

Logistische Modellierung von Chargenarbeitssystemen

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation (Monografie)

von
Michael Winter

aus
Oelde

2024

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Schmidt
Tag der mündlichen Prüfung: 25. April 2024

Wissen schafft Innovation

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Prof. Dr.-Ing. Jan Hendrik Dege

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze

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

Anschrift:

Technische Universität Hamburg

Institut für Produktionsmanagement und -technik

Denickestraße 17

21073 Hamburg

Band 54:

Michael Winter

Logistische Modellierung von Chargenarbeitssystemen

1. Auflage

Hamburg 2024

ISSN 1613-8244

DOI 10.15480/882.9582

Copyright Michael Winter 2024

Kurzfassung

Chargenarbeitssysteme bearbeiten mehrere Aufträge zeitgleich und können daher eine hohe Leistung erreichen. Zugleich führen sie zu hohen Beständen und langen Durchlaufzeiten. Diese Arbeit untersucht den Einfluss von Chargenarbeitssystemen auf die logistischen Zielgrößen. Mit einem deduktiv-experimentellen Vorgehen werden die Leistung und die Durchlaufzeit als Funktion des Bestands abgeleitet. Zudem stellt die Arbeit den Einfluss der Chargenbildung auf die Terminabweichung dar. Die Modellierung ermöglicht es industriellen Unternehmen, sich im Zielkonflikt der logistischen Zielgrößen zu positionieren.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XII
Indizes	XIII
Verzeichnis der Formelzeichen	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	2
1.2 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen	5
2.1 Logistische Zielgrößen	5
2.1.1 Leistung.....	5
2.1.2 Bestand	6
2.1.3 Durchlaufzeit.....	7
2.1.4 Terminabweichung	9
2.2 Durchlaufelement.....	13
2.3 Trichtermodell	14
2.4 Durchlaufdiagramm.....	14
2.5 Produktionskennlinien.....	16
2.5.1 Ideale Produktionskennlinien nach Nyhuis	18
2.5.2 Genäherte Produktionskennlinien nach Nyhuis	23
2.5.3 Genäherte Produktionskennlinien nach Kingman.....	24
3 Bestehende Ansätze zu Chargenarbeitssystemen	26
3.1 Chargenarbeitssysteme	26
3.2 Produktionskennlinien von Chargenarbeitssystemen.....	28
3.2.1 Grundsätzliche Anwendbarkeit	28
3.2.2 Praktische Anwendbarkeit.....	30
3.3 Ablaufplanung von Chargenprozessen.....	31
3.4 Forschungsbedarf	34
4 Beschreibung von Chargenarbeitssystemen	35
4.1 Durchlaufelement.....	35
4.2 Trichtermodell	39
4.3 Durchlaufdiagramm.....	40
4.4 Logik der Chargenbildung.....	40
4.5 Reihenfolge der Chargenbearbeitung	41

4.6 Einheiten.....	42
5 Modellierung von Chargenarbeitssystemen mit einem Chargentyp.....	43
5.1 Ideale Produktionskennlinie.....	43
5.1.1 Definition des Idealprozesses.....	43
5.1.2 Maximal mögliche Leistung.....	44
5.1.3 Idealer Mindestbestand.....	46
5.1.4 Minimale Durchlaufzeit.....	57
5.1.5 Chargenfüllgrad.....	59
5.1.6 Verhalten des Arbeitssystems im Unterlastbereich.....	60
5.1.7 Vergleich von Chargen- und Standardarbeitssystemen.....	64
5.1.8 Evaluierung.....	65
5.2 Genäherte Produktionskennlinie.....	73
5.2.1 Auswahl des Modellierungsansatzes.....	73
5.2.2 Einflussgrößen.....	75
5.2.3 Parametrisierte Näherungskennlinie.....	76
5.2.4 Evaluierung.....	77
5.3 Terminabweichung.....	81
5.3.1 Rückstand.....	81
5.3.2 Reihenfolgeabweichung.....	84
6 Modellierung von Chargenarbeitssystemen mit mehreren Chargentypen.....	86
6.1 Erweiterung der idealen Produktionskennlinie.....	86
6.1.1 Maximal mögliche Leistung.....	86
6.1.2 Idealer Mindestbestand.....	87
6.2 Genäherte Produktionskennlinie.....	91
6.2.1 Einflussgrößen.....	91
6.2.2 Parametrisierte Näherungskennlinie.....	96
6.2.3 Erweiterung der Modellierung.....	97
6.2.4 Evaluierung.....	103
6.3 Terminabweichung.....	110
6.3.1 Rückstand.....	110
6.3.2 Reihenfolgeabweichung.....	111
7 Leitlinien für die Gestaltung von Chargenarbeitssystemen.....	117
8 Schlussbetrachtung.....	119
Literaturverzeichnis.....	121

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 2.1 Zeitpunkt und Zeitspannen der Terminabweichung	10
Abbildung 2.2 Arbeitsvorgangsbezogenes Durchlaufelement	13
Abbildung 2.3 Trichtermodell	14
Abbildung 2.4 Durchlaufdiagramm.....	15
Abbildung 2.5 Betriebszustände der Kennlinien	17
Abbildung 2.6 Durchlaufdiagramm des idealen Fertigungsprozesses.....	19
Abbildung 2.7 Bestandsverlauf des idealen Fertigungsprozesses.....	19
Abbildung 2.8 Idealer Fertigungsprozess mit Transport.....	20
Abbildung 2.9 Konstruktion idealer Produktionskennlinien	22
Abbildung 2.10 Bestandteile der Leistungskennlinie	23
Abbildung 3.1 Analyse von Chargenarbeitssystemen durch Vergleichsprozesse.....	29
Abbildung 3.2 Produktionskennlinie eines Chargenarbeitssystems.....	31
Abbildung 3.3 Verfahren der Ablaufplanung von Chargenprozessen	32
Abbildung 4.1 Durchlaufelement von Chargenarbeitssystemen.....	37
Abbildung 4.2 Trichtermodell von Chargenarbeitssystemen	39
Abbildung 4.3 Durchlaufdiagramm von Chargenarbeitssystemen.....	40
Abbildung 5.1 Detailliertes Durchlaufdiagramm von Chargenarbeitssystemen	46
Abbildung 5.2 Idealer Mindestbestand durch Bearbeitung	48
Abbildung 5.3 Idealer Mindestbestand durch Transport	49
Abbildung 5.4 Auswirkung des Zugangs zum Chargenarbeitssystem	51
Abbildung 5.5 Bestandsflächen der Komplettierung.....	52
Abbildung 5.6 Berechnung des Mindestbestands durch Komplettierung	54
Abbildung 5.7 Mindestbestand der Komplettierung mit einem Chargentyp.....	55
Abbildung 5.8 Leistungskennlinie mit einem Chargentyp.....	57
Abbildung 5.9 Ideale Durchlaufzeitkennlinie mit einem Chargentyp.....	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5.10 Idealer Verlauf des Chargenfüllgrads	60
Abbildung 5.11 Auswirkung der Chargenbildung auf das Durchlaufdiagramm	61
Abbildung 5.12 Kritischer idealer Mindestbestand	62
Abbildung 5.13 Schematischer Vergleich der Chargenfreigabe	63
Abbildung 5.14 Einordnung des Chargenarbeitssystems	64
Abbildung 5.15 Simulationsmodell für Chargenarbeitssysteme	66
Abbildung 5.16 Grundlegende Simulationsparameter	68
Abbildung 5.17 Ideale Kennlinie mit einem Chargentyp	69
Abbildung 5.18 Durchlaufzeit mit einem Chargentyp	71
Abbildung 5.19 Weitere ideale Kennlinien mit einem Chargentyp	72
Abbildung 5.20 Kennlinienvergleich	74
Abbildung 5.21 Genäherte Kennlinie mit einem Chargentyp	78
Abbildung 5.22 Weitere genäherte Kennlinien mit einem Chargentyp	80
Abbildung 5.23 Rückstand bei einem Chargentyp	82
Abbildung 5.24 Auswirkung der Chargenbildung auf den Rückstand	83
Abbildung 5.25 Reihenfolgeabweichung mit einem Chargentyp	84
Abbildung 6.1 Komplettierungsbestand bei mehreren Chargentypen	88
Abbildung 6.2 Leistungskennlinie mit mehreren Chargentypen	90
Abbildung 6.3 Verteilung der Aufträge auf die Chargentypen	92
Abbildung 6.4 Streuung der Zwischenankunftszeit durch zufällige Ankunft	94
Abbildung 6.5 Auswirkung schwankender Prozesszeiten	95
Abbildung 6.6 Komplettierung bei hohen Auslastungen und Pufferbeständen	97
Abbildung 6.7 Genäherte Kennlinie mit mehreren Chargentypen	104
Abbildung 6.8 Durchlaufzeit mit mehreren Chargentypen	105
Abbildung 6.9 Weitere genäherte Kennlinien mit mehreren Chargentypen I	106
Abbildung 6.10 Weitere genäherte Kennlinien mit mehreren Chargentypen II	107
Abbildung 6.11 Weitere genäherte Kennlinien mit mehreren Chargentypen III	108

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 6.12 Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung am Beispiel	112
Abbildung 6.13 Reihenfolgeabweichung bei zufälliger Ankunft.....	115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Reihenfolgeabweichung	12
Tabelle 5.1 Ideale Kennlinie mit einem Chargentyp	70
Tabelle 5.2 Annahmen der Modellierungsansätze	75
Tabelle 5.3 Genäherte Kennlinie mit einem Chargentyp.....	79
Tabelle 6.1 Kennzahlenvergleich mit mehreren Typen.....	89
Tabelle 6.2 Kennzahlenvergleich.....	102
Tabelle 6.3 Genäherte Kennlinie mit mehreren Chargentypen.....	105
Tabelle 6.4 Reihenfolgeabweichungen von Chargenarbeitssystemen	113

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Bedeutung
AnzAuf	Anzahl Aufträge
AVG	Arbeitsvorgang
BKT	Betriebskalendertag
Ch	Chargenarbeitssystem
Durchlaufzeit	Arbeitsvorgangsdurchlaufzeit
FIFO	First In - First Out
LP	lineare Programmierung
ME	Mengeneinheit
MILP	gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung
Min	Minute
PKL	Produktionskennlinie
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
Std	Stunde

Indizes

Zeichen	Bedeutung
Ch	Chargenarbeitssystem
FG	Füllgrad
ideal	unter der Voraussetzung idealer Prozessbedingungen
m	Mittelwert bzw. mittlere Größe
mg	mittlere gewichtete Größe
max	maximal
min	minimal
res	resultierender
s	Standardabweichung
v	Variationskoeffizient
verf	verfügbar

