Kapitel beschreibt die deduktiv-experimentelle Modellierung der Termintreue unter Berücksichtigung des in Abschnitt 2.3.3 formulierten Forschungsziels. Das Modell soll in der Lage sein, die Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen zu bestimmen. Auf diese Weise soll es möglich sein, die Wirkung von Veränderungen der Einflussgrößen auf die Termintreue vorherzubestimmen.

Die Modellbildung besteht aus vier Schritten. Der erste Schritt leitet die Modellgrundlagen deduktiv her. Im zweiten Schritt werden die Zusammenhänge durch eine Formel mathematisch ausgedrückt. Der dritte Schritt überprüft, ob die Formeln das reale Verhalten der Termintreue abbilden. Der letzte Schritt korrigiert die entwickelte Formel, so dass ein allgemeingültiges Modell entsteht. Die Gliederung des Kapitels reflektiert die vier Modellierungsschritte. Abschnitt 4.1 entwickelt die allgemeine Modellstruktur und stellt diese in Form von idealen Termintreuekennlinien dar. Abschnitt 4.2 überführt die allgemeinen Modellzusammenhänge in analytische Formeln zur Berechnung der Termintreue. Abschnitt 4.3 erzeugt in Simulationsexperimenten realitätsnahe Werte für die Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen, um die Ergebnisse der Berechnungsformeln und die Grundannahmen der Modellbildung damit zu vergleichen. Abschnitt 4.4 analysiert die Abweichungen aus diesem Vergleich und führt drei Korrekturparameter zur Ergänzung der Näherungsgleichung ein. Das Ergebnis des Kapitels ist ein allgemeingültig hergeleitetes Modell der Termintreue.

4.1 Deduktive Modellbildung

Dieser Abschnitt leitet die Grundstruktur der Abhängigkeit zwischen der Termintreue und ihren Einflussgrößen her. Die deduktive Ableitung der allgemeingültigen Modellstruktur beruht auf dem Modell der Fertigungssteuerung (vgl. Abschnitt 2.2.1). Die Einflussgrößen auf die Termintreue sind demnach der Rückstand und die Reihenfolgeabweichung, wobei der Rückstand sich in den mittleren Rückstand und die Rückstandsstreuung aufteilt (vgl. Abschnitt 2.2.1.1). Zunächst geht der Abschnitt auf den mittleren Rückstand und dann auf die Reihenfolgeabweichung ein. Die Annahmen über die Reihenfolgeabweichungen sind direkt auf die Rückstandsstreuung übertragbar, sie wird daher nicht einzeln dargestellt.

Der Rückstand und die Reihenfolgeabweichung an den Arbeitssystemen verursachen Terminabweichungen der Aufträge. Unter idealen Bedingungen, also ohne Rück-

standsstreuung und ohne Reihenfolgeabweichungen, beschreibt eine ideale Terminkennlinie die Wirkung des mittleren Rückstands auf die Termintreue. Abbildung 13 a zeigt den Verlauf der Termintreue bei gegebener Termintoleranz über dem mittleren Rückstand. Ohne Rückstandsstreuung und Reihenfolgeabweichungen gibt es ein Intervall für den mittleren Rückstand, innerhalb dessen das Arbeitssystem eine Termintreue von 100 Prozent erreicht. Verlässt das System dieses Rückstandsintervall, fällt die Termintreue sprunghaft auf null Prozent. Drei Betriebspunkte auf der Kennlinie sind in Abbildung 13 b, c und d jeweils mit einem Histogramm ihrer Terminabweichung hervorgehoben. Für einen mittleren Rückstand mit kleinem Betrag ist die resultierende Terminabweichung gering und die Aufträge sind termintreu (Betriebspunkt ①). Steigt der Rückstand über ein kritisches Niveau, verzögern sich die Aufträge an dem entsprechenden Arbeitssystem (Betriebspunkt ②). Die Terminabweichung übersteigt in Folge die Termintoleranz und die Termintreue fällt auf null Prozent. Der Sprung in der Termintreue entsteht ebenfalls bei negativem Rückstand und einer daraus resultierenden negativen Terminabweichung (Betriebspunkt ③). In diesem Fall stellt das System die Aufträge zu früh fertig.

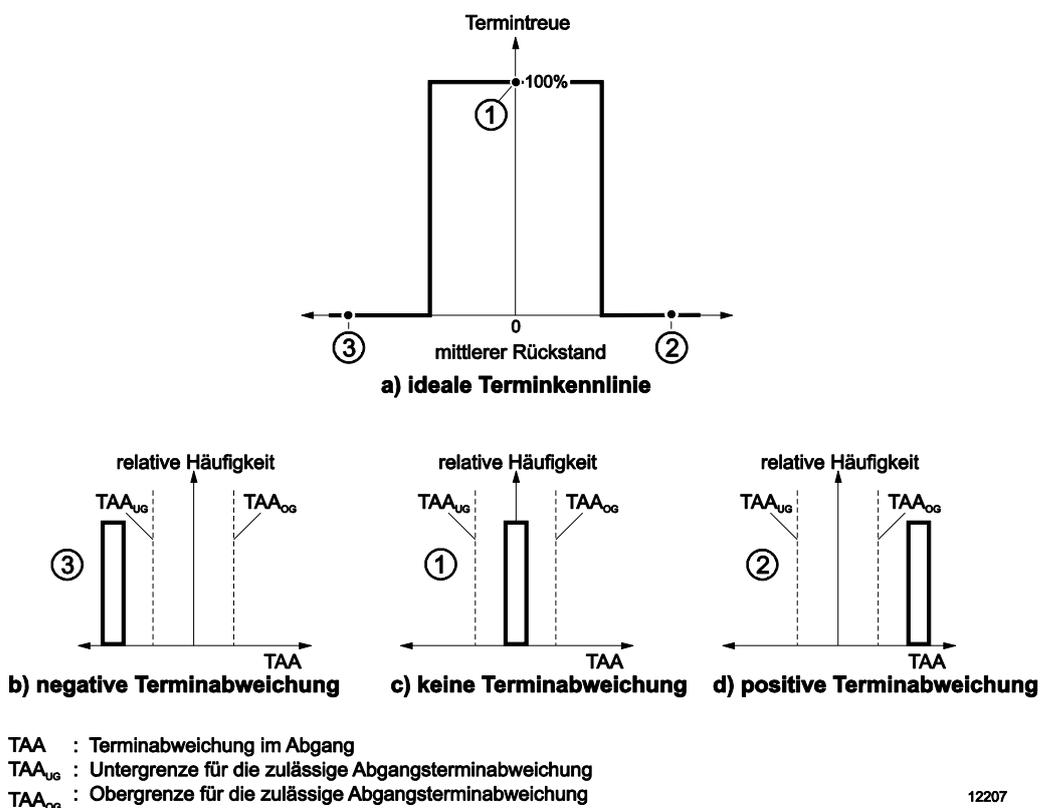


Abbildung 13: Deduktiv abgeleitete Termintreuekennlinie über dem mittleren Rückstand

Unter nicht idealen Bedingungen kann eine Rückstandsstreuung in ausreichender Höhe dazu führen, dass auch an den Betriebspunkten ② und ③ einige Aufträge termintreu sind, während bei Betriebspunkt ① einige Aufträge aus dem Termintoleranzfenster fallen könnten. Die Kurve würde dementsprechend einen runderen Verlauf annehmen, ähnlich dem einer Glockenkurve.

Eine ideale Kennlinie lässt sich auch für die Termintreue in Abhängigkeit der Reihenfolgeabweichung ableiten. Jeder vorgezogene Auftrag stellt mindestens einen anderen Auftrag zurück. Reihenfolgeabweichungen lösen daher immer gleichzeitig positive und negative Terminabweichungen aus, sie treten paarweise auf. Abbildung 14 zeigt in Bildteil a den Verlauf der Termintreue über der Reihenfolgeabweichung als Terminkennlinie an einem idealen Arbeitssystem. In diesem Fall ist ein ideales Arbeitssystem als vollständig rückstandsfrei definiert, also ohne mittleren Rückstand und ohne Rückstandsstreuung. Entlang der Kennlinie sind vier charakteristische Betriebspunkte mit ihrer Terminabweichungsverteilung in den Bildteilen b, c, d und e hervorgehoben. Ohne Reihenfolgeabweichungen arbeitet das ideale System zu 100 Prozent termintreu. Auf der idealen Kennlinie entspricht dieser Betriebspunkt dem y-Achsenabschnitt (Betriebspunkt ①). Ausgehend vom ersten Betriebspunkt steigt die Reihenfolgeabweichung. In den Terminabweichungshistogrammen bedeutet dies eine zunehmende Streuung der Verteilung, die im Modellansatz idealsymmetrisch angenommen ist. Sehr wenige und sehr kleine Reihenfolgeabweichungen vermögen nicht die Terminabweichung der Aufträge aus dem Termintoleranzintervall zu bewegen (Betriebspunkt ②). Erst ab einem gewissen Ausmaß beginnt die Termintreue durch Erhöhung der Reihenfolgeabweichung zu sinken. Einen Zustand, bei dem das Arbeitssystem auf Grund von Reihenfolgeabweichung nicht mehr 100 Prozent termintreu arbeitet, markiert Betriebspunkt ③. Die Terminkennlinie für die Reihenfolgeabweichung nähert sich einem unteren Wert an, ab dem keine größere Terminabweichung durch Vertauschung von Aufträgen mehr möglich ist. Theoretisch kann die Termintreue auch unter das Niveau von Betriebspunkt ④ fallen, z. B. wenn keine Aufträge mehr innerhalb des Termintoleranzintervalls liegen. Hierzu ein Beispiel: An einem Arbeitssystem befinden sich zwei Aufträge im Bestand. Beide Aufträge füllen mit ihrer Auftragszeit die gesamte Tageskapazität aus. Der erste Auftrag ist zur sofortigen Fertigstellung eingeplant, der zweite für den Folgetag. Ohne Termintoleranz senkt ein Vertauschen beider Aufträge die Termintreue auf null Prozent. Ein solcher Fall ist ein theoretisch konstruiertes, aber durchaus mögliches Szenario.

Würde die Auftragszeit der Aufträge jeweils nur die halbe Tageskapazität ausfüllen und wären keine anderen Aufträge im Bestand, hätte eine Vertauschung keinerlei Auswirkung auf ihre Terminabweichung. Die Mindesttermintreue bei auftretender Reihenfolgeabweichung hängt demnach auch von der Auftragszeitstruktur ab. Hinzu kommen die Erkenntnisse von Yu und Nyhuis, die die Höhe der maximalen Reihenfolgeabweichung mit dem Bestand verbinden (vgl. Abschnitte 2.2.1.2 und 2.3.3). Kapitel 6 untersucht diesen Zusammenhang experimentell.

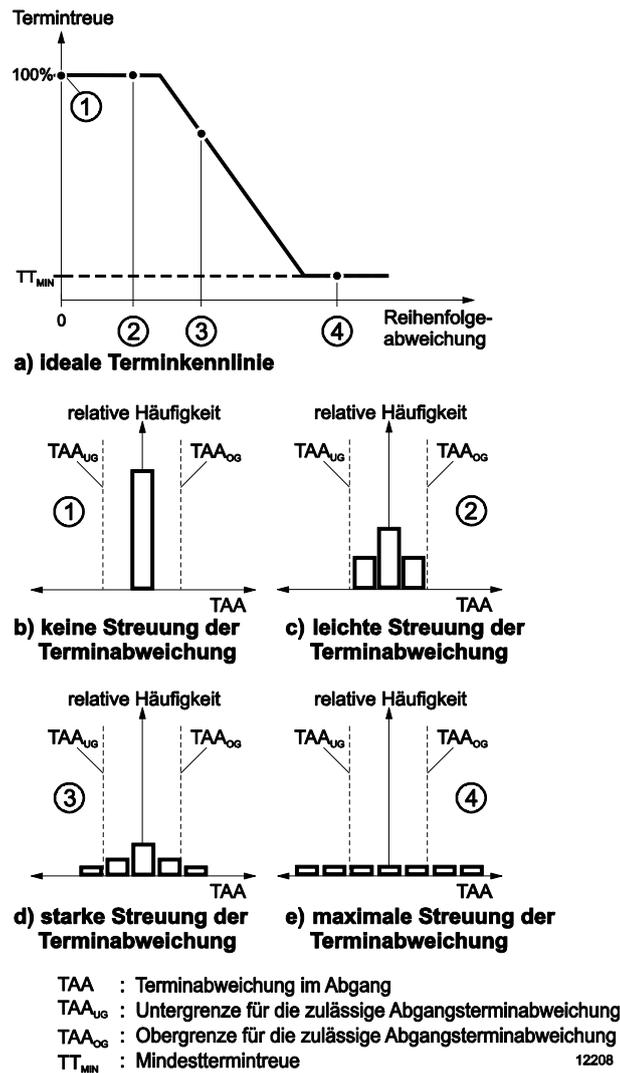


Abbildung 14: Deduktiv abgeleitete Termintreuekennlinie über der Streuung der Reihenfolgeabweichung

Der Modellierungsansatz zur Reihenfolgeabweichung ist direkt auf die Rückstandsstreuung übertragbar. Auch sie wirkt auf die Streuung der Terminabweichung, ohne den Mittelwert zu beeinflussen. Die ideale Kennlinie für die Rückstandsstreuung folgt daher

dem Verlauf der Kennlinie aus Abbildung 14. Eine gesonderte deduktive Ableitung für den Zusammenhang zwischen Termintreue und Rückstandsstreuung entfällt.

Um gezielte Aussagen über das quantitative Verhalten der Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen machen zu können, eignet sich vor allem ein analytisches Modell. Es soll die Wirkbeziehungen zwischen Rückstand und Terminabweichung sowie zwischen Reihenfolgeabweichung und Terminabweichung formal darstellen. Der Vorteil der analytischen Modellierung ist, dass alle Modellzusammenhänge mathematisch zu einem Gesamtmodell der Termintreue zusammengeführt werden können.

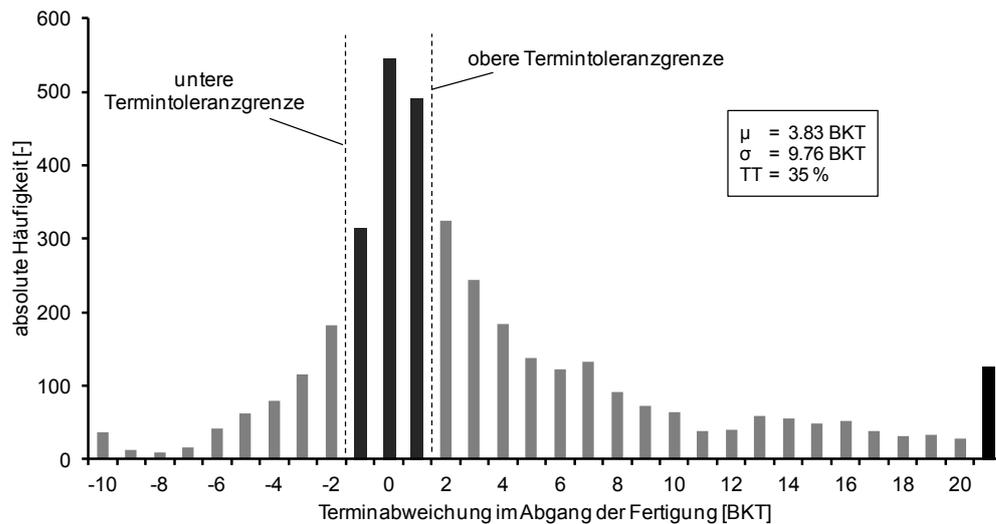
Der folgende Abschnitt beschreibt die formalen Zusammenhänge aller Einflussgrößen und gibt einen Ansatz zur Berechnung der Termintreue.

4.2 Analytische Modellbildung

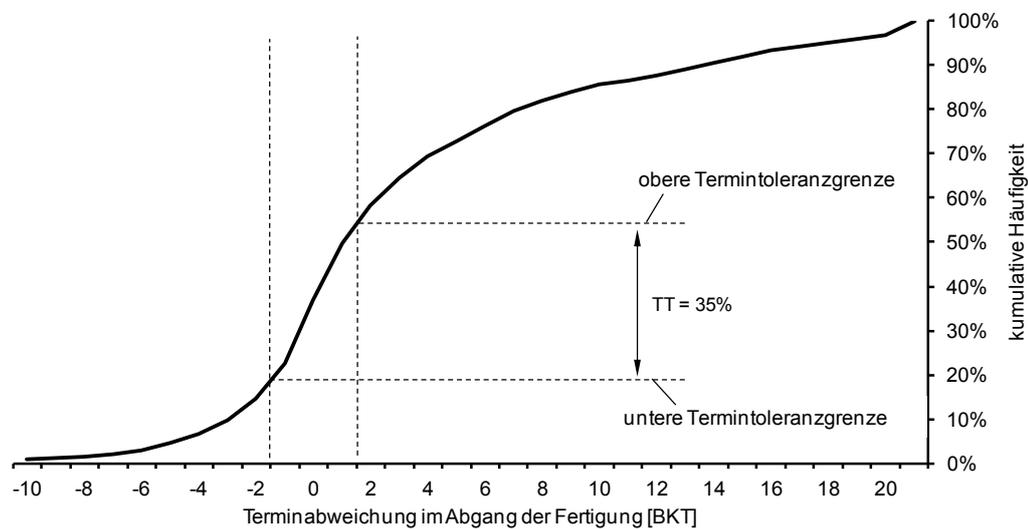
An dieser Stelle ist bekannt, dass die Termintreue vom Termintoleranzintervall und der Terminabweichungsverteilung abhängt. Der nun folgende Abschnitt zeigt den formalen Zusammenhang, der aus Rückstand und Reihenfolgeabweichung die Verteilung der Terminabweichung erklärt. Ziel ist die Berechnung der Termintreue in Abhängigkeit von Termintoleranzintervall, Rückstand und Reihenfolgeabweichung. Abschnitt 4.2.1 erläutert den Grundgedanken der Formalisierung. Der Abschnitt zeigt, dass zur Berechnung der Termintreue die Verteilungsform der Terminabweichung entscheidend ist. Abschnitt 4.2.2 zeigt die theoretische Erzeugung dieser Verteilungsform durch stochastische Faltung. Alternativ dazu approximiert Abschnitt 4.2.3 die Verteilungsform durch Vergleich der Terminabweichung im Abgang von drei Unternehmen mit dem Muster bekannter Verteilungen und leitet die Berechnungsvorschrift für die Termintreue ab. Abschnitt 4.2.4 fasst die formalen Zusammenhänge in der analytischen Modellsynthese zusammen.

4.2.1 Grundgedanke der Formalisierung

Ein Auftrag ist termintreu, wenn seine Terminabweichung innerhalb des Termintoleranzintervalls liegt. Die Termintreue ist der Anteil aller termintreuen Aufträge an der Gesamtzahl der Aufträge. Abbildung 15 a zeigt die absolute Anzahl der termintreuen Aufträge eines Unternehmens als schwarze Balken innerhalb des Termintoleranzbereichs. Für diese Verteilung ist die kumulative Häufigkeit in Abbildung 15 b eingezeichnet. Ihr Wert auf der y-Achse gibt an, welcher Prozentsatz der Aufträge eine Terminabweichung kleiner oder gleich dem korrespondierenden Wert auf der x-Achse aufweist.



a) im Histogramm



b) in der kumulativen Verteilungsfunktion

12209

Abbildung 15: Messung der Termintreue

Die Termintreue entspricht der Wahrscheinlichkeit, mit der die Terminabweichung eines Auftrags (bei gegebener Terminabweichungsverteilung aller Aufträge) innerhalb des Termintoleranzintervalls liegt. Das Integral der Dichtefunktion der Verteilung über dem Termintoleranzintervall berechnet diese Wahrscheinlichkeit. Die Art der Dichtefunktion hängt von der Verteilungsform der Terminabweichung im Abgang ab. Mit der richtigen Dichtefunktion ist es möglich die Termintreue zu berechnen. Um die richtige Dichtefunktion auszuwählen, muss zunächst die Verteilungsform der Terminabweichung im Abgang einer Fertigung ermittelt werden. Der nächste Abschnitt zeigt die Ermittlung der Verteilungsform mit Hilfe der stochastischen Faltung.

4.2.2 Stochastische Faltung der Terminabweichungsverteilung

Gemäß Gleichung 3.11 besteht die Terminabweichung im Abgang aus dem Anteil aus Reihenfolgeabweichung und dem Anteil aus Rückstand. Beide Komponenten lassen sich weiter zerlegen. Die Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung entspricht dem Quotient aus gewichteter Reihenfolgeabweichung und Plan-Leistung (Gleichung 3.3). Die Terminabweichung aus Rückstand ist der Quotient aus Rückstand und Ist-Leistung (Gleichung 3.6). Die Verteilungsform der Terminabweichung aller Aufträge im Abgang einer Fertigung ist daher eine Überlagerung von vier stetig verteilten Einflussgrößen: dem Rückstand, der Ist-Leistung, der gewichteten Reihenfolgeabweichung und der Plan-Leistung. Gelingt es, aus der Verteilung der Einflussgrößen die Verteilungsform der Terminabweichung abzuleiten, kann die Termintreue mit Hilfe der Dichtefunktion berechnet werden.

Unter der Annahme, dass die Einflussgrößen der Termintreue statistisch unabhängig sind gilt, dass jeder Auftrag allen im Betrachtungszeitraum aufgetretenen Leistungen, allen aufgetretenen Rückständen und allen aufgetretenen gewichteten Reihenfolgeabweichungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann. Die Faltung ist ein Verfahren zur Überlagerung von Einzelverteilungen unabhängiger diskreter Verteilungswerte zu einer Gesamtverteilung [Beichelt-03, S 68 ff.; Rinne-08, S. 280; Viertl-03, S. 95 ff.]. Der Grundgedanke der Faltung ist es, dass für unabhängige stochastische Größen X und Y die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Summe $X+Y$ ebenfalls diskret verteilt ist und die Einzelwahrscheinlichkeiten der neuen Verteilung $X+Y$ durch Multiplikation der Punktverteilungen der Klassen von X und von Y entsteht. Formal ausgedrückt gilt [Viertl-03, S. 95]:

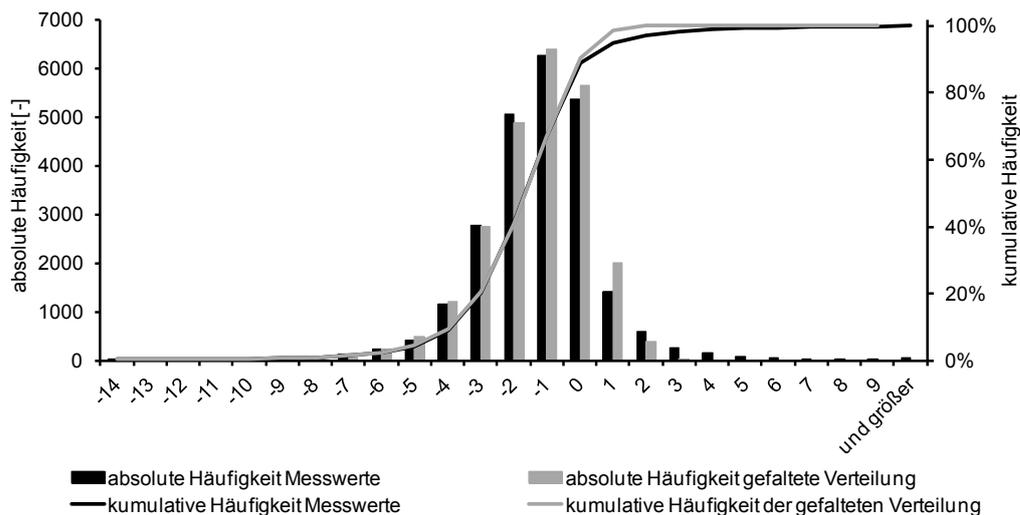
$$p_{X+Y}(a) = \sum_{x \in M_X} p_X(x) \cdot p_Y(a-x) \quad \text{für alle } a \in M_{X+Y} \quad (4.1)$$

mit	X	:	stochastische Größe
	Y	:	stochastische Größe
	$X+Y$:	Summe zweier stochastischer Größen
	x	:	Wert, den eine stochastische Größe X annimmt
	y	:	Wert, den eine stochastische Größe Y annimmt
	a	:	Wert, den die stochastische Größe $X+Y$ annimmt
	$p_X(\cdot)$:	Punkt Wahrscheinlichkeit der stochastischen Größe X für den Wert \cdot
	$p_Y(\cdot)$:	Punkt Wahrscheinlichkeit der stochastischen Größe Y für den Wert \cdot

- $p_{X+Y}(\cdot)$: Punktwahrscheinlichkeit der stochastischen Größe $X+Y$ für den Wert \cdot
- M_X : Merkmalraum von X
- M_{X+Y} : Merkmalraum von $X+Y$

Die Gleichung drückt aus, dass die Wahrscheinlichkeit eines Wertes a in der Verteilung $X+Y$ dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten von x und y aus ihren jeweiligen Verteilungen entspricht, wobei $a = x+y$ ist. Zur Berechnung ist also die relative Häufigkeit jeder Klasse von X mit der relativen Häufigkeit jeder Klasse von Y zu multiplizieren und aufzuaddieren. Die Multiplikation ist für alle Kombinationen von x und y durchzuführen, die in Summe a ergeben. Durch Addition der Multiplikationsergebnisse ergibt sich die neue relative Häufigkeit (p_{X+Y}) der Klasse a in der Verteilung $X+Y$. Wie viele Elemente der Merkmalraum M_{X+Y} hat, hängt von der Anzahl unterschiedlicher Summen, die aus x und y gebildet werden können ab.

Die Formel gilt ausdrücklich nur für Summen statistisch unabhängiger Verteilungen. Diese Annahmen können für die Terminabweichung im Abgang getroffen werden. Sie ist die Summe der Verteilungen der Terminabweichung aus Rückstand und der Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung. Ob beide Verteilungen statistisch unabhängig sind, überprüft der Vergleich der Faltung mit einer zuvor durchgeführten Messung der Terminabweichung. Abbildung 16 zeigt das Ergebnis einer Faltung der zuvor durch Zerlegung (vgl. Abschnitt 3.4) ermittelten Verteilungen von TAA_{RS} und TAA_{RA} zur TAA einer gesamten Fertigung. Die schwarzen Balken zeigen die Ausgangsverteilung. Die grauen Balken zeigen die Ausgangsverteilung nach Zerlegung und anschließender erneuter Kombination durch Faltung.



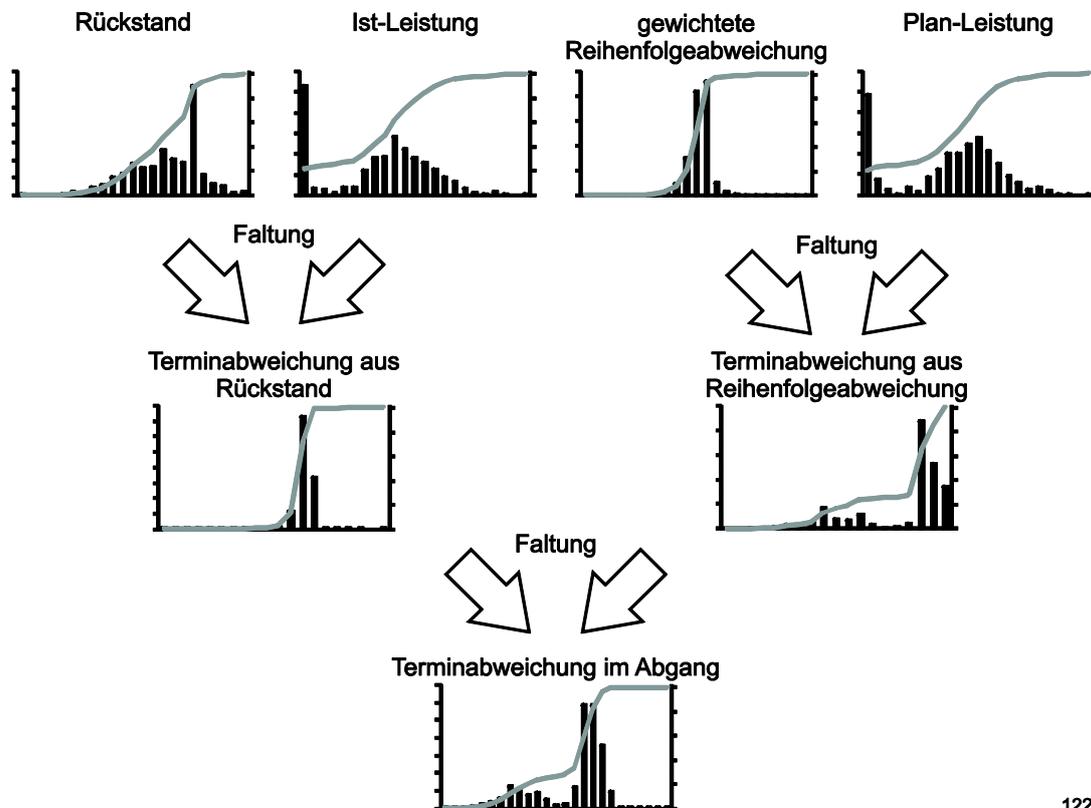
12210

Abbildung 16: Vergleich der gefalteten (grau) mit der gemessenen (schwarz) Verteilung der Terminabweichung im Abgang einer Fertigung

Zur Kombination von TAA_{RA} und TAA_{RS} ist die Faltung erfolgreich anwendbar. Das Ergebnis der Faltung deckt sich nahezu vollständig mit der gemessenen Verteilung der Terminabweichung im Abgang. Das Endergebnis, also die Verteilung der Summe aus TAA_{RA} und TAA_{RS} , entspricht der Verteilung der Summenvariablen und somit der Faltung der Einzelverteilungen. In diesem Fall ist die statistische Unabhängigkeit der beiden Verteilungen naheliegend. Geringe Abweichungen sind dennoch sichtbar. Eine genaue Zuordnung der auftretenden Abweichungen ist nicht möglich. Sie können entweder aus der Zerlegung, aus der anschließenden Faltung oder aus einer geringen statistischen Abhängigkeit herrühren. Zur Bestimmung der Termintreue aus ihren Einflussgrößen reicht es aber nicht TAA_{RS} und TAA_{RA} zu falten, denn dies stellt noch keine direkte Verbindung zwischen Termintreue und Rückstand bzw. Termintreue und Reihenfolgeabweichung her.

Unter der Annahme, dass Rückstand, Ist-Leistung, Plan-Leistung und gewichtete Reihenfolgeabweichung statistisch unabhängig sind, erzeugt die Diskretisierung, also die Zuordnung von stetig verteilten Werten zu Klassen, und anschließende zweimalige Faltung der Einzelverteilungen die Verteilung der Terminabweichung im Abgang. Abbildung 17 zeigt das Vorgehensschema. Die erste Faltung führt die Verteilung von Rückstand und Ist-Leistung zur Verteilung der Terminabweichung aus Rückstand zusammen. Die zweite Faltung überlagert die Verteilungen der gewichteten Reihenfolgeabweichung und der Plan-Leistung zur Verteilung der Terminabweichung aus Reihenfolge-

geabweichung. Die letzte Faltung kombiniert die Verteilungen der Terminabweichungen aus Rückstand und aus Reihenfolgeabweichung zur Terminabweichung im Abgang.



12211

Abbildung 17: Faltung der Verteilungen der Einflussgrößen zur Gesamtverteilung der Terminabweichung im Abgang

Bei diesem Vorgehen treten einige Schwierigkeiten auf: Die Verteilungen von TAA_{RA} und TAA_{RS} sind nicht das Ergebnis einer Summe, sondern eines Quotienten zweier Eingangsverteilungen. Die Anwendungsvoraussetzungen der Faltung sind somit nicht erfüllt. Eine Faltung kann aber mit geringen Anpassungen dennoch durchgeführt werden. Die Bestimmung der Klassen der neuen Verteilung ist ebenfalls der Quotient aus Rückstand und Leistung bzw. aus gewichteter Reihenfolgeabweichung und Leistung. Häufig treten Betriebskalendertage mit einer Plan-Leistung oder einer Ist-Leistung von null Stunden pro Betriebskalendertag auf. In diesen Fällen lässt sich kein Quotient bilden. Diese Werte sind in der hier gezeigten Faltung auf null gesetzt um ein Faltungsergebnis zu ermöglichen.

Eine weitere Schwierigkeit tritt insbesondere für die Reihenfolgeabweichung auf: Während die Plan-Leistung einem Betriebskalendertag oder einer einzelnen Schicht zuzuordnen ist, bezieht sich die gewichtete Reihenfolgeabweichung auf eine Anzahl von

Aufträgen. Unterschiedlich große Grundgesamtheiten sind für die Faltung kein Problem, da sie nur die relative Häufigkeit einer Klasse berücksichtigt. Da aber die Anzahl der Aufträge eines Erfassungszeitraums meist deutlich größer ist als die Anzahl der Betriebskalendertage, kommt es bei der Diskretisierung der Verteilung der gewichteten Reihenfolgeabweichung zu einer gröberen Gruppierung als bei der Diskretisierung der Leistungsverteilung, wenn die Anzahl der Klassen für beide Verteilungen ähnlich groß sein soll.

Der Übergang der Einheiten der Verteilungen zeigt sich als grafisch schwierig interpretierbar. Während die Klassen der Rückstands-, gewichteten Reihenfolgeabweichungs- und Leistungsverteilungen in Stunden bzw. Stunden pro Betriebskalendertag angegeben sind, ist die Einheit der Klassen der Terminabweichungsverteilungen immer Betriebskalendertage. Da bei der Faltung alle Verteilungskombinationen Berücksichtigung finden, entstehen viele mögliche Klassen der neuen Verteilung, von denen aber auf Grund der Quotientenbildung und Diskretisierung nur wenige besetzt sind. Die gefalteten Verteilungen erscheinen dadurch schmäler als erwartet. Die schematisierten Histogramme in Abbildung 17 sind das Ergebnis einer durchgeführten Faltung. Die Verteilung der Terminabweichung im Abgang entspricht nicht der erwarteten Verteilung (schwarze Balken in Abbildung 16). Eine genauere Übersicht der Abweichungen zeigen die detaillierten Histogramme in Anhang I.

Eine wesentliche Voraussetzung der Faltung ist die statistische Unabhängigkeit der in sie eingehenden Zufallsvariablen. Gerade der Rückstand als Differenz von Ist-Abgang und Plan-Abgang ist direkt abhängig von der Ist-Leistung und der Plan-Leistung. Es liegt daher keine statistische Unabhängigkeit vor. Auch für die gewichtete Reihenfolgeabweichung ist eine statistische Unabhängigkeit nicht naheliegend. Beispielsweise ist es in Phasen niedriger Leistung und somit hohen Rückstands oft beobachtbar, dass kleine Aufträge bevorzugt werden, um eine möglichst große Anzahl an Aufträgen noch termintreu fertigzustellen. Ein solches Verhalten erzeugt eine Korrelation zwischen niedriger Leistung und negativer gewichteter Reihenfolgeabweichung. Andere Einflüsse der Fertigungssteuerung können weitere Abhängigkeiten erzeugen. Welche Steuerungslogiken in einer Fertigung vorlagen, lässt sich im Nachhinein aus den Rückmeldedaten kaum erkennen. Die Faltung ist daher nicht unmittelbar auf das vorliegende Problem anwendbar. Selbst wenn die Faltung erfolgreich wäre, benötigt sie immer die Verteilungen von Rückstand, Ist-Leistung, Plan-Leistung und gewichteter Reihenfolgeabweichung, um die daraus resultierende Terminabweichung zu ermitteln. In Situationen, in denen die Verteilungen der Einflussgrößen bekannt sind, liegt in der Regel

auch die Verteilung der Terminabweichung vor und die Termintreue könnte abgelesen werden. Für Voraussagen über das Verhalten der Termintreue müssten die Verteilungen der Einflussgrößen geschätzt werden. Statt einer Abschätzung der Verteilungen von vier Einflussgrößen kann auch direkt die Verteilung der daraus resultierenden Terminabweichung geschätzt werden. Dies ist ein alternativer Ansatz, um die Verteilungsform der Terminabweichung im Abgang zu ermitteln.

Der nächste Abschnitt bewertet die Anpassung der Terminabweichungsverteilung an bekannte Verteilungsformen. Die am besten angepasste Verteilungsform wird ausgewählt, um aus dem Integral ihrer Dichtefunktion die Termintreue gemäß Abbildung 15 b zu bestimmen.

4.2.3 Approximation der Terminabweichungsverteilung

Yu stellt fest, dass die relative Terminabweichung in seinen und anderen Untersuchungen annähernd normalverteilt ist [Yu-01, S. 67]. Diese Beobachtung kann für die Terminabweichung im Abgang der Fertigung nur näherungsweise bestätigt werden. Die Abbildungen 18, 19 und 20 zeigen Terminabweichungshistogramme aus drei unabhängigen Betriebsanalysen. Das erste Histogramm zeigt einen von Wiendahl et al. [Wiendahl et al.-98] erhobenen Datensatz eines Leiterplattenherstellers. Der zweite Datensatz gibt die Terminsituation eines deutschen Maschinenbauunternehmens wieder. Die Firma GTT hat diese Daten im Rahmen eines Beratungsprojekts erhoben [Nyhuis-09]. Der dritte Datensatz zeigt den Betriebspunkt eines Unternehmens aus dem Sondermaschinenbau. Die Auswertung dieses Unternehmens fand eigens für die vorliegende Arbeit statt (vgl. Kapitel 7).

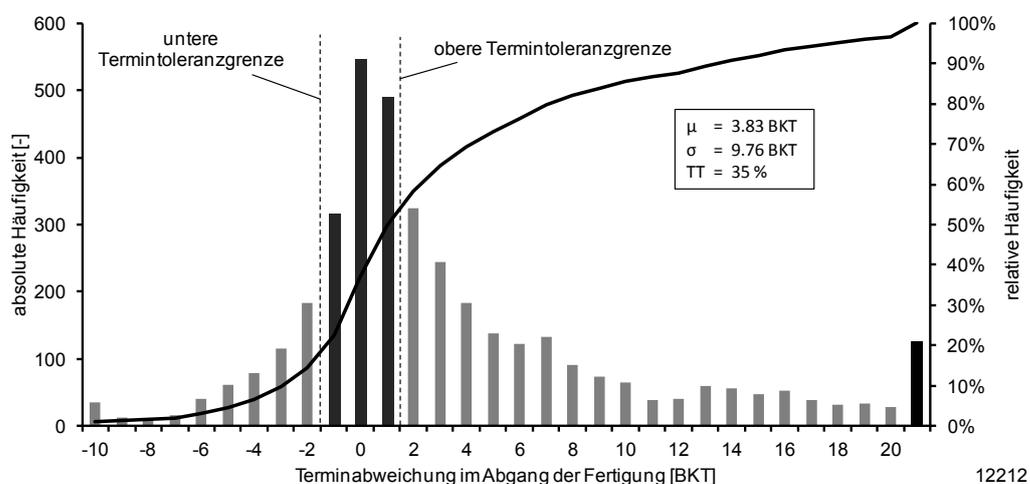


Abbildung 18: Terminabweichung im Abgang von Unternehmen eins.

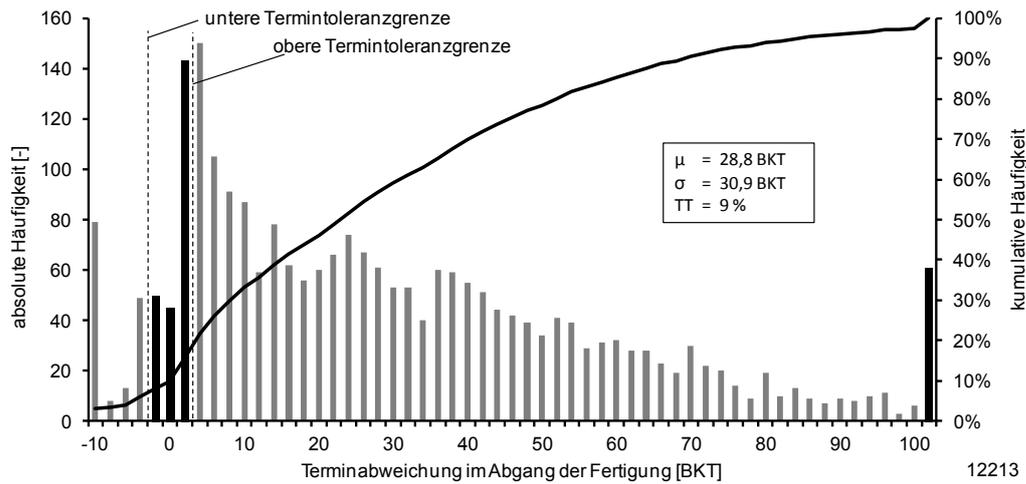


Abbildung 19: Terminabweichung im Abgang von Unternehmen zwei.

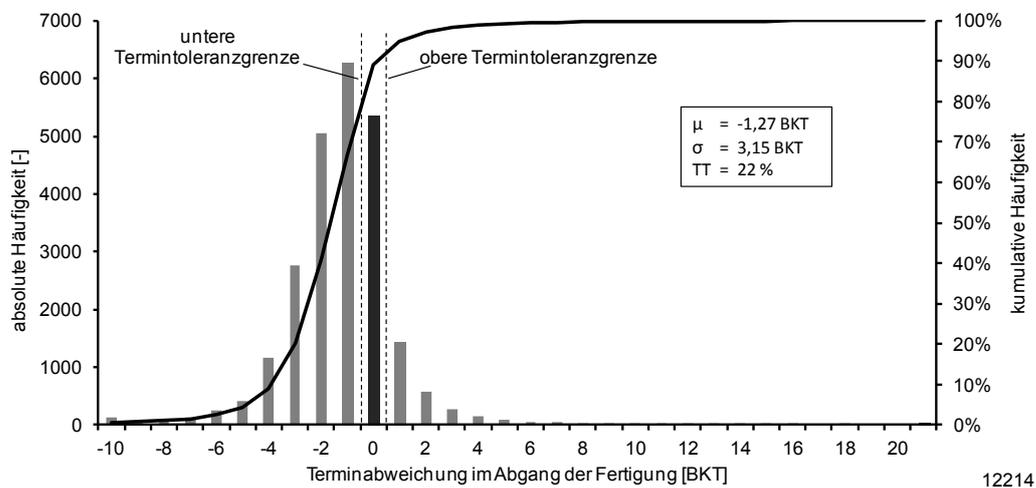


Abbildung 20: Terminabweichung im Abgang von Unternehmen drei.

Es fällt auf, dass die Verteilungsform aller drei Histogramme mit Mittelwert und Streuung unterschiedlich ausfällt. Alle drei Verteilungen haben genau ein Maximum, es sind also unimodale Verteilungen. Die Verteilungen von Unternehmen eins und drei fallen symmetrisch um dieses Maximum ab. Die Verteilung von Unternehmen zwei ist rechtschief. Zum Nullpunkt der x-Achse, also in dem für die Termintreue entscheidenden Bereich, zeigt sich generell eine schmalgipflige Form. Diese entspricht nicht der durchschnittlichen Wölbung einer Normalverteilung. Abbildung 21 zeigt im linken Diagramm beispielhaft die Überlagerung der Terminabweichung von Unternehmen drei mit der Dichtefunktion einer Normalverteilung. Die Normalverteilung (Kurve) hat dabei die gleichen Parameter wie die Grundgesamtheit der Messwerte (Balken), also einen Mittelwert von -1,27 BKT und eine Streuung von 3,15 BKT.

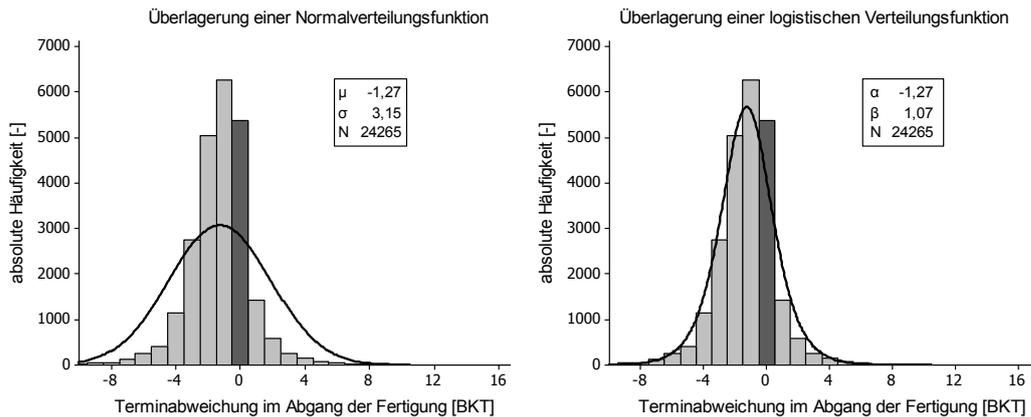


Abbildung 21: Approximation der Terminabweichung von Unternehmen drei durch eine Normalverteilung (links) und eine logistische Verteilung (rechts).