Verzeichnis der Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	%	Auslastung
AA	-	Auftragsanteil des Chargentyps
AB	Std	Abgang
AFF	-	Anzahl freier Felder
AT	-	Anzahl Chargentypen
AC	-	Chargenanteil des Chargentyps
AS	-	Auflagestundenanteil des Chargentyps
B	Std	Bestand
BA	AnzAuf	Bestand
BI	Std	idealer Mindestbestand
BIA	AnzAuf	idealer Mindestbestand
BKAP	Std/BKT	Betriebsmittelkapazität
c	-	Variationskoeffizient
CGA	AnzAuf	Chargengröße
FBA	AnzAuf · BKT	Bestandsfläche
FG	-	Flussgrad
KAP	Std/BKT	Kapazität
L	Std/BKT	Leistung
LA	AnzAuf/BKT	Leistung
LC	Chargen/BKT	Leistung
P	BKT	Länge des Betrachtungszeitraums
PKAP	Std/BKT	Personalkapazität
PR	Std	Prioritätsrang
PRA	-	Prioritätsrang in AnzAuf
R	BKT	Reichweite
RA	Std	Reihenfolgeabweichung

Verzeichnis der Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
RAA	-	Reihenfolgeabweichung in AnzAuf
Rg	Std	Rang
RgA	-	Rang in AnzAuf
RS	Std	Rückstand
RSA	AnzAuf	Rückstand
TAA	BKT	Terminabweichung Abgang
TAB	BKT	Bearbeitungsanfang Auftrag
TAE	BKT	Bearbeitungsende Auftrag
TAZ	BKT	Terminabweichung im Zugang
TBA	BKT	Bearbeitungsanfang (AVG)
TBE	BKT	Bearbeitungsende (AVG)
TBEV	BKT	Bearbeitungsende Vorgänger (AVG)
TKA	BKT	Komplettierungsanfang
TLA	BKT	Liegeanfang
TLE	BKT	Liegeende
TTA	BKT	Transportanfang
TRA	BKT	Rüstanfang
TVA	BKT	Vorbereitungsanfang
t_e	Min/ME	Einzelzeit
t_r	Min	Rüstzeit
t_p	Min	Prozesszeit
x	ME	Losgröße
ZAU	Std	Auftragszeit
ZAZ	Std	Zwischenankunftszeit
ZDA	BKT	Auftragsdurchlaufzeit
ZDF	BKT	Durchführungszeit
ZDF	BKT	Durchlaufzeit

Verzeichnis der Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
ZK	Std	Komplettierungszeit
ZLNB	Std	Nachliegezeit
ZLNT	Std	technologische Nachliegezeit
ZLVB	Std	Liegezeit vor Bearbeitung
ZP	Std	Prozesszeit
ZTR	Std	Transportzeit
ZUE	BKT	Übergangszeit
ZV	Std	Vorbereitungszeit
ZW	Std	Wartezeit
α	-	Streckfaktor

1 Einleitung

Das Fertigungsprinzip der Werkstattfertigung ist in den deutschen Produktionsstandorten auch mit den Trends zur Automatisierung und zur Digitalisierung weit verbreitet [SCHI21, S. 12; LÖDD20, S. 14; NYHU18, S. 8]. Die Werkstattfertigung, die auch als funktionale Fertigung oder Fertigung nach dem Verrichtungsprinzip bezeichnet wird, teilt die Arbeitsplätze nach dem Bearbeitungsverfahren auf. Die Aufträge durchlaufen die Werkstattfertigung von Verrichtungsprinzip zu Verrichtungsprinzip. Dieses Vorgehen ermöglicht eine flexible Fertigung von Produkten mit wechselnden Bearbeitungsreihenfolgen [WIEN19, S. 44].

Eine Regelgröße der Werkstattfertigung ist der Umlaufbestand [LÖDD16, S. 37]. Mit zunehmendem Bestand steigt die Auslastung der Arbeitssysteme. Zugleich erhöht sich mit zunehmendem Bestand die Durchlaufzeit der Aufträge, da die Aufträge an den Arbeitssystemen eine Warteschlange durchlaufen [WIEN19, S. 44]. Eine hohe Auslastung einerseits und geringe Durchlaufzeiten andererseits erfordern eine gegenläufige Einstellung des Bestands und können nicht zeitgleich erreicht werden (Dilemma der Ablaufplanung) [GUTE72, S. 216].

Unternehmen positionieren die Werkstattfertigungen häufig mit einem hohen Bestand und damit hohen Auslastungen und langen Durchlaufzeiten. So zeigen Stommel und Kunz am Beispiel eines metallverarbeitenden Betriebs, dass der Anteil der Bearbeitungszeit zehn Prozent der Durchlaufzeit beträgt [STOM73, S. 11 f.]. Wiendahl ordnet ein, dass in gegenwärtigen Produktionsumgebungen der Werkstattfertigung häufig ein Bearbeitungszeitanteil von unter zehn Prozent vorliegt [WIEN19, S. 45].

Ein geeignetes Werkzeug für die bewusste Positionierung von Produktionssystemen im Spannungsfeld der logistischen Zielgrößen sind Produktionskennlinien. Die Produktionskennlinien, die auch als logistische Kennlinien oder Betriebskennlinien bezeichnet werden, stellen die Zielgrößen der Auslastung, Leistung, Durchlaufzeit, Übergangszeit und Reichweite als Funktion des Bestands dar [NYHU12, S. 36 ff.]. Die aktive Wahl eines Betriebspunkts und die nachfolgende Einstellung des Umlaufbestands ermöglicht eine strategische Ausrichtung der Arbeitssysteme. Zudem zeigen die Produktionskennlinien mögliche Rationalisierungspotenziale auf [NYHU12, S. 92]. Die umfangreiche wissenschaftliche Literatur und die Aufnahme der Produktionskennlinien in die

VDI-Richtlinie 3633 stellen die Bedeutung der Produktionskennlinien als Werkzeug für die Untersuchung von Produktionssystemen heraus [NYHU12, S. 54].

Bei Chargenarbeitssystemen stößt die Theorie der Produktionskennlinien jedoch an die Modellierungsgrenze. Als Chargenarbeitssystem definiert diese Arbeit ein Arbeitssystem, das mehrere Werkstücke parallel bearbeitet. Dafür sammelt das Arbeitssystem Werkstücke mit identischen Produktionsparametern und vereint diese zu einer Charge. Nach der parallelen Bearbeitung der Charge werden die Werkstücke wieder vereinzelt und an die nachfolgenden Arbeitssysteme weitergegeben. Ein Beispiel für ein Chargenarbeitssystem in einer Werkstattfertigung ist ein Ofen.

Das Theoriedefizit zeigen Schneider et al. an einem Beispiel auf. Sie untersuchen die logistischen Rationalisierungspotenziale eines Fertigungsbereichs mit 61 Arbeitssystemen [SCHN02, S. 15-17]. Die Durchlaufzeitanalyse stellt heraus, dass ein Chargenarbeitssystem einen relativen Anteil von 38,1 Prozent an der Gesamtdurchlaufzeit des Fertigungsbereichs bedingt. Das Chargenarbeitssystem ist daher ein elementarer Stellhebel für eine Reduzierung der Gesamtdurchlaufzeit.

Mit den bestehenden Modellierungsansätzen ist es heute nicht möglich, Chargenarbeitssysteme in einer Werkstattfertigung zu untersuchen und auszulegen. Die Leistung, Auslastung, Durchlaufzeit, Reichweite und Terminabweichung können nicht als Funktion des Bestands des Arbeitssystems abgeschätzt werden. Somit ist es einerseits aus erkenntnistheoretischer Sicht von Bedeutung, Chargenarbeitssysteme detailliert zu analysieren. Andererseits ermöglicht eine Modellierung der Chargenarbeitssysteme die durchgängige Anwendung der Kennlinientheorie in der industriellen Praxis.

1.1 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die logistischen Zielgrößen von Chargenarbeitssystemen zu modellieren. Dazu werden vier Teilziele verfolgt:

Teilziel 1: Modellierung der Leistung von Chargenarbeitssystemen

Die Leistung von Standardarbeitssystemen ergibt sich vorrangig durch die Personalkapazität und die Maschinenkapazität der Arbeitssysteme. Bei Chargenarbeitssystemen ist die Anzahl der Werkstücke, die parallel bearbeitet werden kann, eine weitere Einflussgröße. Weiterhin benötigen Chargenarbeitssysteme größere Bestände als Standardarbeitssysteme, da beispielsweise durch das

Sammeln der Werkstücke zusätzlicher Bestand gebunden ist. Erstes Teilziel ist es daher, die Leistung von Chargenarbeitssystemen in Abhängigkeit vom Bestand zu modellieren.

Teilziel 2: Modellierung der Durchlaufzeit von Chargenarbeitssystemen

Das Chargenarbeitssystem ist in der Werkstattfertigung verortet, sodass Aufträge unkoordiniert am Arbeitssystem eintreffen und gesammelt werden. Neben der Bestandswirkung hat auch das Sammeln der Werkstücke zu einer Charge eine Auswirkung auf die Durchlaufzeit. Die Chargenarbeitssysteme benötigen weitere Zeitanteile, wie beispielsweise die Chargenvorbereitungszeit, die eine Steigerung der Durchlaufzeit verursachen. Das zweite Teilziel ist daher, die Durchlaufzeit von Chargenarbeitssystemen in Abhängigkeit vom Bestand zu modellieren.

Teilziel 3: Modellierung der Terminabweichung von Chargenarbeitssystemen

Die Terminabweichung eines Auftrags ergibt sich im Allgemeinen durch die Terminabweichung aus Rückstand und die Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung. Chargenarbeitssysteme erzeugen durch den stoßweisen Abgang der Chargen Rückstandsschwankungen. Chargenarbeitssysteme, die verschiedene Typen bearbeiten, führen zudem zu Reihenfolgeabweichungen, da sie Aufträge einzelner Chargentypen vorziehen oder verzögern. Drittes Teilziel ist entsprechend, die rückstandsbedingte und reihenfolgebedingte Terminabweichung von Chargenarbeitssystemen zu modellieren.

Teilziel 4: Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Auslegung von Chargenarbeitssystemen in der industriellen Praxis

Beruhend auf der Modellierung der ersten drei Teilziele sollen Handlungsempfehlungen für die Auslegung von Chargenarbeitssystemen entwickelt werden. Dies soll es Unternehmen ermöglichen, die wichtigsten Ergebnisse in die Praxis zu überführen.

2 Grundlagen

Kapitel 2 führt zunächst grundlegende logistische Größen und Zusammenhänge ein (Abschnitt 2.1). Darauf aufbauend beschreiben die Abschnitte 2.2 bis 2.4 zentrale grafische Hilfsmittel zur Untersuchung von Arbeits- und Produktionssystemen. Das Durchlaufelement (Abschnitt 2.2) hat den kleinsten Betrachtungsumfang und stellt die Zeitanteile eines Arbeitsvorgangs (AVG) im Verlauf dar. Das Trichtermodell (Abschnitt 2.3) und das Durchlaufdiagramm (Abschnitt 2.4) zeigen die Wechselwirkung verschiedener Aufträge und die zeitliche Abhängigkeit der Aufträge. Das Durchlaufdiagramm verdeutlicht zudem die Beziehungen zwischen den logistischen Zielgrößen. Abschnitt 2.5 führt in die Kennlinientheorie ein. Produktionskennlinien stellen logistische Zielgrößen wie beispielsweise die Leistung oder die Durchlaufzeit in Abhängigkeit vom Bestand dar. Die idealen Produktionskennlinien (Abschnitt 2.5.1) beruhen auf mathematischen und grafischen Ableitungen. Sie beschreiben den idealen Prozess, also ein Referenzsystem mit umfassenden Annahmen, exakt. Die genäherten Produktionskennlinien nach Nyhuis (Abschnitt 2.5.2) sowie Kingman (Abschnitt 2.5.3) lösen diese Annahmen auf und sind praxisnäher.