Die Normalverteilung steigt von einer unteren Schranke aus zunächst zu steil und später zu flach an und reicht mit ihrem Maximum nicht an den Maximalwert der absoluten Häufigkeit der Terminabweichungsverteilung heran. Eine bessere Abschätzung sollte den hohen Maximalwert sowie das weit gestreckte Feld der Ausreißer vom Mittelwert berücksichtigen. Mit Hilfe des Statistikprogramms Minitab wurde die am besten passende Verteilungsform für alle drei Unternehmen ermittelt. Die Untersuchung berücksichtigte die Normalverteilung, die Weibullverteilung, die Gammaverteilung, die logistische Verteilung, die Minimum- und Maximum-Extremwertverteilung, die Log-Normalverteilung und die Log-logistische Verteilung. Die logarithmischen Verteilungen liefern eine gute Abschätzung, kommen für eine Approximation aber nur begrenzt in Frage, da sie für negative Werte nicht definiert sind und nur mit einem unteren Grenzwert bei null zu gültigen Ergebnissen führen. Für alle drei Betriebsauswertungen ergab der Anderson-Darling-Test, dass die logistische Verteilung die beste nicht-logarithmische Approximation ist. Die vollständige Dokumentation der statistischen Testreihe befindet sich in Anhang II dieser Arbeit. Für die Abschätzung der rechtsschiefen Verteilung von Unternehmen zwei (Abbildung 19) ist eine Abschätzung der Terminabweichung mit Hilfe der Log-Normalverteilung sinnvoll, da auch die Dichtefunktion der Log-Normalverteilung nach rechts flach ausläuft. Informationen zu diesem Vorgehen befinden sich in Anhang III.

Diese Arbeit nimmt für die Ableitung einer Näherungsgleichung für die Termintreue im Folgenden eine logistische Verteilung der Terminabweichung im Abgang an. Die logistische Verteilung ist mit den zwei Parametern α und β auch für negative Werte definiert. Gegenüber der Normalverteilung besitzt die logistische Verteilung ein höheres Maxi-

mum und fängt größere Extremwerte ein. Für Unternehmen drei ist die Approximation der Terminabweichungsverteilung mit Hilfe der Dichtefunktion der logistischen Verteilung besonders geeignet. Die Näherung ist in Abbildung 21 im rechten Diagramm abgebildet. Bei Betrachtung der unterschiedlichen Verteilungsformen aller drei Unternehmen wird jedoch bereits deutlich, dass es sich bei der Auswahl einer Verteilungsform immer um eine grobe Näherung handelt, die nicht für alle Anwendungsfälle gleichermaßen gute Ergebnisse erzielen kann.

Das Integral der Dichtefunktion der logistischen Verteilung lautet [Tutz-00, S. 402]:

$$F(x) = \frac{e^{\frac{x-\alpha}{\beta}}}{1+e^{\frac{x-\alpha}{\beta}}} \quad (4.2)$$

mit $F(x)$: Integral der logistischen Dichtefunktion auf dem Intervall $]-\infty;x]$
 α : Lageparameter der logistischen Verteilung
 β : Skalenparameter der logistischen Verteilung

Die Formel gibt die kumulierte Wahrscheinlichkeit für alle Werte an, die kleiner oder gleich x sind. Der Parameter α der logistischen Verteilung entspricht dem Mittelwert μ der Stichprobe bzw. der Grundgesamtheit. Um den Parameter β zu bestimmen, empfiehlt sich die Analyse der Daten mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode. Da diese Methode ohne die Unterstützung von optimierenden Rechenverfahren jedoch sehr aufwendig ist, kann der Parameter β mit Hilfe der Standardabweichung σ der Stichprobe angenähert werden [Tutz-00, S. 402]:

$$\beta = \frac{\sigma \sqrt{3}}{\pi} \quad (4.3)$$

mit β : Skalenparameter der logistischen Verteilung
 σ : Standardabweichung der Stichprobe

Durch Einsetzen von μ und Gleichung 4.3 in Gleichung 4.2 erhält man das Integral der Dichtefunktion der logistischen Verteilung in Abhängigkeit des Mittelwerts und der Standardabweichung der Verteilung [Beichelt-03, S. 428]:

$$F(x) = \frac{e^{\frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{x-\mu}{\sigma}}}{1+e^{\frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{x-\mu}{\sigma}}} \quad (4.4)$$

- mit $F(x)$: Integral der logistischen Dichtefunktion auf dem Intervall $]-\infty; x]$
 μ : Mittelwert der Stichprobe
 σ : Standardabweichung der Stichprobe

Setzt man nun in Gleichung 4.4 für μ die mittlere Terminabweichung und für σ die Standardabweichung der Terminabweichung ein, erhält man das Integral der logistischen Dichtefunktion in Abhängigkeit der Terminabweichung. Die Näherungsgleichung für die Termintreue erhält man, wenn man das Integral zwischen der unteren und der oberen Termintoleranzgrenze bildet, also von dem Integral von $-\infty$ bis zur oberen Termintoleranzgrenze das Integral der Dichtefunktion von $-\infty$ bis zur unteren Termintoleranzgrenze abzieht:

$$TT \approx \left(\frac{1}{1+e^{-\frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{TAA_{OG}+0,5-TAA_m}{TAA_s}}} - \frac{1}{1+e^{-\frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{TAA_{UG}-0,5-TAA_m}{TAA_s}}} \right) \cdot 100\% \quad \text{mit } TAA_s > 0 \quad (4.5)$$

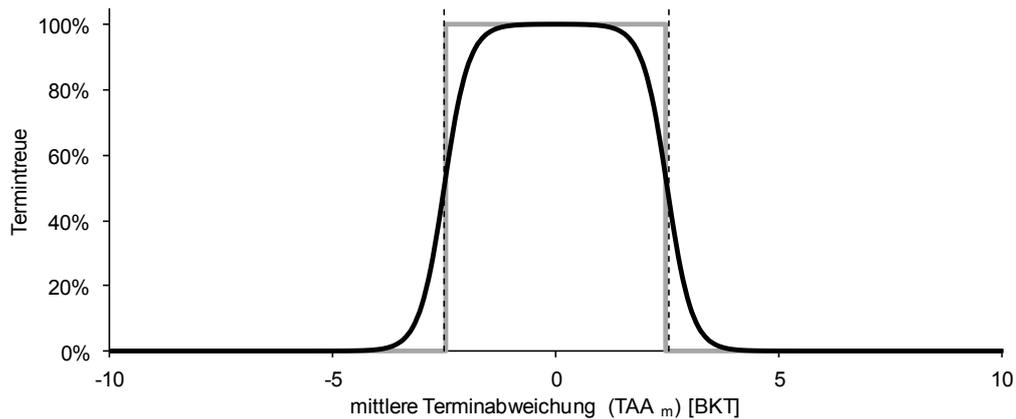
- mit TT : Termintreue [%]
 TAA_{UG} : untere Termintoleranzgrenze [BKT]
 TAA_{OG} : obere Termintoleranzgrenze [BKT]
 TAA_m : mittlere Terminabweichung [BKT]
 TAA_s : Streuung der Terminabweichung [BKT]

Da die Termintoleranzintervalle meist in ganzen Betriebskalendertagen angegeben sind und die Formel für stetige Verteilungen ausgelegt ist, können zur oberen Termintoleranzgrenze 0,5 BKT hinzugezählt und von der unteren Grenze 0,5 BKT abgezogen werden. Auf diese Weise entsteht ein sinnvolles Integrationsintervall auch für Unternehmen mit einer Termintoleranz von ± 0 BKT. Die Gleichung ist für den Wert $TAA_s = 0$ nicht definiert. Ohne Streuung der Terminabweichung ist die Termintreue 100 Prozent, wenn die mittlere Terminabweichung innerhalb des Termintoleranzintervalls liegt und null Prozent in allen anderen Fällen.

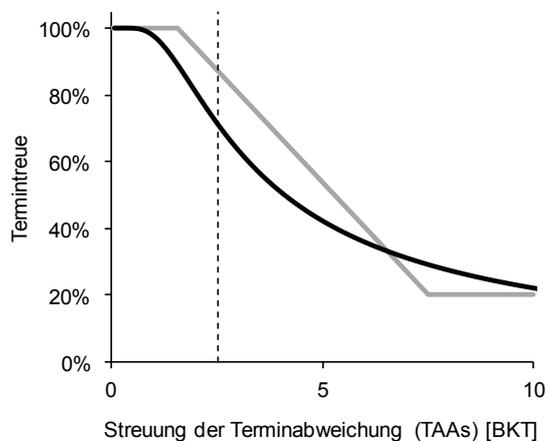
Der Vergleich des Funktionsgraphen von Gleichung 4.5 mit dem deduktiv abgeleiteten Modell aus Abschnitt 4.1 zeigt, ob sich die Grundzusammenhänge der Modellierung der Termintreue in dieser Formel wiederfinden. Abbildung 22 zeigt den Verlauf der mit

Hilfe der logistischen Verteilung analytisch berechneten Terminkennlinie für das Termintoleranzintervall von Unternehmen zwei in Höhe von ± 2 BKT in der diskreten und $\pm 2,5$ BKT in der stetigen Betrachtung der Terminabweichung im Abgang. Abbildung 22 a zeigt die Termintreue über der mittleren Terminabweichung bei einer konstanten Streuung der Terminabweichung von 0,5 BKT. Bildteil b zeigt das Verhalten der Termintreue in Abhängigkeit der Streuung der Terminabweichung. In diesem Fall liegt eine mittlere Terminabweichung von 0 BKT zu Grunde. Eine Zuordnung der Terminabweichung zu Rückstand oder Reihenfolgeabweichung erfolgt bewusst nicht, da beide Größen zu einer Veränderung des Mittelwerts oder der Streuung der Terminabweichung beitragen können. Näheres erläutert der nachfolgende Abschnitt. Die gute Annäherung des Kurvenverlaufs an die deduktiv abgeleiteten Kennlinien in Abbildung 13 und Abbildung 14 ist deutlich erkennbar. In Bildteil a ist zu sehen, wie die Termintreue innerhalb des Termintoleranzintervalls bei einer Verschiebung des Mittelwerts zunächst nicht unter 100 Prozent sinkt. Erst bei Überschreiten der Termintoleranzgrenzen sinkt die Termintreue auf null Prozent ab. Dies entspricht dem grau eingezeichneten Verlauf der deduktiv abgeleiteten Kennlinie. Im Hinblick auf den Mittelwert der Verteilung decken sich die Ergebnisse von Gleichung 4.5 mit den Modellgrundlagen. Die Abweichungen zwischen den Kennlinienverläufen sind auf die Streuung von 0,5 BKT zurückzuführen, da zur Berechnung mit Hilfe von Gleichung 4.5 eine Streuung der Terminabweichung notwendig ist.

Bildteil b zeigt den Verlauf der Termintreue in Abhängigkeit der Streuung der Terminabweichung. Für den Verlauf der grau eingezeichneten, deduktiv abgeleiteten Kennlinie gibt es keine objektiv hergeleiteten Stützpunkte. Der horizontale Verlauf bei geringer Streuung ist daher bis zum Punkt $\sqrt{\frac{TAA_{OG} - TAA_{UG}}{2}}$ eingezeichnet. Die Mindesttermintreue ist mit 20 Prozent angenommen und wird bei einer Streuung in Höhe von $3 \cdot \frac{TAA_{OG} - TAA_{UG}}{2}$ erreicht. Die Abknickpunkte der deduktiv abgeleiteten Kennlinie sind spekulativ festgelegt. Sie sollen nur eine Abschätzung der Erwartungen über den Verlauf der Termintreuekennlinie in Abhängigkeit der Streuung der Terminabweichung wiedergeben.



a) Termintreue über mittlerer Terminabweichung für $TAA_s = 0,5 \text{ BKT}$



b) Termintreue über Streuung der Terminabweichung für $TAA_m = 0 \text{ BKT}$

— deduktiv abgeleitete Kennlinie - - - - - Termintoleranzintervall — berechnete Kennlinie

12215

Abbildung 22: Berechnete Termintreuekennlinien im Vergleich mit den Modellannahmen

Die Kennlinie über der Streuung der Terminabweichung folgt nach einem horizontalen Beginn einem konkaven Kurvenverlauf, der zügig zu einem konvexen Kurvenverlauf übergeht. Die Kennlinie nähert sich der Mindesttermintreue an. Auch hier sind die grundlegenden Modellannahmen erfüllt. Die Abknickpunkte der berechneten Kennlinie treten nicht so deutlich hervor wie in der deduktiven Ableitung, da diese nicht die stetige Änderung der Streuung berücksichtigt. Für qualitative Aussagen des Verhaltens der Termintreue in Abhängigkeit von Streuung und Mittelwert der Terminabweichung scheint Gleichung 4.5 geeignet zu sein. Die Ergebnisse der Gleichung stimmen mit den deduktiv abgeleiteten Modellierungsannahmen hinreichend genau überein, um auf ihr die Modellbildung der Termintreue aufzubauen. Zur vollständigen Modellierung der Termintreue ist es notwendig, die mittlere Terminabweichung und die Streuung der Terminabweichung in der Berechnung durch die tatsächlichen Einflussgrößen Rückstand und Reihenfolgeabweichung zu ersetzen. Diese Verbindung mit den Einfluss-

größen der Termintreue nimmt der folgende Abschnitt in der analytischen Modellsynthese vor.

4.2.4 Synthese des analytischen Modells

Kapitel 3 hat gezeigt, wie die Einflussgrößen der Termintreue gemessen und formal mit der Terminabweichung der Aufträge in Zusammenhang gebracht werden können. Mit diesem Wissen und der Grundgleichung 4.5 lässt sich nun das analytische Modell zusammensetzen. Der erste Schritt ist die Berechnung der mittleren Terminabweichung und der Streuung der Terminabweichung aus der gewichteten Reihenfolgeabweichung der Aufträge und dem Rückstand der Fertigung. Der zweite Schritt der Synthese erzeugt das analytische Modell der Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen.

Für die Summe der Terminabweichungen aus Rückstand und aus Reihenfolgeabweichung gilt bei statistischer Unabhängigkeit, dass sich auch ihre Mittelwerte (Gleichungen 3.5 und 3.9) zur mittleren Terminabweichung im Abgang addieren:

$$TAA_m = \frac{RS_m}{L_{Ist,m}} + \frac{RA_{g,m}}{L_{Plan,m}} \quad (4.6)$$

mit TAA_m : mittlere (berechnete) Terminabweichung im Abgang [BKT]
 RS_m : mittlerer Rückstand [Std]
 $RA_{g,m}$: mittlere gewichtete Reihenfolgeabweichung [Std]
 L_m : mittlere Leistung [Std/BKT]

Die mittlere Terminabweichung entspricht der Summe aus dem Quotienten von mittlerem Rückstand und mittlerer Leistung und dem Quotienten aus gewichteter Reihenfolgeabweichung und mittlerer geplanter Leistung.

Die Varianz einer Summe von Zufallsvariablen entspricht, bei statistischer Unabhängigkeit, der Summe der Varianzen der einzelnen Summanden. Entsprechend ist die Standardabweichung von TAA die Wurzel aus der Summe der Quadrate der Standardabweichungen von TAA_{RS} (Gleichung 3.6) und TAA_{RA} (Gleichung 3.10). Die Formel für die Streuung der Terminabweichung im Abgang lautet:

$$TAA_s = \sqrt{\left(\frac{RS_s}{L_{Ist,m}}\right)^2 + \left(\frac{RA_{g,s}}{L_{Plan,m}}\right)^2} \quad (4.7)$$

mit TAA_s : Streuung der Terminabweichung im Abgang [BKT]

- RS_s : Standardabweichung des Rückstands [Std]
 $RA_{g,s}$: Standardabweichung der gewichteten Reihenfolgeabweichung [Std]
 L_m : mittlere Leistung [Std/BKT]

Der zweite Schritt der analytischen Modellsynthese besteht aus dem Einsetzen der Gleichungen 4.6 und 4.7 in Gleichung 4.5:

$$TT \approx \left(\frac{1}{1 + e^{-\frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{TAA_{OG} + 0,5 - \left(\frac{RS_m}{L_{Ist,m}} + \frac{RA_{g,m}}{L_{Plan,m}}\right)}}{\sqrt{\left(\frac{RS_s}{L_{Ist,m}}\right)^2 + \left(\frac{RA_{g,s}}{L_{Plan,m}}\right)^2}}} - \frac{1}{1 + e^{-\frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{TAA_{UG} - 0,5 - \left(\frac{RS_m}{L_{Ist,m}} + \frac{RA_{g,m}}{L_{Plan,m}}\right)}}{\sqrt{\left(\frac{RS_s}{L_{Ist,m}}\right)^2 + \left(\frac{RA_{g,s}}{L_{Plan,m}}\right)^2}}} \right) \cdot 100\% \quad (4.8)$$

- mit
- TT : Termintreue [%]
 - TAA_{UG} : untere Termintoleranzgrenze [BKT]
 - TAA_{OG} : obere Termintoleranzgrenze [BKT]
 - RS_m : mittlerer Rückstand [Std]
 - RS_s : Standardabweichung des Rückstands [Std]
 - $RA_{g,m}$: mittlere gewichtete Reihenfolgeabweichung [Std]
 - $RA_{g,s}$: Standardabweichung der gewichteten Reihenfolgeabweichung [Std]
 - L_m : mittlere Leistung [Std/BKT]

Mit Gleichung 4.8 ist es möglich die Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen zu berechnen. Ohne Anpassungen ist die Genauigkeit der Gleichung jedoch nicht ausreichend. Tabelle 3 zeigt den Vergleich der Berechnungsergebnisse (Spalte fünf) mit den für die drei Unternehmen aus Abschnitt 4.2.3 gemessenen Termintreuwerten (Spalte 4). Zusätzlich sind die Streuung und der Mittelwert der Terminabweichungsverteilungen in den Spalten zwei und drei angegeben.

Tabelle 3: Berechnete und gemessene Termintreue von drei Unternehmen.

1	2	3	4	5
Unternehmen	TAAm [BKT]	TAAs [BKT]	TT (gemessen) [%]	TT (berechnet) [%]
1	3,83	9,76	35	12,3
2	28,8	30,9	9	3,9
3	-1,27	3,15	22	12,6

Alle drei Berechnungen fallen zu niedrig aus. Um die Ursache dieser Abweichung genau zu analysieren, reicht der Vergleich der Berechnungsgleichung mit den drei Bei-

spielverteilungen nicht aus. Der nächste Abschnitt erzeugt daher Termintreuwerte mittels Simulation, um systematisch zu untersuchen, woher die Abweichungen stammen und wie sie korrigiert werden können.

4.3 Simulationsexperimente

Dieser Abschnitt beschreibt vier Simulationsexperimente zur Untersuchung der Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen. Die Simulation ist heute eine weit verbreitete Technik zur Erforschung komplexer Systeme [Nyhuis-99, S. 50]. Gemäß VDI Richtlinie 3633 handelt es sich bei der Simulation um das „*Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.*“ [VDI-10, S. 3]. Ein Simulationsexperiment beinhaltet dabei die Untersuchung des Simulationsmodells durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischer Parametervariation.

Die hier vorgestellte Simulation untersucht die logistische Zielgröße Termintreue unter systematischer Variation der Parameter mittlerer Rückstand, Streuung des Rückstands, Reihenfolgeabweichung und einer kombinierten Variation aller drei Einflussgrößen gemeinsam. Zunächst beschreibt der Abschnitt die Simulationswürdigkeit der Aufgabenstellung. Im weiteren Verlauf folgt dieser Abschnitt den drei Phasen eines Simulationsexperiments nach VDI Richtlinie 3633 [VDI-10, S. 19]. Der Ablauf beginnt mit der Vorbereitung und Anpassung des Simulationsmodells in Abschnitt 4.3.1. Danach folgen für alle vier Experimente jeweils die Beschreibung der Durchführung und die Auswertung der Simulationsergebnisse (Abschnitte 4.3.2 bis 4.3.5).

Die Simulation ist nur zur Beantwortung simulationswürdiger Fragestellungen ein geeignetes Werkzeug [VDI-10, S. 20 f.]. Die Variation der Einflussgrößen der Termintreue im realen Betrieb ist mit einigen Schwierigkeiten und Kosten verbunden. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Simulation ist demgegenüber günstiger. Rückstände und Reihenfolgeabweichungen entstehen dezentral an verschiedenen Arbeitssystemen in unterschiedlicher Höhe. Es sind auch Wechselwirkungen zwischen beiden Einflussgrößen möglich. Ohne den Einsatz eines Simulators ist keine ausreichende Abschätzung des quantitativen Systemverhaltens, insbesondere der Folgen für die Termintreue einer gesamten Fertigung möglich. Die Komplexität der Fragestellung ist auf Grund ihrer Unüberschaubarkeit, der Vielzahl der Einflüsse, der Abhängigkeiten, der nebenläufigen Prozesse und der großen Datenmengen sehr hoch. Es herrscht Unsicherheit über die Verteilungsform von Rückstand, Leistung und Reihenfolgeabweichung als Folge be-

trieblicher Entscheidungen. Die Forschungsfragen dieser Arbeit sind somit als simulationstauglich einzustufen.

Der nachfolgende Abschnitt erklärt zunächst die Grundlagen und den Aufbau des Simulationsmodells und validiert es. Dieser Schritt zeigt, dass das Simulationsmodell das Systemverhalten eines realen Betriebs nachbildet.

4.3.1 Vorbereitung

Das Ziel der Simulationsexperimente ist die Untersuchung der Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen. Neben dieser Zieldefinition gehören zur Vorbereitung des Simulationsexperiments die Datenaufbereitung und Modellbildung (Abschnitt 4.3.1.1), ein Modelltest, der das Simulationsmodell validiert (Abschnitt 4.3.1.2) und die Anpassung der Simulation zur Durchführung der Simulationsexperimente (Abschnitt 4.3.1.3).

4.3.1.1 Datenaufbereitung und Modellbildung

Die Datengrundlage des Simulationsmodells stammt aus einer von der Firma GTT durchgeführten durchlauforientierten Betriebsanalyse in der Fertigung eines deutschen Maschinenbauunternehmens (vgl. Unternehmen zwei, Abschnitt 4.2.3). Der Datensatz enthält Fertigungsaufträge mit Plan- und Ist-Terminen, deren Fertigstellung innerhalb eines Betrachtungszeitraums von ca. 1,5 Jahren (Dezember 2007 bis Juli 2009) liegt. Der Simulator ist das Programm Plant Simulation. Der Aufbau des Modells beinhaltet die Überführung der Datengrundlage in das Modell und die Erweiterung des Programms zur Simulation einer Werkstattfertigung. Arbeitsvorgänge ohne Auftragszeit sind nicht Teil der Simulation. Das Modell enthält 2.464 Aufträge mit 16.895 Arbeitsvorgängen an 39 Arbeitssystemen. Die Arbeitssysteme bestehen jeweils aus einem, sechs oder neun Maschinen bzw. Handarbeitsplätzen. Die Arbeitsvorgänge umfassen die Fertigung, Montage und Qualitätskontrolle der Produkte.

Im Durchlaufdiagramm in Abbildung 23 ist der Verlauf der realen Produktion von Unternehmen zwei im Untersuchungszeitraum zu sehen. Die Fertigung ist geprägt von einem unkontrollierten Auftragszugang, der zu einem stetig wachsenden Bestand führt. Die Produktionsplanung ist nicht mit den tatsächlichen Kapazitäten der Fertigung abgeglichen. Die Ist-Leistung ist geringer als die geplante Leistung, wodurch der Rückstand ebenfalls über die erste Hälfte des Betrachtungszeitraums anwächst. Teilweise übersteigt der Plan-Abgang den Ist-Zugang. Die Erfüllung des Produktionsplans ist mit einer solchen Auftragsfreigabe unmöglich, da nicht freigegebene Aufträge auch nicht

abgehen können. Ungefähr ab BKT 220 sinken Bestand und Rückstand, da der Zugang zurückgeht. Dies liegt daran, dass nur Datensätze von Aufträgen deren Ist-Endtermine im Betrachtungszeitraum liegen erfasst sind. Der lange Vorlauf im Durchlaufdiagramm ist vereinzelt Aufträgen geschuldet, deren Zugangstermine sehr weit vor allen anderen Aufträgen liegen. Diese Aufträge berücksichtigt die Simulation nicht.

Die Anzahl der Schichten ist für jedes Arbeitssystem bekannt. Eine Schicht dauert acht Stunden und beinhaltet eine halbe Stunde Pause. Pro Schicht und Maschine besitzt jedes Arbeitssystem also eine Standardkapazität von 7,5 Stunden. Als Betriebskalendertag gelten alle Tage mit Ist-Abgang oder Ist-Zugang auf Arbeitssystemebene.

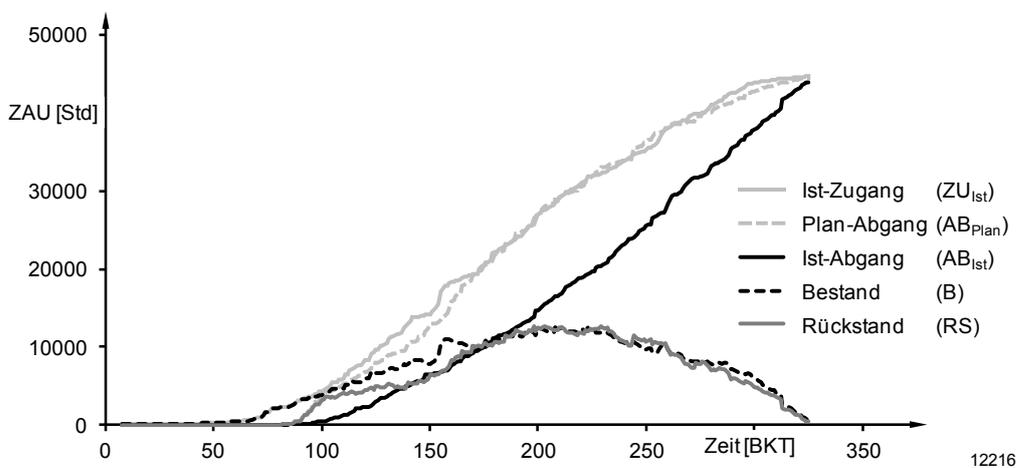


Abbildung 23: Durchlaufdiagramm für den Untersuchungszeitraum von Unternehmen zwei.

Das Ergebnis der Analyse der Terminabweichung von Unternehmen zwei ist in Abbildung 19 auf Seite 63 dargestellt. Die Terminabweichung hat einen hohen positiven Mittelwert von 28,8 BKT und eine ebenfalls sehr hohe Streuung von 30,9 BKT. Mit Hinblick auf die Termintreue ist der Produktionsprozess logistisch nicht beherrscht. Eine Zerlegung der Terminabweichung in die Bestandteile aus Rückstand (Abbildung 24) und aus Reihenfolgeabweichung (Abbildung 25) gibt Hinweise über die Ursachen der mangelhaften Termintreue von neun Prozent: Es treten sowohl Reihenfolgeabweichungen als auch Rückstand auf. Der Rückstand ist für eine mittlere Terminabweichung von 43,9 BKT verantwortlich, trägt aber mit einer Streuung von 13,9 BKT nur wenig zur Breite der Verteilung bei. Anders verhält es sich mit der Reihenfolgeabweichung. Diese erzeugt eine mittlere Terminabweichung von -13,9 BKT. Sie besitzt also eine beschleunigende Wirkung. Dies ist jedoch mit der Erzeugung einer hohen Streuung von 29,3 BKT verbunden.

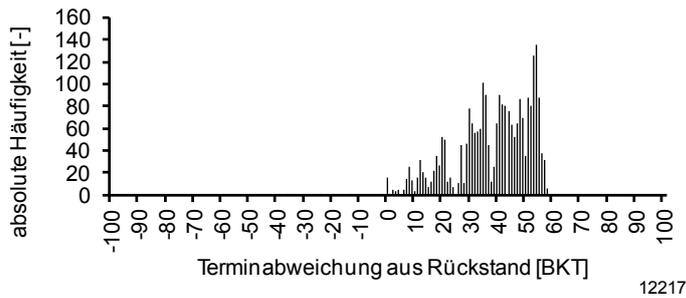


Abbildung 24: Terminabweichung aus Rückstand im Abgang von Unternehmen zwei.

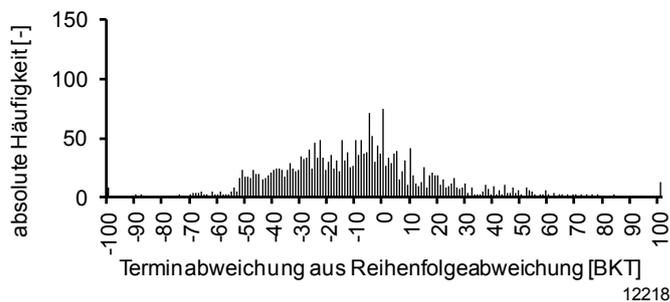


Abbildung 25: Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung im Abgang von Unternehmen zwei

Dieses Unternehmen wurde mit seinem Betriebsverhalten zunächst in die Simulation überführt. Damit die Ergebnisse der Experimente an diesem Simulationsmodell auf die Realität übertragbar sind, ist zunächst nachzuweisen, dass das Simulationsmodell das reale Systemverhalten nachbildet. Diesen Nachweis, die sogenannte Validierung, erbringt der nachfolgende Abschnitt.

4.3.1.2 Simulationsvalidierung

Der Modelltest vergleicht die Ergebnisse des Simulationsmodells mit dem realen logistischen Verhalten der simulierten Fertigung. Validierungsparameter sind die Termintreue (TT), die mittlere Durchlaufzeit (ZDL_m), die mittlere Terminabweichung im Abgang der Fertigung (TAA_m), die Streuung der Terminabweichung im Abgang der Fertigung (TAA_s) und der mittlere Bestand (B_m).

Für den Test gibt das Simulationsmodell die Aufträge zu ihrem in der Realität aufgezeichneten Freigabetermin in die Fertigung. An den Arbeitssystemen dient der im Realbetrieb aufgezeichnete Ist-Abgang als Vorgabe für die simulierte Leistung. Die Rei-

henfolgebildung an den Arbeitssystemen erfolgt gemäß der Abarbeitung der Aufträge in den Rückmeldedaten. Alle arbeitsfreien Tage sind berücksichtigt.

Die Ergebnisse des Modelltests sind in Tabelle 4 zusammengefasst. In der ersten Spalte steht der Parameter, gefolgt von seinem Formelzeichen und der zugeordneten Einheit in den Spalten zwei und drei. Spalte vier zeigt den aus den Rückmeldedaten gemessenen Realwert der Produktion. In der fünften Spalte steht der im Modelltest von der Simulation ermittelte Wert.

Tabelle 4: Validierungsparameter des Modelltests für n = 2464 Aufträge

1	2	3	4	5
Parameter	Formelzeichen	Einheit	Realität	Simulation
Termintreue	TT	%	9	9
mittlere Durchlaufzeit	ZDL _m	BKT	37,8	39,1
mittlere Terminabweichung im Abgang	TAA _m	BKT	28,8	30,0
Streuung der Terminabweichung im Abgang	TAA _s	BKT	30,9	30,8
mittlerer Bestand	B _m	Std	5804	6018

Die Simulation erreicht den genauen Wert der Termintreue der realen Produktion. Die Terminabweichung liegt mit Mittelwert und Streuung sehr nahe an den zu erreichenden Werten. Bestand und Durchlaufzeit weichen nicht wesentlich von der Realität ab. Ursache für Abweichungen zwischen Simulation und Realität sind vor allem inkonsistente Plan- und Ist-Termine in den Rückmeldedaten. Die Reihenfolgeentscheidungen im Realbetrieb sind in den Fällen von überlappter Bearbeitung schwer zu rekonstruieren. Eine exakte Simulation der aufgezeichneten Reihenfolgeentscheidung ist daher nicht möglich. Unterschiedliche Arbeitsvorgänge eines Auftrags besitzen teilweise den gleichen Rückmeldetermin. Es handelt sich um so genannte Sammelrückmeldungen, die dazu dienen, die Datenlücken aus zuvor versäumten Rückmeldungen zu schließen. Aufträge können sich in der Simulation zu jedem Zeitpunkt nur an einem Arbeitssystem befinden. Sammelrückmeldungen sind daher programmbedingt nicht simulierbar. In den Rückmeldedaten sind Plan-Abgänge für Tage ohne hinterlegte Kapazität, also Feiertage und Ferienperioden, vorgesehen. Um die Realitätsnähe zu wahren, ist die historische Auftragsfeinterminierung, trotz vorhandener Planungsfehler, Teil der Simulation. Alle Simulationsergebnisse zeigen also den Versuch der Fertigung durch gezielte Steuerungsmaßnahmen einen Produktionsplan umzusetzen, wenngleich dieser Fehler enthält.

Abbildung 26 veranschaulicht die Übereinstimmung der Simulation mit der Realität für einzelne Aufträge auf Auftragsebene. Auf der y-Achse sind die Werte der Terminabweichung aus der Rückmeldedatei aufgetragen. Auf der x-Achse sind die in der Simulation durch Nachbildung des logistischen Systemverhaltens erzielten Terminabweichungen abgetragen.

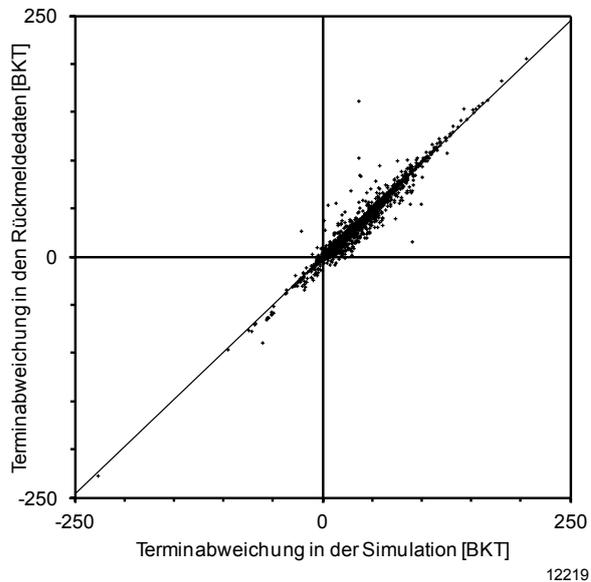


Abbildung 26: Vergleich der simulierten Terminabweichung aller Aufträge mit den Werten aus der Rückmeldedatei

Trotz Dateninkonsistenz in der Rückmeldedatei bildet die Simulation die Terminabweichung der einzelnen Aufträge mit einem Korrelationsmaß R^2 von über 95% nach.

Abbildung 27 zeigt die Qualität der Simulation an den einzelnen Arbeitssystemen. Das Diagramm stellt die mittlere Terminabweichung aus den Rückmeldedaten jedes Arbeitssystems der mittleren Terminabweichung aus der Simulation gegenüber. Die Namen der Arbeitssysteme sind verändert, um das Betriebsgeheimnis des simulierten Unternehmens zu wahren. Die Ergebnisse der Simulation sind hinreichend realitätsnah. Der Modelltest ist damit positiv abgeschlossen.

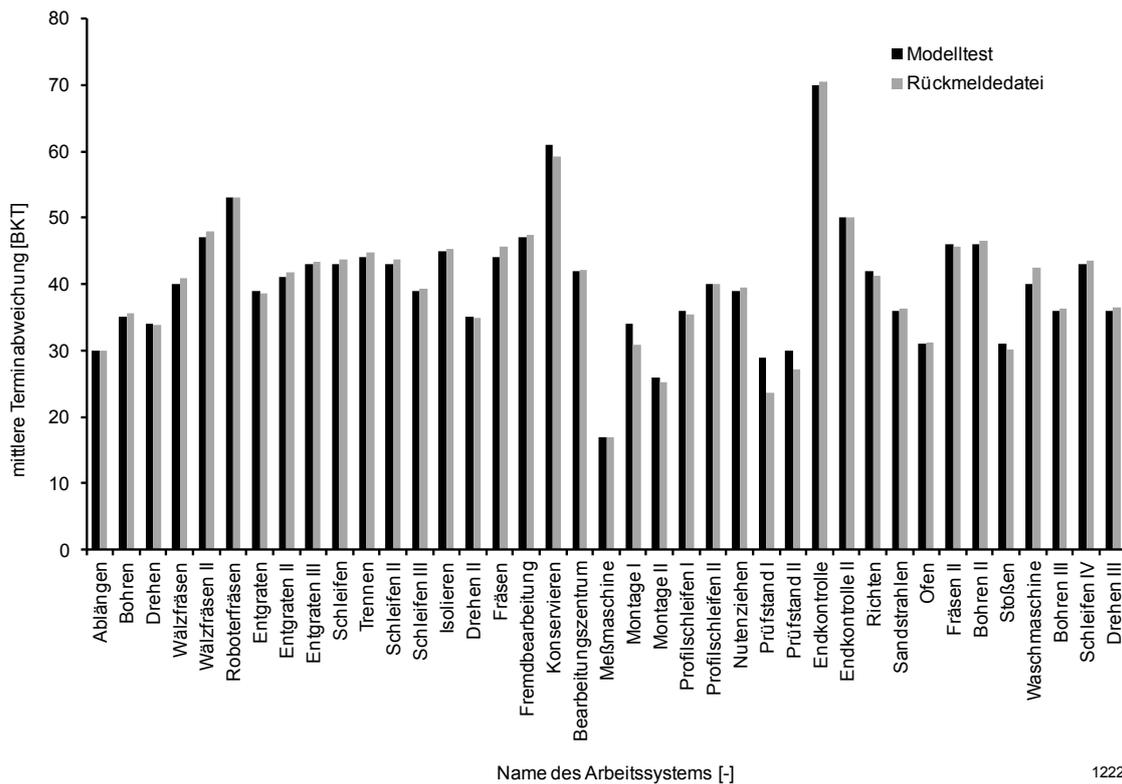


Abbildung 27: Vergleich der Terminabweichung an den Arbeitssystemen zwischen Modelltest und Rückmeldedatei

4.3.1.3 Anpassung des Simulationsmodells

Der Modelltest hat gezeigt, dass ein validiertes Simulationsmodell einer realen Fertigung vorliegt. Die Termintreue in diesem Modelltest liegt bei neun Prozent. Ziel der Simulationsexperimente ist es aber, das volle Spektrum der Termintreue zwischen null und 100 Prozent durch Variation der Einflussgrößen zu erzeugen. Die simulierte Fertigung wäre ohne Kapazitätsanpassungen nicht in der Lage, einen mittleren Rückstand von null oder gar negative Werte zu erreichen. Das validierte Modell muss daher zur Vorbereitung der Experimente angepasst werden.

Mehrere Anpassungen ermöglichen es der Simulation eine Termintreue von 100 Prozent zu erzielen. Zunächst schafft das Simulationsmodell die Grundvoraussetzungen für eine terminorientierte Fertigung: Eine Auftragsfreigabe nach Plan-Starttermin, eine Reihenfolgebildung an den Arbeitssystemen nach frühestem Plan-Starttermin des Arbeitsvorgangs (FPS-Regel) und eine rückstandsgeregelte Kapazitätssteuerung. Mit dieser Konfiguration der Fertigungssteuerung entsteht ein nach der Termintreue ausgerichtetes Abbild von Unternehmen zwei.

Für die Kapazitätssteuerung ist die maximale Kapazität festzulegen. Mit einer Kapazitätsflexibilität, die eine maximale Erweiterung der täglichen Arbeitszeit um eine Schicht und zusätzliche Wochenendarbeit an Samstagen vorsieht, sobald der Rückstand größer als acht Stunden ist, erreicht die simulierte Fertigung eine Termintreue von 53 Prozent. Zwar wäre eine solche Kapazitätsflexibilität eine realitätsnahe Annahme, die Termintreue ist aber für die geplanten Untersuchungen noch zu niedrig. Die Kapazitätsflexibilität des Simulationsmodells wird daher auf eine maximale Arbeitszeit von 24 Stunden an allen Tagen des Jahres ausgeweitet. So sind auch Plan-Abgänge an arbeitsfreien Tagen zu bewältigen. Diese Annahme kann als maximale realistisch umsetzbare kurzfristige Kapazitätserweiterung für das Unternehmen angesehen werden. Strukturelle Erweiterungen der Fertigung durch Anschaffung von Maschinen oder Fremdvergabe von Aufträgen sind nicht vorgesehen. Die maximal erreichbare Termintreue steigt in Folge dieser Flexibilitätserweiterung auf 88 Prozent an. Die Arbeitssysteme können im Bedarfsfall auch unbegrenzte Kapazitäten einstellen, um Plan-Abgänge zu bewältigen, die über die maximale Tageskapazität hinausgehen. Unabhängig von der Planungsqualität ist dadurch jedes Arbeitssystem täglich in der Lage Rückstände vollständig zu vermeiden. Die Simulation erreicht mit Hilfe dieser Erweiterungen eine Termintreue von 100 Prozent. Die Systemdynamik weicht dabei bewusst von der des validierten Betriebs ab.

Das angepasste Simulationsmodell kommt allen Aufgaben der Fertigungssteuerung nach: Es verfügt über eine Auftragsfreigabe, eine Kapazitätssteuerung und eine Reihenfolgebildung, die jeweils unabhängig voneinander gesteuert werden können. Das Simulationsmodell ist dadurch in der Lage, verschiedene Betriebspunkte einer Fertigung mit verschiedenen Ausprägungen der Einflussgrößen zu simulieren.

Die Untersuchung der Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen besteht aus vier Simulationsexperimenten. Das erste Experiment untersucht die Termintreue in Abhängigkeit des mittleren Rückstands. Das zweite Experiment untersucht die Termintreue in Abhängigkeit der Rückstandsstreuung. Das dritte Experiment untersucht die Termintreue in Abhängigkeit der Reihenfolgeabweichung. Schließlich untersucht das vierte Experiment den kombinierten Einfluss von Rückstand, Rückstandsstreuung und Reihenfolgeabweichung auf die Termintreue. Tabelle 5 fasst dieses Experimentierschema zusammen:

Tabelle 5: Experimentierschema für die Simulation

Experiment	1	2	3	4
Versuchsbeschreibung	isolierte Untersuchung einzelner Einflussgrößen			kombinierte Untersuchung aller Einflussgrößen
Zielgröße	Termintreue	Termintreue	Termintreue	Termintreue
unabhängige Größe (Variationsparameter)	mittlerer Rückstand	Rückstands-streuung	Reihenfolge-abweichung	mittlerer Rückstand, Rückstandsstreuung und Reihenfolgeabweichung

Der Auswertungszeitraum beträgt in allen nachfolgend beschriebenen Experimenten 80 Betriebskalendertage ab dem 130. BKT. Die Hoch- und Auslaufphasen des Simulationsmodells werden dadurch ausgeblendet. Als Betriebskalendertag gelten alle Tage, an denen an mindestens einem Arbeitssystem Kapazität bereitgestellt ist. Die Kapazitätssteuerung beeinflusst daher in geringem Maße die Länge des in Kalendertagen gemessenen Auswertzeitraums der einzelnen Simulationsläufe. Die Anzahl der Betriebskalendertage ist jedoch konstant.

4.3.2 Experiment eins: Variation des mittleren Rückstands

Das erste Experiment untersucht die Wirkung des mittleren Rückstands auf die Termintreue.

Durchführung

Der angestrebte mittlere Rückstand entsteht durch die Vorgabe von Zielrückständen an jedem einzelnen Arbeitssystem. Die rückstandsgeregelte Kapazitätssteuerung versucht diesen Rückstandswert einzustellen. Der Versuch variiert den Zielrückstand auf zwölf Faktorstufen. Die Höhe des Zielrückstands entspricht dem Produkt aus Faktor und Standardkapazität des jeweiligen Arbeitssystems. Diese Steuerung strebt eine homogene Verteilung der Terminabweichung über alle Arbeitssysteme an. Tabelle 6 zeigt die Faktorstufen für den Zielrückstand (Spalte eins) und den daraus in der Simulation resultierenden mittleren Rückstand für die gesamte Fertigung (Spalte zwei), bzw. für ein einzelnes Arbeitssystem (Spalte drei). Die Werte in den Spalten zwei und drei wurden während der Simulation aufgezeichnet. Simulationsläufe mit negativen Faktorstufen geben die Aufträge nicht nach dem Plan-Starttermin, sondern sofort frei, um hohe negative Rückstandswerte zu ermöglichen. Das einzeln betrachtete Arbeitssystem hat nur einen Arbeitsplatz und eine Schicht von acht Stunden pro Betriebskalendertag. Es zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass an ihm eine hohe Auslastung eingeplant ist.

Dadurch sind sowohl negative als auch positive Rückstände in ausreichender Höhe einstellbar.