Zugunsten einer besseren Lesbarkeit wurden die Formelzeichen in den zitierten Quellen durch die in der Arbeit verwendeten Formelzeichen ersetzt.

2.1 Logistische Zielgrößen

Die logistischen Zielgrößen sind von hoher Bedeutung. Sie können nach logistischer Qualität und wirtschaftlicher Qualität [WIEN97, S. 137] bzw. der Logistikleistung und den Logistikkosten unterschieden werden. Typische Beispiele für die Logistikleistung sind die Lieferzeit und die Terminabweichung. Ein Beispiel für die Logistikkosten ist die Auslastung. Zudem ist eine Einteilung in interne und externe logistische Zielgrößen möglich [LÖDD16, S. 22]. Die folgenden Unterabschnitte leiten die für die Arbeit relevanten logistischen Zielgrößen ein. Diese sind interne Zielgrößen der Logistikleistung und -kosten.

2.1.1 Leistung

Die Leistung eines Arbeitssystems beschreibt das Verhältnis des Abgangs eines Bezugszeitraums und der Länge des Bezugszeitraums [WIEN97, S. 102]:

$$L_m = \frac{AB}{P} \quad 2.1$$

L_m	mittlere Leistung [Std/BKT]
AB	Abgang im Bezugszeitraum [Std]
P	Länge des Bezugszeitraums [BKT]

Der Abgang im Bezugszeitraum ergibt sich aus der Summe der im Bezugszeitraum zurückgemeldeten Arbeitsinhalte [NYHU12, S. 26]. Die Leistung kann in unterschiedlichen Einheiten gemessen werden. In der Werkstattfertigung werden vorwiegend die Einheit ‚Stunden (Std) pro Betriebskalendertag (BKT)‘ oder die Einheit ‚Anzahl Aufträge (AnzAuf) pro Betriebskalendertag‘ genutzt. Die Leistung wird in der Praxis auch als Durchsatz oder Ausbringung benannt [LÖDD16, S. 39].

Die Auslastung ist als Quotient der mittleren Leistung und der maximal möglichen Leistung definiert [vgl. NYHU12, S. 27; vgl. BECH84, S. 63]:

$$A_m = \frac{L_m}{L_{\max}} \quad 2.2$$

A_m	mittlere Auslastung [-]
L_m	mittlere Leistung [Std/BKT]
L_{\max}	maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

Die maximal mögliche Leistung entspricht dem Minimum der verfügbaren Betriebsmittelkapazität und der nutzbaren Personalkapazität [NYHU12, S. 66].

2.1.2 Bestand

Der Bestand zu einem bestimmten Zeitpunkt ergibt sich zu [LÖDD16, S. 61]:

$$B(T_n) = \sum_{T=T_1}^{T_n} ZU(T) - \sum_{T=T_1}^{T_n} AB(T) + B_{\text{Anf}}(T_1) \quad 2.3$$

$B(T_n)$	Bestand an Betriebskalendertag T_n [Std]
$ZU(T)$	Arbeitsinhalt der an Betriebskalendertag T zugehenden Aufträge [Std]
$AB(T)$	Arbeitsinhalt der an Betriebskalendertag T abgehenden Aufträge [Std]
$B_{\text{Anf}}(T_1)$	Anfangsbestand zu Beginn von Betriebskalendertag T_1 [Std]
T_1	erster Tag des Untersuchungszeitraums [BKT]
T_n	Tag, für den der Bestand berechnet wird [BKT]

Der Anfangsbestand steigt um die Arbeitsinhalte der zugehenden Aufträge und fällt um die Arbeitsinhalte der abgehenden Aufträge. Da die Bestände an Arbeitssystemen und in Produktionsbereichen zumeist schwanken, werden logistische Analysen vorwiegend mit gemittelten Beständen durchgeführt.

Der mittlere Bestand im Zeitintervall von T_0 bis T_1 beträgt [NYHU12, S. 27]:

$$B_m = \frac{\int_{T_0}^{T_1} ZU(T)dT - \int_{T_0}^{T_1} AB(T)dT}{T_1 - T_0} \quad 2.4$$

B_m	mittlerer Bestand (Vorgabestunden) [Std]
$ZU(T)$	Zugang (kumulierter Arbeitsinhalt über der Zeit) [Std]
$AB(T)$	Abgang (kumulierter Arbeitsinhalt über der Zeit) [Std]
T_0	Beginn des Bezugszeitraums [BKT]
T_1	Ende des Bezugszeitraums [BKT]

Für die Praxis zeigt sich, dass die Analyse von diskreten Zeitabschnitten eine ausreichende Abschätzung des Bestands ermöglicht. Rückmeldungen zum Bestand sind beispielsweise zum Ende einer Arbeitsschicht oder eines Arbeitstages üblich. Die Abschätzung des mittleren Bestands erfolgt in diesem Fall als Mittelwert der Rückmeldewerte [vgl. NYHU12, S. 28].

2.1.3 Durchlaufzeit

Die Durchlaufzeit kann für einen gesamten Auftrag oder für einen Arbeitsvorgang eines Auftrags ermittelt werden. Folglich wird zwischen der Auftragsdurchlaufzeit (Gleichung 2.5 und 2.6) und der Arbeitsvorgangsdurchlaufzeit (Gleichung 2.7 und 2.8) unterschieden.

Die Auftragsdurchlaufzeit beschreibt die Zeitspanne zwischen der Freigabe und dem Bearbeitungsende des Auftrags [vgl. WIEN97, S. 46; LÖDD16, S. 32]:

$$ZDA = TAE - TAB \quad 2.5$$

ZDA	Auftragsdurchlaufzeit [BKT]
TAE	Bearbeitungsende Auftrag [BKT]
TAB	Bearbeitungsanfang Auftrag [BKT]

Die Auftragsdurchlaufzeit entspricht zugleich der Summe der Arbeitsvorgangsdurchlaufzeiten eines Auftrags [vgl. BECH79, S. 14; WIEN97, S. 46]:

$$ZDA = \sum_{i=1}^n ZDL_i \quad 2.6$$

ZDA	Auftragsdurchlaufzeit [BKT]
ZDL _i	Durchlaufzeit des Arbeitsvorgangs i [BKT]
n	Anzahl der Arbeitsvorgänge [-]

Die Arbeitsvorgangsdurchlaufzeit, die nach Abschnitt 2.1.3 verkürzt als Durchlaufzeit bezeichnet wird, definiert die Zeitdauer vom Bearbeitungsende des Vorgängers bis zum Bearbeitungsende des betrachteten Vorgangs [BECH84, S. 9]:

$$ZDL = TBE - TBEV \quad 2.7$$

ZDL	Durchlaufzeit [BKT]
TBE	Bearbeitungsende [BKT]
TBEV	Bearbeitungsende Vorgänger [BKT]

Die Auftragsvorgangsdurchlaufzeit umfasst zwei Zeitanteile, die Übergangszeit und die Durchführungszeit [NYHU12, S. 23]:

$$ZDL = ZUE + ZDF \quad 2.8$$

ZDL	Durchlaufzeit [BKT]
ZUE	Übergangszeit [BKT]
ZDF	Durchführungszeit [BKT]

Die Übergangszeit umfasst die Liegezeit nach der Bearbeitung des Vorgängers, die Transportzeit und die Liegezeit vor der Bearbeitung des aktuellen Vorgangs. Im Regelfall ist die Liegezeit vor der Bearbeitung der größte Anteil der Übergangszeit [WIEN97, S. 38]. Da in der Praxis der Endzeitpunkt des Liegens häufig nicht erfasst wird, wird die Übergangszeit vorwiegend als Differenz der Durchlaufzeit und der Durchführungszeit bestimmt [NYHU12, S. 23]. Abbildung 2.2 zeigt die Zeitanteile im Auftragsdurchlauf.

Die Durchführungszeit ist der Quotient der Auftragszeit und der verfügbaren Kapazität [vgl. WIEN97, S. 41]:

$$ZDF = \frac{ZAU}{Kap_{\text{verf}}} \quad 2.9$$

ZDF	Durchführungszeit [BKT]
ZAU	Auftragszeit [Std]
KAP _{verf}	verfügbare Kapazität [Std/BKT]

Sie beschreibt, wie lange die Bearbeitung eines Auftrags in Betriebskalendertagen dauert.

Die Auftragszeit ist die Vorgabezeit, die einem Arbeitsvorgang an einem Arbeitssystem zugeordnet ist [vgl. WIEN97, S. 41; LÖDD16, S. 56]:

$$ZAU = \frac{x \cdot t_e + t_r}{60 \text{ min/Std}} \quad 2.10$$

ZAU	Auftragszeit [Std]
x	Losgröße [ME]
t _e	Einzelzeit (Vorgabezeit) je Werkstück [min/ME]
t _r	Rüstzeit [min]

Die Auftragszeit wird durch die Losgröße, die Einzelzeit und die Rüstzeit bestimmt. Die Angabe der Auftragszeit erfolgt vorwiegend in Stunden.

Eine weitere logistische Zielgröße, die eng mit der Durchlaufzeit verbunden ist, ist die Reichweite. Die Reichweite beschreibt, wie lange der am Arbeitssystem vorliegende Bestand das Arbeitssystem beanspruchen wird [LÖDD16, S. 60]. Für große Betrachtungszeiträume entspricht die Reichweite in etwa der mittleren gewichteten Durchlaufzeit [WIEN97, S. 102].

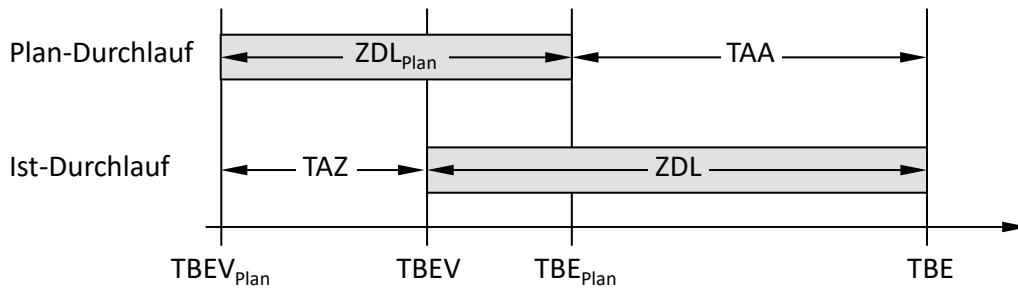
2.1.4 Terminabweichung

Die Terminabweichung ist als die Abweichung zwischen Ist-Terminen und Plan-Terminen definiert [DOMB88, S. 48; VDI78, S. 178]. Für die Terminabweichung im Abgang ergibt sich [vgl. DOMB88, S. 49]:

$$TAA = TBE - TBE_{\text{Plan}} \quad 2.11$$

TAA	Terminabweichung Abgang [BKT]
TBE	(Ist-) Termin Bearbeitungsende [BKT]
TBE _{Plan}	Plan-Termin Bearbeitungsende [BKT]

Die Berechnung der Terminabweichung im Zugang erfolgt analog. Abbildung 2.1 stellt die elementaren Zeitpunkte und Zeitspannen der Terminabweichung dar.