Tabelle 6: Faktorstufen zur Variation des mittleren Rückstands in der Simulation

	1	2	3
	Zielrückstand als Vielfaches der Tageskapazität [-]	mittlerer Rückstand der Fertigung [Std]	mittlerer Rückstand am Arbeitssystem [Std]
Freigabe nach Plan-Start	2	9.004	15
	1,5	3.833	12
	1	2.954	8
	0,5	2.157	4
	0,2	1.250	1
	0	354	0
sofortige Auftragsfreigabe	0	0	0
	-0,2	-541	-2
	-0,5	-1.403	-5
	-1	-2.766	-9
	-1,5	-3.672	-12
	-2	-4.456	-16

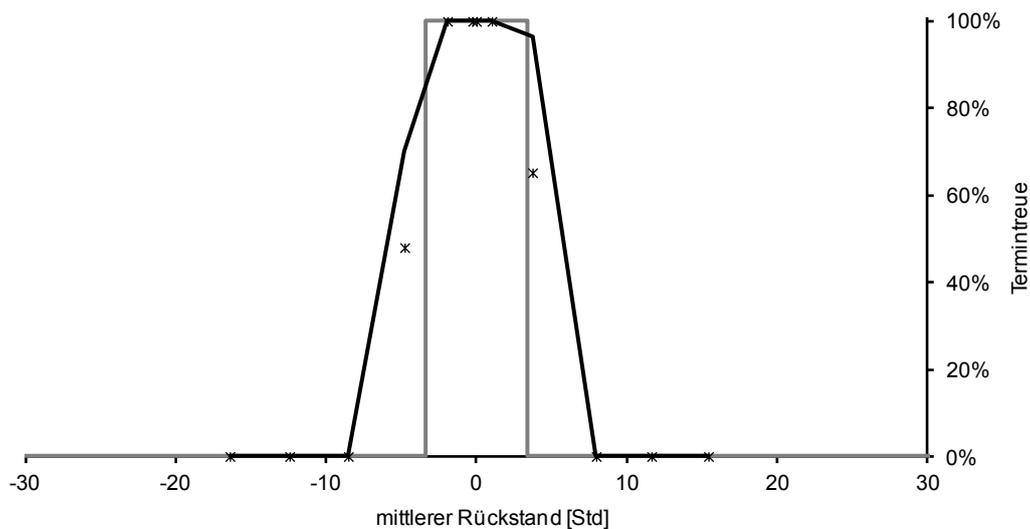
Auswertung

Abbildung 28 zeigt die Simulationspunkte der Termintreue in Abhängigkeit des mittleren Rückstands. Zusätzlich sind die deduktiv abgeleitete Kennlinie der Termintreue über dem mittleren Rückstand in grau und die mit Hilfe von Gleichung 4.8 berechnete Kennlinie in schwarz eingezeichnet.

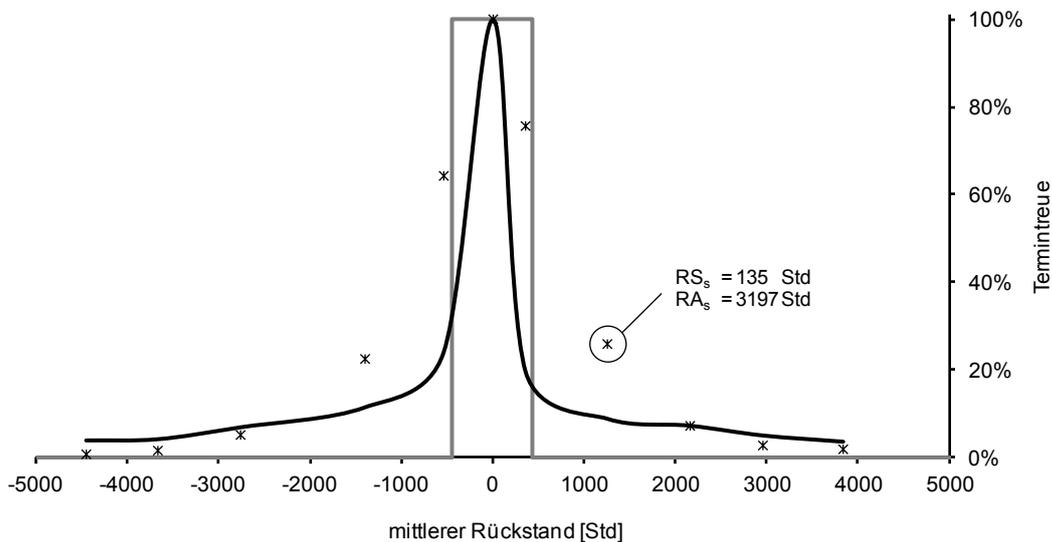
Bildteil a) zeigt das Ergebnis für ein einzelnes Arbeitssystem. Trotz sorgfältigem Aufbau der Versuchsanordnung war es nicht möglich den mittleren Rückstand isoliert zu variieren, ohne gleichzeitig auch Rückstandsstreuung und Reihenfolgeabweichung hervorzurufen. Die Simulationspunkte weichen daher von der deduktiv abgeleiteten, grau eingezeichneten, Kennlinie (vgl. Abbildung 13) ab. Eine bessere Abschätzung der Simulationspunkte ist die mit Hilfe von Gleichung 4.8 berechnete schwarze Kennlinie. Sie berücksichtigt nicht nur die Ausprägung des mittleren Rückstands, sondern auch die der anderen Einflussgrößen, also Rückstandsstreuung und Reihenfolgeabweichung.

Abbildung 28 b zeigt den Verlauf der Termintreue über dem mittleren Rückstand der gesamten Fertigung. Auch hier entstehen Abweichungen von der deduktiv abgeleiteten Kennlinie dadurch, dass die Rückstandsregelung eine Streuung der Terminabweichung im Abgang hervorruft. Der Grund hierfür ist, dass die Rückstandsregelung an jedem

Arbeitssystem versucht den Zielrückstand zu erreichen, ungeachtet der Rückstandssituation an anderen Arbeitssystemen und ungeachtet der Plan-Reihenfolge. Die Arbeitssysteme haben zum Regeln des Rückstands nur die Aufträge in ihrem Bestand mit den jeweiligen Auftragszeiten zur Verfügung. Dringende Aufträge werden teilweise zur Erzeugung des Rückstands zurückgehalten, während an anderen Arbeitssystemen weniger dringende Aufträge bereits bearbeitet werden. Reihenfolgeabweichungen sind dadurch unausweichlich. Da die Auftragszeiten ebenfalls streuen, ist auch der Zielrückstand nicht immer präzise einstellbar, es treten Rückstandsstreuungen auf.



a) Terminreue in Abhängigkeit vom mittleren Rückstand an einem Arbeitssystem



b) Terminreue in Abhängigkeit vom mittleren Rückstand für die gesamte Fertigung

— deduktiv abgeleitete Kennlinie — berechnete Kennlinie * Simulationspunkt

12221

Abbildung 28: Simulation der Terminreue in Abhängigkeit des mittleren Rückstands

Für einen Punkt, der deutlich von der deduktiv abgeleiteten Kennlinie abweicht, sind die Werte der Rückstandsstreuung und der Streuung der Reihenfolgeabweichung in Abbildung 28 b hervorgehoben. Zu sehen ist, dass vor allem die Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung einen sehr hohen Wert annimmt, obwohl die Arbeitssysteme immer den dringendsten Auftrag aus dem Bestand auswählen.

Gleichung 4.8 berücksichtigt zusätzlich zum mittleren Rückstand auch die Rückstandsstreuung und die Reihenfolgeabweichungen. Sie kommt sowohl am Arbeitssystem als auch in der Gesamtfertigung zu einer guten Annäherung der Termintreue. Einige Simulationspunkte liegen direkt auf der schwarzen Kennlinie. Das grundsätzliche Verhalten der Termintreue in Abhängigkeit vom mittleren Rückstand entspricht den Modellierungsgrundlagen. Es ist zu beobachten, dass die Abweichung (vertikaler Abstand zwischen Simulationspunkt und berechneter Kennlinie) im Bereich der Termintoleranzgrenzen sehr hoch ist. Dies lässt darauf schließen, dass die berechnete Termintreue bei einem Anstieg des Betrags des mittleren Rückstands zu schnell abfällt. Innerhalb des Termintoleranzintervalls und in größerer Distanz zu den Grenzen ist das Ergebnis der Berechnung sowohl für das einzelne Arbeitssystem als auch für die gesamte Fertigung nahezu fehlerfrei. Dieser Fehler deutet darauf hin, dass zur Korrektur der Berechnung die Form der unterstellten Verteilung anzupassen ist.

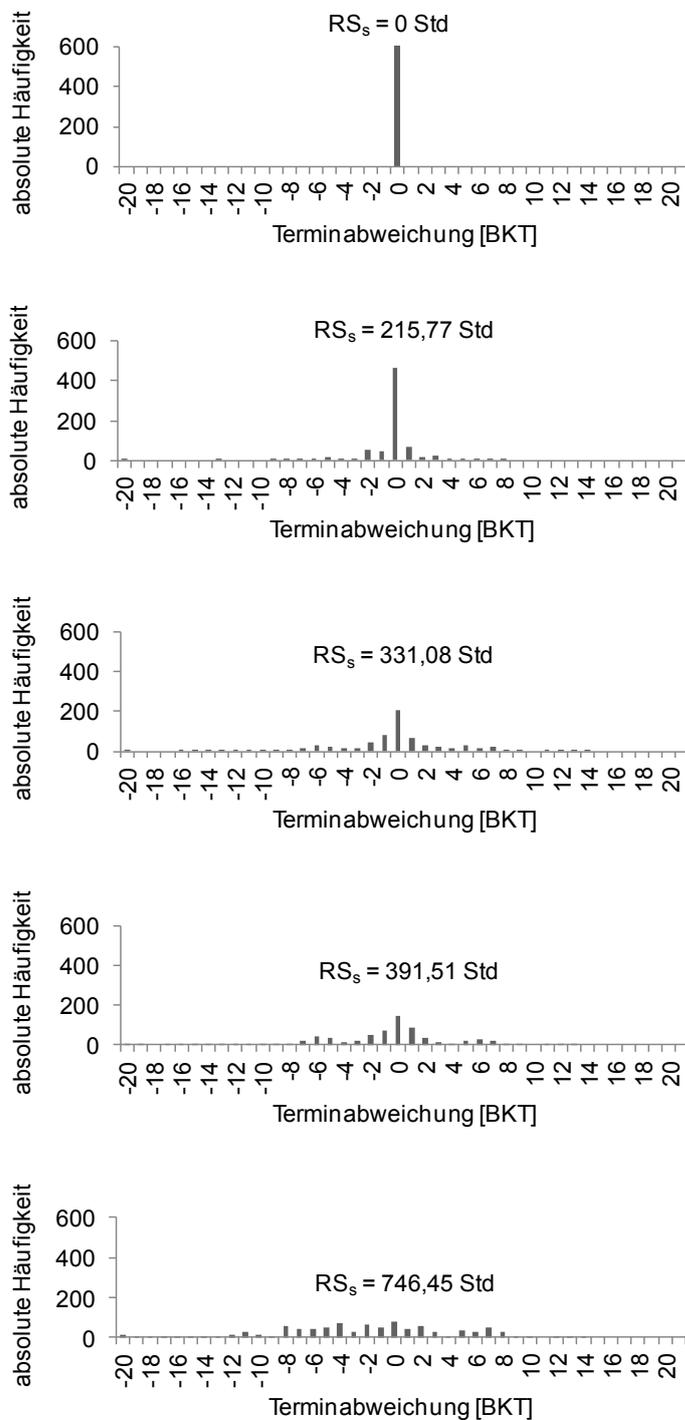
4.3.3 Experiment zwei: Variation der Rückstandsstreuung

Das zweite Experiment untersucht die Wirkung der Rückstandsstreuung auf die Termintreue.

Durchführung

Die Simulationsläufe sollen einen mittleren Rückstand von null Stunden bei unterschiedlich hohen Niveaus der Rückstandsstreuung aufweisen. Ein Regelungskonzept, das isoliert die Standardabweichung einer Zielgröße beeinflusst, ist in der bekannten Literatur nicht dokumentiert. Folgendes Vorgehen erzielt das gewünschte Systemverhalten: Analog zu den Untersuchungen um den mittleren Rückstand steigt von Simulationslauf zu Simulationslauf der Zielrückstand an. Es gelten die gleichen Faktorstufen wie im ersten Experiment (vgl. Tabelle 6). Während des Simulationslaufs ändert der jeweilige Zielrückstand im 14-tägigen Wechsel sein Vorzeichen. Dadurch bleibt der Rückstand im Mittel bei ca. null Stunden. Die Höhe der Rückstandsstreuung steigt jedoch mit der Höhe des Zielrückstands an. Abbildung 29 zeigt die resultierende Terminabweichung im Abgang der Fertigung beispielhaft an fünf ausgewählten Simulations-

punkten. Der Simulationspunkt ohne Rückstandsstreuung ist den Untersuchungen zum mittleren Rückstand entnommen. Erkennbar ist der annähernd konstante Mittelwert der Verteilungen bei null BKT, während die Streuung der Terminabweichung zunimmt. Dies bestätigt die Funktionsweise des Steuerungskonzepts. Die Erhöhung der Rückstandsstreuung drückt sich durch eine breitere Verteilung der Terminabweichung aus.

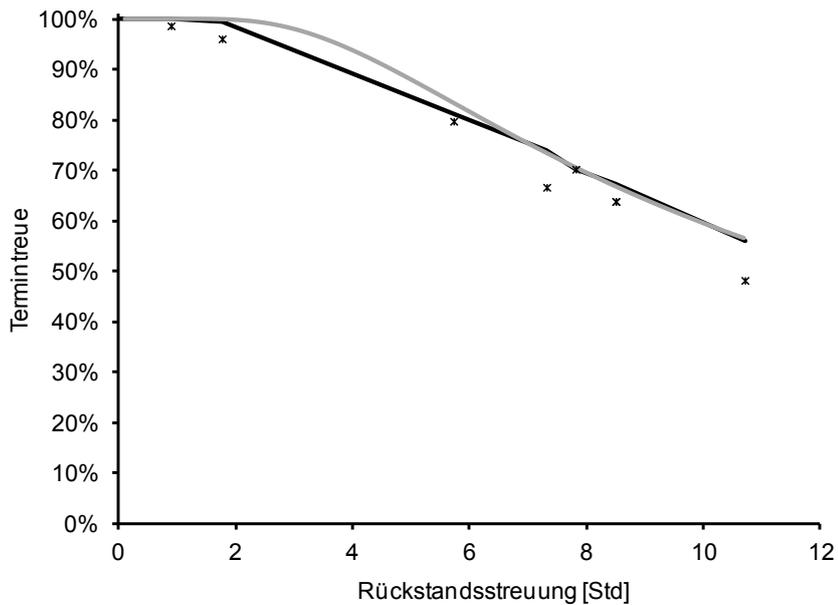


12222

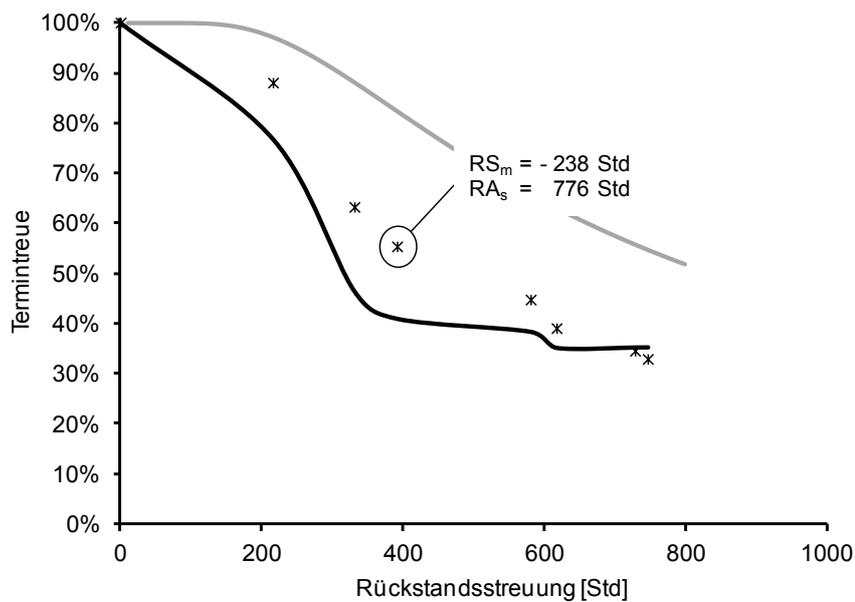
Abbildung 29: Terminabweichungsverteilungen im Abgang der Fertigung bei unterschiedlich hoher Rückstandsstreuung (RS_s)

Auswertung

Abbildung 30 a zeigt die Termintreue in Abhängigkeit der Rückstandsstreuung für ein Arbeitssystem. Bildteil b zeigt die entsprechenden Simulationspunkte für die gesamte Fertigung. Da die deduktive Ableitung für die Termintreuekennlinie in Abhängigkeit der Streuung der Terminabweichung (vgl. Abbildung 14) keine Stützpunkte festgelegt hat, ist sie hier nicht dargestellt. Die grau eingezeichnete Kennlinie ist somit nicht die deduktiv abgeleitete Kennlinie, sondern sie zeigt die Ergebnisse der Berechnungen mit Gleichung 4.8, wenn außer der Rückstandsstreuung alle anderen Einflussgrößen auf null gesetzt werden. Ihr Verlauf entspricht den Modellannahmen, wenn nur die Rückstandsstreuung variiert. Die schwarze Kennlinie repräsentiert die Berechnungsergebnisse unter Berücksichtigung sämtlicher Variablen in Gleichung 4.8. Sie berücksichtigt also neben der Rückstandsstreuung auch die Reihenfolgeabweichung und den mittleren Rückstand.



a) Termintreue in Abhängigkeit der Rückstands-streuung am Arbeitssystem



b) Termintreue in Abhängigkeit der Rückstands-streuung in der Fertigung

- berechnete Kennlinie (außer Rückstands-streuung alle Variablen = 0)
- berechnete Kennlinie
- * Simulationspunkt

12223

Abbildung 30: Simulation der Termintreue in Abhängigkeit der Rückstands-streuung

Mit steigender Rückstands-streuung verlassen immer mehr Aufträge das Termintoleranzintervall, die Termintreue sinkt. Dieser Effekt ist erwartungsgemäß vergleichbar mit dem deduktiv abgeleiteten Verhalten der Termintreue in Abhängigkeit von Reihenfolgeabweichungen (vgl. Abbildung 14). Die Termintreue nähert sich ebenfalls einer unteren

Schranke an. Für die Fertigung in dieser Untersuchung liegt sie bei ca. 30 Prozent. Auch diese Beobachtung deckt sich mit den Modellierungsgrundlagen.

Abweichungen der Simulationspunkte von der berechneten Kennlinie treten verstärkt für die Gesamtfertigung auf. Bei diesem Experiment konnte die Rückstandsstreuung nicht isoliert variiert werden. Wechselwirkungen zu anderen Einflussgrößen traten auf. Ein besonders stark abweichender Punkt ist in Abbildung 30 b hervorgehoben. Besonders ausgeprägt sind die hohen Reihenfolgeabweichungen, obwohl die Arbeitssysteme immer den dringendsten Auftrag aus dem Bestand auswählen. Eine mögliche Ursache hierfür sind Rückstände an verschiedenen Arbeitssystemen, die in Ausmaß und Vorzeichen unterschiedlich sind und so zu einem ungewollten Umsortieren der Aufträge für die nachfolgenden Arbeitssysteme führen. Es entspricht der Erwartung, dass die Messpunkte in Abbildung 30 b unterhalb der grauen Kennlinie liegen, wenn Reihenfolgeabweichungen auftreten und die Modellannahmen dadurch verletzt sind. Wie im ersten Versuch liefert auch hier die Berechnung mit Gleichung 4.8 (schwarze Kennlinie) eine bessere Abschätzung der Termintreue für die gesamte Fertigung als eine Berechnung, die nur die Rückstandsstreuung berücksichtigt (graue Kennlinie). Da die graue und die schwarze Kennlinie weit auseinander liegen, treten beträchtliche Störfaktoren (mittlerer Rückstand und Reihenfolgeabweichung) auf. Da die schwarze Kennlinie näher an den Simulationspunkten liegt, ist der Einfluss der Störgrößen auf die Termintreue in der Simulation größer als der der Rückstandsstreuung allein. Am einzelnen Arbeitssystem ist der Einfluss der Störgrößen kaum zu sehen. Beide Kennlinien liegen nah beieinander und sehr dicht an den Simulationspunkten. Hier gelten die Modellannahmen.

Da der in Abbildung 30 b hervorgehobene Punkt zwar stark von der berechneten Kennlinie abweicht, jedoch in eine gedachte Linie mit den anderen Simulationspunkten passt, lässt sich ein systematischer Zusammenhang zwischen der Rückstandsstreuung und anderen Einflussgrößen vermuten. Für die Berechnung bedeutet dies, dass entweder der mittlere Rückstand oder die Reihenfolgeabweichung oder beide Größen zu einer zu hohen Absenkung der Termintreue führen. Eine genauere Aussage zur Korrektur der Berechnungsgleichung lässt sich aus dieser Auswertung nicht ableiten.

4.3.4 Experiment drei: Variation der Reihenfolgeabweichung

Das dritte Experiment untersucht die Wirkung der Reihenfolgeabweichung auf die Termintreue.

Durchführung

In den Simulationsläufen wird die gewichtete Reihenfolgeabweichung variiert und die Termintreue gemessen. Die Rückstandsregelung verfolgt einen Zielwert von null Stunden und der Algorithmus zur Erzeugung der Rückstandsstreuung ist deaktiviert. Die gewichtete Reihenfolgeabweichung ist nicht direkt beeinflussbar. Der Mitarbeiter am Arbeitssystem kann nur über die Auswahl des nächsten Auftrags entscheiden. Die Reihenfolgedisziplin drückt aus, in wie vielen Fällen die Auftragsauswahl den dringendsten Auftrag tatsächlich zuerst zur Bearbeitung heranzieht. Sie ist damit der eigentliche Variationsparameter. Um eine allgemeingültige Reihenfolgeabweichung zu erzeugen, folgt die Auftragsauswahl keinem erkennbaren Muster (z.B. LOZ oder KOZ). Bei bewussten Abweichungen von der geplanten Auftragsreihenfolge nimmt die Simulation daher die Auswahl der Aufträge zufällig und gleichverteilt über den gesamten Bestand am Arbeitssystem vor. In der Simulation treffen die Arbeitssysteme die Reihenfolgeentscheidungen nach folgendem Algorithmus: Ist die Reihenfolgedisziplin niedriger oder gleich dem Vorgabewert, wird der dringendste Auftrag zuerst bearbeitet. Ist die Reihenfolgedisziplin hingegen höher als angestrebt, wählt das Arbeitssystem einen beliebigen Auftrag aus dem Bestand. Ist nur der dringendste Auftrag im Bestand, wird dieser bearbeitet, um das Arbeitssystem vor Rückstand zu schützen. Die Reihenfolgedisziplin besitzt daher je nach Bestand am Arbeitssystem ein natürliches Minimum, das nicht unterschritten wird. Das für diesen Versuch ausgewählte Arbeitssystem liegt weit vorne im Wertstrom und hat daher nur geringe Reihenfolgeabweichungen im Zugang. Die gewichteten Reihenfolgeabweichungen lassen sich auf diese Weise direkt diesem Arbeitssystem zuordnen.

Tabelle 7: Faktorstufen zur Variation der Reihenfolgedisziplin in der Simulation und die daraus resultierende Reihenfolgeabweichung

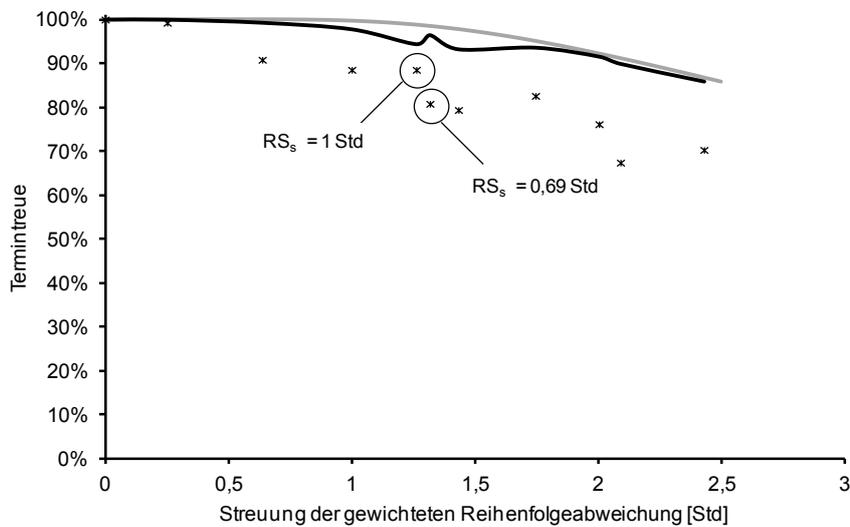
	Fertigung ($L_m=191,7$ Std/BKT)			Arbeitssystem ($L_m=1,1$ Std/BKT)		
1	2	3	4	5	6	7
Vorgabewert Reihenfolgedisziplin	resultierende Reihenfolgedisziplin	mittlere gewichtete Reihenfolge- abweichung [Std]	Streuung der gewichteten Reihenfolge- abweichung [Std]	resultierende Reihenfolgedisziplin	mittlere gewichtete Reihenfolge- abweichung [Std]	Streuung der gewichteten Reihenfolge- abweichung [Std]
100%	100%	26,9	389,1	100%	0,0	0,0
90%	92%	-12,4	499,5	90%	0,0	0,3
80%	84%	-10,1	758,2	80%	0,0	0,6
70%	77%	13,9	829,5	71%	0,0	1,3
60%	71%	44,4	696,4	61%	0,0	1,0
50%	65%	86,0	941,4	52%	0,0	1,4
40%	60%	68,2	891,8	42%	0,0	1,3
30%	55%	70,3	1047,0	33%	-0,1	1,7
20%	52%	75,8	1064,7	24%	-0,2	2,0
10%	50%	144,7	1320,4	16%	0,0	2,1
0%	49%	197,7	1502,4	15%	-0,1	2,4

Der Mittelwert der gewichteten Reihenfolgeabweichung kann auch bei vielen Auftragsvertauschungen null sein. Als Maß für die Höhe der Reihenfolgeabweichung dient daher die Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung. Tabelle 7 zeigt, wie unterschiedliche Vorgabewerte für die Reihenfolgedisziplin zu einer Veränderung der gewichteten Reihenfolgeabweichung führen. Die Werte in den Spalten zwei bis sieben wurden während der Simulationsdurchläufe gemessen. In Spalte zwei stehen die resultierenden Reihenfolgedisziplinen für die gesamte Fertigung und in Spalte fünf die für das einzelne Arbeitssystem. Die Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung (Spalten vier und sieben) steigt mit sinkender Reihenfolgedisziplin. Es gibt jedoch einige Ausnahmen: Zum Beispiel weicht für die Fertigung der Wert bei einer vorgegebenen Reihenfolgedisziplin von 50 Prozent ab. In diesem Fall ist die Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung höher als bei einer vorgegebenen Reihenfolgedisziplin von nur 40 Prozent. Diese und weitere Abweichungen stammen von der zufälligen Auftragsauswahl bei Nichteinhaltung der Plan-Reihenfolge, da jeder Auftrag mit seiner Auftragszeit unterschiedlich zur Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung beiträgt. Trotz der geringfügigen Abweichungen ist die Funktionsweise der Regelungslogik ausreichend, um den Versuch durchzuführen. Der Mittelwert der gewichteten Reihenfolgeabweichung wechselt sein Vorzeichen, je nachdem ob das System vermehrt kleine Aufträge (negatives Vorzeichen) oder große Aufträge (positives Vorzeichen) bevor-

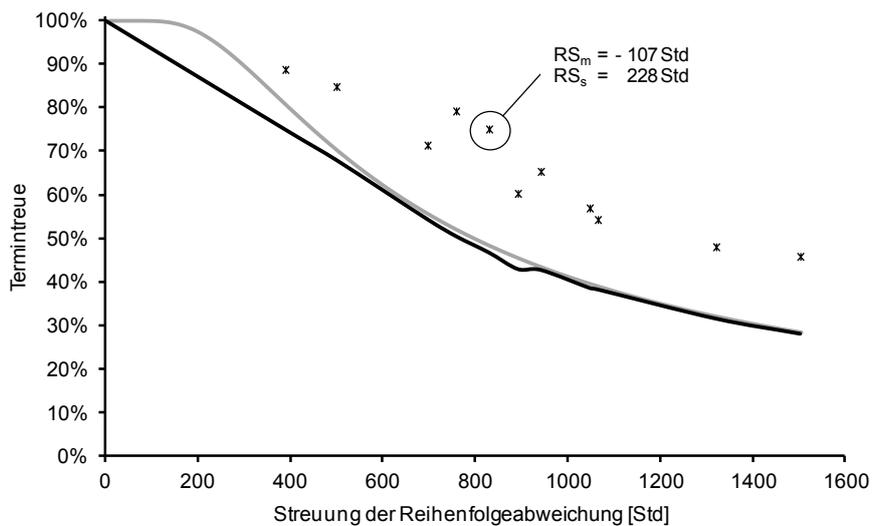
zugt bearbeitet hat. Der Mittelwert der gewichteten Reihenfolgeabweichung ist also ebenfalls von der zufälligen Auftragsauswahl geprägt. An dem einzelnen Arbeitssystem tritt in allen Simulationsläufen so gut wie keine mittlere Reihenfolgeabweichung auf. Das bedeutet, dass weder kleine noch große Aufträge systematisch vorgezogen werden.

Auswertung

Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse des Versuchs:



a) Termintreue in Abhängigkeit der Streuung der Reihenfolgeabweichung am Arbeitssystem



b) Termintreue in Abhängigkeit der Streuung der Reihenfolgeabweichung in der Fertigung

- berechnete Kennlinie (außer Streuung der Reihenfolgeabweichung alle Variablen = 0)
- berechnete Kennlinie
- * Simulationspunkt

12224

Abbildung 31: Simulation der Termintreue in Abhängigkeit der Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung

Auch in diesem Versuch sind die deduktiv abgeleiteten Modellannahmen nicht erfüllt, da sich neben der Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung regelungsbedingt auch immer der Mittelwert verändert (vgl. Tabelle 7). Zusätzlich treten ein mittlerer

Rückstand und Rückstandsstreuungen auf. Wie zuvor beim Versuch zur Rückstandsstreuung sind auch in diesem Fall beide eingezeichneten Kennlinien mit Gleichung 4.8 berechnet. Die graue Kennlinie zeigt zum Vergleich das Ergebnis der Berechnung, wenn in Gleichung 4.8 alle Variablen außer der Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung null gesetzt sind. Die schwarze Kennlinie zeigt die Berechnung unter Berücksichtigung aller Einflussgrößen. Die Simulationspunkte folgen sowohl für die Fertigung als auch für das einzelne Arbeitssystem dem Verlauf der Kennlinien, sie sind jedoch systematisch verschoben. Anders als bei der Rückstandsstreuung ist für das einzelne Arbeitssystem die experimentell erzeugte Termintreue hier systematisch niedriger als berechnet und für die gesamte Fertigung höher als berechnet. Die graue und die schwarze Kennlinie liegen in beiden Diagrammen nah beieinander. Dies zeigt an, dass die Höhe der Störeinflüsse (also mittlerer Rückstand, Rückstandsstreuung und mittlere gewichtete Reihenfolgeabweichung) nicht sehr groß ist. Wären sie groß, würde die schwarze Kennlinie einen deutlich von der grauen Kennlinie abweichenden Verlauf annehmen (vgl. Experiment zwei, Abbildung 30 b).

Beide Kennlinien zeichnen zwar den Verlauf der Simulationspunkte nach, sie sind ihnen gegenüber aber für das Arbeitssystem nach oben und für die gesamte Fertigung nach unten verschoben. Daraus ist ersichtlich, dass die Streuung der Reihenfolgeabweichung in den Berechnungen nicht korrekt berücksichtigt ist. In die Berechnung der Termintreue am Arbeitssystem geht die Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung zu niedrig und in die Berechnung für die gesamte Fertigung zu hoch ein.

Besonders auffällig sind die beiden hervorgehobenen Simulationspunkte in Abbildung 31 a. Sie unterscheiden sich nur in der Reihenfolgedisziplin und der Rückstandsstreuung. Verwunderlich ist, dass der Wert mit der geringeren Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung und der höheren Rückstandsstreuung eine höhere Termintreue besitzt. Da die beiden Punkte sich in allen anderen Messwerten kaum unterscheiden, kann angenommen werden, dass die beiden Streuungen (Rückstand und gewichtete Reihenfolgeabweichung) sich bei diesem Punkt gegenseitig positiv im Sinne einer hohen Termintreue überlagern. Die Berechnung ignoriert diese Wechselwirkung. Die schwarze Kennlinie zeigt dementsprechend für den Punkt mit höherer Rückstandsstreuung eine niedrigere Termintreue.

Eine weitere Erkenntnis aus diesem Experiment ist, dass kein Wert der Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung so hoch ist wie der für den hervorgehobenen Punkt aus Experiment eins (Abbildung 28). Der mittlere Rückstand an unterschiedli-

chen Arbeitssystemen hat einen größeren Einfluss auf die Reihenfolgeabweichung in der Fertigung als die Reihenfolgedisziplin der Arbeitssysteme.

Die ersten drei Experimente weisen auf starke Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen der Termintreue in einer Fertigung hin. Für einzelne Arbeitssysteme fallen die Wechselwirkungen geringer aus. Hier liegen die graue und die schwarze Kennlinie in allen drei Versuchen nah beieinander und geben eine gute Abschätzung der durch Simulation ermittelten Termintreuwerte. Genaue Aussagen über die Wechselwirkungen sind aus den Auswertungen nicht abzuleiten. Daher können aus den Erkenntnissen der ersten drei Experimente keine allgemeingültigen Korrekturen für die Berechnungsgleichung der Termintreue (Gleichung 4.8) abgeleitet werden. Das letzte Experiment betrachtet das Verhalten der Termintreue unter Kombination aller Einflussgrößen. Diese Untersuchung hat das Ziel, sämtliche Wechselwirkungen ebenfalls zu simulieren und daraus Erkenntnisse zur Korrektur von Gleichung 4.8 zu gewinnen.

4.3.5 Experiment vier: kombinierte Variation aller Einflussgrößen

Das vierte Experiment untersucht die Termintreue in Abhängigkeit des mittleren Rückstands, der Rückstandsstreuung und der Reihenfolgeabweichung.

Durchführung

Die Steuerung der Simulation ist eine Kombination aus der Durchführung der vorangegangenen drei Experimente: Der mittlere Rückstand wird als Faktor der Kapazität jedes Arbeitssystems vorgegeben und die Variation der Reihenfolgedisziplin führt unterschiedlich hohe Streuungen der gewichteten Reihenfolgeabweichung herbei. Lediglich zur Beeinflussung der Rückstandsstreuung gibt es eine Anpassung des Algorithmus: Statt des Vorzeichens wandelt sich die absolute Höhe des Zielrückstands zur Erzeugung unterschiedlich hoher Streuungen um mittlere Rückstände, deren Betrag größer null ist. Periodisch verfolgt die Rückstandsregelung also einen um einen Streufaktor erhöhten und in der nächsten Periode einen um den gleichen Faktor reduzierten Zielrückstand. Die Variation in 14-tägigen Intervallen hat sich als zweckmäßig erwiesen. Der Versuchsplan für das vierte Experiment umfasst 216 Simulationsläufe und bildet den Abschluss der experimentellen Untersuchungen. Tabelle 8 fasst die Faktoren von Experiment vier mit den Variationsstufen der drei Einflussgrößen zusammen:

Tabelle 8: Faktorstufen für die Simulationsparameter im Versuchsplan von Experiment vier

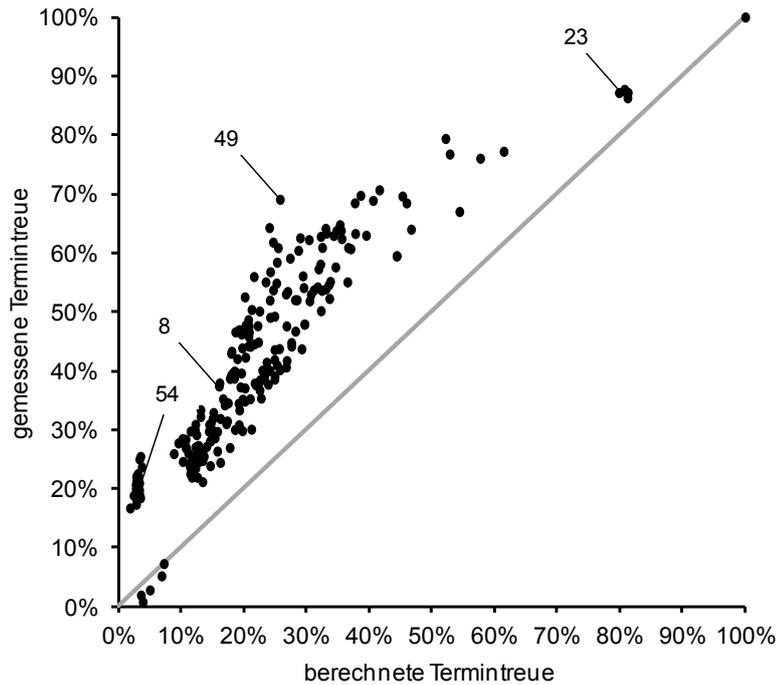
1	2	3
Vorgabewert Reihenfolge- disziplin [%]	Störgröße zur Rückstands- streuung als Vielfaches des Zielrückstands [-]	Zielrückstand als Vielfaches der Tageskapazität [-]
100	0*	-3
80	1,5	-1
60	2	-0,5
40	3	-0,25
20		0
0		0,25
		0,5
		1
		3

Anzahl möglicher Kombinationen: 216

* Für den Wert 0 wurde der Algorithmus zur Erzeugung der Rückstandsstreuung deaktiviert.

Auswertung

Zum Verhalten der Termintreue in Abhängigkeit aller Einflussgrößen existiert keine deduktive Ableitung. Die Ergebnisse dieses Experiments lassen sich nur mit den Ergebnissen der Berechnungen aus Gleichung 4.8 vergleichen. Abbildung 32 zeigt die gemessenen Ergebnisse aller 216 Simulationsläufe über den berechneten Werten in einem Diagramm. Zur besseren Orientierung ist eine 45°-Gerade grau eingezeichnet. Bei Werten, die auf der Gerade liegen, stimmen die Berechnungen und die simulierten Vergleichswerte vollständig überein. Bei Werten zwischen 10 und 90 Prozent Termintreue liefert die Berechnung systematisch zu niedrige Werte, diese Vergleichspunkte liegen alle oberhalb der 45°-Gerade.



12225

Abbildung 32: Vergleich der gemessenen mit der berechneten Termintreue bei Unterstellung einer logistischen Verteilung

Im Diagramm sind vier Punkte mit der Nummer ihres Simulationslaufs markiert. Die Auswahl umfasst Punkte mit niedriger, mittlerer und hoher gemessener Termintreue. Eine detaillierte Analyse dieser vier Simulationsläufe soll helfen, die Ursachen der Abweichung zwischen Berechnung und Messung der Termintreue aufzudecken. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Histogramme zur Terminabweichung im Abgang der markierten Simulationsläufe. In den Histogrammen ist als graue Kurve jeweils die kumulative Häufigkeit als Ergebnis der Berechnung mit dem Integral der logistischen Dichtefunktion dargestellt. Als Parameter der Verteilung dienen die in der Simulation gemessenen Mittelwerte und Streuungen der Terminabweichung im Abgang. Der Vergleich zwischen der schwarz eingezeichneten kumulativen Häufigkeit der gemessenen Terminabweichungen und der berechneten kumulativen Häufigkeit zeigt, dass der Funktionsverlauf zwar in allen vier Fällen den Messwerten folgt, aber gerade innerhalb des Termintoleranzintervalls deutlich abweicht.

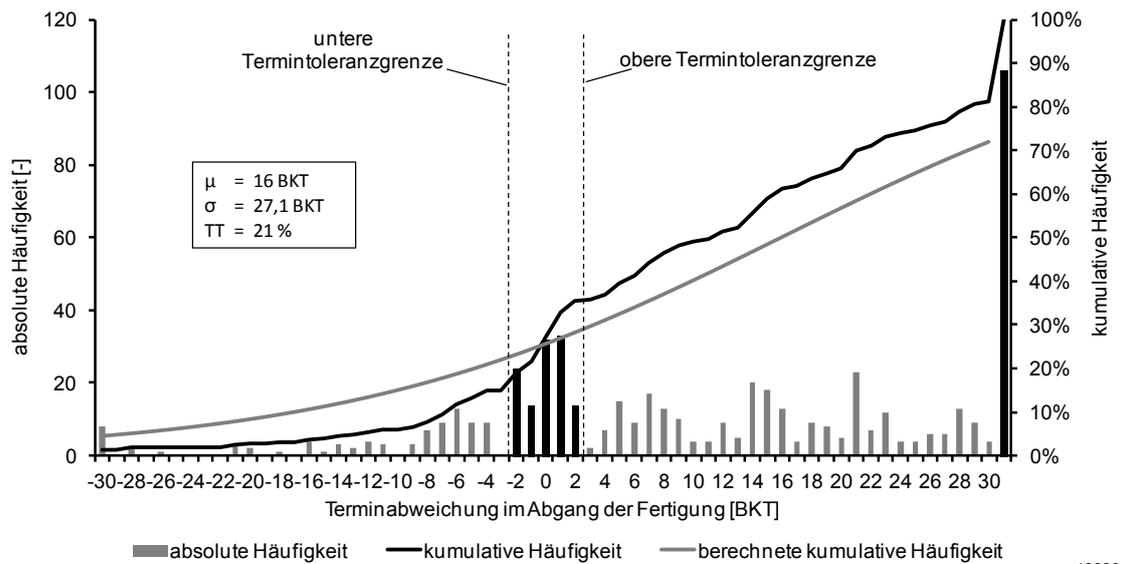


Abbildung 33: Verteilung der Terminabweichung im Abgang von Simulationslauf 54

Die Verteilung der Terminabweichung von Simulationslauf 54 ist in Abbildung 33 als Histogramm dargestellt. Sie ist durch eine breite Streuung der Terminabweichung im Abgang und eine sehr weit nach rechts auslaufende Form geprägt. Über hundert Aufträge sind in der größten dargestellten Klasse zusammengefasst, sie haben eine Terminabweichung von mehr als 30 BKT. Die Termintreue ist der vertikale Abstand zwischen den Schnittpunkten der kumulativen Häufigkeitskurve mit der oberen und der unteren Grenze des Termintoleranzintervalls. Die Kurve der gemessenen kumulativen Häufigkeit (schwarz) verläuft in diesem Intervall durchschnittlich deutlich steiler als die Kurve der berechneten kumulativen Häufigkeit (grau). In Folge ist die Termintreue in der Simulation höher als berechnet.

Simulationslauf acht (vgl. Abbildung 34) erzeugte eine Termintreue von 37 Prozent. Die berechnete Termintreue liegt bei 16 Prozent. Die Terminabweichung im Abgang ist durch einen ausgeprägten Gipfel um den Maximalwert bei 1 BKT und weite Ausläufer nach rechts geprägt. Weitere Gipfel z. B. bei 6 BKT und bei 21 BKT sind ebenfalls zu erkennen. Es handelt sich um eine multimodale rechtsschiefe Verteilung. Auch in diesem Fall ist die Steigung der berechneten kumulativen Häufigkeit im Bereich der Termintoleranz nicht steil genug, um die Termintreue korrekt zu bestimmen.

Für Simulationspunkt 49, dargestellt in Abbildung 35, gilt eine andere Verteilungsform. In diesem Fall ist die Terminabweichung unimodal und leicht linksschief verteilt. Die Steigung des Integrals der logistischen Dichtefunktion im Bereich der Termintoleranz ist aber auch hier zu gering, um die Termintreue korrekt zu bestimmen.

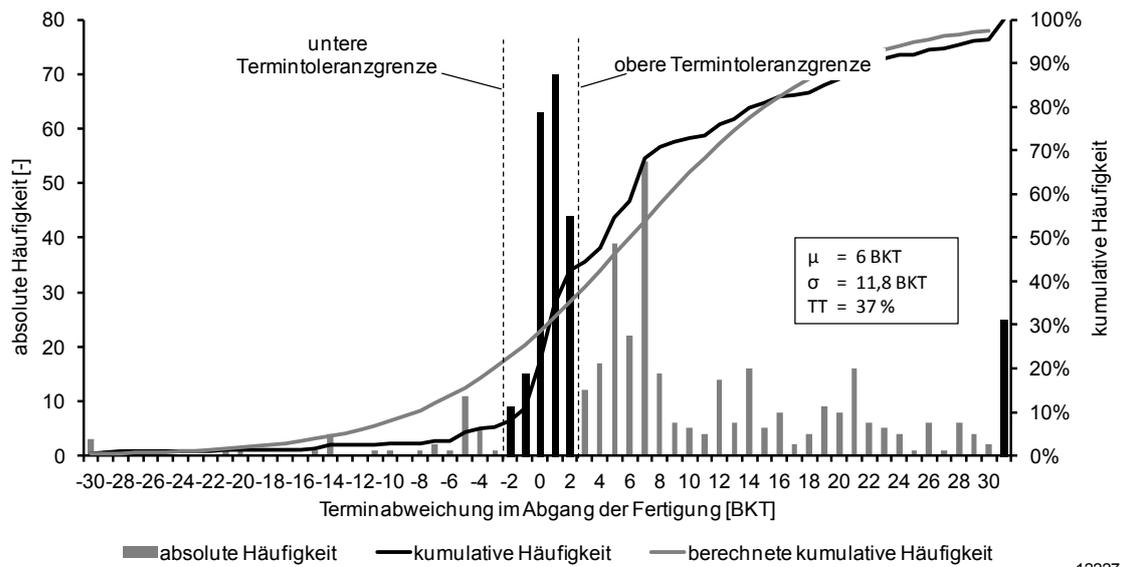


Abbildung 34: Verteilung der Terminabweichung im Abgang von Simulationslauf 8

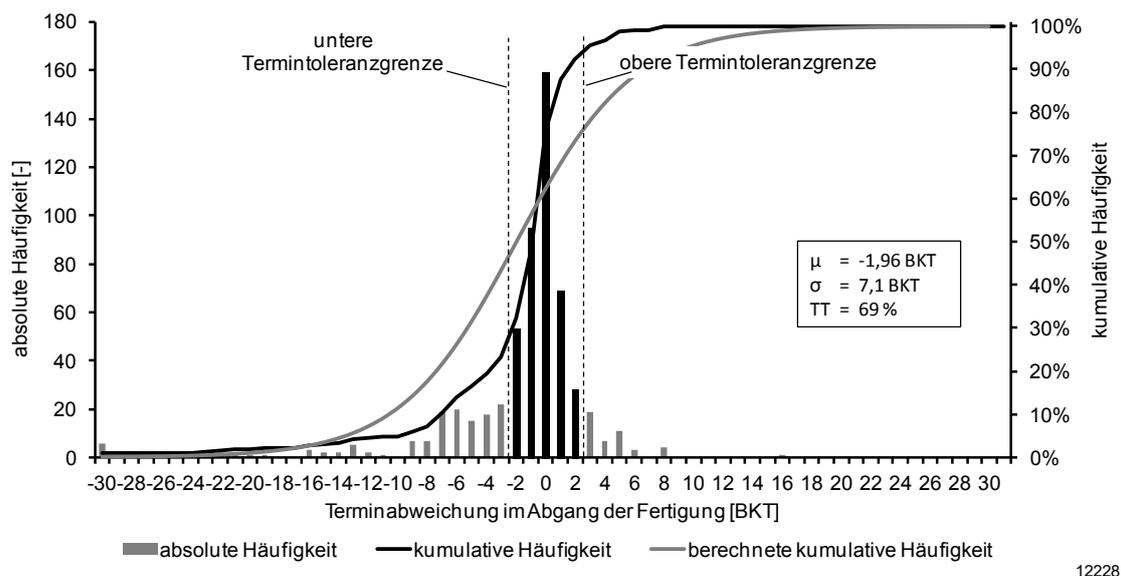


Abbildung 35: Verteilung der Terminabweichung im Abgang von Simulationslauf 49

Eine gute Näherung der Termintreue liefert Gleichung 4.8 für den Simulationspunkt 23. Die Verteilung der Terminabweichung im Abgang für diesen Simulationspunkt ist in Abbildung 36 dargestellt. An diesem Punkt liegt die berechnete Termintreue in Höhe von 80 Prozent vergleichsweise nah an dem gemessenen Wert von 87 Prozent. Jedoch bleibt auch hier festzustellen, dass die Steigung der berechneten kumulativen Häufigkeit über dem Termintoleranzintervall abermals geringer ist als die der gemessenen.

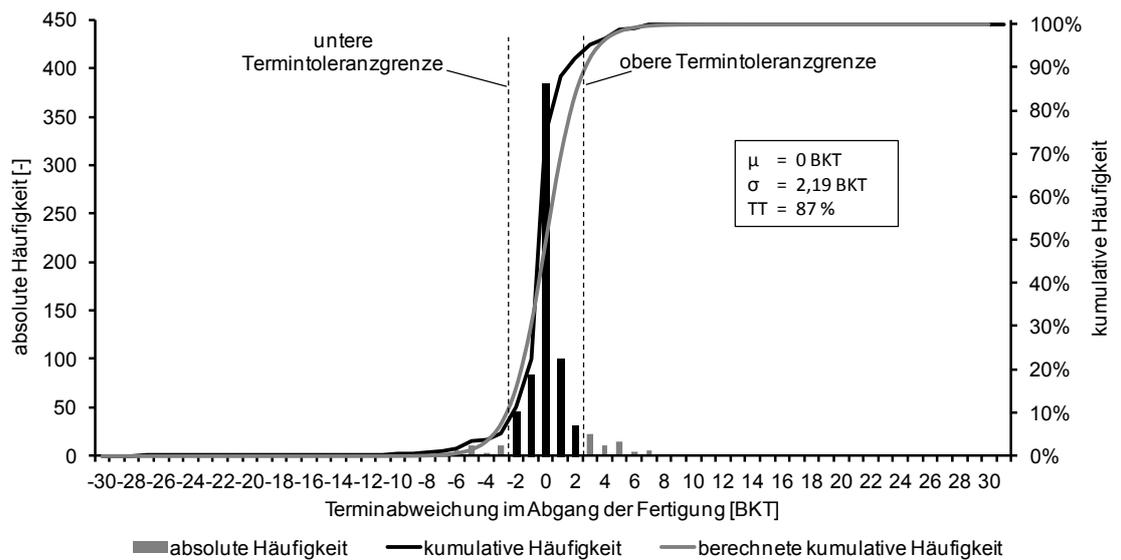


Abbildung 36: Verteilung der Terminabweichung im Abgang von Simulationslauf 23

Die Ergebnisse der Simulationsexperimente lassen darauf schließen, dass die logistische Verteilung zu breitipflig ist, um die hohen Maximalwerte der auftretenden Verteilungen korrekt zu berücksichtigen. Unabhängig von den Einzelauswertungen der vier Simulationsläufe kann die falsche Berechnung der Termintreue zwei Ursachen haben: Entweder sind die Eingangsparameter für die ausgewählte logistische Verteilung, also Mittelwert und Streuung der Terminabweichung, falsch berechnet oder die logistische Verteilungsform weicht zu stark von der tatsächlichen Verteilung der Terminabweichung im Abgang einer Fertigung ab. Die Detailauswertung der vier in diesem Abschnitt dargestellten Simulationsläufe deutet auf letzteres hin. Der nächste Abschnitt erklärt die Abweichungen in der Modellierung und führt Korrekturparameter zu einer verbesserten Berechnung der Termintreue ein.

4.4 Modellsynthese

Die Simulationsexperimente aus Abschnitt 4.3 bestätigen die grundsätzlichen Modellierungsannahmen: Die Termintreue hängt vom Rückstand und der Reihenfolgeabweichung ab. Durch systematische Variation dieser Einflussgrößen ist es möglich, alle Termintreuwerte zwischen null und hundert Prozent Termintreue zu simulieren. Grundsätzlich folgen die Simulationspunkte in allen Experimenten der Form der deduktiv abgeleiteten Kennlinien. Dies bestätigt die Annahmen über das Grundverhalten des Modells. Aus der Interpretation der Simulationsergebnisse ergibt sich aber auch, dass in einer Fertigung bisher unbeachtete Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen der Termintreue bestehen. Die gezielte Untersuchung dieser Wechselwirkungen ist für

ein detailliertes Verständnis der Termintreue notwendig, sie ist aber nicht Teil der vorliegenden Arbeit. Um auch ohne ein Verständnis dieser Wechselwirkungen zu einer anwendbaren Näherungsgleichung für die Termintreue zu gelangen, korrigiert dieser Abschnitt die unter den bisherigen Annahmen aufgestellte Gleichung 4.8 mit dem Ziel, die Termintreue einer Fertigung abschätzen zu können. Dazu prüft dieser Abschnitt zunächst, ob die Berechnung der mittleren Terminabweichung gemäß Gleichung 4.6 korrekt ist. Anschließend überprüft der Abschnitt die Berechnungen der Streuung der Terminabweichung durch Gleichung 4.7 mit Hilfe der Simulationsergebnisse und nimmt eine Korrektur vor. Da auch diese Korrektur die Berechnungsqualität von Gleichung 4.8 zur Bestimmung der Termintreue nicht ausreichend verbessert, führt der Abschnitt schließlich Parameter zur Anpassung der Berechnung ein.

Gleichung 4.6 ist die Berechnungsvorschrift für die mittlere Terminabweichung der Fertigung. Abbildung 37 zeigt die gemessene mittlere Terminabweichung der 216 Simulationläufe aus dem vierten Experiment über den mit Hilfe von Gleichung 4.6 berechneten Werten.

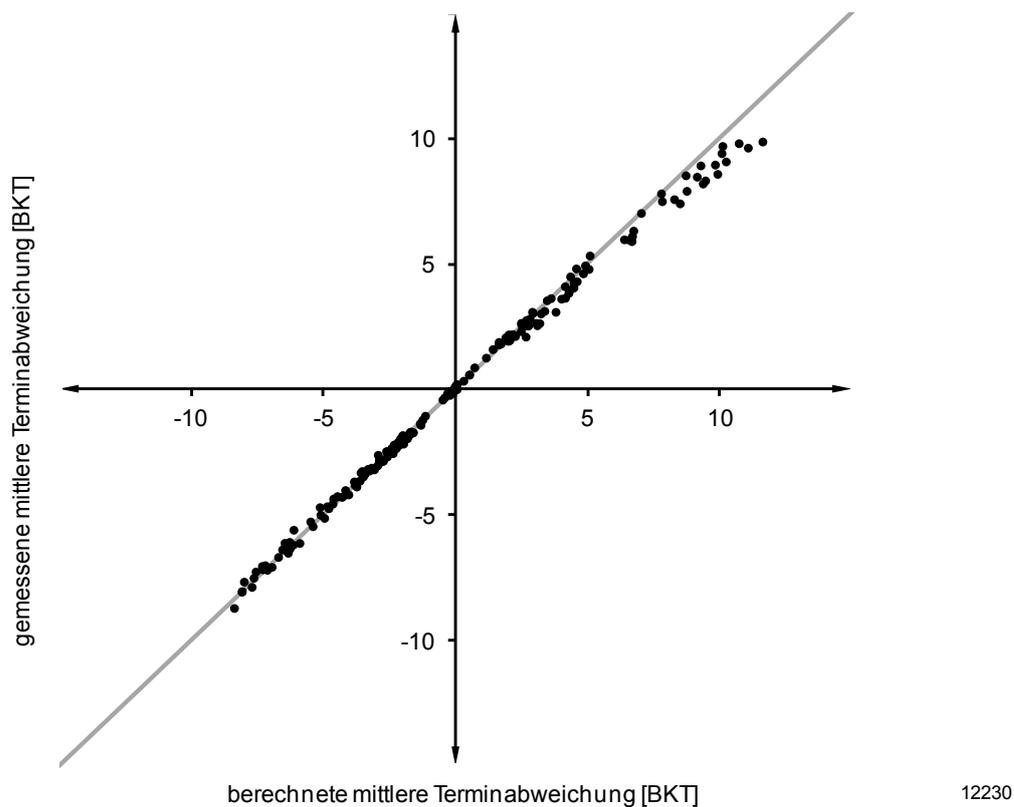


Abbildung 37: Vergleich zwischen berechneter und gemessener mittlerer Terminabweichung im Abgang der Fertigung

Auch in diesem Vergleichsdiagramm ist zur besseren Orientierung eine 45°-Gerade grau eingezeichnet. Die Modellierung ist in der Lage, die mittlere Terminabweichung zu erklären. Bis zu einer mittleren Terminabweichung von ± 10 BKT liefert Gleichung 4.6 präzise Ergebnisse. Nahezu alle 216 Simulationsläufe liegen in diesem Bereich. Bei Punkten, die auf der Gerade liegen, stimmen die Berechnungsergebnisse und die simulierten Vergleichswerte vollständig überein. Eine Anpassung von Gleichung 4.6 ist nicht notwendig.

Abbildung 38 zeigt den Vergleich der gemessenen mit den berechneten Werten der Streuung der Terminabweichung im Abgang der Fertigung. Der Vergleich mit der Simulation zeigt, dass die Ergebnisse von Gleichung 4.7 zur Berechnung der Streuung der Terminabweichung ebenfalls eine hohe Übereinstimmung besitzen. Auffallend ist die Aufteilung des Vergleichs in zwei Gruppen: eine, bei der Gleichung 4.7 systematisch zu niedrige und eine andere, bei der sie systematisch zu hohe Werte berechnet.

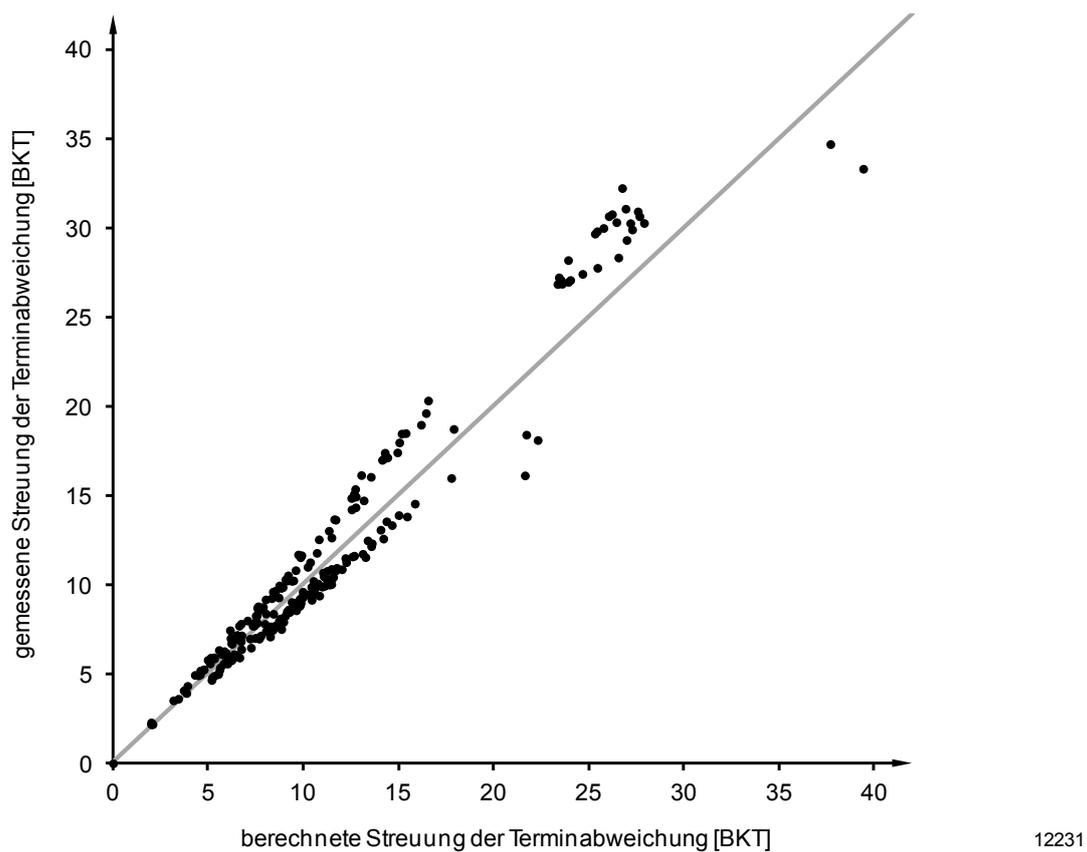


Abbildung 38: Vergleich zwischen berechneter und gemessener Streuung der Terminabweichung im Abgang der Fertigung

Die Auswertung der Daten zeigt, dass fast alle Werte, die oberhalb der 45°-Gerade liegen, eine positive mittlere Terminabweichung besitzen. Die Werte, die unterhalb der 45°-Gerade liegen, haben meist eine negative mittlere Terminabweichung.

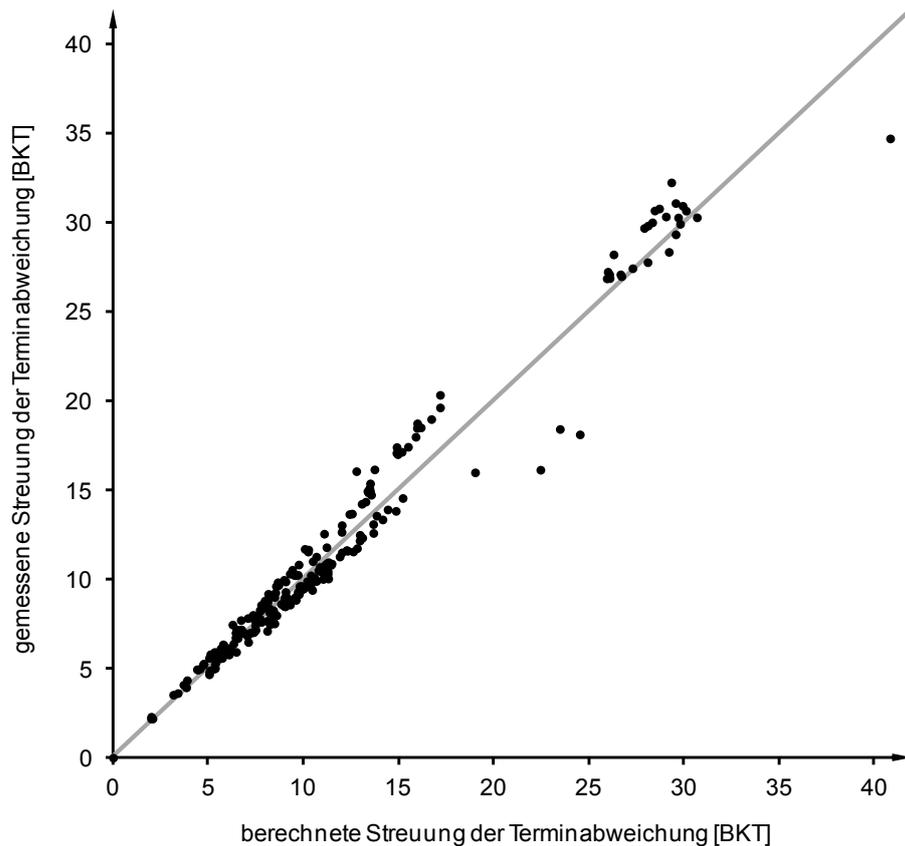
Eine Erklärung hierfür liegt nahe: Eine negative Terminabweichung kann nicht beliebig groß sein. Ihr Maximum ist immer die Dauer von der Auftragsfreigabe bis zum Plan-Endtermin des Auftrags. Dieses natürliche Maximum begrenzt die mittlere Terminabweichung in negativer Richtung und vermindert somit auch die Streuung der Terminabweichung. Bei positiver Terminabweichung ist theoretisch kein Maximum denkbar. Sowohl Mittelwert als auch Streuung der Terminabweichung können beliebig große Werte annehmen. Die Modellierung berücksichtigt diese Wechselwirkung zwischen Mittelwert und Streuung der Terminabweichung bisher nicht.

Eine Fallunterscheidung kann Näherungsgleichung 4.7 verbessern. Die Anpassung der Gleichung muss die Höhe und das Vorzeichen der mittleren Terminabweichung berücksichtigen. Zur Korrektur von Gleichung 4.7 ist es das Ziel, die Streuung von Terminabweichungsverteilungen, die im Mittel negativ sind, abzusenken und die Streuung von Terminabweichungsverteilungen mit positivem Mittelwert zu erhöhen. Je höher die mittlere Terminabweichung ist, desto höher soll die Korrektur ausfallen. Dies gelingt durch Addition eines Vielfachen der mittleren Terminabweichung zur bisherigen Näherungsgleichung. Die Höhe des Vielfachen bestimmt der Parameter γ :

$$TAA_s = \sqrt{\left(\frac{RS_s}{L_{Ist,m}}\right)^2 + \left(\frac{RA_{g,s}}{L_{Plan,m}}\right)^2} + \gamma \cdot TAA_m \quad (4.9)$$

- mit
- TAA_s : Streuung der Terminabweichung im Abgang [BKT]
 - TAA_m : mittlere Terminabweichung im Abgang [BKT] (aus Gleichung 3.13)
 - RS_s : Standardabweichung des Rückstands [Std]
 - $RA_{g,s}$: Standardabweichung der gewichteten Reihenfolgeabweichung [Std]
 - L_m : mittlere Leistung [Std/BKT]
 - γ : Korrekturfaktor Gamma

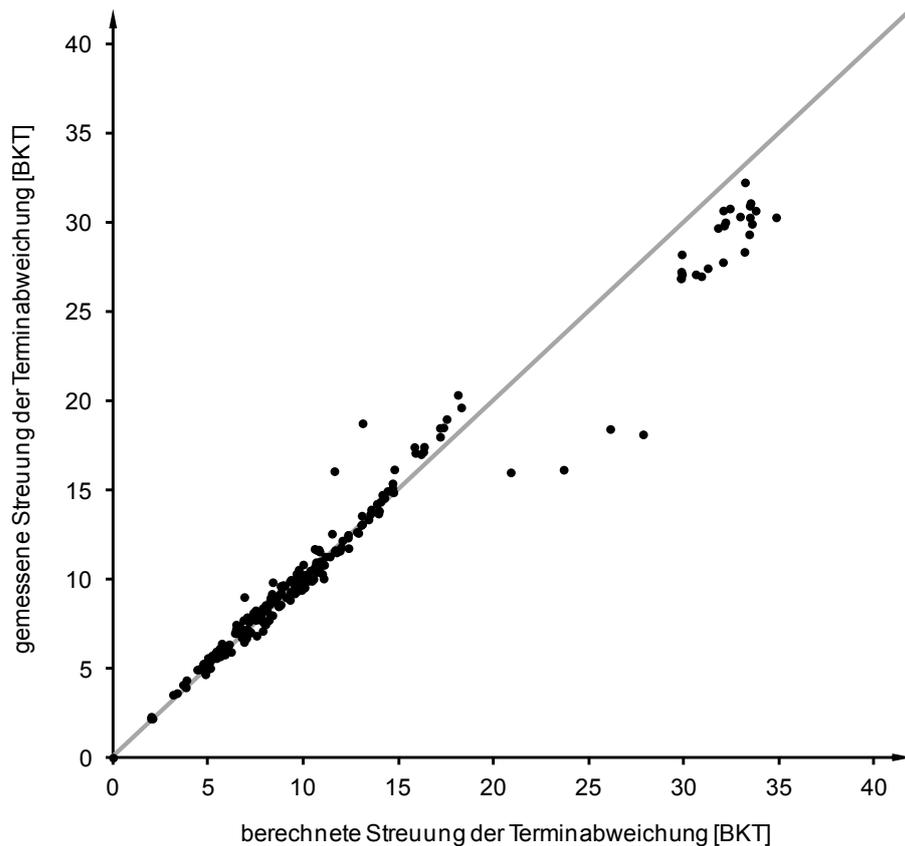
Die höchste Korrelation über alle Simulationsläufe zwischen gemessenen und berechneten Werten erreicht die Gleichung bei $\gamma = 0,08$. Abbildung 39 zeigt, dass auch Werte mit sehr hoher Streuung nun näher an der 45°-Gerade liegen. Für Untersuchungsbereiche bis zu einer Streuung von 15 BKT bietet es sich an, den Korrekturfaktor höher zu wählen.



12232

Abbildung 39: Vergleich zwischen berechneter und gemessener Streuung der Terminabweichung mit Korrekturfaktor $\gamma = 0,08$

Abbildung 40 zeigt, dass mit einem Korrekturfaktor von $\gamma = 0,2$ im Bereich von $TAA_s < 15$ BKT eine außerordentlich hohe Übereinstimmung von analytischem Modell und Simulation eintritt. Bei einer Erhöhung über diesen γ -Wert hinaus kommt es zu einer Überkompensation und die Korrelation beginnt wieder zu sinken. Für sehr hohe Werte der Streuung der Terminabweichung (> 25 BKT) ist diese Überkompensation bereits bei $\gamma = 0,2$ sichtbar.

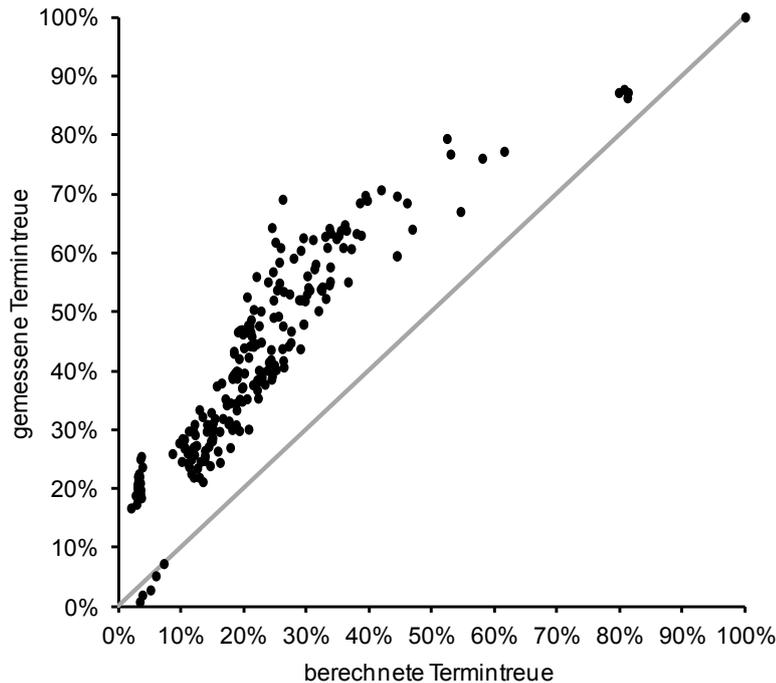


12233

Abbildung 40: Vergleich zwischen berechneter und gemessener Streuung der Terminabweichung mit Korrekturfaktor $\gamma = 0,2$

Da ein zu hoher Korrekturfaktor die Berechnung von Extremwerten ($TAA_s > 25$ BKT) eher verschlechtert als verbessert, kommt im weiteren Verlauf der Parameter $\gamma = 0,08$ zur Anwendung. In dieser Höhe verbessert er das Berechnungsergebnis auf der gesamten Bandbreite der untersuchten Streuung.

Abbildung 41 zeigt, dass diese Korrektur der Berechnung der Streuung der Terminabweichung im Abgang keine deutliche Auswirkung auf die Berechnung der Termintreue hat. Die Näherungsgleichung 4.8 kommt auch nach der Anpassung mit Hilfe von Gleichung 4.9 zu keinem verbesserten Berechnungsergebnis, unabhängig davon, ob der Parameter γ den Wert 0,08 oder 0,2 annimmt.



12234

Abbildung 41: Vergleich der gemessenen mit der berechneten Termintreue nach Korrektur von TAA_s um den Faktor $\gamma = 0,08$

Gleichung 4.6 berechnet den Mittelwert der Terminabweichung korrekt. Gleichung 4.9 ersetzt Gleichung 4.7 zur Berechnung von TAA_s. Die Berechnung der Streuung der Terminabweichung im Abgang der Fertigung ist durch diese Ersetzung ebenfalls hinreichend genau. Die Korrektur hat aber nur einen geringen Einfluss auf die Berechnung der Termintreue. Die logistische Verteilung ist die Grundlage von Gleichung 4.8. Da die Berechnung der Eingangsparameter der Verteilung korrekt ist, ist die Anpassung der Verteilungsform der letzte Ansatzpunkt, um die Qualität der Näherungsgleichung zu verbessern.

Die Detailauswertung der Simulationsläufe in Abschnitt 4.3.5 zeigt, dass die Terminabweichungen der simulierten Betriebspunkte unterschiedliche Verteilungsformen besitzen. Es finden sich darunter sowohl symmetrische als auch links- und rechtsschiefe Verteilungen, die entweder sehr kompakt um den Mittelwert streuen oder weit auslaufende Extremwerte beinhalten. In allen vier untersuchten Punkten ist die Steigung der logistischen kumulativen Verteilungsfunktion im Termintoleranzintervall zu niedrig. Die Steigung einer kumulativen Verteilungsfunktion im Bereich des Modalwerts hängt von der Wölbung (math. Exzess bzw. Kurtosis) der Dichtefunktion ab. Die Identifikation einer Verteilungsform, die dieser Beschreibung gerecht wird, war selbst nach eingehenden

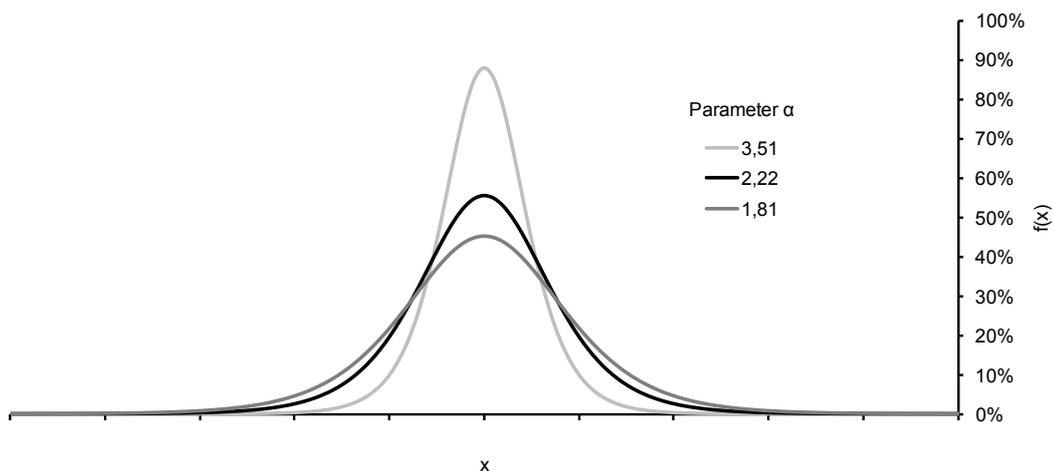
der Recherche nicht möglich. Eine allgemein definierte Verteilungsform mit sehr hoher Kurtosis ist die Laplace-Verteilung. Versuche die Termintreue mit Hilfe der Laplace-Verteilung auszurechnen zeigten keine verbesserte Annäherung gegenüber der logistischen Verteilung. Zur Berechnung von stark rechts- oder linksschiefen Verteilungen kann die log-Normalverteilung herangezogen werden. Sie besitzt ebenfalls eine hohe Kurtosis. Nähere Informationen zu diesen Untersuchungen sind dieser Arbeit als Anhang III beigefügt. Schließlich bleibt die Möglichkeit, die zuvor unterstellte logistische Verteilung so zu modifizieren, dass sie eine möglichst gute Annäherung an alle auftretenden Verteilungsformen liefert.

Im Integral der logistischen Dichtefunktion (Gleichung 4.4) wirkt sich der Term $\frac{\pi}{\sqrt{3}}$ direkt auf die Steigung der Kurve um den Modalwert aus. Die Höhe der mit Gleichung 4.8 berechneten Termintreue hängt direkt von diesem Wert ab. Eine Ersetzung und Erhöhung dieses Terms durch den Parameter α verändert die Form der logistischen Verteilung und ist damit der Ansatzpunkt zur Verbesserung der Näherungsgleichung. Der Ausgangswert liegt bei $\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{3}} = 1,81$. Durch Änderung dieses Parameters kann in Bereichen, in denen die logistische Verteilung bereits eine sehr gute Näherung bildet, eine Verschlechterung der Berechnungsergebnisse eintreten. In Abbildung 41 ist zu den Extremwerten hin (null und 100 Prozent Termintreue) eine Annäherung an die 45°-Gerade sichtbar. Zur Anpassung der Berechnung ist also zu mittelgroßen Termintreuewerten ein Aufschlag hinzuzuaddieren. Je näher der berechnete Wert nahe null oder 100 Prozent liegt, desto geringer sollte die Korrektur ausfallen. Ein zweiter Parameter β korrigiert dies, indem er systematisch mittlere berechnete Termintreuewerte erhöht und sich an den Extremwerten null und 100 Prozent neutral verhält. Eine Sinusfunktion erzeugt die systematische Addition des zweiten Parameters.

Die resultierende Berechnungsvorschrift für die Termintreue besteht aus zwei Gleichungen: Gleichung 4.10 fügt zur bisherigen Berechnungsvorschrift (Gleichung 4.8) den Parameter α hinzu und berechnet die vorläufige Termintreue. Der Parameter α beeinflusst die Wölbung (math. Exzess bzw. Kurtosis) der Verteilungsform. Für $\alpha = 1,81$ findet keine Anpassung statt. Der Parameter sollte der erwarteten Form der Verteilung der Terminabweichung im Abgang der Fertigung entsprechen. Je höher die Verteilung um den Mittelwert konzentriert ist, desto höher sollte α sein.

Abbildung 42 zeigt zur Unterstützung bei der Parameterauswahl drei Verteilungsformen mit ihrem jeweiligen α -Wert an. Dargestellt sind $\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{0,8}} = 3,51$, $\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 2,22$ und

$\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{3}} = 1,81$. Zur Auswahl von α ist nur die Wölbung der Verteilungskurve relevant. Je höher α ist, desto schmalgipfliger ist die Verteilung. Die Höhe des Mittelwerts und der Streuung sind nicht von Bedeutung, daher ist bei der Beschriftung der Achsen in der Abbildung bewusst kein Nullpunkt angegeben und die Beschriftung bezieht sich auch nicht auf Terminabweichungsgrößen, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Mittelwert und Streuung berücksichtigt die Näherungsgleichung an anderer Stelle. Für Fertigungsbereiche mit schmalgipfliger Verteilung sollte α groß sein. Für breitgipflige Verteilungen sollte α möglichst klein sein. Zu beachten ist, dass bei einer Veränderung des Parameters α von der logistischen Verteilung abgewichen wird. Es entsteht je nach Parameterwahl eine neue Verteilungsform, die nicht vollständig mathematisch definiert ist. Bei niedrigen α -Werten nähert sich die Verteilung der Normalverteilung an. Bei hohen α -Werten sind auch unsinnige Ergebnisse, z. B. Termintreuwerte von deutlich über 100% möglich.



12235

Abbildung 42: Beispiele für Verteilungsformen mit verschiedenen α -Werten und einer Standardabweichung von $\sigma = 1$

Die zweite Rechnung (Gleichung 4.11) korrigiert die Höhe der mittleren Termintreuwerte. Die Stärke dieser Korrektur bestimmt der Parameter β . Er drückt aus, wie hoch der maximale Termintreueaufschlag auf einem mit Gleichung 4.10 berechneten Wert ist. Für $\beta = 0$ findet keine Erhöhung mittlerer Termintreuwerte im Modell statt. Bei $\beta = 0,1$ erhalten mittlere berechnete Werte einen Aufschlag von maximal zehn Prozent. Zur Auswahl sind also Parameterwerte zwischen null und eins sinnvoll. Durch diese Addition ist es ebenfalls möglich, ungewünschte Berechnungsergebnisse von über 100

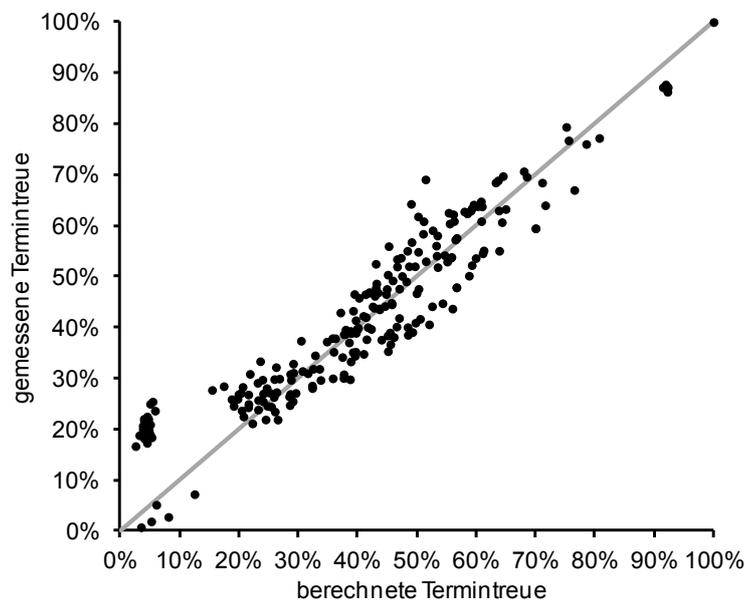
Prozent zu erzeugen. Zum Teil kompensiert der Faktor $1 - TT_\alpha$ diesen Fehler. Er sorgt auch dafür, dass die Korrektur stärker ausfällt, je kleiner der berechnete Termintreuewert ist. Dies hat sich als sinnvolle Ergänzung erwiesen.

Die beiden Gleichungen (4.10 und 4.11) sind das Modell der Termintreue:

$$TT_\alpha = \left(\frac{1}{1+e^{-\alpha \frac{TAA_{OG}-TAA_m}{TAA_s}}} - \frac{1}{1+e^{-\alpha \frac{TAA_{UG}-TAA_m}{TAA_s}}} \right) \quad (4.10)$$

$$TT \approx TT_\alpha + (1 - TT_\alpha) \cdot \sin(TT_\alpha \cdot \pi) \cdot \beta \cdot 100\% \quad (4.11)$$

- mit
- TT : Termintreue [%]
 - TT_α : mit α -Parameter berechnete Termintreue [-]
 - TAA_{UG} : untere Termintoleranzgrenze [BKT]
 - TAA_{OG} : obere Termintoleranzgrenze [BKT]
 - TAA_m : mittlere Terminabweichung (aus Gleichung 3.13) [BKT]
 - TAA_s : Streuung der Terminabweichung (aus Gleichung 3.16) [BKT]
 - α : erster Korrekturparameter
 - β : zweiter Korrekturparameter



12236

Abbildung 43: Vergleich der gemessenen mit der berechneten Termintreue bei parametrisierter Modellberechnung mit $\alpha = 2,5$; $\beta = 0,3$ und $\gamma = 0,08$

Durch Einsetzen der Modellparameter mit ihren Ursprungswerten ($\alpha = 1,81$ $\beta = 0$ und $\gamma = 0$) erhält man eine konservative, aber ungenaue Abschätzung der Termintreue (vgl. Abbildung 32). Abbildung 43 zeigt die Verbesserung der Berechnungen nach der Anpassung. Die gewählten Parameter sind $\alpha = 2,5$; $\beta = 0,3$ und $\gamma = 0,08$. Diese Auswahl unterstellt eine Verteilungsform, die schmalgipfliger ist als die logistische Verteilung, erhöht die berechnete Termintreue um maximal 30 Prozent und berücksichtigt die Korrelation zwischen Streuung und Mittelwert der Terminabweichung. Die in diesem Beispiel gewählten Werte sind sorgfältig ausgesucht, basieren aber nicht auf einer systematischen Optimierung und sind keinesfalls allgemeingültig.

Der Ablauf zur Anwendung des korrigierten analytischen Modells ergibt sich entsprechend: Zunächst ist mit Gleichung 4.6 die mittlere Terminabweichung im Abgang auszurechnen. Sie geht zusammen mit dem Parameter γ in Gleichung 4.9 ein, um die Streuung der Terminabweichung im Abgang zu bestimmen. Die Ergebnisse aus diesen Berechnungen fließen in Gleichung 4.10 ein. Der Parameter α wird entsprechend der erwarteten Verteilungsform der Terminabweichung ausgewählt. Als letzter Berechnungsschritt fließt das Ergebnis aus Gleichung 4.10 in Gleichung 4.11 ein. Der Parameter β legt hier den Aufschlag fest, mit dem mittlere Termintreuwerte gegenüber den Extremwerten überhöht werden.

Mit diesen Korrekturen ist die Modellierung der Termintreue abgeschlossen. Das nächste Kapitel zeigt die Erkenntnisse, die sich aus dem Modell ableiten lassen. Das weiter unten folgende Kapitel 7 demonstriert die Anwendung des vorgestellten Modells an einem Praxisbeispiel.

5 Zusammenfassung der Modellierungserkenntnisse

Auf Basis der Grundlagen aus den Kapiteln 2 und 3 hat Kapitel 4 die Termintreue modelliert. Die grafische Aufbereitung der Zusammenhänge aus der Modellierung der Termintreue zu Termintreuekennlinien macht den Handlungsspielraum der Fertigungssteuerung sichtbar. Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung steuern den Rückstand und die Reihenfolgeabweichung unabhängig voneinander. Die Folgen ihrer Steuerungsentscheidungen für die Termintreue können auf Termintreuekennlinien abgelesen werden. Dieses Kapitel zeigt Beispiele solcher Termintreuekennlinien und diskutiert an ihnen die wesentlichen Erkenntnisse aus der Modellierung der Termintreue.

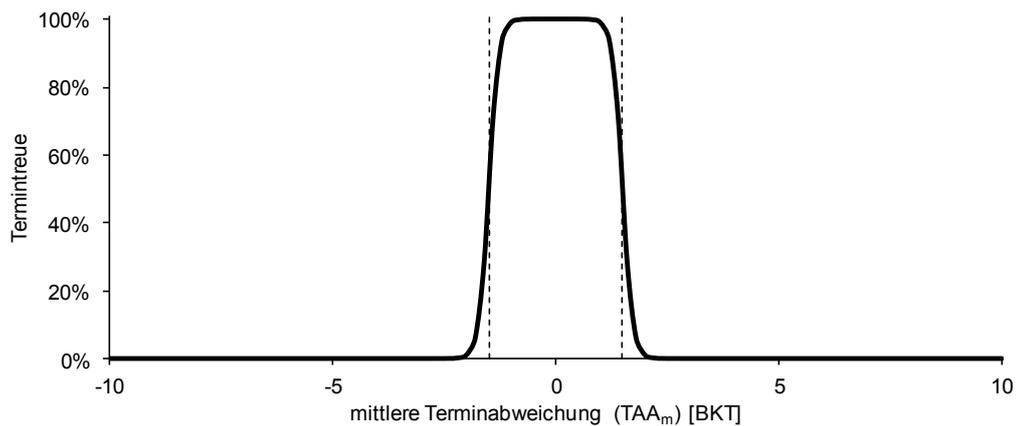
Sämtliche Beispielkennlinien sind mit dem Modell der Termintreue (Gleichungen 4.10 und 4.11) berechnet. Dabei sind die Parameter des Modells mit $\alpha = 1,81$; $\beta = 0$ und $\gamma = 0$ konservativ gewählt, sie entsprechen damit der Grundform der logistischen Verteilung. Zusätzlich sind zur Berechnung weitere Werte notwendig: Die Ist- und die Planleistung der Fertigung betragen konstant 500 Std/BKT und die Termintreuetoleranz liegt bei ± 1 BKT.

Abschnitt 5.1 zeigt die Termintreue in Abhängigkeit von Streuung und Mittelwert der Terminabweichung und hebt Besonderheiten in den Kennlinienverläufen hervor. Abschnitt 5.2 zeigt die Termintreuekennlinie über dem mittleren Rückstand und der Rückstandsstreuung. Abschnitt 5.3 zeigt die Termintreuekennlinie über der Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung und schließt das Kapitel mit einer Darstellung zum Verhalten der Termintreue in Abhängigkeit einer kombinierten Variation sämtlicher Einflussgrößen.

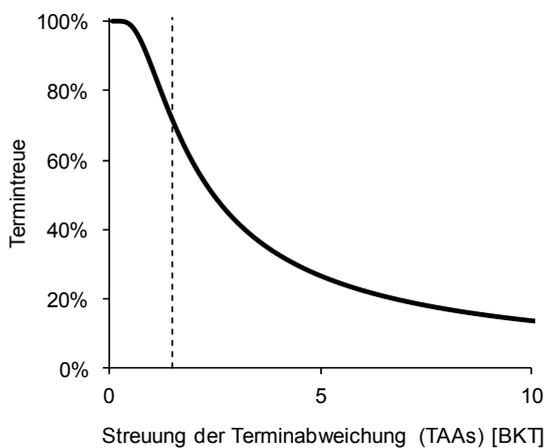
5.1 Die Bedeutung von Streuung und Mittelwert der Terminabweichung für die Termintreue

Abbildung 44 a zeigt die Termintreue in Abhängigkeit von der mittleren Terminabweichung im Abgang einer Fertigung. Die Kennlinie verläuft innerhalb des Termintoleranzintervalls symmetrisch horizontal und fällt dann nach beiden Seiten des Intervalls steil ab. Bei einer geringen Streuung der Terminabweichung reagiert die Termintreue einer Fertigung sehr deutlich auf Verschiebungen im Mittelwert der Terminabweichung. Mit Überschreiten der Termintoleranzgrenzen senkt der Mittelwert der Terminabweichung die Termintreue auf null Prozent ab.