TBE : Termin Bearbeitungsende	TAA : Terminabweichung Abgang
TBEV : Termin Bearbeitungsende Vorgänger	TAZ : Terminabweichung Zugang
ZDL : Durchlaufzeit	Plan : Planwert einer Kenngröße

Abbildung 2.1 Zeitpunkt und Zeitspannen der Terminabweichung [in Anlehnung an DOMB88, S. 49; NYHU12, S. 24; YU01, S. 18; LÖDD16, S. 33]

Die Plandurchlaufzeit und die Durchlaufzeit ergeben sich nach Gleichung 2.7 die Terminabweichung im Abgang und die Terminabweichung im Zugang nach Gleichung 2.11. Ob ein Auftrag im Mittel verlangsamt oder beschleunigt wurde, zeigt der Vergleich der Plan-Durchlaufzeit und der Ist-Durchlaufzeit oder alternativ der Terminabweichung im Zugang und der Terminabweichung im Abgang. Diese Veränderung ist als die relative Terminabweichung definiert [WIEN97, S. 108].

Der Detaillierungsgrad der Untersuchung der Terminabweichung ist veränderbar. So kann die Betrachtung von einzelnen Arbeitsvorgängen oder auch von Aufträgen erfolgen [YU01, S. 18].

Die Terminabweichung kann positive und negative Werte annehmen. Positive Terminabweichungen beschreiben eine Verspätung, negative Terminabweichungen bedeuten eine verfrühte Fertigstellung [LÖDD16, S. 33].

Die Basis für die Steuerung der Terminabweichung ist die Kenntnis der Einflüsse auf die Terminabweichung. Diese sind der Rückstand und die Reihenfolgeabweichung [LÖDD16, S. 80]. Die folgenden zwei Abschnitte definieren diese Größen.

Rückstand

Der Rückstand eines Arbeitssystems entspricht zu jedem Zeitpunkt der Differenz des geplanten Abgangs und des tatsächlichen Abgangs [PETE96, S. 65 f.]:

$$RS(t) = AB_{Plan}(t) - AB_{Ist}(t) \quad 2.12$$

$RS(t)$	Rückstand zum Zeitpunkt t [Std]
$AB_{Plan}(t)$	Plan-Abgang zum Zeitpunkt t [Std]
$AB_{Ist}(t)$	Ist-Abgang zum Zeitpunkt t [Std]

Der Rückstand einer Arbeitsstation oder eines Fertigungsbereichs kann positiv oder negativ sein. Bei einem positiven Rückstand wurde weniger gefertigt als geplant. Bei einem negativen Rückstand wurde mehr gefertigt als geplant.

Der Quotient aus dem Rückstand und der Leistung ergibt die Terminabweichung, die auf den Rückstand zurückzuführen ist [YU01, S. 41; LÖDD16, S. 83]:

$$TAA_{RS,i} = \frac{RS(TBE_{Plan,i})}{L_{Ist}} \quad 2.13$$

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

Reihenfolgeabweichung

Die Reihenfolgeabweichung beschreibt die Differenz des Ist-Rangs und des Plan-Rangs eines Auftrags. Die Plan-Ränge geben die Auftragsreihenfolge aus der Planung wieder. Ist-Ränge ergeben sich durch die ausgeführte Bearbeitungsreihenfolge [LÖDD14, S. 4; LÖDD16, S. 85 f.]:

$$RA_i = PR_{Ist,i} - PR_{Plan,i} \quad 2.14$$

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

Tabelle 2.1 vergleicht die Angabe der Reihenfolgeabweichung in den Einheiten ‚Anzahl Aufträge‘ und ‚Vorgabestunden‘.

2 Grundlagen

Tabelle 2.1 Reihenfolgeabweichung [LÖDD16, S. 86]

Auftrag	Plan-Rang [-]	Ist-Rang [-]	RAA _i [-]	Auftragszeit [Std]	Plan-Rang [Std]	Ist-Rang [Std]	RA _i [Std]
2020	1	1	0	1	1	1	0
4080	2	3	1	3	4	5	1
5030	3	4	1	3	7	8	1
6020	4	2	-2	1	8	2	-6
		Σ	0			Σ	-4
						Mittelwert	-1

RAA Reihenfolgeabweichung (in Anzahl Aufträgen)

RA Reihenfolgeabweichung (in Vorgabestunden)

Die dimensionslosen Spalten beschreiben die Ränge und Reihenfolgeabweichungen in ‚Anzahl Aufträge‘. Die Spalten mit der Einheit Stunden ermitteln die Reihenfolgeabweichung in ‚Vorgabestunden‘. Der Mittelwert der Reihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen ist null, da für jeden Auftrag, der vorgezogen wird, ein anderer verzögert wird. Die Betrachtung der Auftragszeiten ermöglicht Mittelwerte, die von Null verschieden sind. Werden kleine Aufträge vorgezogen und große verspätet, entsteht beispielsweise eine negative mittlere Reihenfolgeabweichung [LÖDD16, S. 86].

Die Terminabweichung, die aus der Reihenfolgeabweichung resultiert, kann analog zu dem Vorgehen der Terminabweichung aus Rückstand ermittelt werden. Sie ist der Quotient der Reihenfolgeabweichung und der Leistung [KUYU13, S. 43]:

$$TAA_{RA,i} = \frac{RA_i}{L_{Plan}} \quad 2.15$$

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

RA_i Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [Std]

L_{Plan} Plan-Leistung [Std/BKT]

Die gesamte Terminabweichung entspricht der Summe der Terminabweichung aus Rückstand und der Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung [vgl. KUYU13, S. 46]:

$$TAA_i = TAA_{RS,i} + TAA_{RA,i} \quad 2.16$$

TAA_i Terminabweichung von Auftrag i [BKT]

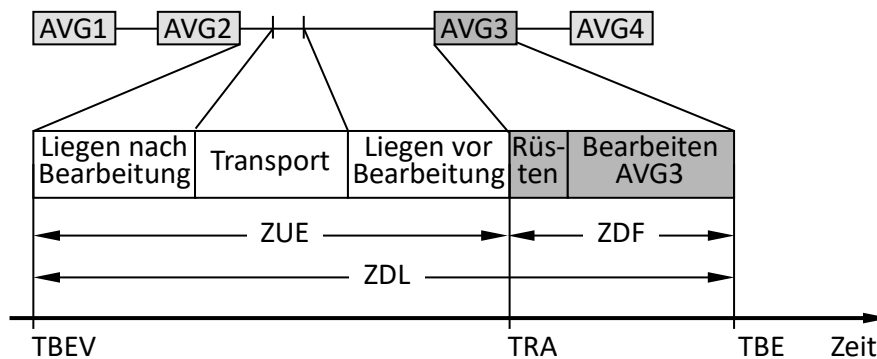
$TAA_{RS,i}$ Terminabweichung aus Rückstand von Auftrag i [BKT]

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

Die Zerlegung der Terminabweichung in die Terminabweichung aus Rückstand und die Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung ist in gleicher Weise in der Einheit ‚Anzahl Aufträge‘ möglich.

2.2 Durchlaufelement

Das Durchlaufelement in Abbildung 2.2 beschreibt die Ablaufschritte eines Arbeitsvorgangs. Der skizzierte Auftrag durchläuft insgesamt vier Arbeitsvorgänge (AVG1 bis AVG4). Der dritte Arbeitsvorgang wird detailliert.



TBEV : Bearbeitungsende Vorgänger	ZDL = TBE - TBEV : Durchlaufzeit
TRA : Rüstanfang	ZUE = TRA - TBEV : Übergangszeit
TBE : Bearbeitungsende	ZDF = TBE - TRA : Durchführungszeit

Abbildung 2.2 Arbeitsvorgangsbezogenes Durchlaufelement [in Anlehnung an NYHU12, S. 22]

Nach dem Bearbeitungsende des Arbeitsvorgangs zwei liegt der Auftrag auf der Ablieferfläche des Arbeitssystems und wartet auf den Transport („Liegen nach Bearbeitung“). Im zweiten Schritt wird der Auftrag zur Anlieferfläche des Arbeitsvorgangs drei transportiert („Transport“) und reiht sich dort in der Regel in eine Warteschlange ein. Der Auftrag wartet, bis die vorherigen Aufträge der Warteschlange abgearbeitet sind („Liegen vor Bearbeitung“). Hat das Arbeitssystem freie Kapazitäten, erfolgt zunächst das Rüsten und im Anschluss die Bearbeitung am Arbeitssystem. Die ersten drei Zeitanteile werden zur Übergangszeit zusammengefasst. Die Zeitanteile für das Rüsten und die Bearbeitung ergeben die Durchführungszeit. Die Summe der Übergangszeit und der Durchführungszeit ist die Durchlaufzeit [NYHU12, S. 21 f.].

2.3 Trichtermodell

Das Trichtermodell stellt Arbeitssysteme als Trichter dar (Abbildung 2.3). Dabei kann ein Arbeitssystem einen Einzelarbeitsplatz, eine Kostenstelle oder eine gesamte Fertigung umfassen [NYHU12, S. 25].

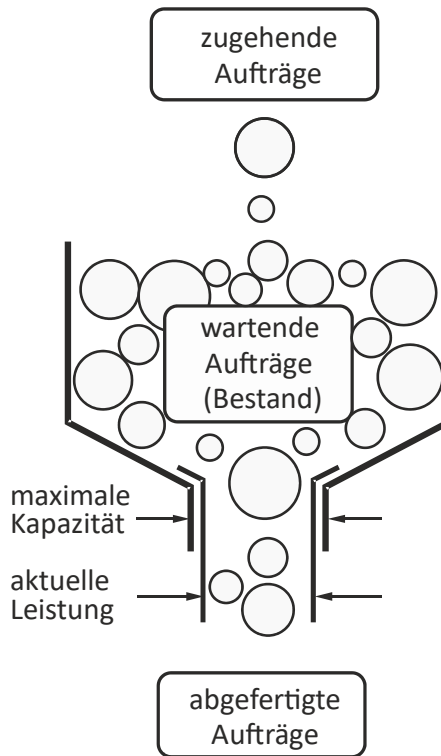


Abbildung 2.3 Trichtermodell [in Anlehnung an WIEN97, S. 84; BECH84, S. 51]

Die zugehenden Aufträge werden als Kreise dargestellt. Die Fläche der Kreise zeigt die Auftragszeit der Aufträge. Die zugehenden Aufträge bilden zusammen mit den wartenden Aufträgen und dem Auftrag in Bearbeitung den Bestand. Nach der Bearbeitung fließen die Aufträge aus dem Trichter ab. Der Auslass des Trichters verkörpert die Leistung des Arbeitssystems. Diese kann bis zur maximal möglichen Leistung gesteigert werden [NYHU12, S. 25].