Die Streuung der Terminabweichung bestimmt ebenso die Termintreue einer Fertigung. Der Verlauf ihrer Kennlinie ist in Abbildung 44 b dargestellt. Die Kennlinie über der Streuung der Terminabweichung nimmt nach einem horizontalen Beginn einen steil fallenden Verlauf an. Die Steigung nimmt aber mit zunehmender Streuung wieder ab. Je unkontrollierter der Abgang der Fertigung ist, also je mehr Streuung die Verteilung der Terminabweichung im Abgang besitzt, desto niedriger ist die Termintreue, die bei einer mittleren Terminabweichung von 0 BKT noch erreicht wird.



a) Termintreue über mittlerer Terminabweichung für $TAA_s = 0,2$ BKT



b) Termintreue über Streuung der Terminabweichung für $TAA_m = 0$ BKT

----- Termintoleranzgrenzen

12237

Abbildung 44: Termintreue in Abhängigkeit von Mittelwert und Streuung der Terminabweichung im Abgang der Fertigung

Die Sensibilität der Termintreue in Abhängigkeit des Mittelwerts der Terminabweichung unterscheidet sich von der Sensibilität in Abhängigkeit der Streuung der Terminabweichung. Die Steigung der Kurve in Abbildung 44 a ist nahe der Termintoleranzgrenze deutlich steiler als die in Abbildung 44 b. Für Werte von TAA_s , die jenseits der Termin-

toleranz liegen ist die Sensibilität der Termintreue sogar noch geringer. Steigt beispielsweise die Streuung der Terminabweichung auf zwei Betriebskalendertage, sinkt die Termintreue auf ca. 60 Prozent. Steigt hingegen die mittlere Terminabweichung auf zwei Betriebskalendertage, sinkt die Termintreue auf ca. 1 Prozent ab. Für die Verbesserung der Termintreue scheint die Korrektur hoher Beträge der mittleren Terminabweichung daher effizienter zu sein als die Vermeidung einer hohen Streuung der Terminabweichung. Eine Termintreue von 100 Prozent ist aber nur bei kleinen Beträgen der Streuung und des Mittelwerts der Terminabweichung möglich. In diesem Beispiel ist eine Termintreue von 100 Prozent nur bis zu einer Streuung der Terminabweichung im Abgang der Fertigung von 0,5 BKT erreichbar.

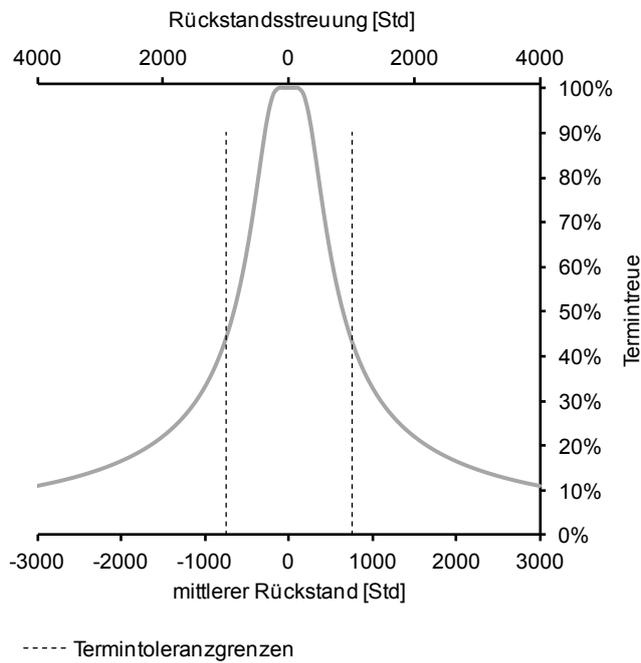
Mittelwert und Streuung der Terminabweichung im Abgang zeigen nur die Auswirkung der Einflussgrößen der Termintreue. Für die betriebliche Praxis sind daher vor allem solche Termintreuekennlinien von Bedeutung, die die Termintreue in Abhängigkeit der tatsächlich steuerbaren Einflussgrößen darstellen. Der nächste Abschnitt zeigt zunächst, wie sich die Termintreue in Abhängigkeit des Rückstands verhält. Abschnitt 5.3 zeigt daraufhin, wie sich die Termintreue in Abhängigkeit von Reihenfolgeabweichungen verhält. Zusätzlich zeigt der Abschnitt das Verhalten der Termintreue, wenn es zu einer Veränderung sämtlicher Einflussgrößen kommt.

5.2 Termintreue in Abhängigkeit des Rückstands

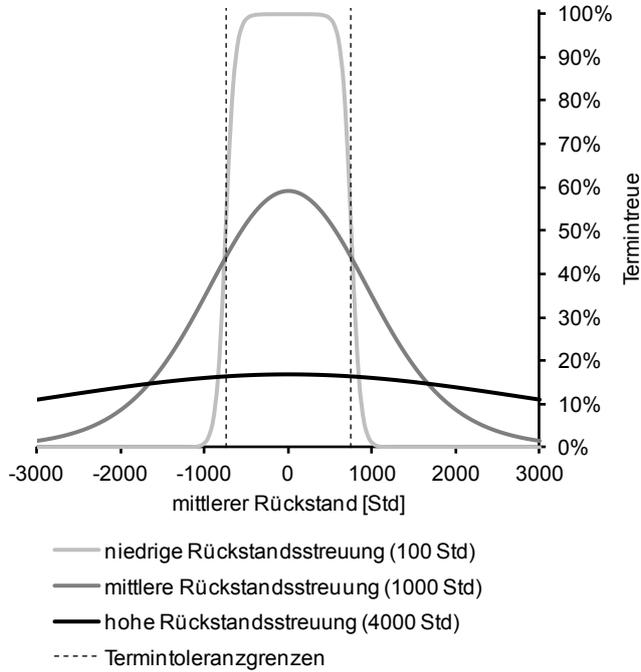
Die Ergebnisse aus den Simulationsversuchen in dieser Arbeit deuten darauf hin, dass eine Korrelation zwischen mittlerem Rückstand und Rückstandsstreuung besteht. Abbildung 45 a zeigt, wie sich die Termintreue verhält, wenn eine Fertigung durch eine systematische rückstandsgeregelte Kapazitätssteuerung sowohl den Mittelwert als auch die Streuung des Rückstands beeinflusst. Der Quotient aus den Termintoleranzgrenzen und der mittleren Leistung ergibt das Termintoleranzintervall in Stunden. Es ist ebenfalls abgebildet und an der unteren x-Achse abzulesen.

Bei hohem mittlerem Rückstand und hoher Rückstandsstreuung ist die Steigung der Termintreuekennlinie zunächst sehr gering. Liegen beide Werte jedoch innerhalb des Termintoleranzintervalls, kann durch Vermeidung von mittlerem Rückstand und Rückstandsstreuung mit einem starken Anstieg der Termintreue gerechnet werden. Zu beachten ist der Kurvenbereich um den Nullpunkt der x-Achsen, in dem die Kennlinie horizontal verläuft. Eine Rückstandsregelung darf also eine gewisse Unschärfe besitzen, ohne eine Termintreue von 100 Prozent zu gefährden. In diesem Beispiel wäre ein mitt-

lerer Rückstand von ± 120 Stunden und eine Rückstandsstreuung von 160 Stunden gerade noch ausreichend, um eine Termintreue von 100 Prozent zu erzielen.



a) Termintreue in Abhängigkeit von Mittelwert und variabler Streuung des Rückstands



b) Termintreue in Abhängigkeit vom mittleren Rückstand bei unterschiedlicher Rückstandsstreuung

12238

Abbildung 45: Termintreuekennlinien über dem Rückstand einer Fertigung

Abbildung 45 b zeigt das Verhalten der Termintreue über dem Rückstand, wenn Mittelwert und Streuung des Rückstands nicht korrelieren. Dargestellt sind drei Kennlinienverläufe über dem mittleren Rückstand, die sich im Wert der Rückstandsstreuung unterscheiden.

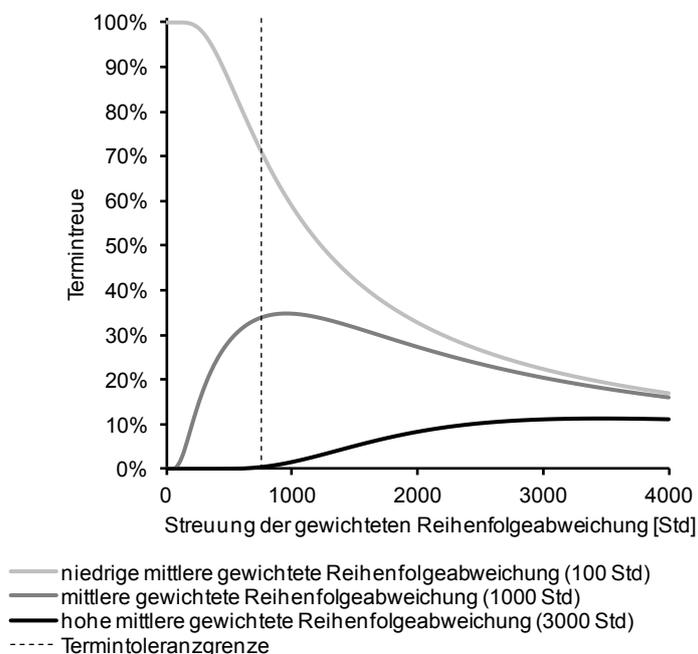
Die hellgraue Kennlinie zeigt das Verhalten der Termintreue einer Fertigung mit einer rückstandsgeregelten Kapazitätssteuerung, die eine sehr niedrige Rückstandsstreuung von 100 Stunden verursacht. Sie erreicht eine maximale Termintreue von 100 Prozent. Eine niedrige Streuung erzielt eine Kapazitätssteuerung dann, wenn die Kapazitäten sehr gut an den Rückstand angepasst sind. Dazu sollte sie Rückstände möglichst schnell ausgleichen, am besten zum Ende jeder Schicht oder jedes Betriebskalendertags. Auf diese Weise sind sowohl Streuung als auch Mittelwert des Rückstands vermeidbar bzw. fallen bei unvorhergesehenen Störungen nur gering aus. Bei niedriger Rückstandsstreuung existiert ein Toleranzbereich für den mittleren Rückstand. In diesem Beispiel sinkt die Termintreue erst ab einem mittleren Rückstand von ca. ± 480 Stunden unter 100 Prozent.

Die dunkelgraue Kennlinie zeigt den Verlauf der Termintreue über dem mittleren Rückstand bei einer Rückstandsstreuung von 1000 Stunden. Mit einer Kapazitätssteuerung, die eine Streuung des Rückstands in dieser Höhe verursacht, ist nur eine Termintreue von unter 60 Prozent erreichbar. Dieser Fall tritt ein, wenn Rückstände erst mit großer Verzögerung ausgeregelt und möglicherweise sogar überkompensiert werden. Kommt es mit dieser Kapazitätssteuerung zu einer Verschiebung des mittleren Rückstands weg vom Nullpunkt, sinkt die Termintreue sofort ab.

Die schwarze Kennlinie zeigt eine Situation mit einer Rückstandsstreuung von 4000 Stunden, also der achtfachen Tagesleistung. Dieser Zustand spricht für das Fehlen einer systematischen Kapazitätssteuerung, die den Rückstand regelt. In so einer Situation spielt der Mittelwert des Rückstands nahezu keine Rolle mehr. Die Termintreue liegt unabhängig von seinem Wert zwischen zehn und fünfzehn Prozent. Hervorzuheben ist, dass bei sehr hohen Beträgen des mittleren Rückstands die schwarze Kennlinie oberhalb der dunkelgrauen verläuft. Dies bedeutet, dass sich bei der Einführung einer Rückstandsregelung auf hohem mittlerem Rückstandsniveau die Termintreue zunächst verschlechtert, bis sich der Betrag des mittleren Rückstands verringert.

5.3 Termintreue in Abhängigkeit der Reihenfolgeabweichung

Eine Veränderung der mittleren gewichteten Reihenfolgeabweichung wirkt sich auf die Termintreue so aus, wie es in Abbildung 45 für den Rückstand dargestellt ist. Auf eine erneute Darstellung mit veränderter Achsbeschriftung wird daher verzichtet. Eine Verschiebung der mittleren gewichteten Reihenfolgeabweichung tritt aber nur bei einer Reihenfolgebildung mit Korrelation zur Auftragszeit der Aufträge auf (KOZ- oder LOZ-Priorisierung). Auch ohne auftragszeitbedingte Präferenzen bei der Auftragsauswahl kann es zu Reihenfolgeabweichungen kommen. Dies berücksichtigt die Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung. Abbildung 46 zeigt die Termintreue in Abhängigkeit der Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung für unterschiedliche Niveaus des Mittelwerts der gewichteten Reihenfolgeabweichung. Dabei sind nur die Beträge der mittleren gewichteten Reihenfolgeabweichung relevant, sie können sowohl positiv als auch negativ sein. Ein hoher Mittelwert (schwarze Kennlinie) zeigt eine besonders starke Korrelation zwischen Auftragszeit und Priorität des Auftrags bei der Auswahl zur Bearbeitung an. Ein kleiner Mittelwert (hellgraue Kennlinie) zeigt eine Fertigung, in der die Auftragszeit keine Rolle für die Auswahl der Aufträge an den Arbeitssystemen spielt.



12239

Abbildung 46: Termintreue in Abhängigkeit der Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung

Bei der Betrachtung der dunkelgrauen und schwarzen Kennlinien fällt auf, dass die Termintreue einer Fertigung mit Hang zur Bevorzugung besonders kleiner oder besonders großer Aufträge davon profitiert, wenn eine gewisse Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung auftritt. Da das Vorziehen eines Auftrags immer eine positive und eine negative gewichtete Reihenfolgeabweichung auslöst, entsteht bei Abweichungen von der geplanten Auftragsreihenfolge immer eine Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung. Je größer die Auftragszeiten sind, desto höher fällt die Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung bei gegebener ungewichteter Reihenfolgeabweichung aus. Diese Streuung kompensiert einen Teil der mittleren Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung und steigert so die Termintreue. Der Verlauf der dunkelgrauen Kennlinie zeigt, dass eine weitere Steigerung der Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung die Termintreue ab einem gewissen Punkt aber wieder sinken lässt.

Der Verlauf der hellgrauen Kennlinie ($RA_{g,m} = 100$ Stunden) spiegelt das Verhalten der gesamten Streuung der Terminabweichung (Abbildung 44 b) wider. In einer Fertigung ohne mittlere Terminabweichung verringern Reihenfolgeabweichungen die Termintreue. Die Kennlinie konvergiert gegen ein unteres Termintreueniveau, ab dem eine zusätzliche Vertauschung von Aufträgen nicht mehr zu einer zusätzlichen Verringerung der Termintreue führt. Festzuhalten bleibt, dass eine Termintreue von 100 Prozent nur bei sehr geringen Reihenfolgeabweichungen möglich ist. Ohne Rückstand ist bei einer Abarbeitung der Aufträge gemäß einer KOZ- oder LOZ-Regel keine Termintreue von 100 Prozent möglich.

Schließlich bleibt zu erläutern, wie die Termintreue sich in Abhängigkeit aller Einflussgrößen verhält, wenn die Fertigungssteuerung sowohl der Kapazitätssteuerung als auch der Reihenfolgebildung nachkommt. Durch Addition der Streuung aus Rückstand und aus Reihenfolgeabweichung und durch Addition des mittleren Rückstands und der mittleren gewichteten Reihenfolgeabweichung ist es möglich, die Termintreue in Abhängigkeit aller vier Variablen des Modells der Termintreue darzustellen. Abbildung 47 zeigt das Ergebnis. Das eingezeichnete Termintoleranzintervall bezieht sich auf die untere x-Achse, auf der die Mittelwerte der Einflussgrößen abgetragen sind.

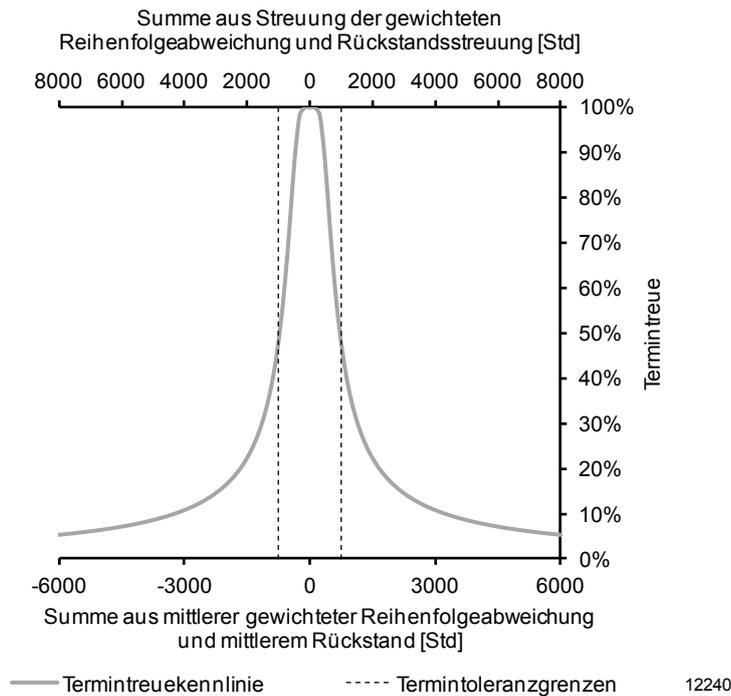


Abbildung 47: Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen

Der Verlauf der Kennlinie zeigt, dass bei einer gleichzeitigen Verringerung der Streuungen und der Beträge der Einflussgrößen ein exponentieller Verlauf zum Nullpunkt sichtbar ist. Fehler in der Fertigungssteuerung führen somit zu einem raschen Verlust der Termintreue. Ein Termintreuewert von unter fünf Prozent ist aber auch bei einer falsch gesteuerten Fertigung sehr unwahrscheinlich. Diese Kennlinie ermöglicht es, jede Fertigung logistisch zu positionieren und ihr Termintreuepotenzial aufzuzeigen. Die Steigung der Kennlinie gibt für jeden Betriebspunkt an, wie effizient Maßnahmen in der Kapazitätssteuerung oder in der Reihenfolgebildung an diesem Punkt auf die Termintreue wirken.

Die Durchführung des Simulationsexperiments zur Reihenfolgeabweichung hat Schwierigkeiten bei der direkten Beeinflussung der gewichteten Reihenfolgeabweichung gezeigt. Den Arbeitssystemen ist es lediglich möglich, darüber zu entscheiden, welcher Auftrag der nächste ist. Ist dieser Auftrag der dringendste verfügbare Auftrag, ist die Reihenfolgedisziplin gewahrt. Die Reihenfolgedisziplin wirkt sich zum Teil auch auf die Reihenfolgeabweichung aus. Sie ist aber nicht die einzige Einflussgröße. Unabhängig von der Modellierung der Termintreue beleuchtet das nächste Kapitel diese komplexen Zusammenhänge und stellt die Verbindung zwischen den logistischen Zielgrößen Bestand und Termintreue her.

6 Einflussgrößen der Reihenfolgeabweichung

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen darzustellen. Die Reihenfolgeabweichung ist durch die Fertigungssteuerung aber kaum direkt beeinflussbar. Daher hat dieses Kapitel das Ziel, den Zusammenhang zwischen den tatsächlich von der Fertigungssteuerung beeinflussbaren Größen und der Termintreue herzustellen. Das Kapitel ist nicht Teil der Modellierung der Termintreue, es stellt aber eine sinnvolle Erweiterung der Erkenntnisse dar und verbindet die logistischen Zielgrößen Termintreue und Bestand miteinander. Dadurch wird die Verbindung zur Kennlinientheorie sichtbar.

Abschnitt 6.1 zeigt den Einfluss der Reihenfolgedisziplin auf die Termintreue. Hierbei treten Unterschiede in Abhängigkeit des Bestands hervor. Abschnitt 6.2 untersucht mittels Simulation den Zusammenhang zwischen Bestand, Reihenfolgedisziplin und Reihenfolge-treue. Abschnitt 6.3 leitet aus den Ergebnissen des Simulationsexperiments die Folgen für die Auftragsfreigabe zur termintreuegerechten Positionierung einer Fertigung über dem mittleren Bestand ab. Abschnitt 6.4 fasst die wesentlichen Ergebnisse des Kapitels mit der Termintreuekennlinie über dem mittleren Bestand zusammen.

6.1 Einfluss der Reihenfolgedisziplin auf die Termintreue

Im dritten Experiment in Kapitel 4 (Abschnitt 4.3.4) war die Reihenfolgedisziplin Variationsparameter. Aus den Ergebnissen dieses Versuchs lässt sich erkennen, dass die Termintreue mit sinkender Reihenfolgedisziplin abfällt. Abbildung 48 fasst die Ergebnisse des Versuchs für die Fertigung und für ein einzelnes Arbeitssystem zusammen. Zur Vereinfachung der Darstellung ist die x-Achse invertiert.

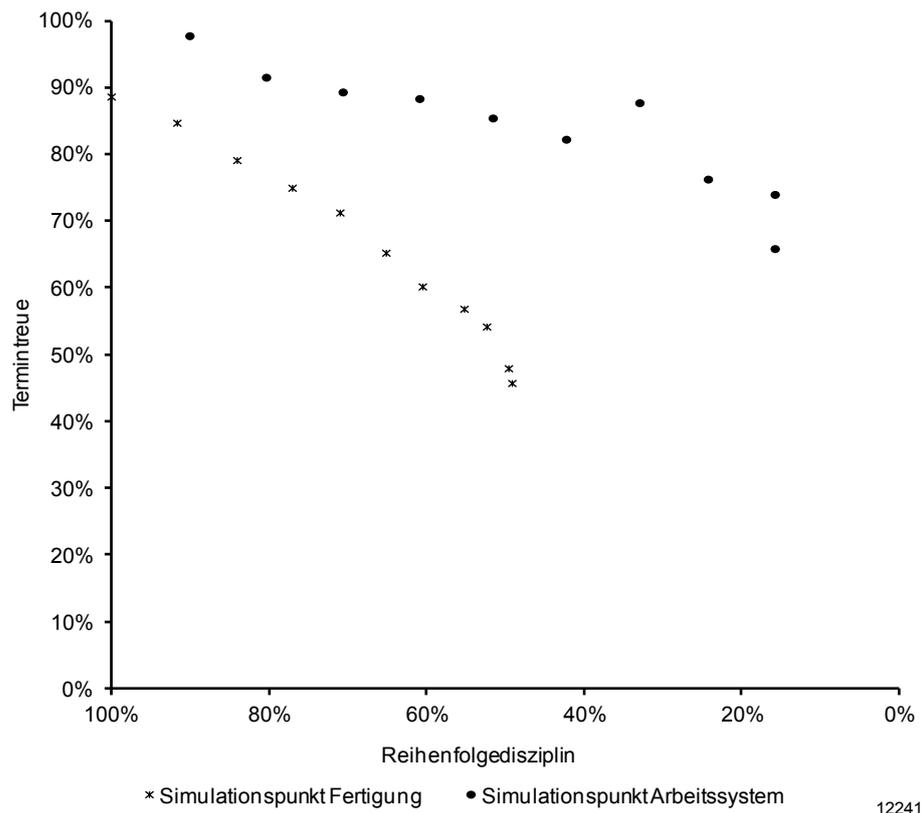


Abbildung 48: Simulation der Termintreue in Abhängigkeit der Reihenfolgedisziplin

Die mittlere Reihenfolgeabweichung kann positiv oder negativ sein. Die Streuung der Reihenfolgeabweichung korreliert mit der Höhe der Reihenfolgedisziplin einer Fertigung (vgl. Tabelle 7). Der Einfluss der Reihenfolgedisziplin auf die Termintreue in der gesamten Fertigung ist stärker als an einem einzelnen Arbeitssystem. Ein Grund könnte der höhere Bestand der Fertigung sein, der es ermöglicht, stärker von der geplanten Reihenfolge abzuweichen. Auf diesen Zusammenhang haben bereits Nyhuis und Yu hingewiesen [Nyhuis-99, S. 87; Yu-01, S. 54 ff.]. Ausgehend von dieser Beobachtung untersucht der nächste Abschnitt den Zusammenhang zwischen Bestand Reihenfolgedisziplin und Reihenfolgeabweichung.

6.2 Einfluss des Bestands und der Reihenfolgedisziplin auf die Reihenfolgeabweichung

In Kapitel 4 wurde bereits ein Experiment zur Untersuchung der Wirkung der Reihenfolgeabweichung auf die Termintreue durchgeführt. Mit der Simulationskonfiguration dieses Experiments in Abschnitt 4.3.4 ist es ebenfalls möglich, den Bestand zu variieren. Das Ergebnis ist ein Nachweis über den Zusammenhang zwischen Bestand, Reihenfolgedisziplin und Reihenfolgeabweichung, dargestellt in Abbildung 49. Das Dia-

gramm zeigt die Reihenfolgetreue für verschiedene Bestandsniveaus über der Reihenfolgedisziplin:

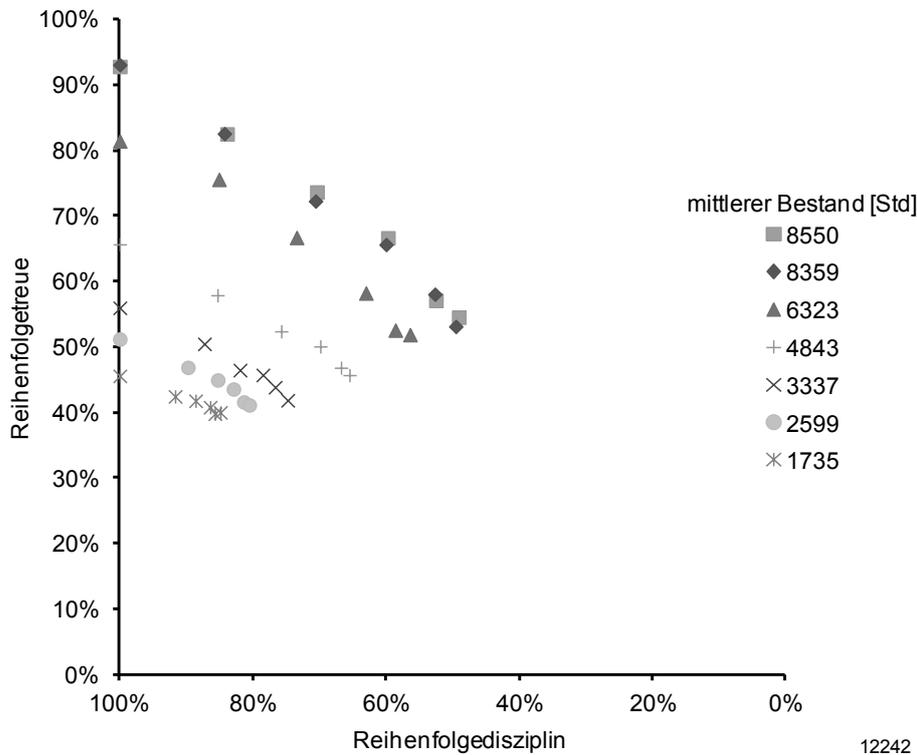


Abbildung 49: Simulation der Reihenfolgetreue in Abhängigkeit der Reihenfolgedisziplin bei unterschiedlichen Bestandsniveaus in der Fertigung ($L_m=188$ Std/BKT)

Da sich die Reihenfolgedisziplin sowohl auf den Betrag des Mittelwerts als auch auf die Streuung der Reihenfolgeabweichung in einer Fertigung auswirkt (vgl. Tabelle 7), ist hier die Reihenfolgetreue dargestellt. Die Reihenfolgetreue fasst zusammen, ob beide Größen eine termintreue Produktion zulassen. Zusätzlich blendet sie die Störeinflüsse des Rückstands aus. Das Diagramm liefert drei Erkenntnisse:

1. Je geringer die Reihenfolgedisziplin in der Fertigung ist, desto weniger Aufträge sind reihenfolgetreu. Dies ist für alle Bestandsniveaus sichtbar.
2. Mit sinkendem Bestand sinkt die Höhe der Reihenfolgetreue bei gleichbleibender Reihenfolgedisziplin.
3. Je höher der Bestand am Arbeitssystem ist, desto niedriger ist die minimal erreichbare Reihenfolgedisziplin. Bei niedrigen Beständen ist die Reihenfolgedisziplin zwangsläufig hoch, da die Bearbeitung des dringendsten verfügbaren Auftrags häufig alternativlos ist.

Es ergibt sich folgendes Dilemma: Bei niedrigem Bestand ist die Reihenfolgedisziplin zwangsläufig hoch, die Reihenfolgetreue ist aber durchschnittlich niedriger. Die Reihenfolgetreue kann aber bei niedrigem Bestand und hoher Reihenfolgedisziplin höher sein als bei hohem Bestand und niedriger Reihenfolgedisziplin. Welches Bestandsniveau ist anzustreben?

Um das Systemverhalten tiefer zu ergründen, sind weitere Messpunkte notwendig. In der Versuchsanordnung, aus der die Simulationspunkte in Abbildung 49 stammen, ist der Bestand nach oben begrenzt. Die Auftragsfreigabe erfolgt normalerweise zum Plan-Starttermin. Das mittlere Bestandsniveau der Auftragsfreigabe nach Plan-Starttermin liegt bei ca. 8500 Std. Zur Reduzierung des Bestands verzögert die Simulation die Freigabe weiterer Aufträge. Dadurch sinkt der mittlere Bestand auf Kosten einer Terminabweichung im Zugang der Fertigung. Eine Aussage über das Systemverhalten bei Beständen über 8500 Stunden lässt dieser Versuchsaufbau aber nicht zu. Zur genaueren Untersuchung des Verhaltens der Reihenfolgetreue in Abhängigkeit des Bestands und der Reihenfolgedisziplin sind daher weitere Simulationsläufe, auch bei höherem mittlerem Bestand notwendig.

Das nachfolgende Experiment untersucht die Effekte des mittleren Bestands auch für sehr hohe Bestände. Es zeigt den Zusammenhang zwischen Bestand, Reihenfolgedisziplin und Reihenfolgetreue. Variationsparameter sind der Bestand und die Reihenfolgedisziplin.

Durchführung

Der Versuchsplan umfasst 60 Simulationsläufe. Die Ausprägungen der Variationsparameter zeigt Tabelle 9.

Tabelle 9: Faktorstufen für die Simulationsparameter im Versuchsplan des Experiments

1	2
Vorgabewert Reihenfolge- disziplin [%]	Anzahl Conwip- Karten [-]
100	50
80	75
60	100
40	150
20	200
0	300
	400
	600
	1000
	Freigabe nach Plan-Starttermin

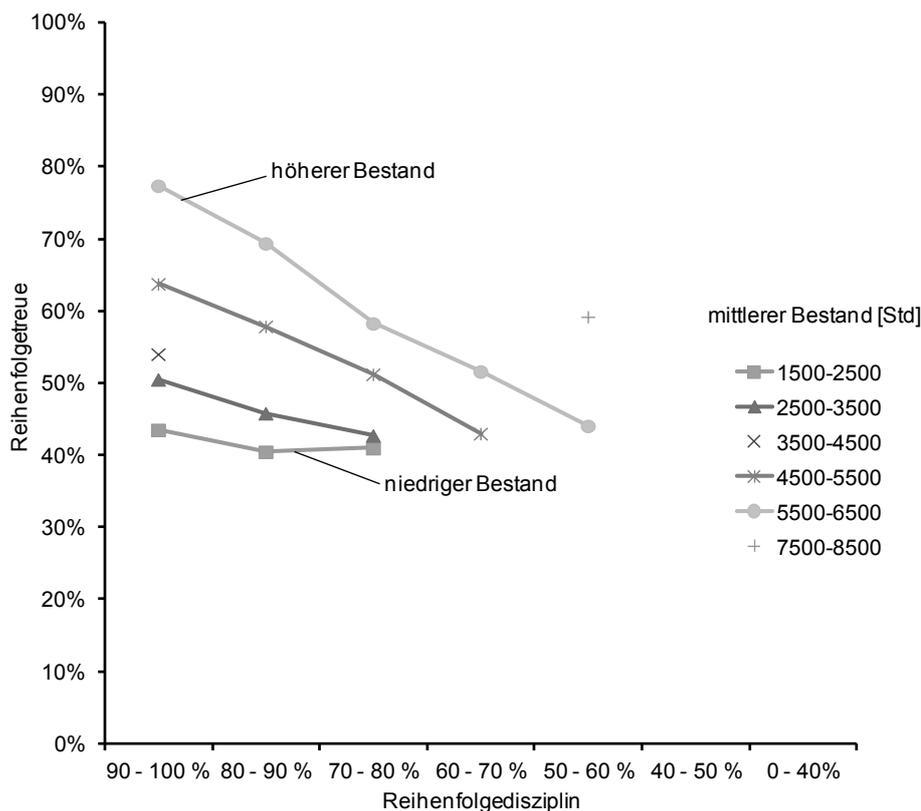
Anzahl möglicher Kombinationen: 60

Hopp und Spearman haben das Conwip-Verfahren entwickelt [Hopp & Spearman-08, S. 363 ff.]. Es hält den Bestand der Fertigung mit Hilfe der Auftragsfreigabe konstant. Um den Bestand zu beeinflussen, gibt die Simulation Aufträge mit Hilfe einer Conwip-Steuerung, gemäß dem von Lödding [Lödding-08, S. 327 ff.] beschriebenen Algorithmus, frei. Die Anzahl der Conwip-Karten bestimmt die Höhe des Bestands. Die Zahl der Aufträge ist durch den Kunden vorgegeben und nicht beeinflussbar. Beim Einstellen eines Zielbestands entscheidet die Fertigungssteuerung über die Anzahl der freizugebenden Aufträge. Zum Einstellen eines hohen Zielbestands ist es notwendig, Aufträge freizugeben, deren Plan-Starttermin in der Zukunft liegt. Dadurch erhalten die Aufträge eine negative Terminabweichung im Zugang zur Fertigung. Bei niedrigen Zielbeständen ist es umgekehrt: Aufträge werden zurückgehalten, obwohl ihr Plan-Starttermin bereits erreicht ist. Die Auftragsfreigabe entscheidet somit über die Terminabweichung der Aufträge im Zugang zur Fertigung. Die Versuchsdurchführung sieht zehn Faktorstufen für die Auftragsfreigabe vor. Neun davon sind unterschiedliche Bestandsstufen der Conwip-Steuerung und eine Stufe entspricht einer Auftragsfreigabe nach Plan-Starttermin der Aufträge, um Terminabweichungen im Zugang auszuschließen. Der Vorgabewert der Reihenfolgedisziplin variiert zwischen 100 und null Prozent. Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigen die Bestandsabhängigkeit der Wirkung der Reihenfolgedisziplin auf die Reihenfolgetreue.

Auswertung

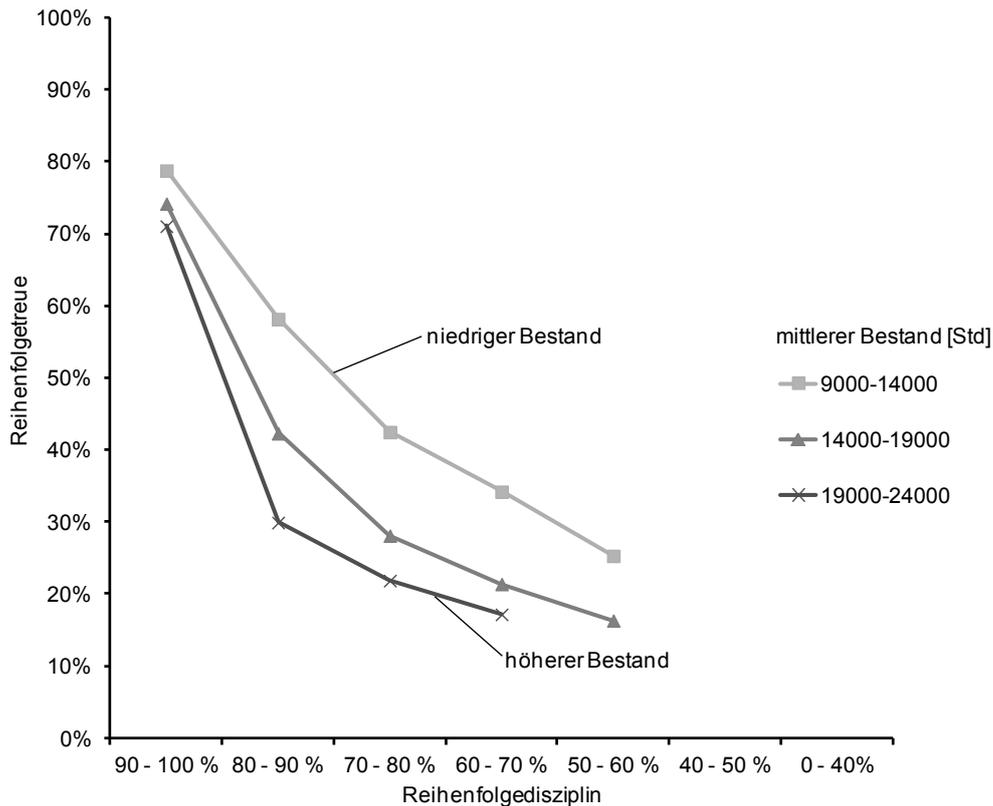
Abbildung 50 zeigt die Ergebnisse der Simulation für Bestände, die niedriger sind als

bei einer Freigabe nach Plan-Starttermin, also niedriger als ca. 8500 Stunden. Auch in dieser Darstellung ist statt der Termintreue die Reihenfolgetreue aufgetragen, da sie die möglichen Auswirkungen der Terminabweichung im Zugang ausblendet. Ohne Rückstand entspricht die Reihenfolgetreue der Termintreue. Bis zum Bestand von 8500 Stunden ist folgendes Verhalten zu beobachten: Wie in Abschnitt 6.1 gezeigt, führen niedrige Bestände bei gleichbleibender Reihenfolgedisziplin zu einer geringeren Reihenfolgetreue. Eine hohe Reihenfolgedisziplin führt bei niedrigem Bestand zu keiner deutlichen Verbesserung der Reihenfolgetreue. Grund hierfür ist schlichtweg die Abwesenheit der dringenden Aufträge, die die Auftragsfreigabe zur Bestandsbegrenzung zurückhält. Die höchste Reihenfolgetreue erzielt die Fertigung auf einem Bestandsniveau, das einer Freigabe nach Plan-Starttermin entspricht. Steigt der Bestand über dieses Niveau, beginnt die Reihenfolgetreue wieder zu sinken. Diese Werte sind in Abbildung 51 eingetragen. Hier liegen die mittleren Bestände der Simulationsläufe oberhalb von 8500 Stunden, also über dem mittleren Bestand der Freigabe nach Plan-Starttermin.



12243

Abbildung 50: Simulation der Reihenfolgetreue in Abhängigkeit der Reihenfolgedisziplin in der Fertigung für Bestandsniveaus unterhalb der Freigabe nach Plan-Starttermin



12244

Abbildung 51: Simulation der Reihenfolgetreue in Abhängigkeit der Reihenfolgedisziplin in der Fertigung für Bestandsniveaus oberhalb der Freigabe nach Plan-Starttermin

Ein Bestand in Höhe von 18.000 Stunden entspricht in diesem Beispiel ca. dem 100-fachen der Tagesleistung. Bestände dieser Größenordnung sind durchaus möglich. Durch die größere Auswahlmöglichkeit an Aufträgen führt auf einem hohen Bestandsniveau eine niedrige Reihenfolgedisziplin zu stärkeren Reihenfolgeabweichungen, als dies bei einem niedrigen Bestandsniveau möglich wäre. Je weiter das Bestandsniveau die Auftragsfreigabe nach Plan-Starttermin überschreitet, desto stärker wirkt sich eine niedrige Reihenfolgedisziplin auf die Reihenfolgetreue aus.

Oberhalb einer Reihenfolgedisziplin von 90 Prozent liegen die Werte der Reihenfolgetreue sehr nah beieinander. Daher gilt auch, je höher die Reihenfolgedisziplin ist, desto geringer ist die Bedeutung des Bestandsniveaus für die Reihenfolgetreue.

Beim Vergleich zwischen Abbildung 50 und Abbildung 51 fällt auf, dass sich eine niedrige Reihenfolgedisziplin bei hohem Bestand quantitativ sehr viel negativer auswirkt als bei zu niedrigem Bestand. In der simulierten Fertigung liegt die Reihenfolgetreue bei einer Reihenfolgedisziplin von 70 bis 80 Prozent und einem mittleren Bestand zwischen 19000 und 24000 Stunden bei ca. 20 Prozent (Abbildung 51). Auf dem wesent-

lich geringeren Bestandsniveau von 1500 bis 2500 Stunden führt die gleiche Reihenfolgedisziplin zu einer Reihenfolgetreue von ca. 40 Prozent (Abbildung 50).

Je nach Reihenfolgedisziplin einer Fertigung kann ein mittlerer Bestand bestimmt werden, auf dem die Termintreue am höchsten ist. Diese Positionierung hinsichtlich Bestand und Termintreue beschreibt der nachfolgende Abschnitt.

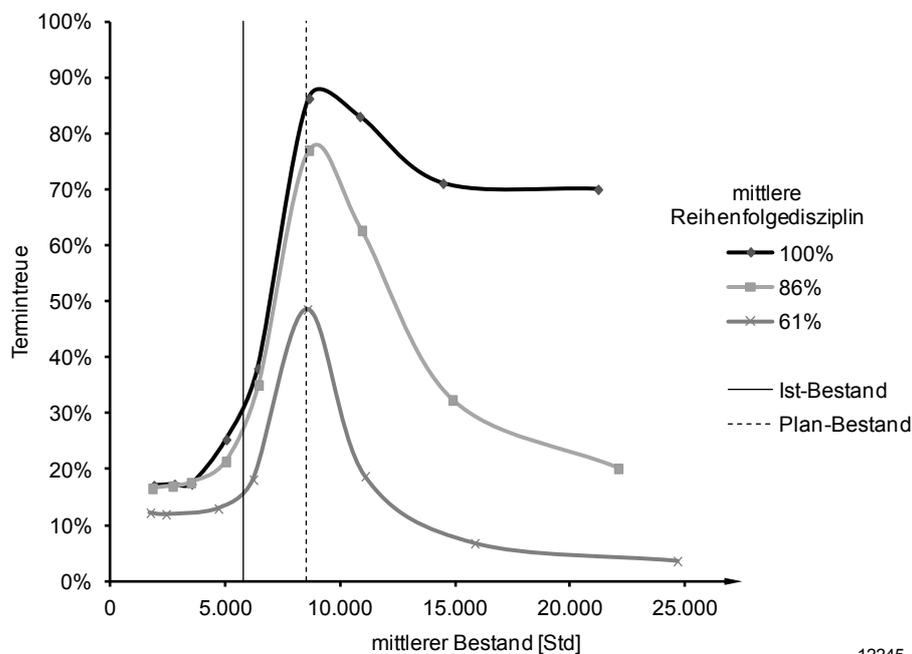
6.3 Termintreuegerechte Bestandspositionierung

Gibt eine Fertigung Aufträge nach Plan-Starttermin frei, so stellt sich ein gewisser mittlerer Bestand ein. Die Positionierung einer Fertigung hinsichtlich des mittleren Bestands erfolgt aber vor allem unter Berücksichtigung der mittleren Leistung und der mittleren Durchlaufzeit (vgl. Abschnitt 2.2.2). Wenn die Vergabe der Plan-Starttermine der Aufträge mit dem geplanten Bestand synchronisiert ist, bedeutet eine Freigabe zum Erreichen des Soll-Bestands nur geringe Abweichungen von einer Freigabe nach Plan-Starttermin. Sind die Produktionsplanung und die Auftragsfreigabe jedoch nicht synchronisiert, kann das von der Auftragsfreigabe angestrebte mittlere Bestandsniveau höher oder niedriger sein, als es eine Freigabe nach Plan-Starttermin herbeiführen würde. In diesen Fällen verändert sich die Reihenfolgetreue in Abhängigkeit der Reihenfolgedisziplin gemäß den Ergebnissen aus dem in Abschnitt 6.2 durchgeführten Experiment.

Ist der Bestand zu niedrig, kommt es zu einer Verschlechterung der Reihenfolgetreue, unabhängig von der Reihenfolgedisziplin, da dringende Aufträge mit kurzer Plan-Durchlaufzeit nicht in die Fertigung gelangen und bei der Reihenfolgebildung an den Arbeitssystemen schlichtweg nicht berücksichtigt werden können. Ist der Bestand hingegen höher als bei einer Auftragsfreigabe nach Plan-Starttermin, nimmt die Bedeutung der Reihenfolgedisziplin zu, da bei hohem Bestand größere Reihenfolgeabweichungen möglich sind als bei niedrigem. Je höher der Bestand ist, desto gravierender wirkt sich eine Absenkung der Reihenfolgedisziplin auf die Termintreue aus. Abbildung 52 veranschaulicht diesen Zusammenhang und fasst die Simulationsergebnisse für die gesamte Fertigung zusammen. Abgetragen ist die Termintreue über dem mittleren Bestand. Die einzelnen Kurven zeigen Messwerte mit jeweils unterschiedlicher mittlerer Reihenfolgedisziplin. Bei niedrigem Bestand ist die Reihenfolgedisziplin aber bei allen Datenreihen gleichermaßen hoch. Der Bestand, der sich bei einer Freigabe nach Plan-Start einstellt, liegt bei ca. 8500 Stunden. Auf diesem mittleren Bestand kommt es ohne mittleren Rückstand und ohne Rückstandsstreuung zu Termintreueverlusten durch Ab-

senkung der Reihenfolgedisziplin. Für niedrigere Bestände verschwindet die Wirkung der Reihenfolgedisziplin. Übersteigt der mittlere Bestand den Wert von 8500 Stunden, spielt die Höhe der Reihenfolgedisziplin eine entscheidende Rolle. Die Fertigung nimmt bei einem mittleren Bestand von 15000 Stunden je nach Reihenfolgedisziplin Termintreuwerte zwischen 70 und fünf Prozent an. Die Termintreue geht auch bei einer Reihenfolgedisziplin von 100 Prozent zurück, da ein höherer Bestand zu längeren Ist-Durchlaufzeiten führt (relative Termintreue nach Yu [Yu-01]), die Plan-Durchlaufzeiten in der Simulation aber konstant bleiben.

Im realen Betriebspunkt der simulierten Fertigung bei ca. 5800 Stunden (vgl. Tabelle 4 auf Seite 75) ist durch eine Erhöhung der Reihenfolgedisziplin nur eine Steigerung der Termintreue auf ca. 30 Prozent möglich.



12245

Abbildung 52: Termintreue in Abhängigkeit des Bestands für unterschiedliche Reihenfolgedisziplinen

Bei guter Abstimmung von Produktionsplanung und -steuerung ist bei jedem mittleren Bestand jede Termintreue erreichbar. Eine gute Abstimmung bedeutet, dass eine Freigabe nach Plan-Starttermin der Aufträge einen mittleren Bestand einstellt, der dem Plan-Bestand der Fertigung entspricht. Ein einfaches Verfahren, um zu überprüfen, ob die Fertigung einen mittleren Bestand hat, der über oder unter dem mittleren Bestand liegt, der sich bei Auftragsfreigabe nach Plan-Start einstellen würde, ist die Analyse der Auftragsfreigabe, als wäre sie ein Arbeitssystem. Misst man den mittleren Rückstand

der Auftragsfreigabe, so kann man sehen, wie gut die Auftragsfreigabe und die Vergabe der Plan-Starttermine miteinander synchronisiert sind.

Hat die Auftragsfreigabe einen negativen Rückstand, so gibt sie tendenziell mehr Aufträge frei als geplant. Dies hat bei einer hohen Reihenfolgedisziplin ($> 90\%$) kaum Auswirkungen. Sinkt die Reihenfolgedisziplin an den Arbeitssystemen, bedeutet dies eine Verschlechterung von Reihenfolge- und Termintreue. In solchen Fällen kann eine Erhöhung der Reihenfolgedisziplin oder eine Bestandssenkung die Termintreue erhöhen. Voraussetzung ist in allen Fällen eine Auftragsfreigabe ohne Reihenfolgeabweichungen.

Ein positiver Rückstand bedeutet, dass die Auftragsfreigabe dringende Aufträge zurückhält. Dies hat unabhängig von der Reihenfolgedisziplin an den Arbeitssystemen negative Auswirkungen auf die Reihenfolgetreue in der Fertigung. Treten auf Grund einer Bestandssenkung zur Durchlaufzeitreduzierung positive Rückstände in der Auftragsfreigabe auf, ist auf eine Pflege der Plan-Durchlaufzeiten zu achten. Bleibt diese aus, wird die Verkürzung der mittleren Durchlaufzeit unweigerlich zu einer Verminderung der Termintreue führen. Sind die Plan-Durchlaufzeiten korrekt dem gewünschten mittleren Bestand angepasst, so ergeben sich auch die entsprechenden Plan-Starttermine und in der Auftragsfreigabe ist kein Rückstand messbar.

6.4 Termintreuekennlinie über dem mittleren Bestand

Neben den Termintreuekennlinien aus der Modellierung der Termintreue ist noch eine weitere Kennlinie sinnvoll: Die Termintreuekennlinie über dem mittleren Bestand. Sie gewährleistet die einheitliche Darstellung im Rahmen der Kennlinientheorie (vgl. Abschnitt 2.2.2). Abbildung 53 zeigt für ein Arbeitssystem das Verhalten der Termintreue ohne mittleren Rückstand und ohne Rückstandsstreuung. Der Einfluss der Reihenfolgedisziplin in Abhängigkeit des Bestands ist sichtbar. Zur besseren Unterscheidung sind Simulationspunkte mit jeweils hoher, mittlerer und niedriger Reihenfolgedisziplin durch Linien verbunden.

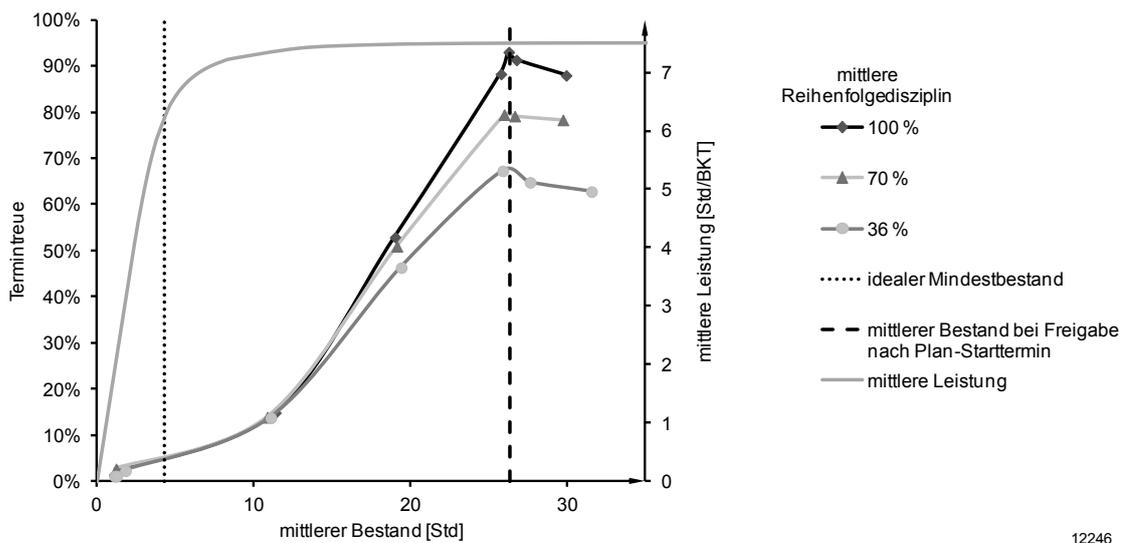


Abbildung 53: Terminkennlinie in Abhängigkeit des mittleren Bestands an einem Arbeitssystem

Die dargestellte Produktionskennlinie wurde nach [Wiendahl-97, S. 161 ff.] ermittelt. An diesem Arbeitssystem beträgt der ideale Mindestbestand 4,3 Stunden. Die mittlere Auftragszeit ZAU_m beträgt 1,58 Stunden und die Streuung der Auftragszeit ZAU_s beträgt 2,08 Stunden. Die maximale Leistung des Arbeitssystems sind 7,5 Stunden pro BKT. Der mittlere Bestand bei Freigabe nach Plan-Starttermin in der Fertigung stellt sich bei diesem Arbeitssystem auf ca. 26,4 Stunden ein. Dieser Wert ist experimentell ermittelt.

Es ist nicht möglich die Termintreuekennlinien über dem mittleren Bestand durch das Modell der Termintreue (Kapitel 4) zu erzeugen. Der hier dargestellte Verlauf ist durch Simulationsläufe ermittelt. Es ist deutlich zu sehen, dass ein Einstellen des idealen Mindestbestands ohne Anpassung der Terminplanung zu einer gravierenden Absenkung der Termintreue führt. Oberhalb des Plan-Bestands hängt die Termintreue stark von der Reihenfolgedisziplin des Arbeitssystems ab.

Obwohl die Ergebnisse dieses Kapitels nicht in der Modellierung berücksichtigt sind, ist das in dieser Arbeit vorgestellte Modell in der Lage die Termintreue einer Fertigung zu analysieren und zu verbessern. Das nachfolgende Kapitel demonstriert am Beispiel einer realen Fertigung die Anwendung.

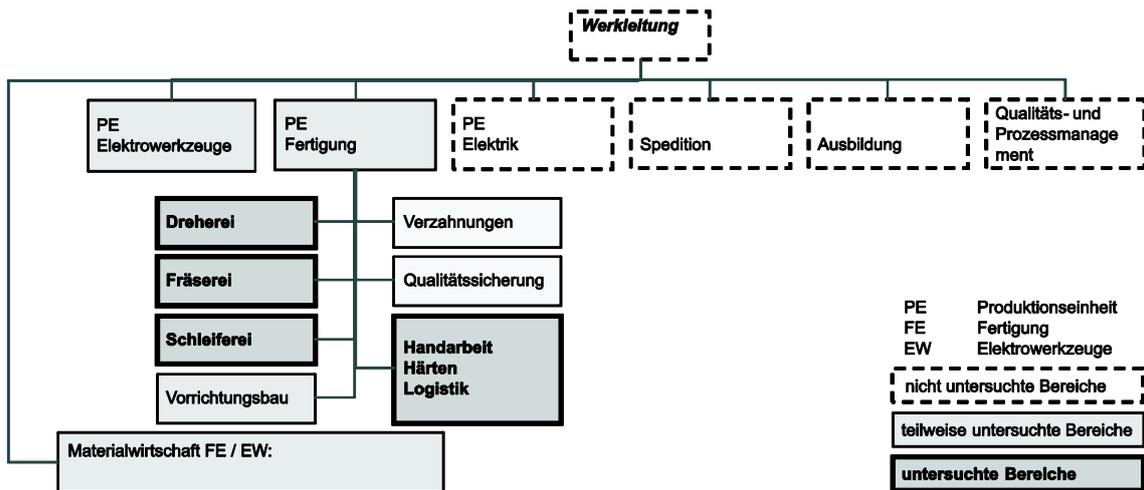
7 Anwendungsbeispiel zur Analyse und Verbesserung der Termintreue in der Produktion

Dieses Kapitel veranschaulicht die Anwendung der Modellierung der Termintreue an einem Praxisbeispiel. Abschnitt 7.1 stellt den untersuchten Fertigungsbereich vor und gibt eine Übersicht über den Projektablauf. Abschnitt 7.2 analysiert die Termintreue an jedem Arbeitssystem des ausgewählten Fertigungsbereichs. Abschnitt 7.3 entwickelt darauf aufbauend ein Konzept zur Hebung des ermittelten Potenzials. Abschnitt 7.4 zeigt mittels Simulation des entwickelten Konzepts die zu erwartende Verbesserung der Termintreue. Das Kapitel schließt in Abschnitt 7.5 mit einer Ergebnisdarstellung.

7.1 Einführung

Die Trumpf Gruppe ist ein weltweit führendes Unternehmen der Fertigungs- und Medizintechnik mit den vier Geschäftsfeldern Werkzeugmaschinen, Lasertechnik, Elektronik und Medizintechnik. Im Geschäftsjahr 2011/12 erzielte das Unternehmen mit rund 9500 Mitarbeitern einen Umsatz von ca. 2,3 Milliarden Euro. Der Geschäftsbereich Werkzeugmaschinen trägt den größten Anteil zum Umsatz bei. [TRUMPF-13]

Die TRUMPF Grusch AG ist eine Tochtergesellschaft der TRUMPF Gruppe. Sie entwickelt und produziert Elektrowerkzeuge und fertigt zusätzlich Komponenten von Werkzeugmaschinen. In der Produktionseinheit (PE) Fertigung bilden die Dreherei, die Fräseerei, die Schleiferei, der Bereich Handarbeit, das Härten und die Logistik eine logische und weitgehend auch räumliche Einheit zur Komponentenfertigung [Kemkemer-12]. Es handelt sich um eine variantenreiche, auftragsbezogene Werkstattfertigung. Abbildung 54 zeigt die Organisationsstruktur der Produktion bei der Trumpf Grusch AG. Der Untersuchungsbereich ist hervorgehoben. Einige Aufträge überschreiten die Systemgrenze zu den Bereichen Verzahnungen, Qualitätssicherung, Vorrichtungsbau und der PE Elektrowerkzeuge. Auch wenn diese Bereiche nicht im Fokus der Untersuchung liegen, wurden ihre projektrelevanten Daten berücksichtigt.



12247

Abbildung 54: Organigramm zur Abgrenzung des Untersuchungsbereichs nach [Kemkemer-12]

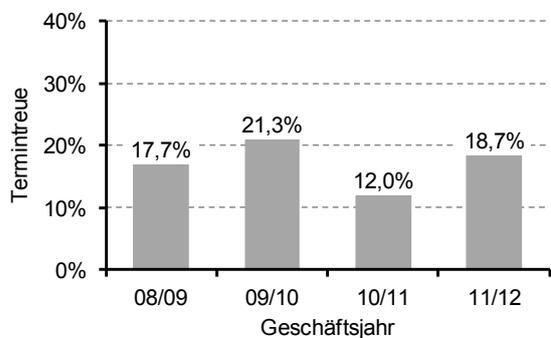
Die PE Fertigung erfüllt alle Voraussetzungen zur Analyse und Verbesserung der Termintreue mit Hilfe des in dieser Arbeit vorgestellten Modells. Zu den Voraussetzungen zählen vor allem die klare Definition des Untersuchungsbereichs und die Wahrnehmung aller Aufgaben der Fertigungssteuerung (vgl. Abbildung 4). Die wichtigste Projektvoraussetzung ist aber das Vorhandensein der benötigten Daten im ERP-System. Rückmeldedaten bis auf Arbeitsvorgangsebene sind notwendig zur Zerlegung der Terminabweichung jedes Arbeitssystems in die Bestandteile aus Rückstand und aus Reihenfolgeabweichung. Tabelle 10 fasst die erforderlichen Daten aus dem ERP-System zusammen. Neben den Rückmeldedaten für die Analyse beinhaltet sie auch Stammdaten für die Konzeptentwicklung und zum Aufbau eines Simulationsmodells. Die Plan- und Ist-Termine der Aufträge ergeben sich aus den Terminen des jeweils ersten und letzten Arbeitsvorgangs eines Auftrags.

Tabelle 10: Benötigte ERP-Daten zur Projektdurchführung

Rückmeldedaten		Stammdaten	
Auftragsdaten	Rückmeldungen auf Arbeitsvorgangsebene	Arbeitssystemdaten	Angaben zu den Schichtmodellen
Fertigungsauftragsnummer	Fertigungsauftragsnummer	Arbeitssystembezeichnung	Schichtmodellbezeichnung
Soll-Menge	Arbeitsvorgangsnummer	Anzahl der Arbeitsplätze	Schichtbeginn
Auftragsfreigabetermin	Arbeitssystem	Schichtmodell	Schichtende
	Bearbeitungszeit		Pausenzeiten
	Rüstzeit		Wochenarbeitstage
	Plan-Starttermin		
	Plan-Endtermin		
	Ist-Starttermin		
	Ist-Endtermin		

Zusätzlich: Betriebskalender um die Datumsangaben aus den Rückmeldungen in Betriebskalendertage umzurechnen

Die TRUMPF Grösch AG empfindet die Termintreue der eigenen Fertigung als verbesserungswürdig. Abbildung 55 zeigt die Entwicklung der Termintreue in den vergangenen Geschäftsjahren: Sie liegt zwischen 12 und 21,3 Prozent. Die Termintoleranz ist sehr gering. Nur Aufträge mit einer Terminabweichung von null BKT gelten als termintreu. Das selbstgesteckte Ziel der Fertigung ist es, zunächst eine Termintreue von 40 Prozent zu erreichen, was bei dieser Termintoleranz ein vergleichsweise hoher Wert ist.



12248

Abbildung 55: Entwicklung der Termintreue der TRUMPF Grösch AG in den Geschäftsjahren 08/09 - 11/12 [Kemkemer-12]

Das Projekt beginnt damit, die notwendigen Daten (Tabelle 10) aus dem ERP-System des Unternehmens zu exportieren und aufzubereiten. Der zweite Projektschritt zerlegt computergestützt, gemäß dem Vorgehen aus Abschnitt 3.4, die Terminabweichung im Abgang aller Arbeitssysteme und der gesamten PE in die Komponenten aus Reihenfolgeabweichung und aus Rückstand. Zusätzlich wird die Reihenfolgedisziplin an jedem Arbeitssystem aus den Rückmeldedaten ausgewertet. Dies ist möglich, da keine

nennenswerten Transportzeiten auftreten. Sobald ein Auftrag zurückgemeldet ist, kann er vom nachfolgenden Arbeitssystem zur Bearbeitung ausgewählt werden. Aus den Rückmeldeterminen ergibt sich somit, welche Aufträge zum Zeitpunkt einer Auftragsauswahl am Arbeitssystem im Bestand waren (vgl. Anhang IV). Die gewonnenen Daten lassen sich zu Kennzahlen aufbereiten, die die Terminabweichung einzelner Arbeitssysteme zeigen.

In Absprache mit dem Unternehmen wurde beschlossen, Veränderungen zur Verbesserung der Termintreue zunächst nur an wenigen ausgewählten Arbeitssystemen vorzunehmen. Der dritte Projektschritt, die Konzepterstellung, wählt daher die Arbeitssysteme aus, bei denen die größte Terminabweichung auftritt. Zu den ausgewählten Arbeitssystemen liegen Detailuntersuchungen vor, die die Basis für das erarbeitete Verbesserungskonzept bilden.

Eine Simulationsstudie in Projektschritt vier analysiert, wie die Verbesserung von nur drei ausgewählten Arbeitssystemen die Termintreue der gesamten PE Fertigung beeinflusst. Das Projekt endet mit Handlungsempfehlungen an das Unternehmen und der Positionierung der PE Fertigung auf einer Termintreuekennlinie.

Der nächste Abschnitt stellt die Ergebnisse der ersten beiden Projektschritte, also der Datenerfassung und -aufbereitung dar. Diese Analyse repräsentiert den Ist-Zustand der PE Fertigung zu Projektbeginn.

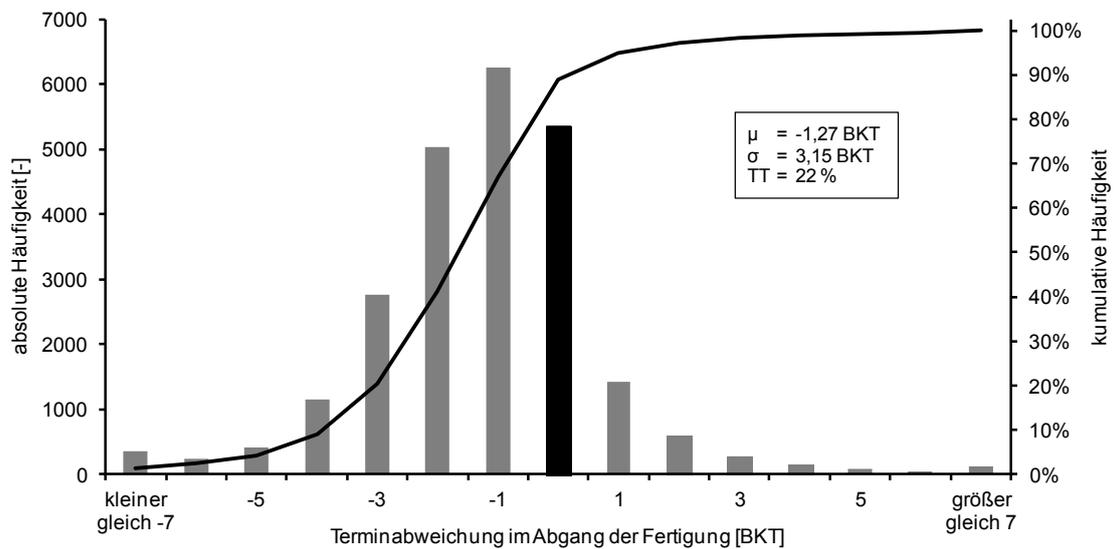
7.2 Ist-Analyse

Die in diesem Abschnitt gezeigten Analyseergebnisse beruhen auf Rückmeldedaten eines Erfassungszeitraums von ca. 1,5 Jahren. Sie umfassen ca. 25.000 Aufträge mit ca. 130.000 Arbeitsvorgängen an 74 Arbeitssystemen. Aufträge, die nicht dem Untersuchungsbereich entsprechen, sowie fehlerhafte Datensätze wurden entfernt. Aufgetretene Fehler sind Aufträge ohne hinterlegte Auftragszeit sowie Arbeitsvorgänge ohne Rückmeldetermin, ohne Auftragszeit oder mit Auftragszeit in der falschen Einheit (Masse statt Dauer). In den aufbereiteten Daten sind daher nur solche Aufträge enthalten, deren Freigabe und Ist-Bearbeitungsende innerhalb des Untersuchungszeitraums liegen.

7.2.1 Produktionseinheit Fertigung

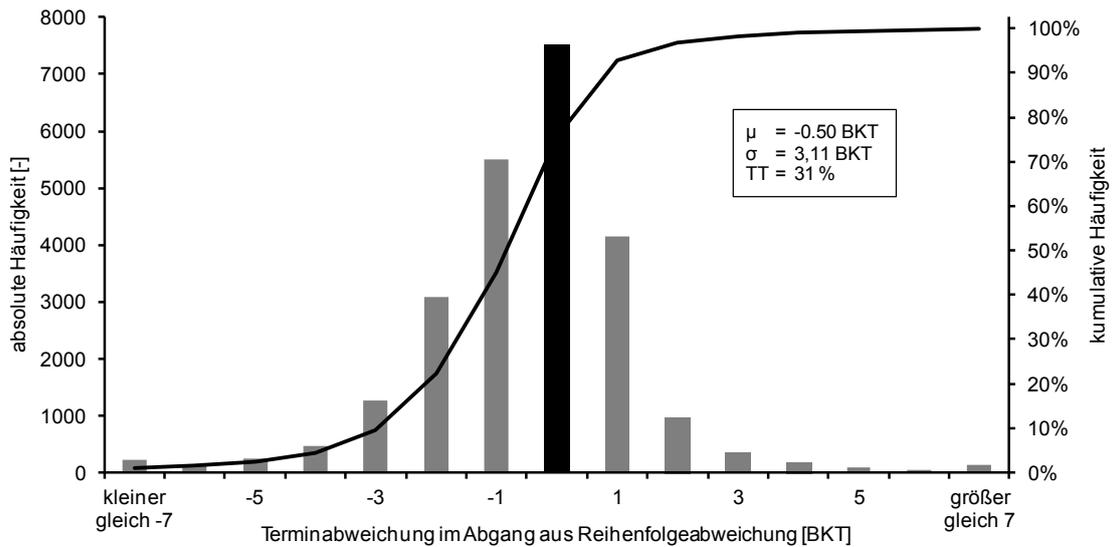
Die mittlere Terminabweichung liegt im Betrachtungszeitraum bei -1,27 BKT. Die Streuung der Terminabweichung beträgt 3,15 BKT. Ohne Termintoleranz entspricht dies einer Termintreue von 22 Prozent. Abbildung 56 zeigt das Histogramm für die Terminabweichung im Abgang der PE Fertigung. Die termintreu fertiggestellten Aufträge sind als schwarzer Balken eingezeichnet.

Die PE Fertigung hat die Aufträge im Mittel zu früh fertiggestellt. Die Streuung der Terminabweichung ist dabei aber so hoch, dass auch einige Aufträge die Fertigung zu spät verließen. Genauen Aufschluss über die Form der Verteilung gibt die Zerlegung der Terminabweichung im Abgang in TAA_{RA} und TAA_{RS} , dargestellt in Abbildung 57 und Abbildung 58.



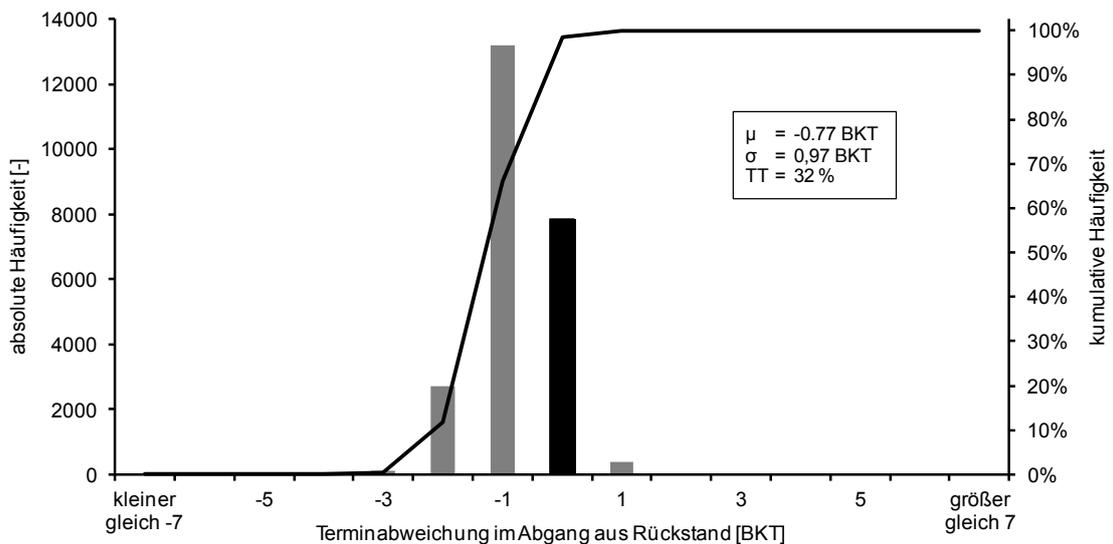
12249

Abbildung 56: Terminabweichung im Abgang der PE Fertigung



12250

Abbildung 57: Terminabweichung im Abgang der PE Fertigung aus Reihenfolgeabweichung



12251

Abbildung 58: Terminabweichung im Abgang der PE Fertigung aus Rückstand

Es tritt sowohl Terminabweichung aus Rückstand als auch aus Reihenfolgeabweichung auf. Die Streuung der Terminabweichung im Abgang ist maßgeblich durch die Reihenfolgeabweichung geprägt. Der negative Mittelwert von TAA_{RA} zeigt an, dass die Fertigung kleinere Aufträge bevorzugt abarbeitet. Der Betrag ist aber zu gering, um eine systematische Reihenfolgeabweichung mit Tendenz zur KOZ-Regel zu belegen. Auffällig ist, dass der Rückstand für die meisten Aufträge eine Terminabweichung von -1 BKT erzeugt. Es liegt also eine Tendenz zu negativem Rückstand vor. Weder die Reihenfolgegetreue noch die Rückstandstreue liegen über 32 Prozent. Keine der Einflussgrößen ist

daher zur Verbesserung der Termintreue systematisch auszuschließen. Eine Analyse der Termintreue im Zugang zeigt, dass diese mit 75 Prozent sehr hoch im Vergleich zur Abgangstermintreue (22 Prozent) ist. Die Auftragsfreigabe kommt daher als Ursache für die Terminabweichung nicht unmittelbar in Frage (Das Histogramm zur Terminabweichung im Zugang der Fertigung befindet sich als Anhang V am Ende dieser Arbeit.). Wege zur Verbesserung der Termintreue sind also vor allem direkt an den Arbeitssystemen zu suchen. Der nächste Abschnitt zeigt die Analyseergebnisse auf Arbeitsebene.

7.2.2 Arbeitssysteme

Der Mittelwert der Terminabweichung drückt nicht aus, wie viel ein Arbeitssystem zur Verschlechterung der Termintreue beiträgt, denn sowohl negative als auch positive Terminabweichungen senken die Termintreue und können sich in der Mittelwertbetrachtung gegenseitig aufheben. Besser ist es, die Beträge der Terminabweichungen aller Aufträge als Kennzahl zu verwenden. Zusätzlich ist auch die Anzahl der Aufträge, die dieses Arbeitssystem durchlaufen haben, von Bedeutung. Analog dem Vorgehen der Engpassorientierten Logistikanalyse nach Nyhuis [Nyhuis-99, S. 196 ff.] geht die Anzahl der Aufträge als Multiplikator in die Kennzahl zur Bestimmung der relevanten Arbeitssysteme ein.

Tabelle 11 zeigt die acht Arbeitssysteme mit dem größten Potenzial zur Verbesserung der Termintreue. In Spalte eins steht die Bezeichnung des Arbeitssystems. Die Spalten zwei bis vier geben die Kennzahlen zur Beschreibung der Terminalsituation am Arbeitssystem an. Dies sind die Termintreue (TT), die mittlere Terminabweichung im Abgang (TAA_m) und die Streuung der Terminabweichung im Abgang (TAA_s). Die Relevanz des Arbeitssystems für das Projekt bestimmt sich nicht aus der Termintreue in Spalte zwei, sondern aus der Kennzahl in Spalte sieben. Sie ist das Produkt aus der Anzahl der Arbeitsvorgänge, die das Arbeitssystem im Betrachtungszeitraum ausführte (Spalte fünf), und dem Mittelwert der Beträge der Terminabweichungen der Aufträge (Spalte sechs), die das Arbeitssystem durchlaufen haben. Die Tabelle ist nach Spalte sieben, also nach der Relevanz des Arbeitssystems für die Verbesserung der Termintreue, sortiert.

Tabelle 11: Kennzahlen der Arbeitssysteme mit dem größten Beitrag zur Terminabweichung im Abgang

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arbeits-system	TT [%]	TAA _m [BKT]	TAA _s [BKT]	AnzAVG [-]	TAA _m [BKT]	TAA _m · AnzAVG [BKT]	RD [%]	RS _m [Std]	L _m [Std/BKT]
<u>TGSKL01</u>	15	-1,7	2,96	9226	2,0	18363	25	-4,3	7,1
<u>TGSSU06</u>	20	-1,3	1,05	10213	1,4	13877	47	-8,5	8,6
TGSSU02	20	-1,24	1,08	8725	1,3	11507	58	-5,6	6,2
TGSSX03	31	-1,47	2,43	5992	1,8	10841	37	-11,1	9,2
TGSSF02	13	-2,37	2,11	3725	2,5	9516	30	-16,1	9,4
TGSHE01	36	-0,61	2,69	6525	1,3	8475	31	-6,2	24,4
TGSFS01	38	-0,59	1,9	6794	1,2	8112	24	-8,6	52,5
<u>TGSDZ03</u>	55	-0,44	0,61	10319	0,5	4863	91	-9,3	15,1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

unterstrichene Arbeitssysteme wurden für die Detailanalyse ausgewählt

- mit
- TT : Termintreue
 - TAA_m : mittlere Terminabweichung
 - TAA_s : Streuung der Terminabweichung
 - AnzAVG: Anzahl der Arbeitsvorgänge im Betrachtungszeitraum
 - |TAA_m| : Mittelwert der Beträge der Terminabweichung
 - RD : Reihenfolgedisziplin
 - RS_m : mittlerer Rückstand
 - L_m : mittlere Leistung

In Spalte acht ist statt der gewichteten Reihenfolgeabweichung die Reihenfolgedisziplin im Betrachtungszeitraum eingetragen. Dies hat den Vorteil, dass eine niedrige Reihenfolgedisziplin, im Gegensatz zur gewichteten Reihenfolgeabweichung, direkt am Arbeitssystem korrigierbar ist. Eine Reihenfolgedisziplin unter 100 Prozent zeigt, dass das Arbeitssystem Verbesserungspotenzial besitzt.

In Spalte neun und zehn sind der Rückstand und die mittlere Leistung aufgeführt. Besonders interessant ist, dass das relevanteste Arbeitssystem (in Tabelle 11 an erster Position) weder die niedrigste Reihenfolgedisziplin noch den betragsmäßig größten mittleren Rückstand besitzt oder die meisten Arbeitsvorgänge ausgeführt hat. Ohne eine systematische Auswahl wäre dieses Arbeitssystem wohl nicht in den Fokus gerückt.

Alle Ausprägungen der Einflussgrößen sind an den Arbeitssystemen zu finden: Hohe und niedrige Reihenfolgedisziplin sowie hoher und niedriger absoluter mittlerer Rückstand. Um zu zeigen, dass eine hohe Termintreue nur dort möglich ist, wo Reihenfol-

geabweichungen und Rückstand möglichst nahe null sind, wurde neben den ersten beiden Arbeitssystemen aus der Liste auch das achte (TGSDZ03) für eine Detailanalyse ausgewählt. Es besitzt bereits eine sehr hohe Reihenfolgedisziplin und kann durch Verbesserung des Rückstandswertes zu einer sehr hohen Termintreue gelangen. Bei Projekterfolg dient es als Positivbeispiel für weitere Arbeitssysteme. Der nächste Abschnitt erläutert die Ergebnisse der Detailanalysen und die Verbesserungskonzepte für die drei Arbeitssysteme TGSKL01, TGSSU06 und TGSDZ03.

7.3 Ist-Analyse an den Arbeitssystemen und Soll-Konzept

Dieser Abschnitt beschreibt das Soll-Konzept zur Verbesserung der Termintreue durch Anpassung der drei ausgewählten Arbeitssysteme. Jeder der folgenden Unterabschnitte erläutert stichpunktartig die Ist-Situation an den ausgewählten Arbeitssystemen und skizziert grob das für sie ausgearbeitete Teilkonzept.

7.3.1 Laserbeschriftungseinrichtung TGSKL01

TGSKL01 ist eine Laserbeschriftungseinrichtung mit sehr geringen Rüstzeiten. Rüsttätigkeiten finden in der Regel hauptzeitparallel statt. Ein rüstoptimales Zusammenfassen von Aufträgen ist daher nicht notwendig. Das Arbeitssystem wird einschichtig mit einer Standardkapazität von 7,5 Std/BKT betrieben.

An diesem Arbeitssystem gibt es keine systematische Kapazitätssteuerung. Nur falls eine positive Terminabweichung der Aufträge droht, reagiert die Mannschaft mit kurzfristiger Kapazitätsanpassung in Form von Überstunden.

Die niedrige Reihenfolgedisziplin von 25 Prozent lässt sich durch die Reihenfolgebildung am Arbeitssystem erklären. Zunächst werden Aufträge mit Prio1-Kennzeichnung abgearbeitet, danach die Aufträge für einen bestimmten Kunden. Der Mitarbeiter am Arbeitssystem sortiert die verbleibenden Aufträge nach ihrem Plan-Endtermin. Die Prio1-Kennzeichnung ist ein im ERP-System hinterlegter Vermerk, der den Auftrag während seines Fertigungsdurchlaufs als Eilauftrag kennzeichnet. In der Regel bezieht sich diese Kennzeichnung auf Aufträge, die zuvor als Ausschuss gebucht wurden und bereits durchgeführte Arbeitsvorgänge noch einmal durchlaufen müssen. Ob der Auftrag bereits eine hinreichende Beschleunigung erfahren hat, wenn er dieses Arbeitssystem erreicht, ist nicht bekannt. Einmal vergeben, verbleibt die Prio1-Kennzeichnung bis zu seiner Fertigstellung am Auftrag. Der Plan-Endtermin des Auftrags ist die einzige

objektiv aussagekräftige Zahl, um seine Dringlichkeit hinsichtlich einer hohen Termintreue zu bewerten.

Das Soll-Konzept für dieses Arbeitssystem besteht aus der Einführung einer Kapazitätssteuerung in Form einer Rückstandsregelung [vgl. dazu Lödning-08, S. 479 ff.] und einer Revision der Reihenfolgebildung am Arbeitssystem. Zur Kapazitätssteuerung muss es dem Mitarbeiter möglich sein, den Plan-Abgang mit dem Ist-Abgang zu vergleichen, um frühzeitig auf Rückstand, auch auf negativen, reagieren zu können. Die Informationen, die dem Mitarbeiter bisher am Arbeitsplatz zur Verfügung stehen, sind dazu nicht ausreichend. Der Zielzustand soll eine klare Übersicht über den Plan-Abgang beinhalten und eine genaue Erfassung des Ist-Abgangs ermöglichen. Geeignete Diagramme am Arbeitsplatz (vgl. Abbildung 5) sollen die tägliche Nachverfolgung des Rückstands erleichtern.

Die Revision der Reihenfolgebildung soll die Reihenfolgedisziplin verbessern. Im Soll-Zustand ist die Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin der Aufträge die einzige Vorgabe. Weder die Prio1-Kennzeichnung noch die Bevorzugung von Aufträgen für einen bestimmten Kunden konnten in der Detailanalyse sinnvoll begründet werden. Es handelt sich bei beiden um historisch entstandene Reihenfolgeregeln, deren Ziel an diesem Arbeitssystem nicht mehr vollständig nachvollziehbar ist. Eine Verbesserung der Reihenfolgedisziplin ist durch die klare Vorgabe, Aufträge nur nach Plan-Endtermin zu sortieren, zu erwarten.

7.3.2 Schleifmaschine TGSSU06

Die Schleifmaschine mit der Arbeitssystembezeichnung TGSSU06 arbeitet in zwei Schichten. Die Mitarbeiter des Arbeitssystems fassen Aufträge zur Leistungssteigerung rüstoptimal zusammen.

Der Ist-Zustand der Kapazitätssteuerung ist ähnlich dem von TGSKL01. Der Plan-Abgang ist den Mitarbeitern am Arbeitssystem nicht bekannt. Auch dieses Arbeitssystem reagiert durch Ausweitung der Kapazität nur auf eine sich anbahnende positive Terminabweichung der Aufträge. Bei negativen Terminabweichungen wird die Kapazität nicht reduziert, solange sich noch Aufträge im Bestand befinden. Dies führt zu negativem mittlerem Rückstand und einer negativen mittleren Terminabweichung der Aufträge (vgl. Tabelle 11).

Die von dem Arbeitssystem gefertigten Aufträge sind nur für einen einzigen Kunden bestimmt. Reihenfolgeabweichungen entstehen nur durch das rüstopoptimale Vorziehen. Ansonsten erfolgt die Reihenfolgebildung gemäß des kleinsten Plan-Endtermins des Arbeitsvorgangs. Die Reihenfolgedisziplin von 47 Prozent ist auf diese Weise zwar höher als bei TGSKL01, aber dennoch verbesserungsfähig.

Im Zielzustand sollte auch an diesem Arbeitssystem eine Rückstandsregelung, analog dem Konzept für TGSKL01, die Kapazitäten an den tatsächlichen Bedarf anpassen. Die Entkopplung der Schichten ist anzustreben, damit jeder Mitarbeiter am Ende seiner Schicht Rückstände kurzfristig ausgleichen kann. Das bedeutet, dass am Ende jeder Schicht nicht direkt die nächste Mannschaft übernimmt, sondern ein gewisser Zeitraum für notwendige Kapazitätsausweitungen zur Verfügung steht.

Die Reihenfolgebildung soll nach Plan-Endtermin der Arbeitsvorgänge sortieren. Das rüstopoptimale Zusammenfassen steht dem teilweise entgegen, da sie Aufträge mit unterschiedlichen Plan-Endterminen gruppiert. Der im Mittel negative Rückstand am Arbeitssystem zeigt, dass die Rüstopoptimierung teilweise entfallen kann. Die Leistungssteigerung durch das Zusammenfassen von Aufträgen ist auch ohne Verminderung der Reihenfolgedisziplin möglich. Dazu ist darauf zu achten, nur Aufträge mit gleichem Plan-Endtermin zusammenzufassen. Aufträge mit späteren Plan-Endterminen dürfen nicht in die Zusammenfassung einbezogen werden.

7.3.3 CNC-Drehmaschine TGSDZ03

Beim Arbeitssystem TGSDZ03 handelt es sich um eine CNC-Drehmaschine. Sie arbeitet ebenfalls im Zweischichtbetrieb. Für viele Aufträge ist dieses Arbeitssystem der Startarbeitsvorgang. Den Zugang zum Arbeitssystem bestimmt daher die Auftragsfreigabe. Sie gibt die Aufträge durch Bereitstellen des Rohmaterials zwar weitgehend termintreu frei, einige Aufträge gehen dem ersten Arbeitsvorgang aber einen Tag zu früh zu (vgl. Anhang V). Rüstzeiten sind an diesem Arbeitssystem vernachlässigbar. Einige Aufträge mit sehr großer Losgröße stören regelmäßig die ansonsten homogene Auftragszeitstruktur. Diese vereinzelt vorkommenden Aufträge übersteigen mit ihrer Auftragszeit die Tageskapazität um ein Vielfaches.

Eine systematische Kapazitätssteuerung ist ähnlich wie bei den beiden anderen Arbeitssystemen nicht vorhanden. Der Ist-Zustand sieht ebenfalls eine Anpassung der Kapazität bei Überschreiten der Plan-Endtermine der Arbeitsvorgänge, nicht jedoch eine Reduzierung der Kapazität in Zeiten negativen Rückstands vor.

Die Reihenfolgebildung geschieht an diesem Arbeitssystem genau wie bei TGSKL01. Zunächst werden Aufträge mit Prio1-Kennzeichnung vorgezogen, danach die Aufträge für einen bestimmten Kunden. Alle verbleibenden Aufträge werden nach Plan-Endtermin des Arbeitsvorgangs ausgewählt. Die Auftragsfreigabe gibt die Aufträge gemäß dem Plan-Starttermin frei. Dadurch entsteht eine gewisse Vorsortierung, die die terminliche Dringlichkeit der Aufträge berücksichtigt. Das Arbeitssystem hat dadurch eine sehr hohe Reihenfolgedisziplin von 91 Prozent.

Das Soll-Konzept für TGSDZ03 gleicht dem von TGSSU06. Lediglich die Aufträge mit großen Losgrößen stehen einer gut abgestimmten Rückstandsregelung im Weg. Die Reduzierung der Losgröße ist Aufgabe der Produktionsplanung. Die Detailanalyse vor Ort hat gezeigt, dass diese Aufträge den Kapazitätsbedarf nivellieren sollen und die Mitarbeiter der PE Fertigung die Lose bereits selbständig teilen. Ihre Fertigstellung weicht daher häufig vom Produktionsplan ab. Eine Verringerung der Losgröße scheint vor diesem Hintergrund auch in der Produktionsplanung möglich zu sein.

Die Vorsortierung durch die Auftragsfreigabe wirkt sich besonders positiv auf die Reihenfolgebildung des Arbeitssystems aus. Vermeidet die Auftragsfreigabe in Zukunft auch die Bereitstellung von Aufträgen, deren Plan-Starttermin noch nicht erreicht ist, ist auch eine positive Unterstützung der Kapazitätssteuerung zu erwarten.

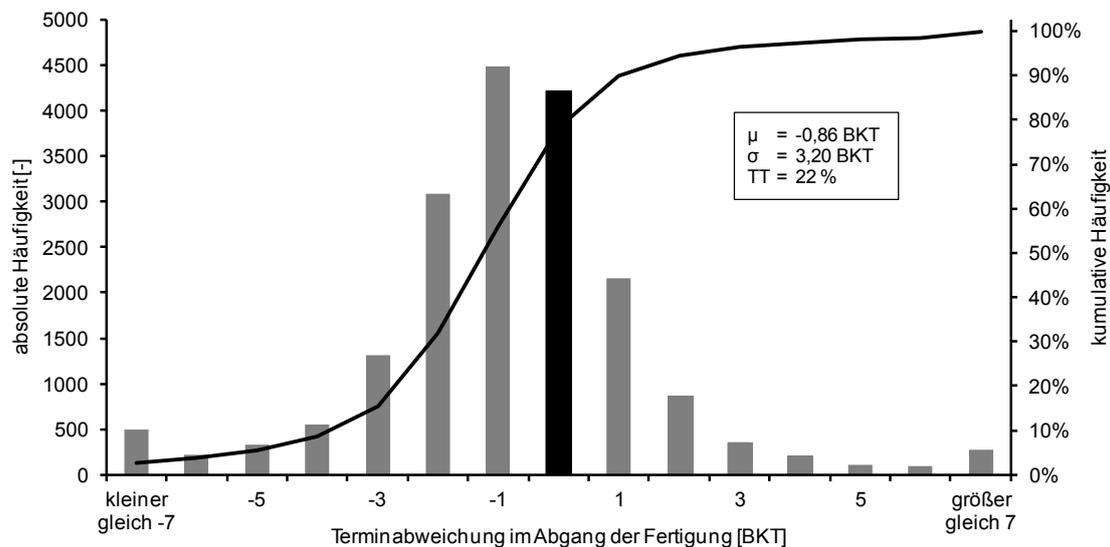
Nach Abschluss der drei Detailanalysen liegen Teilkonzepte für die ausgewählten Arbeitssysteme vor. Ob die Verbesserung der drei Arbeitssysteme eine Verbesserung der Termintreue der gesamten Produktionseinheit Fertigung zur Folge hat, ist nur schwierig abzuschätzen. Zur quantitativen Bewertung des zu erwartenden Projektergebnisses simuliert der nächste Abschnitt daher die Umsetzung des Konzepts und prüft, wie sich dadurch die Termintreue der PE Fertigung verändert.