2.4 Durchlaufdiagramm

Durchlaufdiagramme beschreiben den Durchlauf von Aufträgen im Zeitverlauf. Sie können Arbeitssysteme von einem einzelnen Arbeitsplatz bis zur gesamten Produktion beschreiben [WIEN97, S. 83-109]. Aus der Zugangs- und der

Abgangskurve im Durchlaufdiagramm in Abbildung 2.4 kann die Leistung, die Belastung und der Bestand ermittelt werden [BECH84, S. 38].

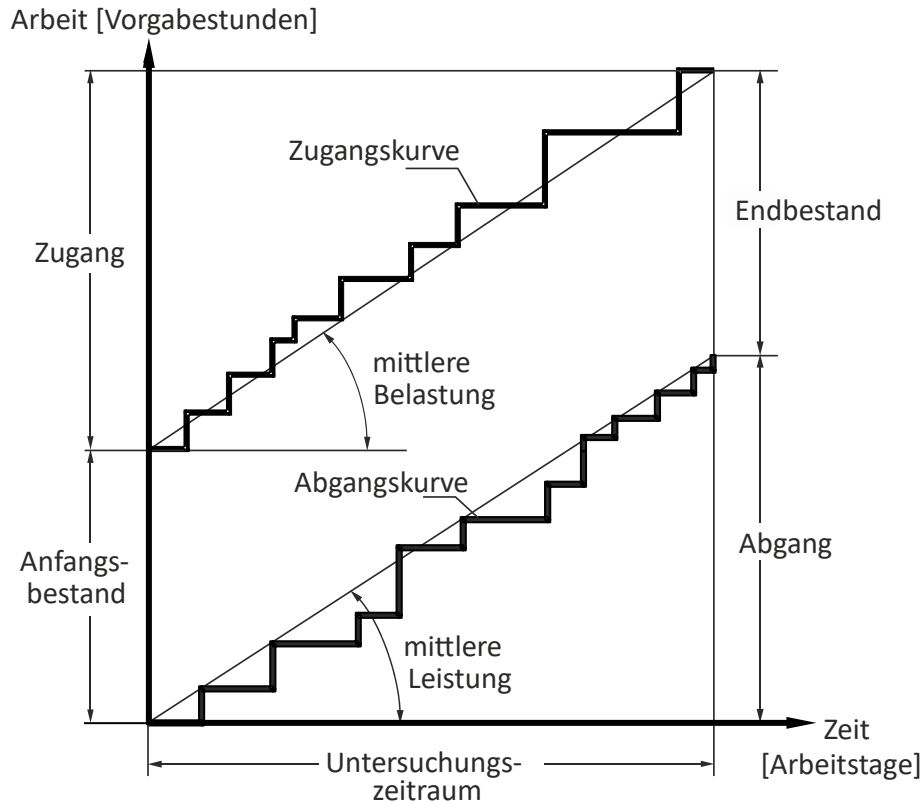


Abbildung 2.4 Durchlaufdiagramm [in Anlehnung an WIEN97, S. 84; BECH84, S. 36]

Der vertikale Abstand des Zugangs und Abgangs entspricht zu jedem Zeitpunkt dem Bestand am Arbeitssystem [BECH84, S. 38]. Die mittlere Steigung der Zugangskurve bildet die mittlere Belastung und die mittlere Steigung der Abgangskurve die mittlere Leistung ab. Die Darstellung ist in verschiedenen Einheiten, wie beispielsweise ‚Vorgabestunden‘ oder ‚Anzahl Aufträge‘ möglich. Der horizontale Abstand wird als Reichweite bezeichnet [WIEN97, S. 85-95].

Aus den trigonometrischen Zusammenhängen im Durchlaufdiagramm leitet sich die Trichterformel ab [BECH84, S. 39]:

$$R_m = \frac{B_m}{L_m} \quad 2.17$$

R_m	mittlere Reichweite [BKT]
B_m	mittlere Bestand [Std]
L_m	mittlere Leistung [Std/BKT]

Die mittlere Reichweite entspricht dem Quotienten des mittleren Bestands und der mittleren Leistung. Die Reichweite und in der Folge auch die Durchlaufzeit können durch ein geringeres Bestandsniveau oder eine größere Leistung reduziert werden. Da die Leistung in der industriellen Praxis durch die Nachfrage festgelegt wird, ergibt sich der mittlere Bestand als wesentliche Regelgröße für die Reichweite und die Durchlaufzeit [vgl. LÖDD16, S. 62].

2.5 Produktionskennlinien

Produktionskennlinien stellen logistische Zielgrößen als Funktion des Bestands dar [NYHU12, S. 36]. Im Gegensatz zu dem Durchlaufdiagramm und dem Trichtermodell bilden die Produktionskennlinien nicht nur einen Betriebszustand ab, sondern eine Vielzahl von möglichen Betriebspunkten [NYHU12, S. 37]. Dies ermöglicht es, Wirkzusammenhänge zwischen den logistischen Größen darzustellen und Verbesserungspotenziale abzuleiten [NYHU12, S. 36].

Abbildung 2.5 zeigt exemplarisch die Zuordnung von drei Betriebszuständen zu einer logistischen Kennlinie.

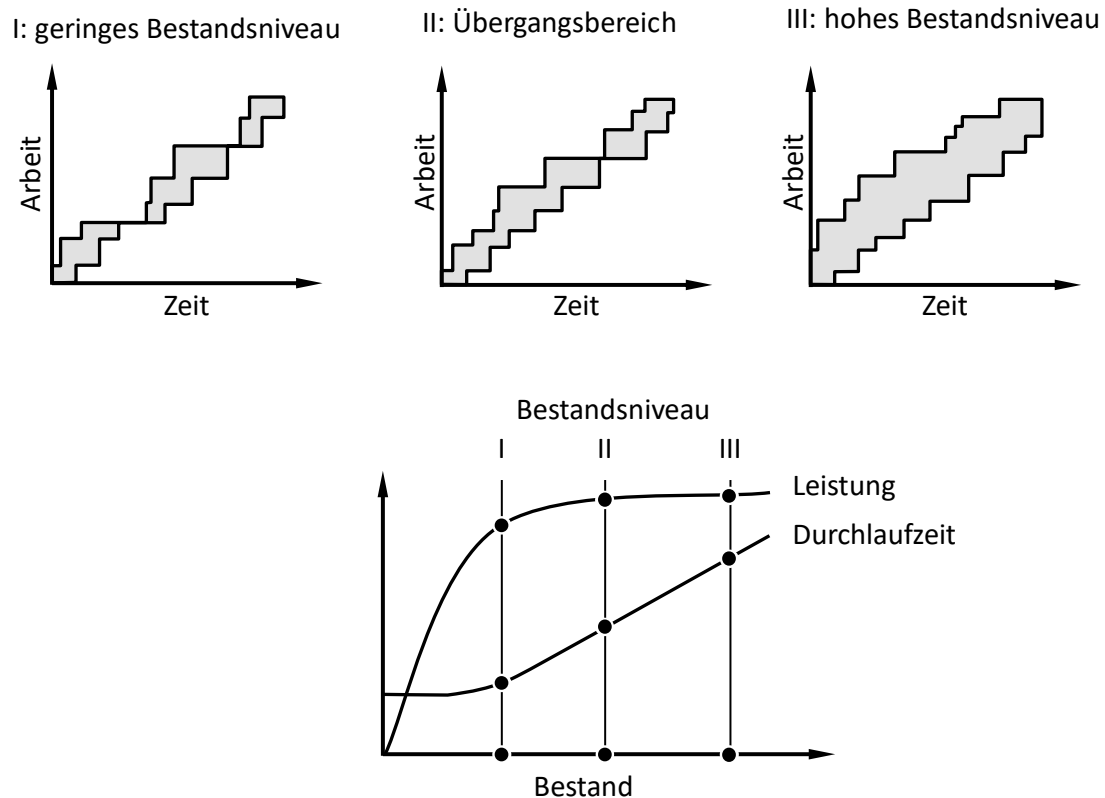


Abbildung 2.5 Betriebszustände der Kennlinien [in Anlehnung an WIEN97, S. 138; NYHU12, S. 37]

Das erste vereinfachte Durchlaufdiagramm beschreibt einen Betriebszustand mit einem geringen Bestandsniveau. Während zwei kurzen Zeitdauern liegt kein Auftrag am Arbeitssystem vor, sodass Leistungsverluste entstehen. Zugleich konkurrieren die Aufträge selten um das Arbeitssystem. Dies führt zu einer kurzen Durchlaufzeit. Der zweite und dritte Betriebspunkt bilden ein höheres Bestandsniveau mit einer entsprechend höheren Leistung und Durchlaufzeit ab. Im Allgemeinen führen hohe Bestände zu hohen Leistungen und zugleich zu langen Durchlaufzeiten. Bestandsreduzierungen bewirken eine Reduzierung der Durchlaufzeiten. Sie können aber auch zu Materialflussabbrissen und damit zu Leistungsverlusten führen [NYHU12, S. 38]. Diese Zusammenhänge zeigen die Bedeutung und Potenziale der aktiven Positionierung von Arbeitssystemen über den Bestand [LÖDD16, S. 77-79].

Die nachfolgenden Abschnitte leiten den Verlauf der Produktionskennlinien her.

2.5.1 Ideale Produktionskennlinien nach Nyhuis

Nyhuis verwendet ein deduktiv-experimentelles Vorgehen für die Ableitung der Kennlinien. Im ersten Schritt entwickelt er Produktionskennlinien, die auf dem idealen Prozess von Wedemeyer [WEDE89] beruhen.

In diesem idealen Prozess trifft der jeweils folgende Auftrag an einem Arbeitssystem genau dann ein, wenn der aktuelle Auftrag beendet wurde [vgl. WEDE89, S. 51]. Dies bedeutet, dass zu jeder Zeit genau ein Auftrag am Arbeitssystem ist und dass ein Auftrag direkt nach der Ankunft bearbeitet wird [NYHU12, S. 62]. Neben dieser elementaren Bedingung formuliert Nyhuis sieben weitere Bedingungen eines idealen Fertigungsablaufs [NYHU12, S. 62].

Die grafische Beschreibung der idealen Produktionskennlinie (vgl. Abbildung 2.9) setzt die Kenntnis von zwei zentralen Kenngrößen voraus: des idealen Mindestbestands und der maximal möglichen Leistung. Diese beiden Kenngrößen werden nachfolgend hergeleitet. Abschließend beschreibt der Abschnitt die idealen Produktionskennlinien nach Nyhuis.

Idealer Mindestbestand

Der ideale Mindestbestand entspricht dem mittleren Bestand des Arbeitssystems im idealen Prozess [NYHU12, S. 63]. Abbildung 2.6 stellt das Durchlaufdiagramm des idealen Prozesses dar.

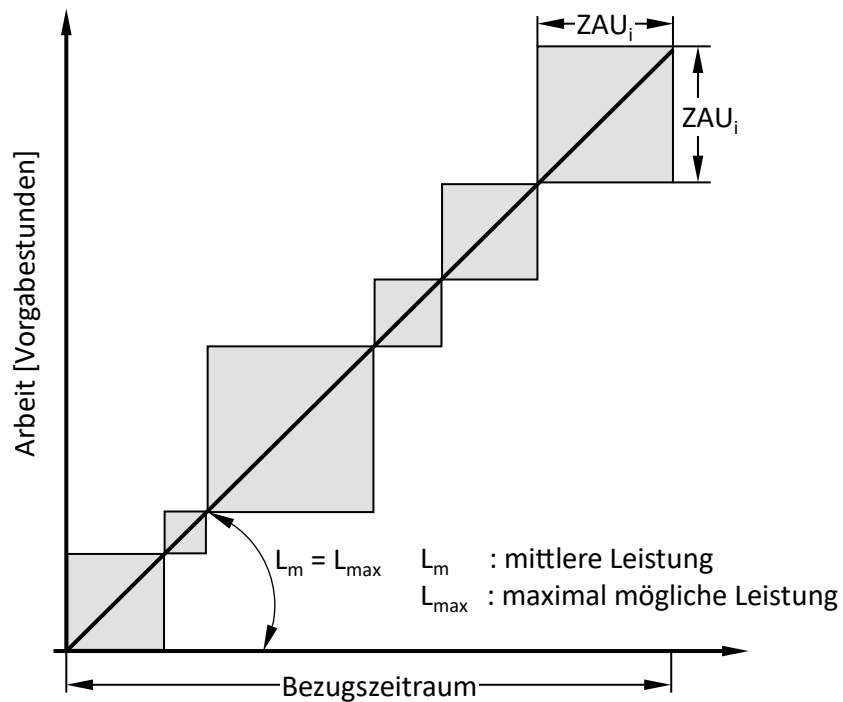


Abbildung 2.6 Durchlaufdiagramm des idealen Fertigungsprozesses [NYHU12, S. 63]

Vereinfachend wird die x-Achse in ‚Vorgabestunden‘ und nicht in der üblichen Einheit der ‚Betriebskalendertage‘ aufgetragen. Abbildung 2.7 leitet aus dem Durchlaufdiagramm den Bestandsverlauf des idealen Prozesses ab.

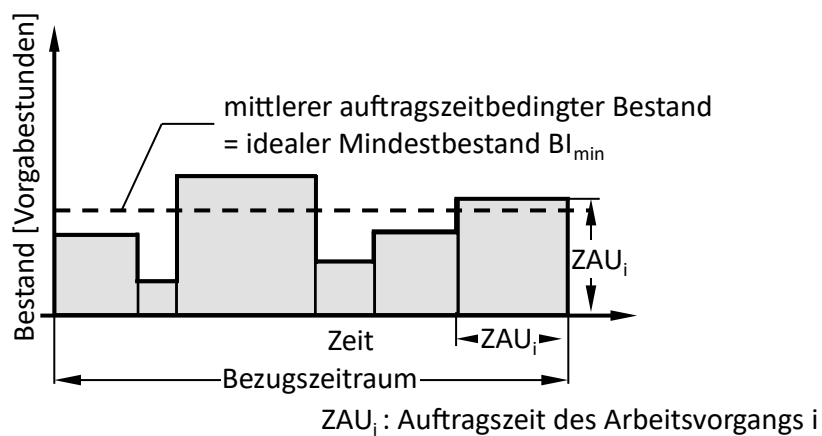


Abbildung 2.7 Bestandsverlauf des idealen Fertigungsprozesses [NYHU12, S. 63]

Der mittlere Bestand ergibt sich zu [NYHU12, S. 63-64]:

$$BI_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^n (ZAU_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} = ZAU_m \cdot (1 + ZAU_v^2) \quad 2.18$$

- BI_{\min} idealer Mindestbestand [Std]
- ZAU_i Auftragszeit des Auftrags i [Std]
- ZAU_m mittlere Auftragszeit [Std]
- ZAU_v Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]

Der ideale Mindestbestand berechnet sich aus dem Mittelwert und dem Variationskoeffizienten der Auftragszeit. Neben der Auftragszeit können auch Zeitanteile der Übergangszeit abgebildet werden. Die Wartezeiten sind definitionsgemäß null. Die Abbildung 2.8 zeigt die Berücksichtigung der Transportzeit.

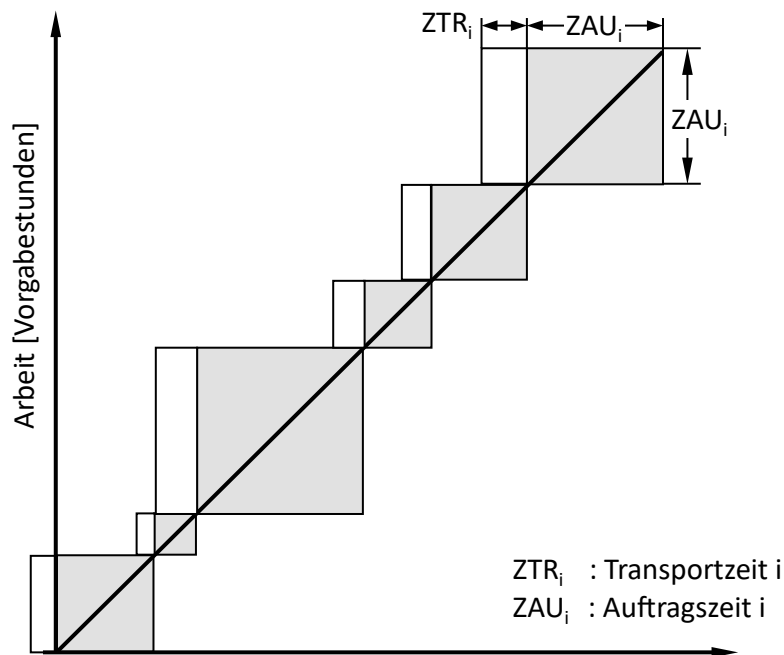


Abbildung 2.8 Idealer Fertigungsprozess mit Transport [in Anlehnung an WEDE89, S. 52; NYHU12, S. 65]

Die weitere Bestandsfläche für jeden Auftrag entspricht dem Produkt der Transportzeit und der Auftragszeit. Für auftragsunabhängige Transportzeiten ergibt sich [NYHU12, S. 65]:

$$\begin{aligned}
 BI_{\min} &= \frac{\sum_{i=1}^n (ZAU_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} + \frac{\sum_{i=1}^n (ZTR_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} \\
 &= ZAU_m \cdot (1 + ZAU_v^2) + ZTR_m
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

BI_{\min}	idealer Mindestbestand [Std]
ZAU_i	Auftragszeit des Auftrags i [Std]
ZAU_m	mittlere Auftragszeit [Std]
ZAU_v	Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]
ZTR_i	Transportzeit des Auftrags i [Std]
ZTR_m	mittlere Transportzeit [Std]

Weitere prozessbedingte Übergangszeiten können auf gleiche Weise in die Berechnung einbezogen werden [NYHU12, S. 66].

Maximal mögliche Leistung

Die maximal mögliche Leistung ist von zwei Einflussgrößen abhängig, der Betriebsmittelkapazität und der Personalkapazität. Diese Kapazitäten können beispielsweise durch Störungen, Wartungen, Urlaub oder Krankheit reduziert werden. Die maximal mögliche Leistung ergibt sich durch den kleineren Kapazitätsfaktor [NYHU12, S. 66]:

$$L_{\max} = \min\{BKAP_v, PKAP_n\} \tag{2.20}$$

L_{\max}	maximal mögliche Leistung [Std/BKT]
$BKAP_{\text{verf}}$	verfügbare Betriebsmittelkapazität [Std/BKT]
$PKAP_n$	nutzbare Personalkapazität [Std/BKT]

Aus dem idealen Mindestbestand und der maximal möglichen Leistung leiten sich die idealen Produktionskennlinien in Abbildung 2.9 ab.

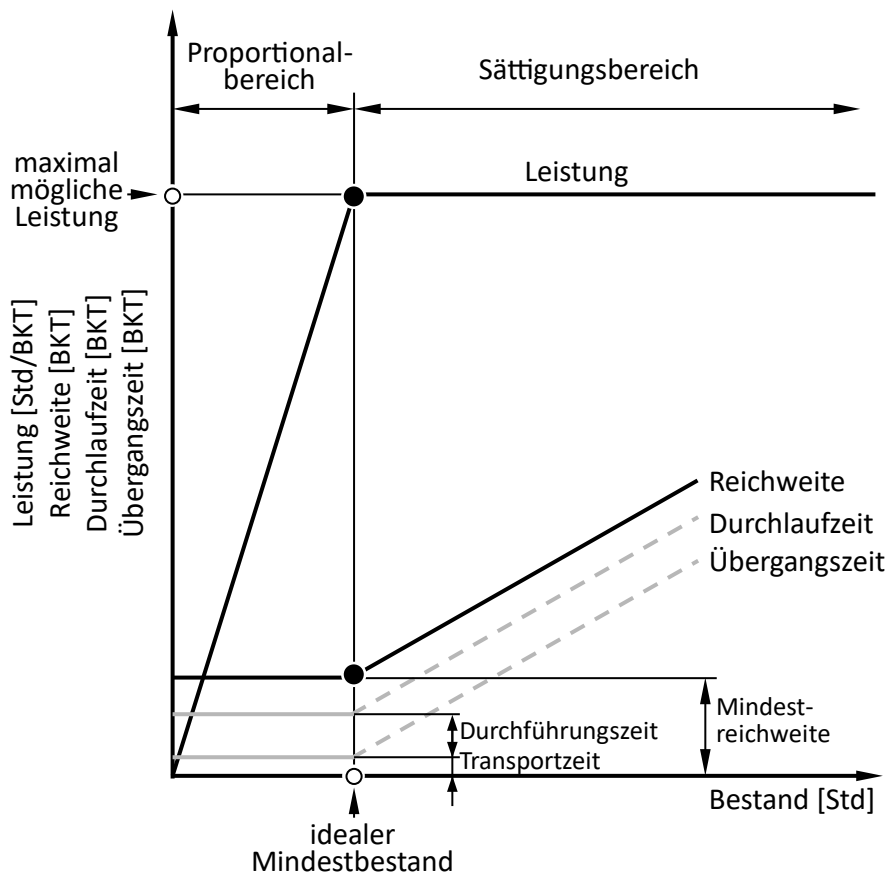


Abbildung 2.9 Konstruktion idealer Produktionskennlinien [WEDE89, S. 53; NYHU12, S. 67]

Der Kennlinienverlauf teilt sich in den Proportionalbereich und den Sättigungsbereich. Die Leistungskennlinie steigt im Proportionalbereich linear vom Ursprung bis zum Punkt des idealen Mindestbestands und der maximal möglichen Leistung an. Jede Erhöhung des Bestands führt hier zu einer Steigerung der Leistung. Im Sättigungsbereich ist die maximal mögliche Leistung des Arbeitssystems erreicht. Ein weiterer Bestandsanstieg verändert die Leistung nicht [NYHU12, S. 68].