7.4 Konzeptevaluation mittels Simulation

Die Konzeptevaluation mittels Simulation folgt dem in Abschnitt 4.3 beschriebenen Vorgehen gemäß VDI 3633. Der erste Schritt sind der Aufbau und die Validierung des Simulationsmodells. Zur Validierung dient der Vergleich des simulierten Auftragsdurchlaufs mit den Rückmeldedaten. Der zweite Schritt simuliert die durch das vorgestellte Konzept auftretenden Veränderungen und die damit verbundenen Auswirkungen auf die PE Fertigung.

7.4.1 Validierung

Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung sind der realen Fertigungssteuerung nachempfunden. Das bedeutet, dass die Auftragsfreigabe die Aufträge gemäß dem Ist-Zugangstermin aus den Rückmeldedaten freigibt, dass die Kapazitätssteuerung den aufgezeichneten Ist-Abgang jedes Betriebskalendertags an den Arbeitssystemen erzeugt und dass die Reihenfolgebildung nach dem Ist-Starttermin der Arbeitsvorgänge aus den Rückmeldedaten sortiert. Auch die Plan-Termine sind vollständig aus der historischen Planung übernommen. Abbildung 59 zeigt das Ergebnis der Simulationsvalidierung. Der Modelltest ergibt eine nahezu vollständige Übereinstimmung der Terminabweichungsverteilung mit dem realen Betriebsablauf (vgl. Abbildung 56). Insbesondere die Termintreue von 22 Prozent in der Simulation entspricht exakt dem realen Vorgabewert.



12252

Abbildung 59: Validierung der Simulation der PE Fertigung

7.4.2 Konzeptsimulation

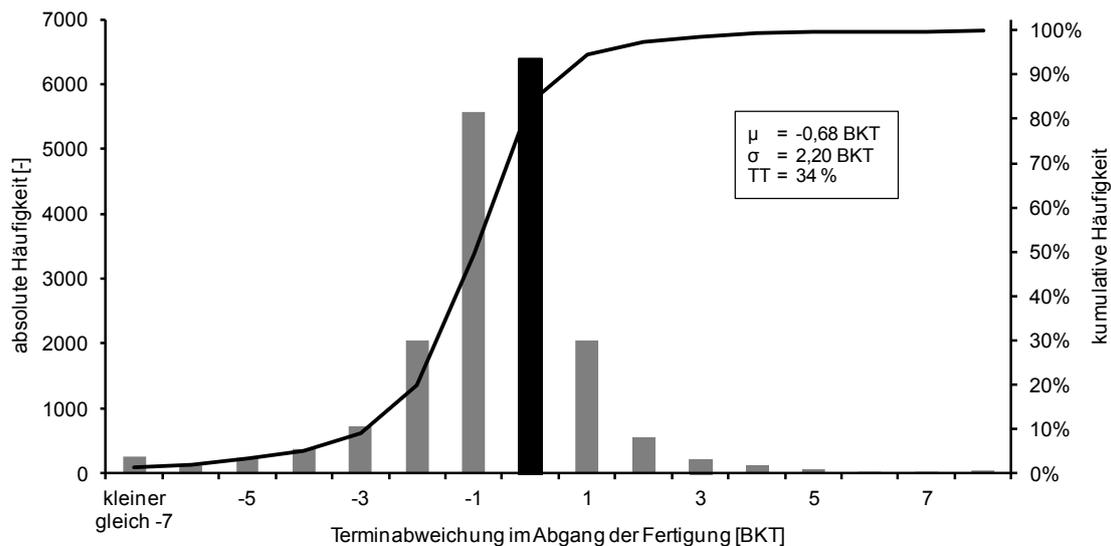
Ausgehend vom validierten Modell wendet die Simulation das Verbesserungskonzept auf die drei ausgewählten Arbeitssysteme an. Im Einzelnen sind dies die Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin und die Kapazitätssteuerung in Form einer Rückstandsregelung. Die drei Arbeitssysteme streben dabei eine Reihenfolgedisziplin von hundert Prozent an. Alle anderen Arbeitssysteme bleiben gegenüber dem validierten Modell unverändert. Die Termintreue steigt in Folge der Anwendung des Konzepts an den Arbeitssystemen in unterschiedlichem Maße an:

Tabelle 12: Veränderung der Termintreue in der Simulation nach Einführung der Verbesserungskonzepte an den drei ausgewählten Arbeitssystemen

1	2	3	4
Arbeits-system	TT [%]	TT Validierung [%]	TT Konzept [%]
TGSKL01	15	23	56
TGSSU06	20	30	32
TGSDZ03	55	31	39
PE Fertigung	22	22	34

Tabelle 12 zeigt den Vergleich der Termintreue der einzelnen Arbeitssysteme (Spalte eins) vor Projektbeginn (Spalte zwei), im Validierungslauf der Simulation (Spalte drei) und nach Anwendung des erarbeiteten Konzepts (Spalte vier). Die Validierung ist für einzelne Arbeitssysteme in der Simulation nicht so präzise wie für die gesamte Fertigung. Dennoch ist in der Gegenüberstellung in Tabelle 12 deutlich zu sehen, dass vor allem am beim Lasersignieren (TGSKL01) mit einem großen Anstieg der Termintreue zu rechnen ist. Das Systemverhalten der Drehmaschine TGSDZ03 konnte von der Simulation hingegen nur schlecht nachgebildet werden. Vergleicht man die Termintreue aus der Validierung mit der aus dem Konzept, ist jedoch bei allen Arbeitssystemen und für die Gesamtfertigung ein Anstieg der Termintreue zu verzeichnen.

Abbildung 60 zeigt das Ergebnis des Simulationslaufs für die gesamte Produktionseinheit als Histogramm:



12253

Abbildung 60: Simulationsergebnis für die PE Fertigung nach Anwendung des Konzepts

Der Betrag der mittleren Terminabweichung ist etwas niedriger als in der Modellvalidierung (vgl. Abbildung 59), die Streuung der Terminabweichung ist deutlich gesunken. Die Termintreue erhöhte sich in Folge der Anwendung des Konzepts von 22 auf 34 Prozent.

7.5 Ergebnis

Durch die gezielte Anpassung der Fertigungssteuerung an drei ausgewählten Arbeitssystemen steigt die Termintreue der gesamten Produktionseinheit um zwölf Prozent. Auch wenn die Umsetzung des Konzepts bei der TRUMPF Grüşch AG noch nicht abgeschlossen ist und daher noch keine realen Auswertungen zur Verfügung stehen, gibt die Simulation bereits eine Grobabschätzung der zu erwartenden Verbesserung der Termintreue. Bei der Umsetzung des vorgestellten Konzepts an drei Arbeitssystemen bleibt die TRUMPF Grüşch AG, laut Simulationsergebnis, noch hinter ihrem selbstgesteckten Ziel von 40 Prozent Termintreue zurück. Die Veränderungen im Zuge dieses Pilotprojekts bereiten aber die Grundlage, um die Verbesserung der Termintreue sukzessive auf zusätzliche Arbeitssysteme auszuweiten.

Verschiedene Termintreuekennlinien für die PE Fertigung der TRUMPF Grüşch AG lassen sich mit Hilfe der Modellierung der Termintreue erzeugen. Dazu sind die Parameter α , β und γ festzulegen (vgl. Abschnitt 4.4). In Abbildung 56 ragen die Balken mit Terminabweichungen von 0, -1 und -2 BKT deutlich heraus. Die Verteilung der Terminabweichung im Abgang der PE Fertigung ist stark um ihren Maximalwert konzentriert (hoher Exzess bzw. Kurtosis). Die Auswahl des Parameters α berücksichtigt dies mit einem hohen Wert. Mittlere berechnete Termintreuwerte bedürfen auf Grund der niedrigen Streuung der Verteilung nur einer geringfügigen Erhöhung. Der Parameter β sollte daher einen niedrigen Wert annehmen. Über die Korrelation von Streuung und Mittelwert der Terminabweichung im Abgang lassen sich keine Aussagen treffen. Der Parameter γ verbleibt daher bei seinem in Abschnitt 4.4 hergeleiteten Standardwert von 0,08.

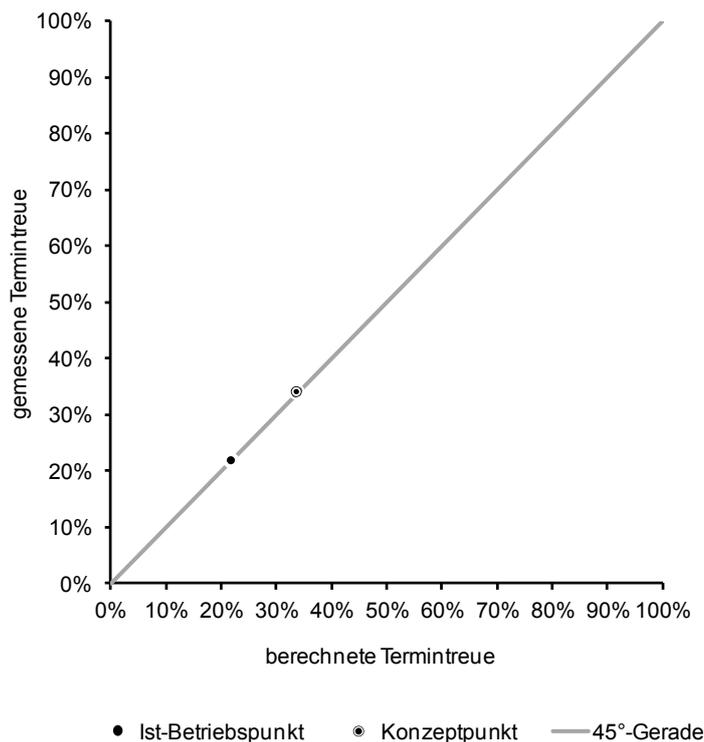
Da für dieses Projekt ein Simulationsmodell vorliegt, ist es möglich das Modell der Termintreue mit Hilfe zweier bekannter Messwerte anzupassen und die Parameter α und β entsprechend zu bestimmen. Abbildung 61 zeigt zum einen den Betriebspunkt der PE Fertigung vor Projektbeginn und zum anderen das Ergebnis der Simulation nach Anwendung des hier vorgestellten Konzepts. Die Modellparameter sind so ausgewählt, dass eine möglichst hohe Übereinstimmung zwischen den Messwerten und

den mit Hilfe von Gleichung 4.11 berechneten Termintreuwerten entsteht. Die Parameter $\alpha = 5$; $\beta = 0,05$ und $\gamma = 0,08$ beschreiben die PE Fertigung sehr genau. Tabelle 13 fasst die Werte für die Berechnung und zur Zeichnung des Diagramms zusammen. Die Anpassung der drei Arbeitssysteme wirkt sich vor allem auf die Reduzierung der Reihenfolgeabweichung aus.

Tabelle 13: Wertetabelle für den Vergleich des Modells der Termintreue mit der Realität bzw. Simulation

1	2	3	4	5	6	7	8
Vergleichspunkt	TT gemessen [%]	TT berechnet [%]	RS _m [Std]	RS _s [Std]	RA _{g,m} [Std]	RA _{g,s} [Std]	L _m [Std/BKT]
Ist-Betriebspunkt vor Projektbeginn	22	22	-637	767	-678	4288	1123
Simulation des Konzepts an drei Arbeitssystemen	34	34	-1021	865	295	2618	1012

- mit TT : Termintreue [%]
 RS_m : mittlerer Rückstand [Std]
 RS_s : Standardabweichung des Rückstands [Std]
 RA_{g,m} : mittlere gewichtete Reihenfolgeabweichung [Std]
 RA_{g,s} : Standardabweichung der gewichteten Reihenfolgeabweichung [Std]
 L_m : mittlere Leistung [Std/BKT]



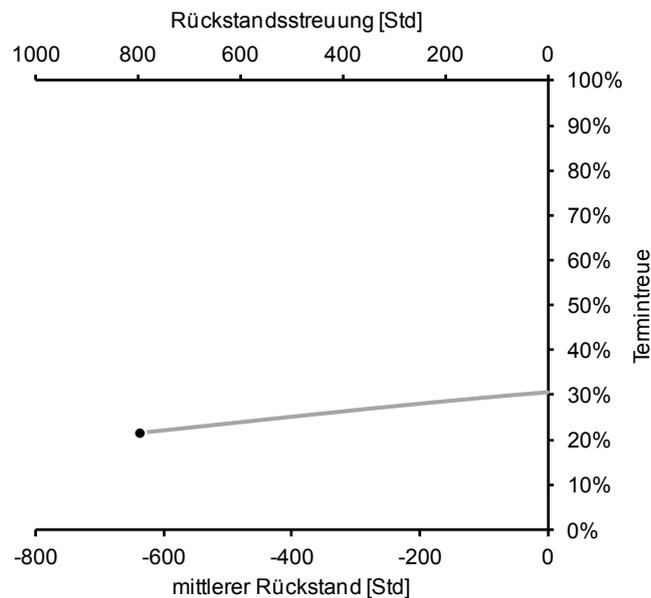
12254

Abbildung 61: Vergleich zwischen der gemessenen Termintreue der PE Fertigung und der Berechnung mit dem analytischen Modell (Gleichung 4.11), mit den Parametern $\alpha = 5$; $\beta = 0,05$ und $\gamma = 0,08$

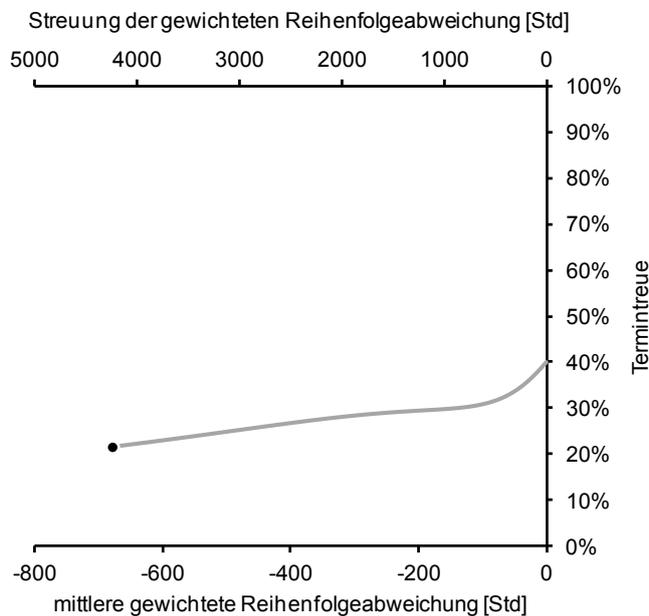
Der Betriebs- und der Konzeptpunkt liegen beide auf der 45°-Gerade. Die Modellierung der Termintreue ergibt in diesem Fall eine gute Abschätzung der Realität bzw. der Simulation. Die ausgewählte Darstellung demonstriert zudem die Funktionsfähigkeit des Modells.

Mit den gewählten Parametern sind nun Aussagen über das Verhalten der Termintreue der PE Fertigung in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen möglich und in Form von Termintreuekennlinien darstellbar (vgl. Kapitel 5). Abbildung 62 zeigt zwei ausgewählte Termintreuekennlinien für die PE Fertigung. Ausgehend vom Betriebspunkt (vgl. Tabelle 13) wird in Abbildung 62 a der Betrag des mittleren Rückstands und parallel dazu die Rückstandsstreuung linear bis auf null reduziert. Alle anderen Einflussgrößen bleiben konstant. Es ergibt sich eine Kennlinie für die Termintreue über dem Rückstand (Mittelwert und Streuung). Der Ordinatenabschnitt gibt den Wert der Termintreue ohne mittleren Rückstand und ohne Rückstandsstreuung an. Diese Termintreue in Höhe von 31 Prozent zeigt den Wert an, den die Verteilung von TAA_{RA} (vgl. Abbildung 57) als Rei-

henfolgetreue darstellt. Es ist ein Bild des Ist-Zustands der PE Fertigung, wenn kein Rückstand im Beobachtungszeitraum aufgetreten wäre. Auffällig ist die niedrige Steigung der Termintreuekennlinie. Auch eine starke Reduzierung des Rückstands führt zu keiner signifikanten Steigerung der Termintreue, solange die Reihenfolgeabweichung erhalten bleibt.



a) Termintreue in Abhängigkeit von Mittelwert und Streuung des Rückstands in der PE Fertigung



b) Termintreue in Abhängigkeit von Mittelwert und Streuung der Reihenfolgeabweichung in der PE Fertigung

• Betriebspunkt — Termintreuekennlinie

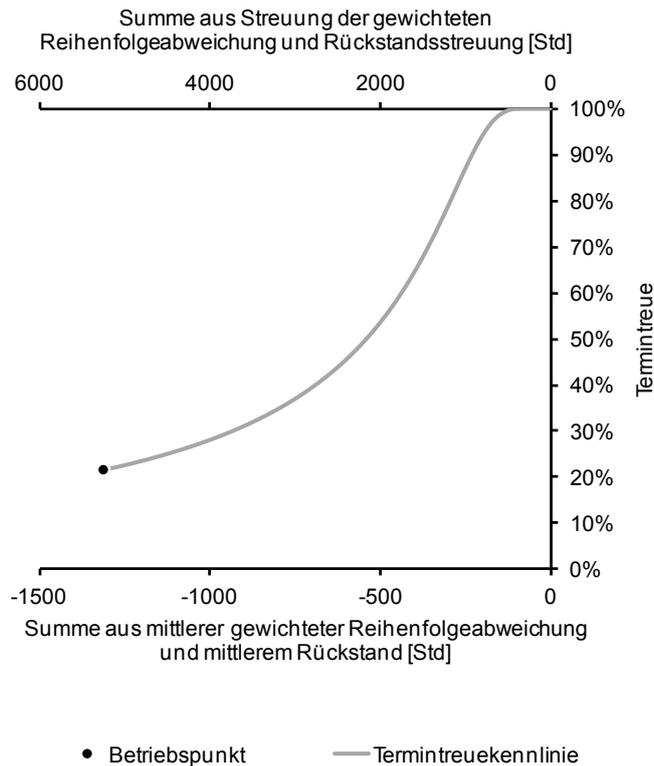
12255

Abbildung 62: Termintreuekennlinien für die PE Fertigung

Der zweite Bildteil (Abbildung 62 b) zeigt eine vergleichbare Kennlinie für die Reduzierung der Reihenfolgeabweichung. Vom berechneten Betriebspunkt aus sinken der Betrag des Mittelwerts und die Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung linear ab. Als Ergebnis des Modells steigt die Termintreue entsprechend an. Ohne Reihenfolgeabweichungen prognostiziert das Modell eine Termintreue von 40 Prozent. Der Vergleich mit der Rückstandstreu in Abbildung 58 zeigt, dass dieser Wert acht Prozent zu hoch ist. Das analytische Modell misst der Reduzierung der Streuung der Terminabweichung im Abgang durch Wegfall der Reihenfolgeabweichung also ein zu hohes Gewicht bei. Dies ist auf eine nicht zu vermeidende stochastische Unsicherheit zurückzuführen, die gerade bei dem sehr eng gewählten Termintreueintervall verstärkt auftritt. Die Steigung der Kennlinie über der Reihenfolgeabweichung ist ein wenig steiler als die über dem Rückstand. Kurz vor der Ordinate nimmt die Steigung rapide zu. Dies liegt vor allem an der verringerten Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung.

Die Ergebnisse beider Verfahren, also die Zerlegung der Termintreue in ihre Komponenten (Abbildung 57 und Abbildung 58) und die Positionierung der PE Fertigung auf den Termintreuekennlinien (Abbildung 62), lassen den Schluss zu, dass die Beeinflussung der Reihenfolgeabweichung ein größeres Potenzial zur Verbesserung der Termintreue besitzt als die Beeinflussung des Rückstands. Die zu erwartende Termintreue bei Korrektur von nur einer Einflussgröße ist aber mit max. 40 Prozent noch recht niedrig.

Abschnitt 4.3 hat allgemeingültig gezeigt, dass eine Fertigung ohne Rückstand und ohne Reihenfolgeabweichung eine Termintreue von 100 Prozent erreicht. Die PE Fertigung ist dabei keine Ausnahme. Entfielen sowohl der Rückstand als auch die Reihenfolgeabweichungen, prognostiziert das Modell eine Termintreue von 100 Prozent. Ähnlich der Kennlinie aus Abbildung 47 zeigt Abbildung 63 die Termintreue in Abhängigkeit des Mittelwerts und der Streuung zugleich. Die untere Abszisse zeigt die Summe aus mittlerem Rückstand und mittlerer gewichteter Reihenfolgeabweichung, während die obere Abszisse die Streuung als Summe aus Rückstandsstreuung und Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung darstellt. Alle vier Größen fallen ausgehend vom Betriebspunkt linear ab.



12256

Abbildung 63: Termintreuekennlinie für die lineare Reduzierung von Rückstand und Reihenfolgeabweichung in der PE Fertigung

Erst wenn die Einflussgrößen auf ca. ein Drittel ihres Ist-Wertes reduziert sind, beginnt die Termintreue signifikant zu steigen. Aus den Berechnungsdaten ist erkennbar, dass die Streuung der gewichteten Reihenfolgeabweichung den größten Einfluss hat. Sie sollte in der PE Fertigung in Zukunft besondere Beachtung finden. Der Vergleich aller drei Kennlinien (Abbildung 62 und Abbildung 63) zeigt jedoch, dass nur eine gleichzeitige Korrektur des Rückstands und der Reihenfolgeabweichung zu einer Termintreue von 100 Prozent führt.

Wie bei anderen Verfahren der Logistikanalyse ist auch die Verbesserung der Termintreue von einer kontinuierlichen Überwachung der Arbeitssysteme abhängig. Die Ergebnisse dieser Betriebsanalyse entstanden aufwandsarm und in überschaubarer Zeit. Sämtliche vorgestellte Verfahren eignen sich zur computergestützten Anwendung, entweder in ein ERP-System integriert oder in Form von separaten Auswertungswerkzeugen auf Basis herkömmlicher Tabellenkalkulationsprogramme. So wird die Überwachung der Einflussgrößen Rückstand und Reihenfolgeabweichung zu einem Teil des betrieblichen Alltags. Dies ermöglicht es der Fertigungssteuerung negative Tendenzen frühzeitig zu erkennen und darauf zu reagieren.

Die erfolgreiche Anwendung des Termintreuemodells signalisiert an dieser Stelle die Vollständigkeit der vorliegenden Arbeit. Das nächste Kapitel schließt mit entsprechenden Schlussbetrachtungen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel schließt die vorliegende Arbeit ab. Abschnitt 8.1 fasst das Vorgehen und die wesentlichen Erkenntnisse der Modellierung der Termintreue zusammen. Abschnitt 8.2 nimmt eine kritische Reflektion der vorgestellten Arbeit vor und gibt als Ausblick Ansätze zur Vertiefung und Erweiterung der vorgestellten Ergebnisse.

8.1 Zusammenfassung

Die Termintreue ist eine der wichtigsten Zielgrößen in der Produktionsplanung und -steuerung. Sie hängt von der Reihenfolgeabweichung und dem Rückstand ab. Zur Regelung dieser Einflussgrößen stehen der Fertigungssteuerung die Reihenfolgebildung und die Kapazitätssteuerung zur Verfügung. Alle Entscheidungen der Fertigungssteuerung sind mit Folgen verbunden, die nicht nur die Termintreue beeinflussen. Die Anordnung von Überstunden zur Kapazitätsausweitung oder der Verzicht auf rüstopmierendes Zusammenfassen von Aufträgen kann die Termintreue steigern. Überstunden führen aber zu erhöhten Kosten und eine Reihenfolgebildung, die nicht rüstopimal ist, senkt die Leistung eines Arbeitssystems. Eine sinnvolle Fertigungssteuerung ist nur unter Berücksichtigung aller Konsequenzen möglich. Der erste Schritt dazu ist ein fundiertes Verständnis über das Verhalten der Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen. Diese Arbeit stellt dazu ein geeignetes Modell vor.

Eine notwendige Voraussetzung zur erfolgreichen Modellierung der Termintreue ist die Messung der Reihenfolgeabweichung. Die vorgestellte Methode zur Ermittlung der gewichteten Reihenfolgeabweichung drückt aus, wie viele Stunden ein Auftrag vorgezogen oder zurückgestellt wurde. Auf diese Weise ist es möglich, die Auswirkung von Reihenfolgeentscheidungen auf die Terminabweichung einzelner Aufträge zu bewerten.

Überlegungen über das Verhalten der Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen bilden die Grundstruktur der Modellierung. Das Ergebnis ist ein Ansatz, der die Termintreue mit Hilfe einer stochastischen Dichtefunktion berechnet. Ausgiebige Simulationsexperimente bestätigen die grundsätzliche Richtigkeit dieses Ansatzes. Die Ergänzung von drei Parametern verbessert die Qualität der Näherungsgleichung. Mit Hilfe des Modells lassen sich Termintreuekennlinien berechnen, die die Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen darstellen. Darüber hinaus können die Ursachen mangelhafter Termintreue in der Fertigung systematisch identifiziert und Konzepte zu ihrer

Vermeidung erarbeitet werden. Die erfolgreiche Anwendung des Modells der Termintreue auf einen realen Fertigungsbetrieb demonstriert seine Leistungsfähigkeit.

8.2 Ausblick

Diese Arbeit stellt wesentliche Grundlagen zum Verständnis der Termintreue vor. Die erfolgreiche Modellierung der Termintreue ist eine sinnvolle Ergänzung der Produktionsplanung und -steuerung. Es bleiben jedoch einige Punkte offen:

Eine in dieser Arbeit entwickelte Methode ermöglicht die Berechnung der Reihenfolgeabweichung mit Hilfe betriebsüblicher Rückmeldedaten. Die Berechnung der Ist-Reihenfolge basiert auf den zurückgemeldeten Bearbeitungsendterminen der Arbeitsvorgänge bzw. der Aufträge. Es kann an Arbeitssystemen mit mehreren parallelen Arbeitsplätzen aber vorkommen, dass die Reihenfolge der Bearbeitungsendtermine nicht der Reihenfolge bei der Auswahl der Aufträge entspricht. Dies wäre zum Beispiel der Fall, wenn ein Auftrag zuerst ausgewählt wird, ihn aber auf der Parallelmaschine ein zweiter Auftrag, der später ausgewählt wurde, überholt. Solche Abweichungen in den Berechnungen hat diese Arbeit vernachlässigt. Zur Verfeinerung der Grundlagen wäre es vorteilhaft, die Berechnung der Reihenfolgeabweichung auch für Arbeitssysteme mit Parallelbearbeitung zu entwickeln. Eine Voraussetzung dazu ist die Erfassung der Starttermine der Arbeitsvorgänge im Betrieb, inklusive einer Zuordnung zum entsprechenden Arbeitsplatz.

Durch die vorgestellte Modellierung wurde eine Näherungsgleichung für die Termintreue entwickelt. Eine der Grundlagen dafür ist die Abschätzung der Verteilung der Terminabweichung im Abgang durch eine logistische Verteilung. Auch wenn das Modell der Termintreue mit dieser Abschätzung zu sinnvollen Ergebnissen kommt, bleibt es immer eine stochastische Näherung. Sie kann nicht für jeden Betriebspunkt jeder Fertigung exakte Ergebnisse liefern, selbst bei sorgfältiger Bestimmung der Parameter. Die notwendige Schätzung der Modellparameter fügt zu den Ergebnissen weitere Unsicherheit hinzu.

Das Forschungsvorgehen bei dieser Modellierung zerlegt zunächst die Terminabweichung im Abgang in ihren Mittelwert und ihre Streuung und entwickelt zwei getrennte Formeln zu deren Berechnung. Obwohl beide Formeln in der Lage sind, die Eingangsgrößen für die Termintreueformel präzise zu berechnen, weichen die Ergebnisse des Modells der Termintreue von der Realität ab. Das Modellierungsvorgehen ignoriert mögliche Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflussgrößen. Gerade beim

Rückstand ist eine statistische Abhängigkeit von der Leistung zu vermuten. Das gewählte Vorgehen, eine passende Verteilung für die gesamte Terminabweichung im Abgang zu finden, kann diese Wechselwirkungen nicht im Detail berücksichtigen. Ein alternativer Ansatz könnte die Einflussgrößen einzeln modellieren. Der Ansatz sollte den Zusammenhang zwischen Rückstand und Leistung sowie zwischen Reihenfolgeabweichung und Leistung erklären, um daraus die Terminabweichung aus den jeweiligen Einflussgrößen zu modellieren. Die Terminabweichung im Abgang ergäbe sich dann nicht als Ergebnis ihres Mittelwerts und ihrer Streuung, sondern würde als Überlagerung der Verteilungen der Terminabweichung aus Rückstand und aus Reihenfolgeabweichung zusammengesetzt. Der Einsatz der Faltung zweier Verteilungen verspricht für die Anwendung auf diese Fragestellung großes Potenzial zu haben. Die Form der Verteilung wäre dann nicht mehr von der Qualität der Schätzung abhängig, sondern würde für jeden Anwendungsfall gezielt entwickelt. Eine Abschätzung der Verteilungsform entfielen und ein allgemeingültiges Vorgehen zur Berechnung der Termintreue wäre möglich.

Das hier vorgestellte Modell erklärt die Termintreue in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen. Einem Arbeitssystem ist es möglich, den Rückstand direkt zu messen und durch Kapazitätssteuerung zu beeinflussen. Für die Reihenfolgeabweichung gilt dies nicht. Der Aufbau des Simulationsmodells für diese Arbeit zeigte, dass die Reihenfolgeabweichung unter realitätsnahen Bedingungen nicht vollständig von den Arbeitssystemen gesteuert werden kann. Maßgebliche Stellgröße war daher immer die Reihenfolgedisziplin. Neben ihr sind auch die Auftragszeitstruktur, der Bestand und die Terminabweichung von Bedeutung für die Reihenfolgeabweichung. Ein Termintreuemodell für die praktische Anwendung sollte am besten nur direkt beeinflussbare Regelgrößen enthalten, um die kausalen Zusammenhänge für die Fertigungssteuerung greifbar zu machen. Der Zusammenhang zwischen Bestand, Reihenfolgedisziplin und Reihenfolgeabweichung, den diese Arbeit experimentell nachweisen konnte, sollte als sinnvolle Ergänzung des vorgestellten Modells ebenfalls formal modelliert werden. Wissenschaftliche Bedeutung erhält diese Aufgabe dadurch, dass die Produktionsplanung für die Erstellung der Plan-Starttermine der Aufträge verantwortlich ist, somit also den Plan-Bestand festlegt. Die Beantwortung der Frage, wie sich die Termintreue bei unterschiedlichen Beständen und einer darauf abgestimmten Terminierung verhält, ist ein Anknüpfungspunkt zur Einbindung der Produktionsplanung in die Modellierung der Termintreue.

Aus dem Anwendungsbeispiel haben sich interessante Fragestellungen ergeben. Es zeigt sich, dass eine der Hauptursachen für Reihenfolgeabweichungen das rüstoportimale Zusammenfassen von Aufträgen ist. Da dieses Zusammenfassen in der Regel die Leistung eines Arbeitssystems erhöht, entsteht ein Zielkonflikt zwischen Termintreue und Leistung. Diesen Konflikt gilt es zu modellieren, um die Fertigungssteuerung bei der zielführenden Reihenfolgebildung zu unterstützen.

Das für das Anwendungsbeispiel gewählte Vorgehen berechnete zunächst eine Kennzahl, um die Relevanz der einzelnen Arbeitssysteme für die Verbesserung der Termintreue des gesamten Fertigungsbereichs zu bewerten. Daraufhin wurden drei Arbeitssysteme zur Verbesserung ausgewählt. Es stellt sich die Frage, ob das gewählte Vorgehen effizient ist, um die Termintreue einer ganzen Fertigung zu verbessern. Da die Termintreue von den Schlussarbeitsgängen jedes Auftrags bestimmt wird, ist es auch denkbar, mit den Arbeitssystemen zu beginnen, die weit hinten im Wertstrom liegen. Ziel eines zweiten Schritts ist dann die sukzessive Anpassung der davorliegenden Arbeitssysteme. Es ist ein Konzept für einen strukturierten Projektablauf zu entwerfen, der am effizientesten zu den gewünschten Ergebnissen führt.

Diese Grundlagenarbeit zeigt mit dem Modell der Termintreue, wie sich Reihenfolgeabweichung und Rückstand auswirken. Wie sich einzelne Methoden der Fertigungssteuerung auf die Reihenfolgeabweichung und auf den Rückstand auswirken, sollte das Ziel weiterer Forschungsarbeit sein. Anzustreben ist eine direkte kausale Verbindungskette zwischen der Konfiguration der Fertigungssteuerung und der Termintreue. Erst dann ist eine Bewertung der Kosten für eine hohe Termintreue, die z. B. durch eine angepasste Rückstandsregelung entstehen, möglich. Als Ergebnis kann sich ein Unternehmen auf dem von ihm angestrebten Termintreueniveau mit den dazugehörigen Kosten positionieren.

Literaturverzeichnis

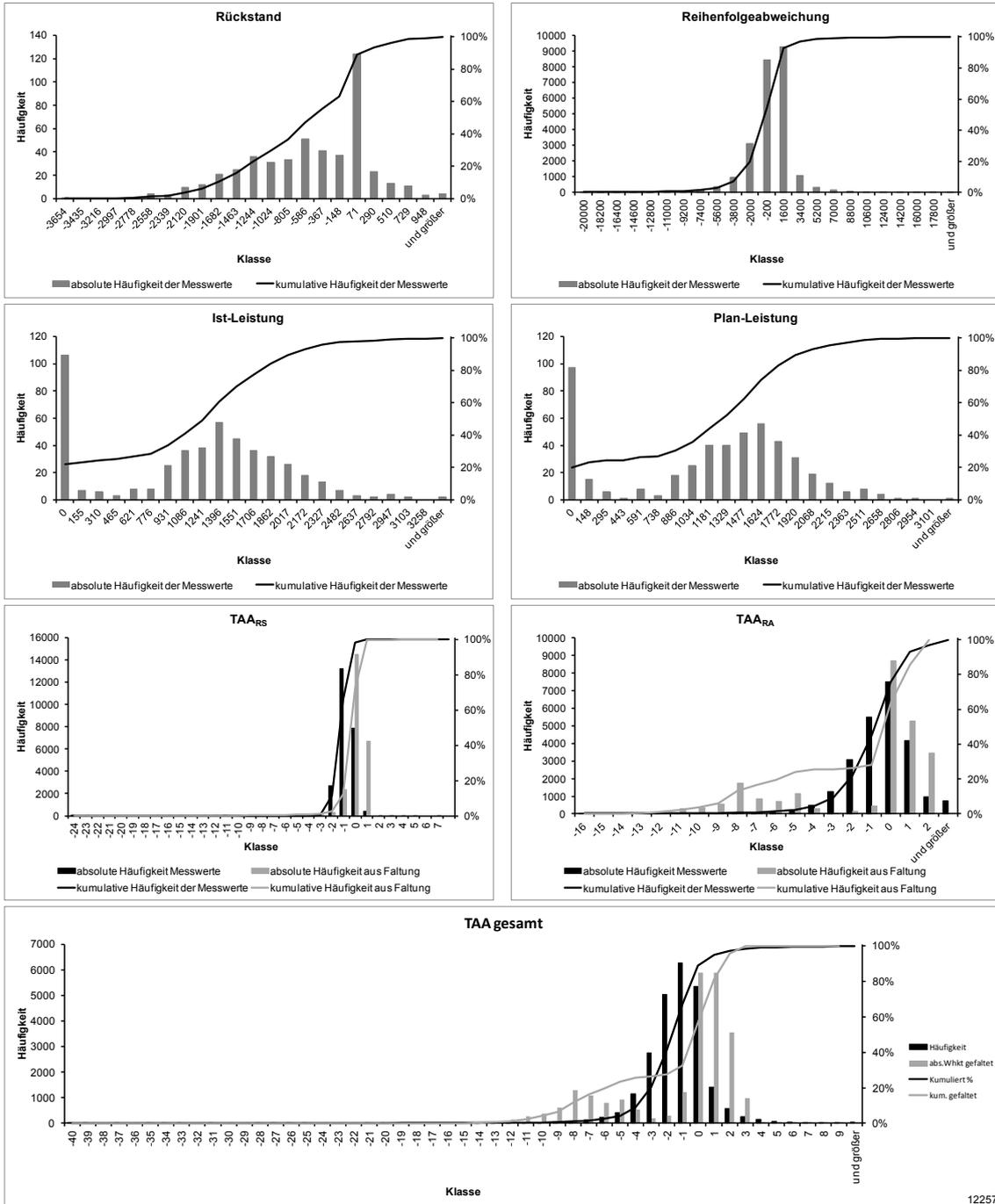
- [Beichelt-03] Beichelt, F.: Teubner-Taschenbuch der Stochastik: Wahrscheinlichkeitstheorie, stochastische Prozesse, mathematische Statistik. Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2003.
- [Bronstein & Semendjajew-01] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. Deutsch, Thun [u.a.] 2001.
- [Brosze et al.-11] Brosze, T.; Hausberg, C.; Kompa, S.; Meier, C.; Schnittler, V.; Thomas, C.: Produktion am Standort Deutschland: Ausgabe 2011, Aachen, 2011.
- [Conway et al.-67] Conway, R. W.; Maxwell, W. L.; Miller, L. W.: Theory of scheduling. Addison-Wesley Pub. Co, Reading, Mass., 1967.
- [Day & Hottenstein-70] Day, J. E.; Hottenstein, M. P.: Review of sequencing research. Naval Research Logistics Quarterly 17 (1970), 1, S. 11–39.
- [DIN-08] DIN: Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen (ISO 9001:2008); Dreisprachige Fassung EN ISO 9001:2008 03.120.10. Beuth Verlag, Berlin, 2008; Zugriff am 11.10.2011.
- [Dombrowski-88] Dombrowski, U.: Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung. VDI-Verl., Düsseldorf, 1988.
- [Fischer-07] Fischer, A.: Modellbasierte Wirkbeschreibung von Prioritätsregeln. PZH, Produktionstechnisches Zentrum, Garbsen, 2007.
- [Gudehus-06] Gudehus, T.: Dynamische Disposition: Strategien zur optimalen Auftrags- und Bestandsdisposition. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [Hess-08] Hess, G.: Supply-Strategien in Einkauf und Beschaffung: Systematischer Ansatz und Praxisfälle. Gabler, Wiesbaden, 2008.
- [Hopp & Spearman-08] Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory physics. McGraw-Hill/Irwin/Irwin, New York, NY, 2008.
- [Jungwattanakit et al.-08] Jungwattanakit, J.; Reodecha, M.; Chaovalitwongse, P.; Werner, F.: Algorithms for flexible flow shop problems with unrelated parallel machines, setup times, and dual criteria. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 37 (2008), 3-4, S. 354–370.
- [Kemkemer-12] Kemkemer, J.: Analyse und Konzepterstellung zur Verbesserung der Termintreue in der Fertigung. Präsen-

- tion zum Projektbeginn, Qualitäts- und Prozessmanagement TRUMPF Grösch AG, Grösch, 2012.
- [Lödding-08] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Springer, Berlin ; Heidelberg [u.a.] 2008.
- [Lödding-11] Lödding, H.: A manufacturing control model. International Journal of Production Research (2011), S. 1–18.
- [Meißner-09] Meißner, S.: Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung. Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik der Techn. Universität München 2009.
- [Melzer-Ridinger-07] Melzer-Ridinger, R.: Supply-Chain-Management: Prozess- und unternehmensübergreifendes Management von Qualität, Kosten und Liefertreue. Oldenbourg, München, Wien, 2007.
- [Moser & Engell-92] Moser, M.; Engell, S.: A survey of priority rules for FMS scheduling and their performance for the benchmark problem. Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 1992, S. 392–397.
- [Nebi-07] Nebi, T.: Produktionswirtschaft. Oldenbourg, München, Wien, 2007.
- [Nyhuis-99] Nyhuis, P.: Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Springer, Berlin, 1999.
- [Nyhuis-09] Nyhuis, F.: Betriebsanalyse und -verbesserung mit FastPro, Schulungsworkshop, Hannover, 2009.
- [Petermann-96] Petermann, D.: Modellbasierte Produktionsregelung. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [Pinedo-09] Pinedo, M. L.: Planning and Scheduling in Manufacturing and Services. Springer, New York, NY, 2009.
- [Ramasesh-90] Ramasesh, R.: Dynamic job shop scheduling: A survey of simulation research. Omega 18 (1990), 1, S. 43–57.
- [Rinne-08] Rinne, H.: Taschenbuch der Statistik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt a. M., 2008.
- [Schuh-06] Schuh, G.: Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Springer, Berlin, 2006.
- [TRUMPF-13] TRUMPF: Zahlen und Fakten TRUMPF Gruppe, <http://www.trumpf.com/unternehmen/zahlen-und-fakten.html>; Zugriff am 21.01.2013.

- [Tutz-00] Tutz, G.: Die Analyse kategorialer Daten: Anwendungsorientierte Einführung in Logit-Modellierung und kategoriale Regression. Oldenbourg, München, 2000.
- [VDA-94] VDA 5001: Logistische Lieferantenbewertung, Frankfurt, 1994, www.vda.de/de/downloads/110; Zugriff am 16.04.2012.
- [VDI-10] VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Beuth Verlag, Berlin, 2010.
- [Viertl-03] Viertl, R. K. W.: Einführung in die Stochastik: Mit Elementen der Bayes-Statistik und der Analyse unscharfer Information. Springer, Wien u.a., 2003.
- [Wiendahl-97] Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. Hanser, München, 1997.
- [Wiendahl et al.-98] Wiendahl, H.-P.; Nyhuis, P.; Helms, K.: Durchlaufzeit/2 - Die Potentiale liegen auf der Hand! Ergebnisse einer „Engpaßorientierten Logistikanalyse“ in der Leiterplattenindustrie. Werkstattstechnik 88 (1998), 4, S. 159-164.
- [Yu-01] Yu, K.-W.: Terminkennlinie: Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich. VDI-Verl., Düsseldorf, 2001.