Die Reichweitenkennlinie ergibt sich nach Gleichung 2.17 aus dem Quotienten des Bestands und der Leistung. Im Proportionalbereich sind Leistung und Bestand proportional, sodass die Reichweite konstant ist. Da die Leistung im Sättigungsbereich konstant ist, steigt die Reichweite für Bestände, die größer als der ideale Mindestbestand sind, proportional an [vgl. NYHU12, S. 68]. Unter bestimmten Annahmen lassen sich zudem Kennlinien für die mittlere Durchlaufzeit und Übergangszeit bestimmen.

2.5.2 Genäherte Produktionskennlinien nach Nyhuis

Die genäherten Produktionskennlinien beruhen auf den analytischen Ergebnissen der idealen Produktionskennlinien. Diese bilden den Grenzverlauf der genäherten Produktionskennlinien ab. Nyhuis zeigt in Simulationsversuchen, dass Betriebspunkte ohne die strikten Annahmen der idealen Produktionskennlinien insbesondere bei hohen Auslastungen zusätzliche Pufferbestände benötigen. Der erforderliche Puffer hängt neben der Auslastung von der Auftragszeitverteilung, der Transportzeit, der Belastungsschwankung und der Kapazitätsflexibilität ab [NYHU12, S. 70].

Abbildung 2.10 zeigt den schematischen Verlauf der genäherten Leistungskennlinie.

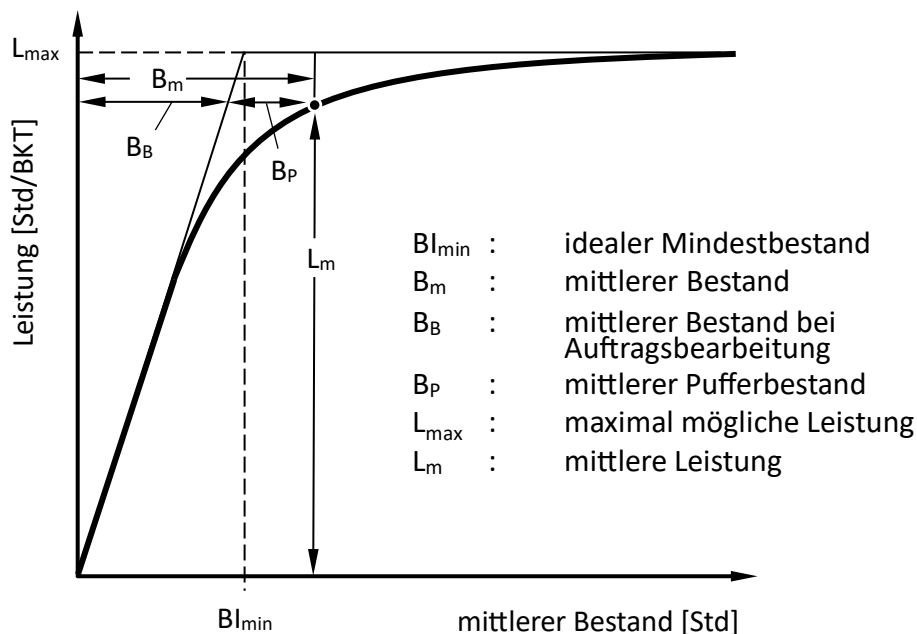


Abbildung 2.10 Bestandteile der Leistungskennlinie [in Anlehnung an NYHU12, S. 82]

Der mittlere Bestand eines Leistungsniveaus kann in den Bestand der Auftragsbearbeitung und den Pufferbestand unterteilt werden. Der Bestand der Auftragsbearbeitung spiegelt den Anteil der idealen Produktionskennlinie wider. Der Proportionalbereich und der Sättigungsbereich (vgl. Abbildung 2.9) sind für die genäherte Produktionskennlinie nicht klar abzugrenzen, sondern gehen in einem Übergangsbereich vom linearen Anstieg zur maximal möglichen Leistung über [NYHU12, S. 69 ff.].

Mathematisch beschreibt Nyhuis die genäherten Produktionskennlinien auf der Basis einer C_{Norm} -Funktion [NYHU12, S. 83]:

$$B_m(L_m) = BI_{\min} \cdot \frac{L_m}{L_{\max}} + BI_{\min} \cdot \alpha_1 \cdot \left(1 - \sqrt[4]{1 - \frac{L_m}{L_{\max}}}\right)^4 \quad 2.21$$

B_m	mittlerer Bestand [Std]
BI_{\min}	idealer Mindestbestand [Std]
L_m	mittlere Leistung [Std/BKT]
L_{\max}	maximal mögliche Leistung [Std/BKT]
α_1	Streckfaktor [-]

Der erste Summand beschreibt den Bestand der Auftragsbearbeitung und der zweite Summand den Pufferbestand. Die zentralen Größen des Pufferbestands sind der ideale Mindestbestand und der empirische Streckfaktor α_1 . Arbeitssysteme in der Werkstattfertigung mit Belastungsabgleich werden häufig mit einem Streckfaktor von zehn abgebildet [NYHU12, S. 81-84 in Verbindung mit 96-99].

2.5.3 Genäherte Produktionskennlinien nach Kingman

Neben der Ableitung der Produktionskennlinien über den Idealprozess und die C-Norm-Funktion ist auch eine Herleitung über die Warteschlangentheorie möglich.

Ausgangsgleichung ist die Berechnung der mittleren Wartezeit nach Kingman [KING61, S. 902-904; HOPP04, S. 288 f.] in der Formelübersetzung von Nyhuis [NYHU12, S. 43]:

$$ZW = \frac{\rho}{\mu \cdot (1 - \rho)} \cdot \left(\frac{c_a^2 + c_b^2}{2} \right) \quad 2.22$$

ZW	mittlere Wartezeit [Std]
ρ	Auslastungsgrad [-]
$1/\mu$	mittlere Bedienzeit [Std]
c_a	Variationskoeffizient der Ankunftszeiten [-]
c_b	Variationskoeffizient der Bedienzeiten [-]

Gleichung 2.22 wird auch als G/G/1-Modell bezeichnet, wobei diese Notation eine beliebig verteilte Ankunfts- und Servicezeit an einem Einzelarbeitssystem bezeichnet. Nyhuis leitet für das M/G/1-Modell mit einem Poisson-Ankunftsprozess und einer beliebig verteilten Servicezeit die Bestands-

Auslastungskennlinien ab [NYHU12, S. 43-46]. Die beiden Modelle unterscheiden sich allein in der Verteilung der Ankunftszeiten. Analog zu der Herleitung von Nyhuis kann das G/G/1-Modell überführt werden. Der mittlere Bestand ergibt sich zu:

$$BA_m = A_m \cdot \left(1 + \frac{A_m}{1 - A_m} \cdot \left(\frac{ZAZ_v^2 + ZDF_v^2}{2} \right) \right) \quad 2.23$$

BA_m mittlerer Bestand in AnzAuf [-]

A_m mittlere Auslastung [-]

ZAZ_v Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit [-]

ZDF_v Variationskoeffizient der mittleren Durchführungszeit [-]

Die Näherungsgleichung nach Nyhuis stellt Abschnitt 2.5.2 als Bestands-Leistungskennlinie dar. Die Näherungsgleichung nach Kingman liegt als Bestands-Auslastungskennlinie vor. Die Gleichungen können mit dem Zusammenhang der mittleren Leistung und der mittleren Auslastung (Gleichung 2.2) in die jeweils andere Form überführt werden.

Ein Vergleich der beiden Produktionskennlinien mit ihren jeweiligen Prämissen erfolgt im Abschnitt 5.2.1.

3 Bestehende Ansätze zu Chargenarbeitssystemen

Seit den neunziger Jahren wird vermehrt zu Chargenarbeitssystemen geforscht. Nach der Definition von Chargenarbeitssystemen im Abschnitt 3.1 stellt dieses Kapitel die wesentlichen Forschungsansätze in den Abschnitten 3.2 und 3.3 dar und formuliert abschließend den Forschungsbedarf im Abschnitt 3.4.

3.1 Chargenarbeitssysteme

Diese Arbeit versteht ein Chargenarbeitssystem als ein Arbeitssystem, das mehrere Aufträge zeitgleich bearbeiten kann. Dafür werden die Aufträge vor dem Arbeitsschritt gesammelt und nach dem Chargenarbeitssystem wieder vereinzelt. Ein Beispiel für ein Chargenarbeitssystem ist ein Ofen. Dieses Arbeitssystem sammelt Aufträge mit der gleichen Temperatur und Prozesszeit und bearbeitet diese dann in einer Charge [LÖDD16, S. 131].

Chargenarbeitssysteme führen im Produktionssystem zu langen Durchlaufzeiten und hohen Beständen, die in den folgenden vier Eigenschaften der Arbeitssysteme begründet sind [LÖDD16, S. 131]:

- Chargenarbeitssysteme benötigen Sammelzeiten. Um eine Charge mit mehreren Aufträgen bearbeiten zu können, müssen diese zunächst gesammelt werden. Je größer die Kapazität des Chargenarbeitssystems ist, desto mehr Aufträge können zu einer Charge zusammengefasst werden und desto länger werden die Sammelzeiten.
- Chargenarbeitssysteme erfordern häufig eine Vorbereitung der Charge. Dies kann zum Beispiel die Montage der Werkstücke auf speziellen Aufnahmen für das Arbeitssystem sein.
- Chargenarbeitssysteme bearbeiten mehrere Aufträge parallel. Somit binden sie einen höheren Bestand an Aufträgen während des Bearbeitungsprozesses.
- Chargenarbeitssysteme verursachen Belastungsspitzen an den Nachfolgesystemen. Nach dem Bearbeitungsprozess werden die Aufträge der Charge in einem Stoß an die nächsten Arbeitssysteme übergeben, sodass ungleichmäßige Belastungen der nachgelagerten Arbeitssysteme entstehen und sich zusätzliche Pufferbestände bilden.

In Summe führen diese Besonderheiten dazu, dass die Durchlaufzeit am Chargenarbeitssystem häufig einen großen Teil der Auftragsdurchlaufzeit ausmacht.

Daher sollen Chargenarbeitssysteme möglichst durch technologische Alternativen ersetzt werden.