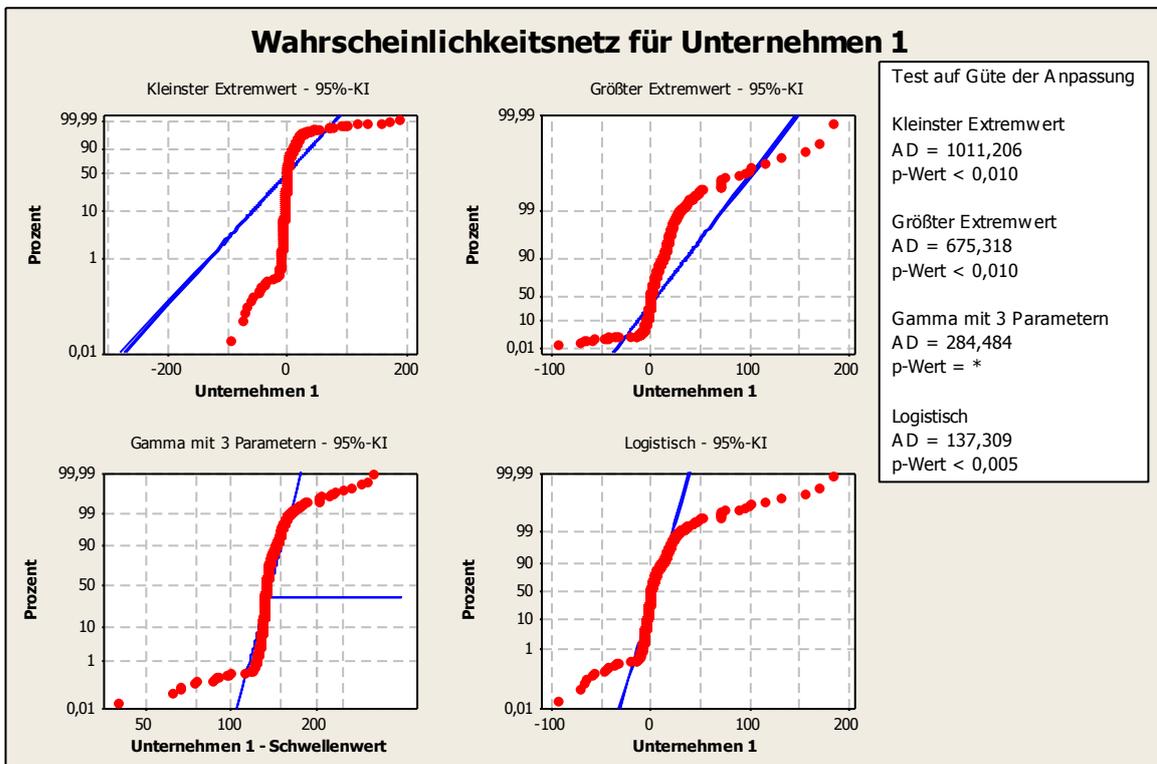
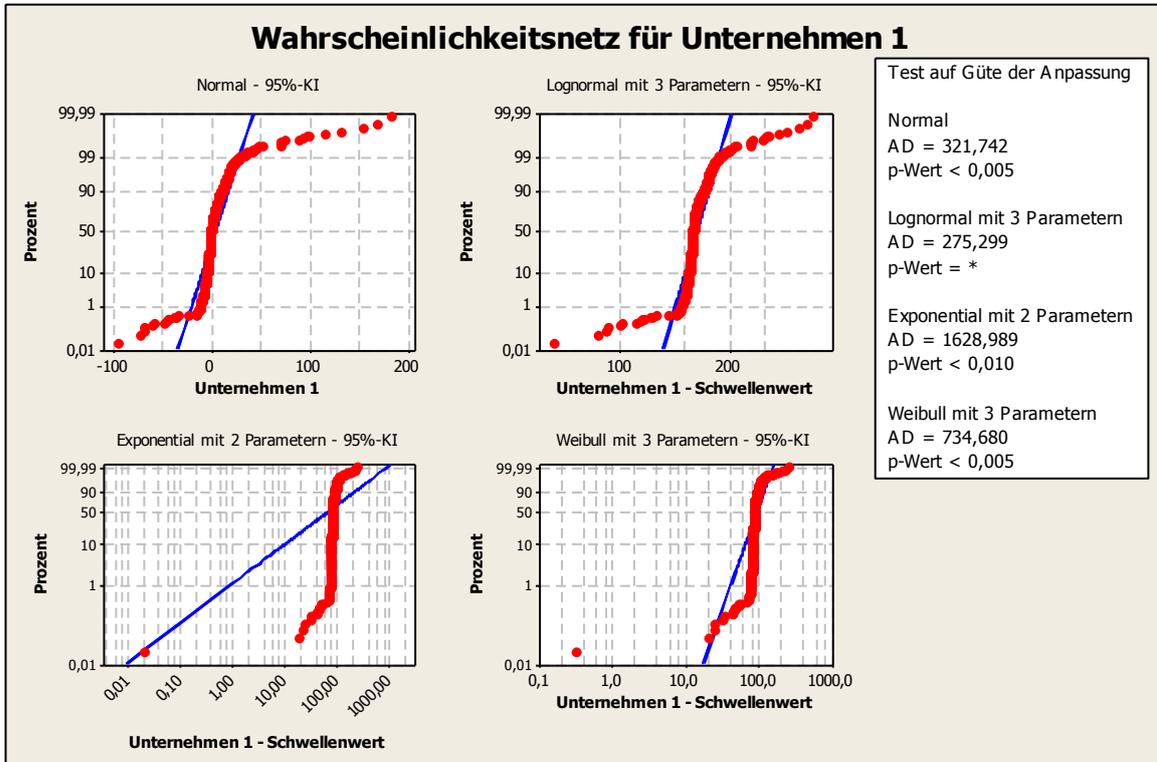
Anhang I

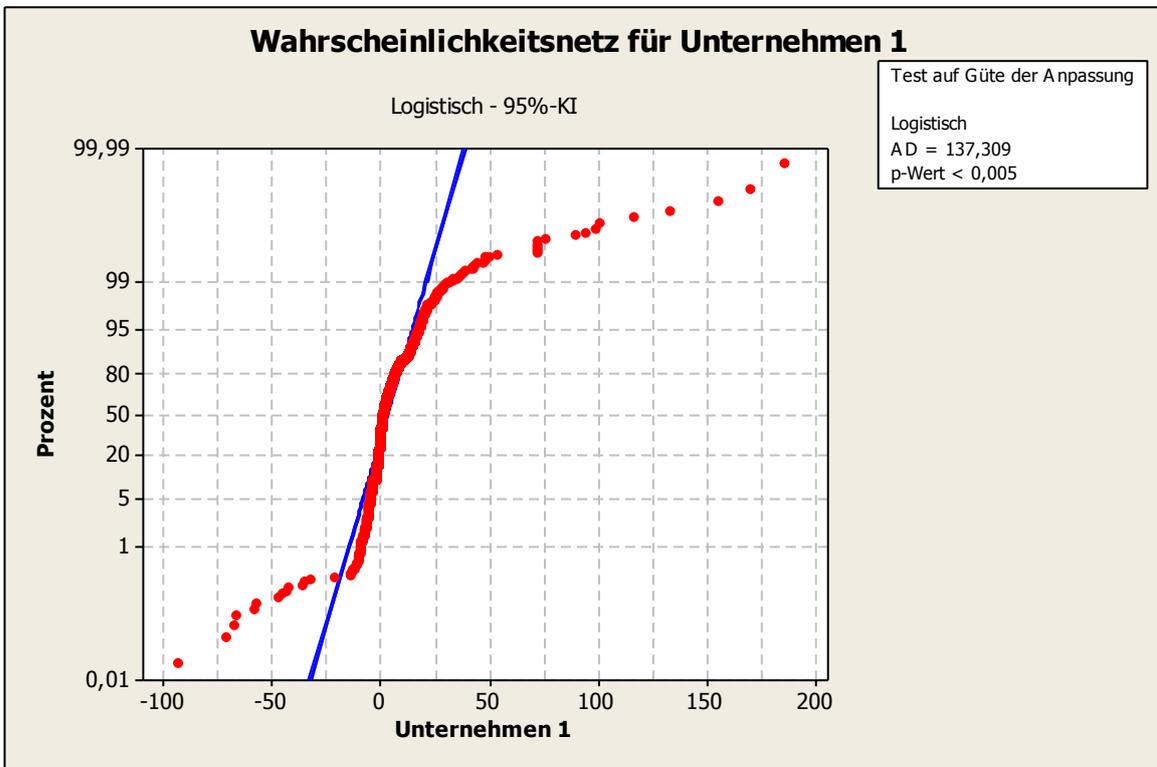
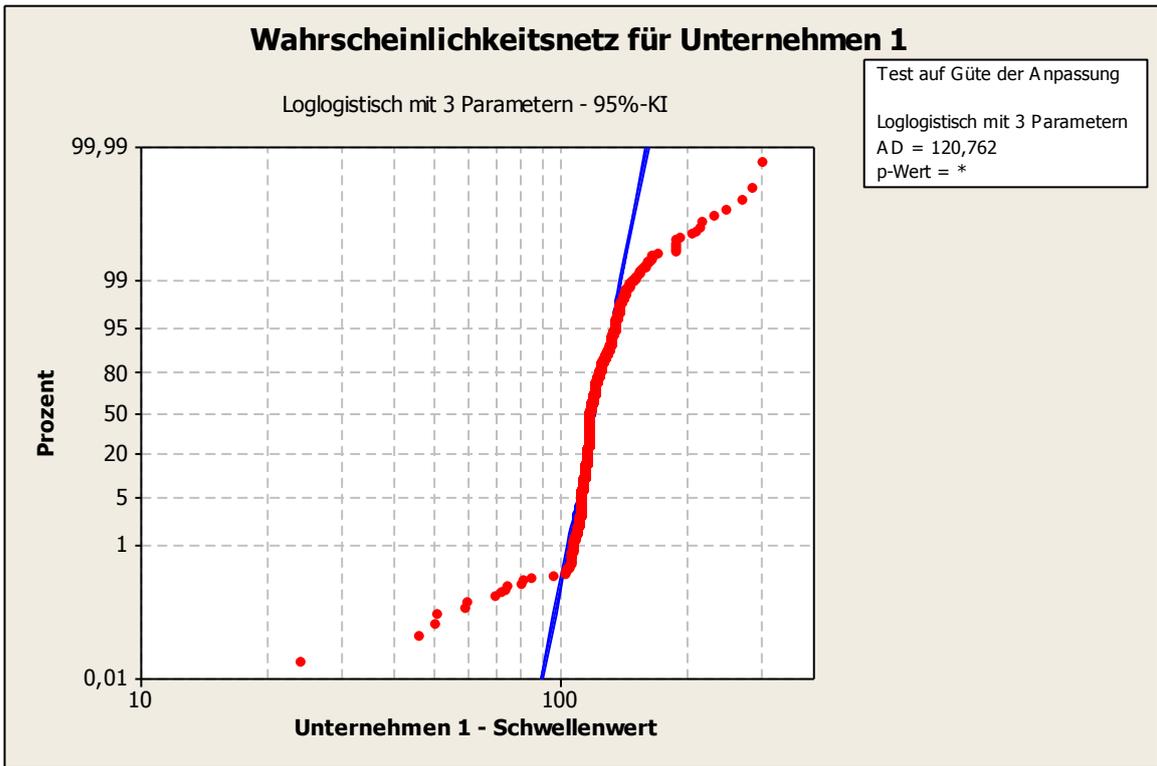
Detaildarstellungen der Faltung von Rückstand, Ist-Leistung, gewichteter Reihenfolgeabweichung und Plan-Leistung zur Terminabweichung im Abgang einer Fertigung



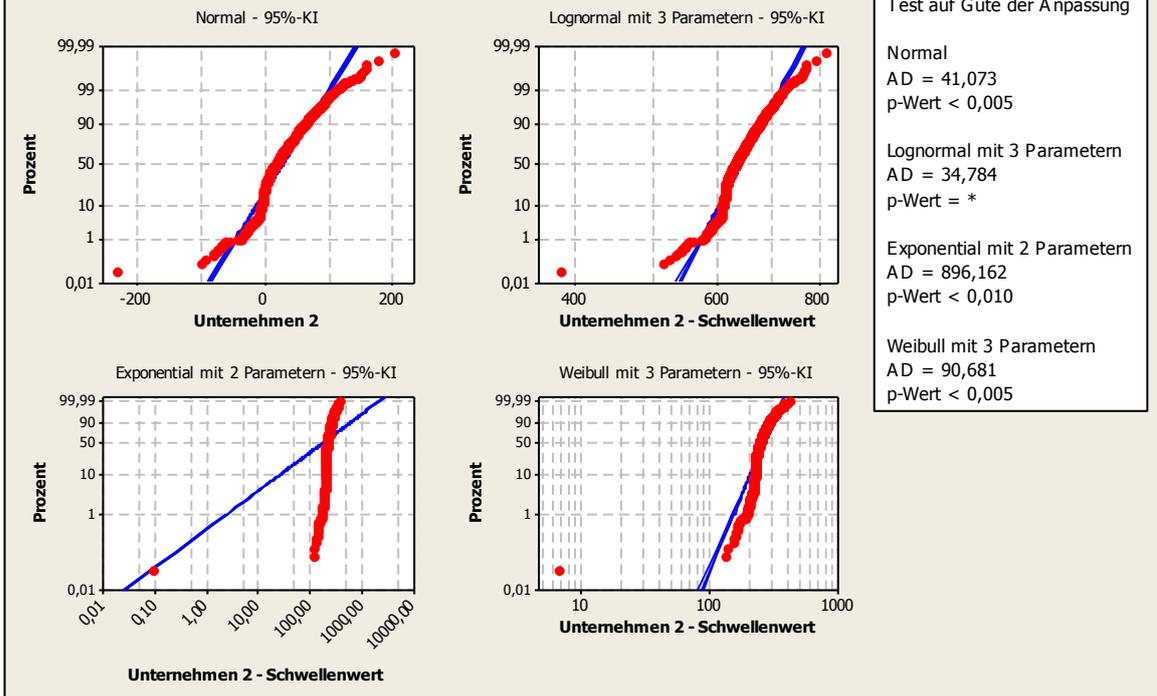
Anhang II

Wahrscheinlichkeitsnetze zur Ermittlung der Verteilungsform der Terminabweichung

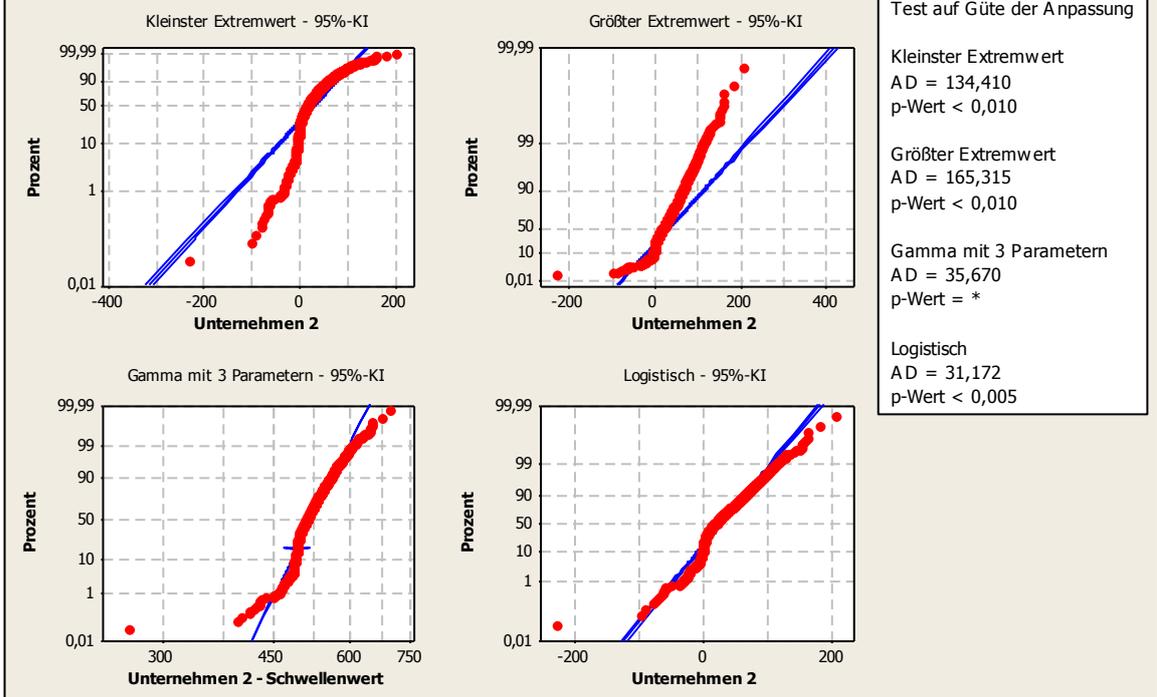




Wahrscheinlichkeitsnetz für Unternehmen 2

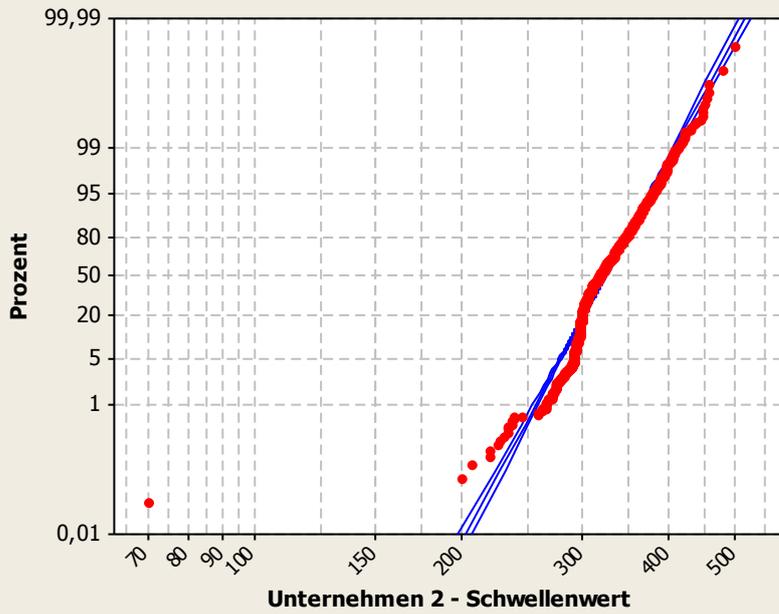


Wahrscheinlichkeitsnetz für Unternehmen 2



Wahrscheinlichkeitsnetz für Unternehmen 2

Loglogistisch mit 3 Parametern - 95%-KI



Test auf Güte der Anpassung

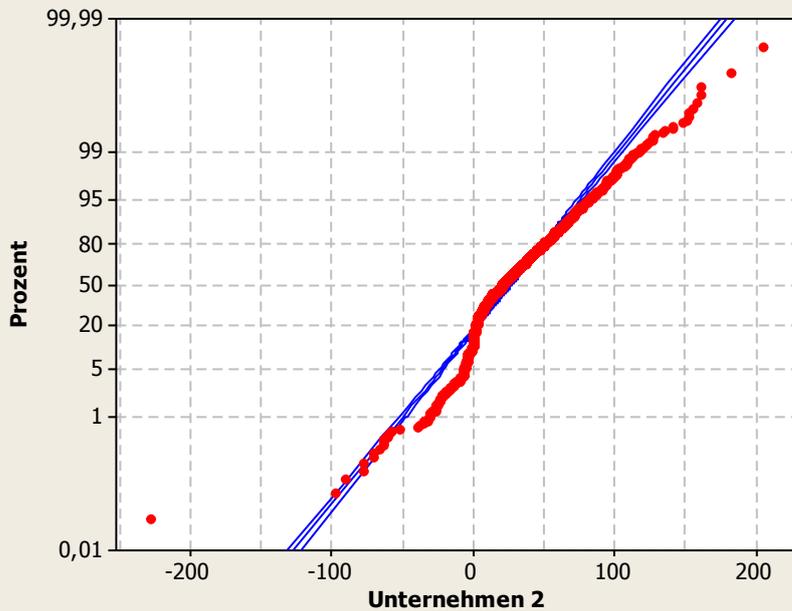
Loglogistisch mit 3 Parametern

AD = 24,408

p-Wert = *

Wahrscheinlichkeitsnetz für Unternehmen 2

Logistisch - 95%-KI



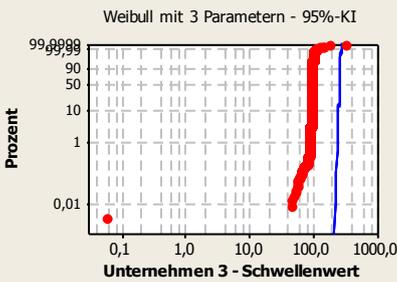
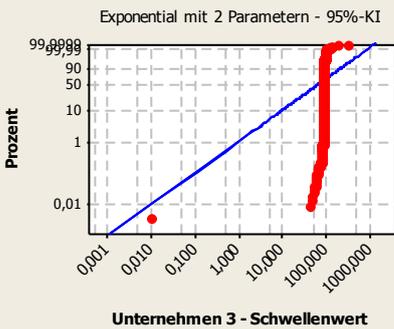
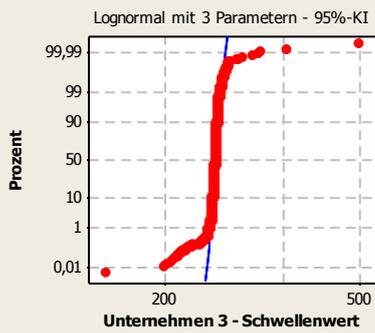
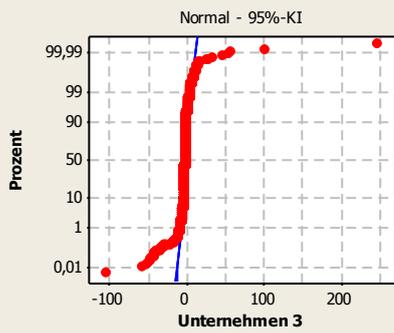
Test auf Güte der Anpassung

Logistisch

AD = 31,172

p-Wert < 0,005

Wahrscheinlichkeitsnetz für Unternehmen 3



Test auf Güte der Anpassung

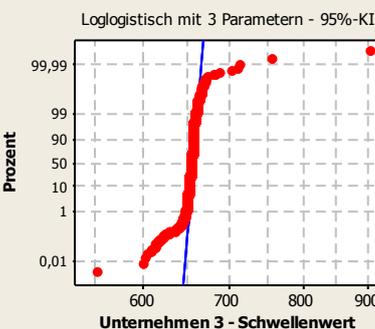
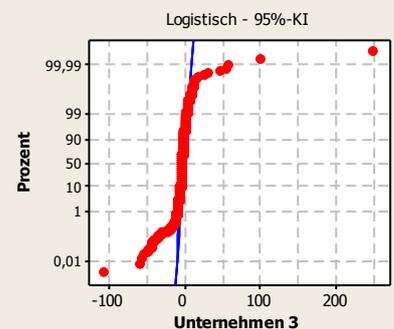
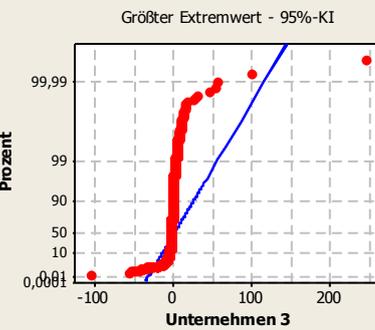
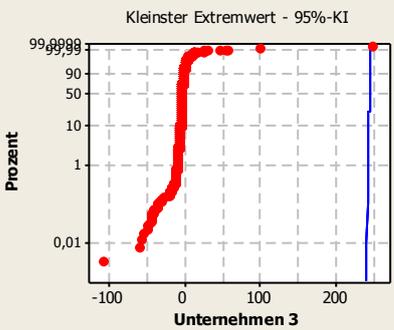
Normal
AD = 1880,833
p-Wert < 0,005

Lognormal mit 3 Parametern
AD = 1710,151
p-Wert = *

Exponential mit 2 Parametern
AD = 10731,149
p-Wert < 0,010

Weibull mit 3 Parametern
AD = 1188918,951
p-Wert < 0,005

Wahrscheinlichkeitsnetz für Unternehmen 3



Test auf Güte der Anpassung

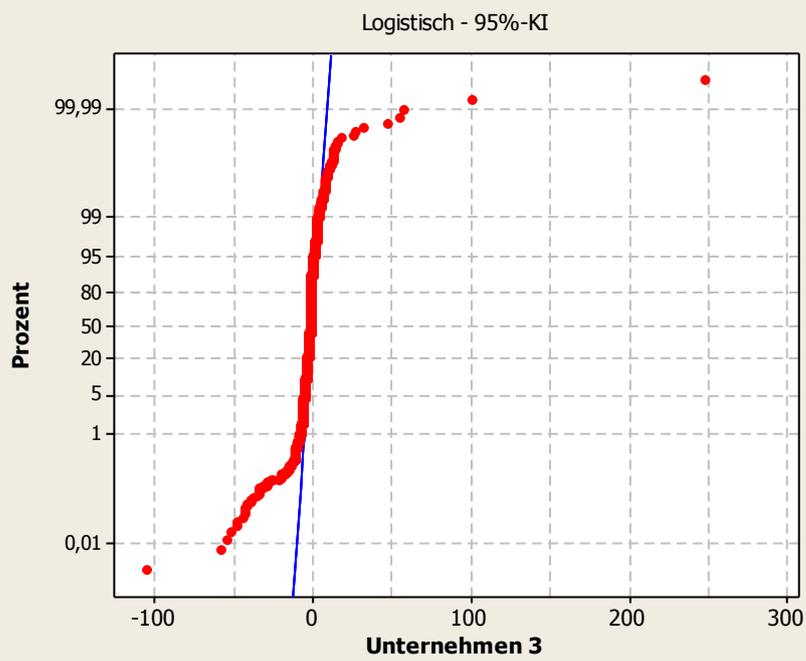
Kleinster Extremwert
AD = 14614981,592
p-Wert < 0,010

Größter Extremwert
AD = 7340,646
p-Wert < 0,010

Logistisch
AD = 446,579
p-Wert < 0,005

Loglogistisch mit 3 Parametern
AD = 447,051
p-Wert = *

Wahrscheinlichkeitsnetz für Unternehmen 3



Test auf Güte der Anpassung

Logistisch
AD = 446,579
p-Wert < 0,005

12258

Anhang III

Modellierung der Termintreue mit Hilfe der Log-Normalverteilung und der Laplace-Verteilung

Bei rechtsschiefen Verteilungen ist eine Erweiterung der logistischen Verteilung um eine logarithmisch verteilte Komponente möglich. Die Verteilungsfunktion der Log-Normalverteilung ist das Integral [Bronstein & Semendjajew-01, S. 780]:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\log x} e^{\left(-\frac{(t-\mu_L)^2}{2\sigma_L^2}\right)} dt \quad \text{für } x > 0 \quad (8.1)$$

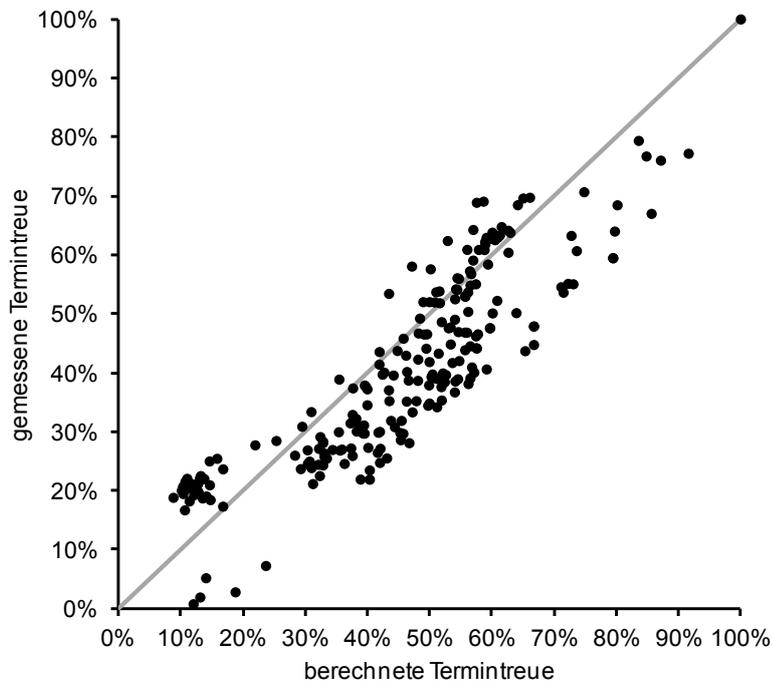
mit $F(x)$: Integral der Dichtefunktion der log-Normalverteilung
 σ_L : logarithmierte Standardabweichung der Stichprobe
 μ_L : logarithmierter Mittelwert der Stichprobe

Das Integral ist nur für Werte von $x > 0$ definiert. In allen anderen Fällen hat es die Lösung null. Die logistische Verteilung und die Berechnungen mit Gleichung 4.8 gelten dann nur auf dem Teilintervall zwischen der unteren Termingrenze, falls diese negativ ist, und dem Wert null. Auf dem positiven Teilintervall bis zur oberen Termingrenze ist die Log-Normalverteilung anwendbar. Liegen sowohl die obere als auch die untere Termintoleranzgrenze im negativen Bereich, ist mittels linearer Transformation der Grenzen in den positiven Bereich und entsprechender Anpassung des Mittelwerts der Verteilung zu arbeiten. Die Standardabweichung bleibt von dieser Transformation unberührt.

In gängigen Tabellenkalkulationsprogrammen ist die Berechnung der Log-Normalverteilung als Standardbefehl vorhanden. Alternativ ist die Lösung des Integrals für verschiedene Werte von μ , σ und x in Verteilungstabellen nachzuschlagen. Das Vorgehen zur Ermittlung der entsprechenden Formel für die Termintreue ist analog dem Vorgehen zur Ermittlung von Gleichung 4.8.

Mit der kombinierten Berechnungsvorschrift aus logistischer und Log-Normalverteilung ist es möglich links- bzw. rechtsschiefe Verteilungen der Terminabweichung im Abgang einer Fertigung in der Berechnung zu kompensieren. Die Log-Normalverteilung bildet dabei die asymmetrische Verteilungskomponente. Eine solche Kompensation zeigt eine deutliche Verbesserung der Annäherung, vor allem in solchen Fällen, in denen sehr

wenige Aufträge sehr stark einseitig vom Mittelwert der Terminabweichung entfernt liegen. Abbildung 64 zeigt den Vergleich zwischen gemessener und berechneter Termintreue bei Unterstellung dieser kombinierten Verteilungsform. Von der unteren Termintoleranzgrenze bis Null gilt eine logistische Verteilung. Die Berechnung geschieht mittels Gleichung 4.8 auf dem Intervall $[TAA_{UG}; 0]$. Hinzuzuzählen ist die Termintreue auf dem positiven Teilintervall, berechnet durch Gleichung 8.1 zwischen null und der oberen Termintoleranzgrenze. Bei einer negativen mittleren Terminabweichung ist deren Betrag einzusetzen, was bei symmetrischen Termintoleranzgrenzen, also $TAA_{UG} = -TAA_{OG}$, unproblematisch ist. Auch bei Berücksichtigung der asymmetrischen Verteilung ist die Streuung gegenüber den gemessenen Ergebnissen recht hoch. Die Berechnungsvorschrift arbeitet mit einer Genauigkeit von ± 8 Prozent (statistischer Fehler). Eine grobe Abschätzung der Termintreue ist damit möglich.



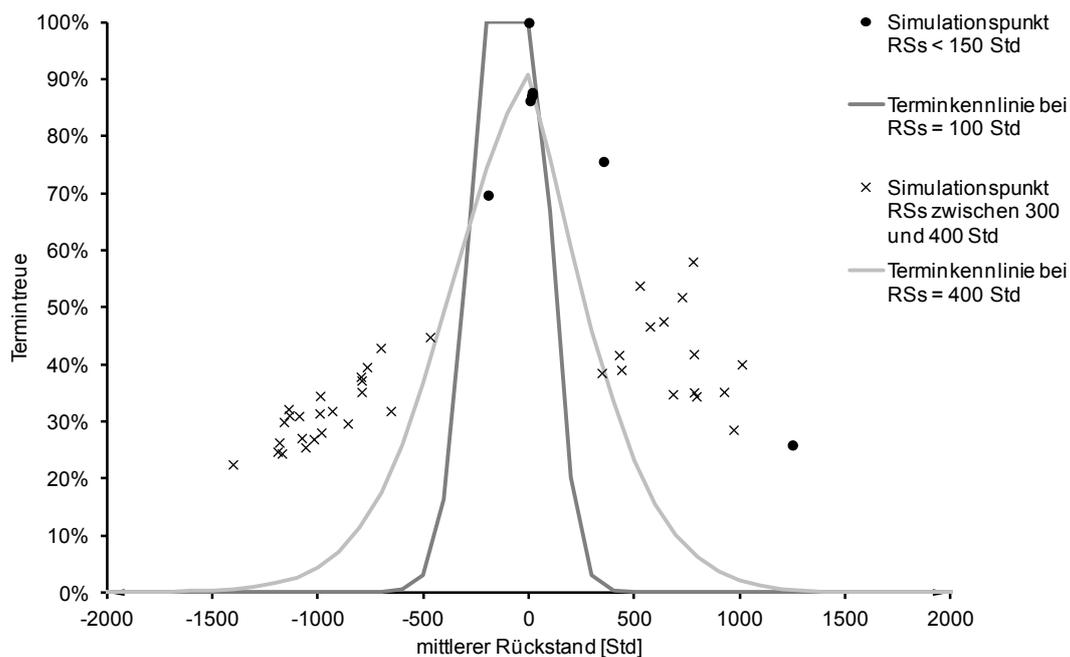
12259

Abbildung 64: Vergleich der gemessenen mit der berechneten Termintreue bei Unterstellung einer kombinierten logistischen und Log-Normalverteilung

Die Kombination von verschiedenen Verteilungsformen zur Berechnung der Termintreue birgt Nachteile. Es ist nicht leicht herauszufinden, ob eine symmetrische oder asymmetrische Verteilung vorliegt. Symmetrische Verteilungsformen werden durch die kombinierte Berechnungsvorschrift schlechter abgeschätzt als mit der logistischen Verteilung. Insgesamt lässt sich nicht erkennen, in welchen Fällen mit einer Log-

Normalverteilung zu kombinieren ist. Insbesondere solche Betriebspunkte, bei denen das ursprüngliche logistische Modell gute Werte erzielt hat, also sehr kleine und sehr große Termintreuwerte, erfahren durch die Kombination eine Verschlechterung der Modellgüte. Mathematisch ergibt sich zusätzlich das Problem, dass bei einer Addition verschiedener Wahrscheinlichkeitsfunktionen Werte größer 100 Prozent möglich sind. Für asymmetrische Termintoleranzintervalle ist eine einfache Kombination zweier Verteilungsformen nicht anwendbar. Die Kombination von logistischer und Log-logistischer Verteilung ist auf Grund dieser Nachteile als Modellansatz nur bedingt geeignet.

Abbildung 65 zeigt die Terminkennlinien für das kombinierte logistische und Log-normalverteilte Modell. Abgetragen ist die Termintreue über dem mittleren Rückstand für verschieden hohe Rückstandsstreuungen. Es ist zu sehen, dass die berechnete Termintreue grundsätzlich zu schnell abfällt. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus Abbildung 32, in denen auch im logistischen Modell mittlere Termintreuwerte systematisch unterbewertet sind.

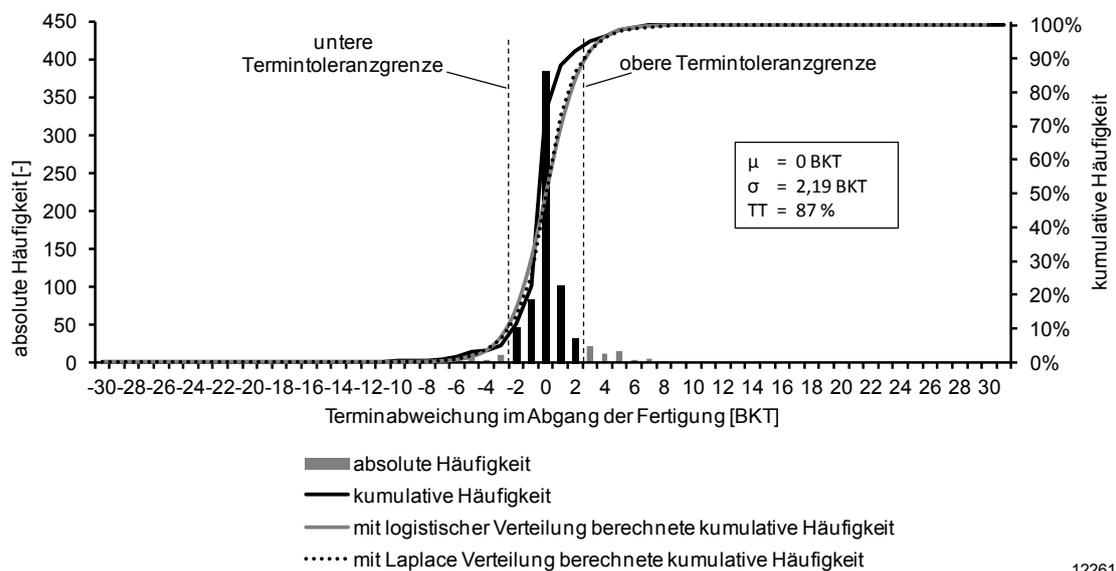


12260

Abbildung 65: Terminkennlinien für das kombinierte logistische und log-normalverteilte Modell

Die logistische Verteilung besitzt eine zu geringe Kurtosis um die Terminabweichung im Abgang korrekt zu bestimmen. Dies zeigt sich daran, dass die kumulative Häufigkeitskurve der logistischen Verteilung im Termintoleranzintervall flacher verläuft als die gemessene kumulative Häufigkeit der Terminabweichung im Abgang.

Eine in der Literatur dokumentierte Standardverteilung mit sehr hoher Kurtosis ist die Laplace-Verteilung. Beim Vergleich zwischen gemessener, mit logistischer Verteilung berechneter und mit Laplace-Verteilung berechneter kumulativer Häufigkeit zeigte sich keine Verbesserung des Berechnungsergebnisses durch Unterstellung der Laplace-Verteilung. Abbildung 66 zeigt den Vergleich für Simulationslauf 23. Die Verteilung dieses Simulationslaufs ist besonders schmalgipflig. Hier sollte die Laplace-Verteilung eine deutliche Verbesserung gegenüber der Berechnung mit logistischer Verteilung liefern. Die beiden kumulativen Häufigkeitskurven liegen aber praktisch übereinander. Eine Verbesserung der Berechnung durch Anwendung der Laplace-Verteilung ist nicht nachweisbar.



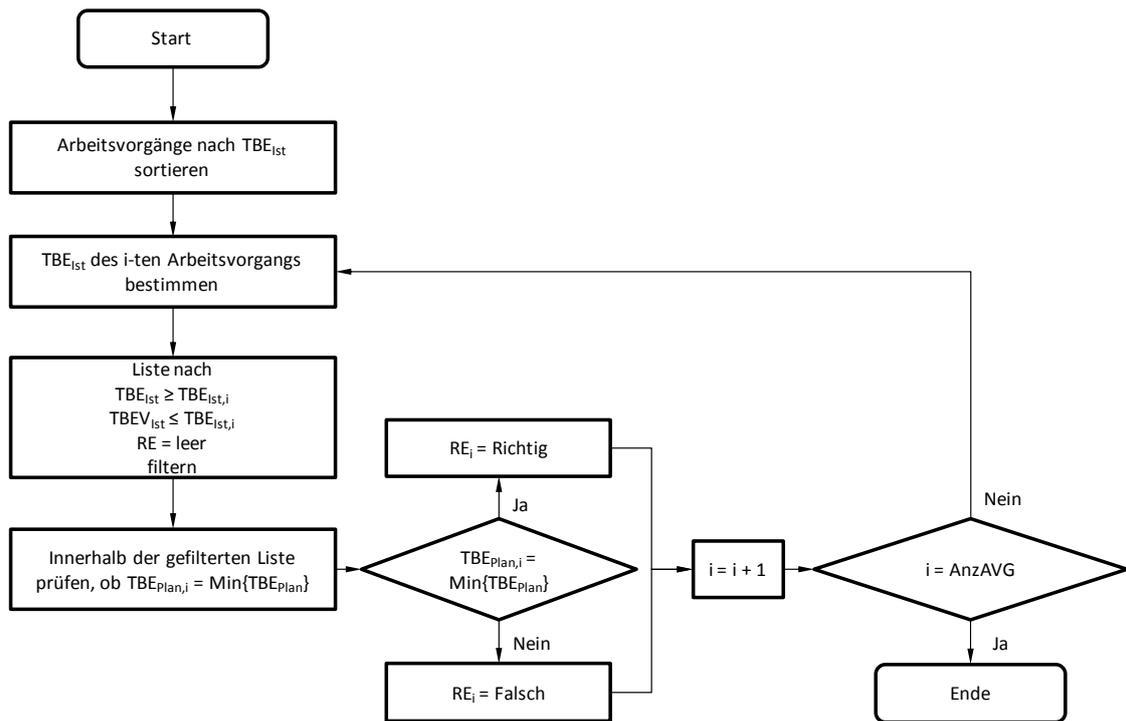
12261

Abbildung 66: Verteilung der Terminabweichung im Abgang von Simulationslauf 23, Berechnung der kumulativen Häufigkeit mit logistischer Verteilung (graue Kurve) und mit Laplace-Verteilung (gepunktete Kurve)

Anhang IV

Algorithmus zur Bestimmung der Reihenfolgedisziplin

Grundlage zur Bestimmung der Reihenfolgedisziplin ist eine Liste mit allen zurückgemeldeten Arbeitsvorgängen eines Arbeitssystems. In der in dieser Arbeit analysierten Fertigung reichen die Mitarbeiter jedes Arbeitssystems die Aufträge nach ihrer Fertigstellung zügig weiter an das nachfolgende Arbeitssystem. Daher kann ein Auftrag zu seinem Rückmeldetermin als dem nachfolgenden Arbeitssystem zugegangen gelten. Nur so ist es möglich zu bestimmen, welche Aufträge zum Zeitpunkt der Auftragsauswahl ebenfalls im Bestand waren. Der Augenblick der Auswahl ist aber nicht dokumentiert. Daher gilt hier der Termin des Bearbeitungsendes als Auswahlzeitpunkt. Die Reihenfolgedisziplin berücksichtigt hier also nur Aufträge, die sich an dem Betriebskalendertag im Bestand befanden, als der untersuchte Auftrag abgegangen ist. Diese Erfassung ist zwar ungenauer als eine Aufzeichnung der Reihenfolgedisziplin direkt am Arbeitssystem, sie ist aber auf Basis einfacher Rückmeldedaten durchführbar. Nachfolgend ist der Algorithmus zur Bestimmung der Reihenfolgedisziplin als Prozessdiagramm dargestellt:



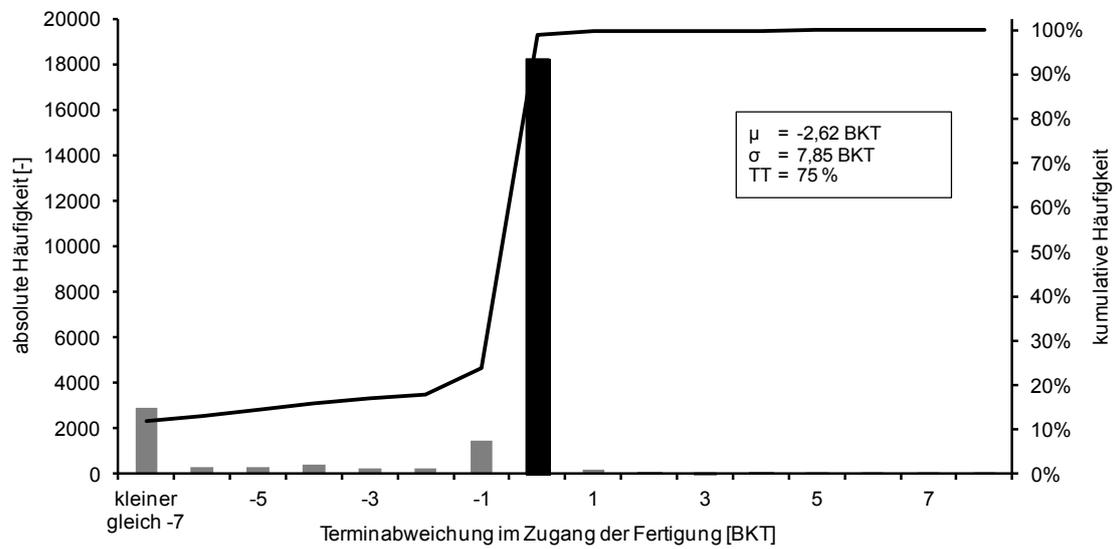
TBE : Termin Bearbeitungsende (Arbeitsvorgang)
 i : Zählindex (Arbeitsvorgänge)
 AnzAVG : Anzahl Arbeitsvorgänge
 TBEV : Termin Bearbeitungsende des Vorgängerarbeitsvorgangs
 RE : Reihenfolgeentscheidung

12262

Abbildung 67: Prozessdiagramm zur Bestimmung der Reihenfolgedisziplin aus Rückmeldedaten

Anhang V

Terminabweichung im Zugang zur Produktionseinheit Fertigung



12263

Abbildung 68: Terminabweichung im Zugang der PE Fertigung

Lebenslauf

Dipl.-Ing. Arif Kuyumcu

Gerstäckerstraße 5
20459 Hamburg
kuyumcu@tu-harburg.de

Name	Kuyumcu
Vorname	Arif
Geburtsdatum	27.12.1983
Geburtsort, -land	Saarbrücken, Deutschland

09.1990 - 08.1994	Albert Weisgerber Grundschule in St. Ingbert
09.1994 - 07.1997	Leibniz Gymnasium in St. Ingbert
09.1997 - 07.2000	Evangelische Schule in Berlin-Frohnau
09.2000 - 07.2001	Golden Valley High School in Merced, CA, USA
09.2001 - 06.2003	Evangelische Schule in Berlin-Frohnau
06.2003	Allgemeine Hochschulreife
07.2003 - 03.2004	Wehrdienst in Celle
04.2004 - 07.2009	Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der TU Berlin Abschluss: Diplom-Ingenieur mit Auszeichnung
08.2009 - 07.2013	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktions- management und -technik der TU Hamburg-Harburg

Schriftenreihe

Band 1

Koch, Jens Bodo: Unterstützung der schiffbaulichen Projektierung durch Repräsentation von Erfahrungswissen, 2004.

Band 2

Meyer, Sven: Flexible Gruppenarbeit in der Auftragsfertigung, 2004.

Band 3

Joswig, Dirk: Untersuchungen zum Zerspanverhalten weicher Elastomerwerkstoffe, 2005.

Band 4

Kerse, Nils: Unterstützung der schiffbaulichen Produktentstehung durch Einsatz von Virtual Reality (VR)-Technologien, 2007

Band 5

Kurzewitz, Mathias: Kompetenzentwicklung als Element erfolgreicher Strategieumsetzung – dargestellt am Beispiel des Schiffbaus, 2007.

Band 6

Davids, Niko: Workflow-Management in Produktentwicklungsprojekten der Investitionsgüterindustrie, 2008.

Band 7

Möller, Carsten: Untersuchungen zum Drehen von gesinterten WC-Co-Hartmetallwalzringen, 2009.

Band 8

Gotsch, Falko: Untersuchungen zum Zerspanverhalten von Elastomerschäumen mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Fertigung von Feder-Dämpfer-Bauteilen, 2009.

Band 9

Neumann, Lutz: Risikomanagement bei der Gestaltung von Unternehmenskooperationen – untersucht am Beispiel der Investitionsgüterindustrie, 2009.

Band 10

Sellmer, Dirk: Untersuchungen zur Verbesserung des Arbeitsergebnisses beim Vollbohren unter besonderer Berücksichtigung der Prozesskräfte und der Spanbildung, 2009.

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.