Für die Gestaltung und Steuerung von Chargenarbeitssystemen nennt Lödning drei Regeln [LÖDD16, S. 132]:

- Der Einstoß von Aufträgen des gleichen Chargentyps soll koordiniert erfolgen. So erreichen die Aufträge das Chargenarbeitssystem zeitlich abgestimmt und die Charge hat eine geringe Sammelzeit. Einen Algorithmus für die Freigabe stellt Cheng [CHEN08, S. 541-546] vor.
- Die Vorbereitungszeit soll durch technische und organisatorische Maßnahmen reduziert werden.
- Eine reduzierte Chargengröße ist logistisch vorteilhaft. Sie reduziert die Sammelzeiten und belastet die nachfolgenden Arbeitssysteme gleichmäßiger.

In der Literatur finden sich weitere Definitionen, die der vorherigen ähnlich sind. So beschreibt Schmidt eine Charge als „diejenige Menge eines Gutes, die im gleichen Herstellungsprozess verarbeitet wird“ [SCHM08, S. 328]. Die begrenzende Größe für eine Charge wird von Kahl als die Kapazität des Arbeitssystems oder die verfügbare Einsatzmenge des Guts angegeben [KAHL96, S. 25]. Arbeitssysteme, die Chargen bearbeiten, sind Chargenarbeitssysteme. Günther beschreibt, dass die Chargen dem Arbeitssystem als Ganzes zugehen und nach dem Produktionsprozess als Ganzes entnommen werden [GÜNT16, S. 16].

Die Chargenfertigung, die auch als Chargenproduktion oder Batchproduktion beschrieben wird, wird in verschiedenen Organisationstypen in der Produktion genutzt. Sie ordnet sich in der Regel in die Fertigungsart bzw. den Produktionstyp der Mehrfachfertigung ein und gilt als Sonderform der Sortenfertigung [SCHM08, S. 330]. Die Chargenfertigung ist eine Form der diskontinuierlichen Produktion [GÜNT16, S. 16].

Gold untersucht den Einfluss der Push- und Pull-Strategie auf Chargenarbeitssysteme. In vier Fallstudien leitet er auf der Basis von Markow-Ketten die Kennlinien für die Wartezeit, und zum Teil für den Chargenfüllgrad und den Bestand, als Funktion der ‚traffic intensity‘ ab. Die ‚traffic intensity‘ leitet Gold aus dem Quotienten der Ankunftsrate und der Serverkapazität ab. Die Szenarien sind ein Push-System, ein Pull-System, ein kombiniertes Push-Pull-System und ein System mit zwei Chargenarbeitssystemen. Somit liegt der Fokus der Arbeit auf der

Untersuchung der Push- und Pull-Systeme. Durch die Annahme, dass alle Aufträge miteinander kompatibel sind und dass es einen Mindestfüllgrad für die Bearbeitung am Chargenarbeitssystem gibt, schränkt Gold die Allgemeingültigkeit ein [GOLD92; GOLD91].

Nachfolgend wird der Begriff der Charge von bedeutungsverwandten Begriffen abgegrenzt. Die Unterscheidung zwischen einer Charge und einer Partie erfolgt über den Verarbeitungsgrad des Guts. Eine Partie bezeichnet „eine Menge (eine Lieferung) eines Rohmaterials von gleicher Qualität“ [SCHM08, S. 328].

Spezielle Produktionssysteme treffen die Annahme, dass eine Charge den gesamten Produktionsprozess als eine geschlossene Einheit durchläuft. Diese Einheit wird als Chargenidentität bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit werden Chargen im Gegensatz dazu so definiert, dass sie für ein einzelnes Arbeitssystem gebildet und danach wieder aufgelöst werden.

Im Qualitätsmanagement ist eine Charge als eine Menge von Produkten definiert, die unter gleichen Bedingungen produziert oder aus dem gleichen Ausgangsmaterial gewonnen wurden. Die Zuordnung von Produkten zu einer Charge erlaubt es bei einem Qualitätsproblem, die betroffenen Produkte zu identifizieren. In dieser Arbeit wird die Charge dagegen ausschließlich aus dem Bezug zum Chargenarbeitssystem definiert.

3.2 Produktionskennlinien von Chargenarbeitssystemen

Produktionskennlinien eignen sich für die Untersuchung und Auslegung von Chargenarbeitssystemen in der Werkstattfertigung. Dies belegen Stühler, Schmidt und Wiendahl an einem Beispiel aus der Halbleiterindustrie, indem sie die theoretischen Anwendungsvoraussetzungen (Abschnitt 3.2.1) prüfen und die praktische Anwendbarkeit mit Daten eines Arbeitssystems (Abschnitt 3.2.2) nachweisen [STÜH99, S. 14 ff.].

3.2.1 Grundsätzliche Anwendbarkeit

Das untersuchte Arbeitssystem umfasst drei Kammern eines Horizontalofens, der als Chargenarbeitssystem arbeitet. Am Arbeitssystem werden nur gleichartige Prozesse bearbeitet. Das Arbeitssystem ist Bestandteil einer Werkstattfertigung mit 14 weiteren Arbeitssystemen. Die grundsätzliche Anwendbarkeit wird in einem dreistufigen Vorgehen geprüft [STÜH99, S. 16 f.]:

Festlegen eines Vergleichsprozesses, der durch die Kennlinientheorie abgebildet wird. Standardarbeitssysteme und Chargenarbeitssysteme unterscheiden sich elementar in der Leistung der Arbeitssysteme. Um die Leistungen anzugleichen, wird als Vergleichsprozess für die Chargenbearbeitung die Parallelbearbeitung an mehreren identischen Arbeitsplätzen gewählt. Annahme ist, dass alle Aufträge einer Charge zeitgleich eintreffen und folglich identische Durchführungszeiten haben. Die Produktionskennlinie für die Parallelbearbeitung ist bekannt. Abbildung 3.1 zeigt den Vergleich der beiden Modelle [STÜH99, S. 17].

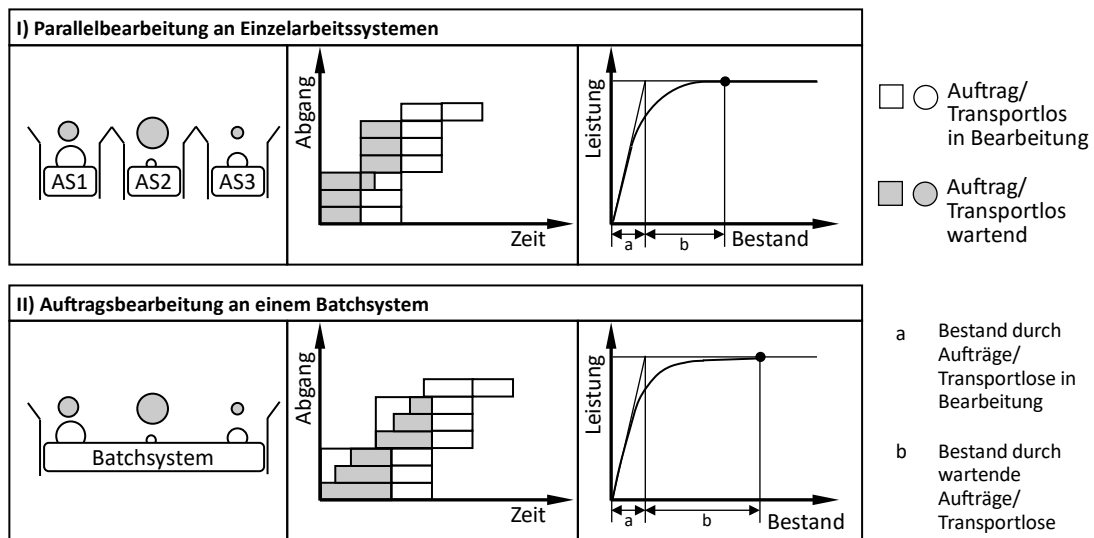


Abbildung 3.1 Analyse von Chargenarbeitssystemen durch Vergleichsprozesse [in Anlehnung an STÜH99, S. 17]

Der linke Teil der Abbildungen skizziert die Trichtermodelle der Arbeitssysteme, der mittlere Teil stellt die Durchlaufdiagramme dar und der rechte Teil die Produktionskennlinien.

Anpassen des Vergleichsprozesses auf den Chargenprozess. Der zweite Schritt zur Prüfung der grundsätzlichen Anwendbarkeit gleicht die Beschreibungsparameter an. Im Beispiel werden ein Chargenarbeitssystem mit mehreren Ofenkammern und eine Parallelbearbeitung an einer identischen Anzahl von Einzelarbeitsplätzen verglichen [STÜH99, S. 17].

Auflösen der Annahmen. Der dritte Schritt löst die Annahme der zeitgleichen Ankunft am Chargenarbeitssystem auf. Im Vergleichsprozess ergeben sich verschiedene Zeitpunkte für den Bearbeitungsanfang und das Bearbeitungsende an den Einzelarbeitssystemen. Da Bearbeitungsanfang und Bearbeitungsende im

Chargenarbeitssystem für alle Aufträge zeitgleich erfolgen, weist dieses System eine geringere Kapazitätsflexibilität auf. Für das Chargenarbeitssystem ist folglich eine Erhöhung des Streckfaktors α_1 erforderlich [STÜH99, S. 17].

3.2.2 Praktische Anwendbarkeit

Für den Vergleich der theoretischen Überlegungen und der Praxisdaten nutzen Stühler, Schmidt und Wiendahl die Rückmeldedaten des Horizontalofens von zwei Untersuchungszeiträumen. Diese umfassen jeweils einen Monat. Der nachfolgende Abschnitt beschreibt den zweiten Untersuchungszeitraum [STÜH99, S. 17 f.].

Die maximal mögliche Leistung entspricht der Summe der verfügbaren Kapazitäten der Einzelarbeitsplätze und beträgt 247,7 Std/BKT (12 Arbeitsplätze, 24 Std/BKT Kapazität, maximal mögliche Auslastung 86 Prozent) [NYHU12, S. 108 ff.; STÜH99, S. 17 f.]. Der ideale Mindestbestand berechnet sich als Summe der Mindestbestände der Einzelarbeitssysteme zu 82,4 Std (12 Arbeitsplätze, mittlere Auftragszeit 6,8 Std, mittlere Standardabweichung der Auftragszeit 0,6 Std) [NYHU12, S. 108 ff.; STÜH99, S. 17 f.]. Die Berechnung des idealen Mindestbestands zeigt den kleinen Variationskoeffizienten der Auftragszeit von weniger als 0,1. Diese geringe Streuung ordnen Stühler, Schmidt und Wiendahl als typisch für Ofenprozesse ein [STÜH99, S. 18]. Der Streckfaktor α_1 wird als 10 gesetzt und entspricht damit dem Streckfaktor des Vergleichssystems [STÜH99, S. 18]. Abbildung 3.2 stellt den ausgewerteten Betriebspunkt und die berechnete Produktionskennlinie dar.

3 Bestehende Ansätze zu Chargenarbeitssystemen

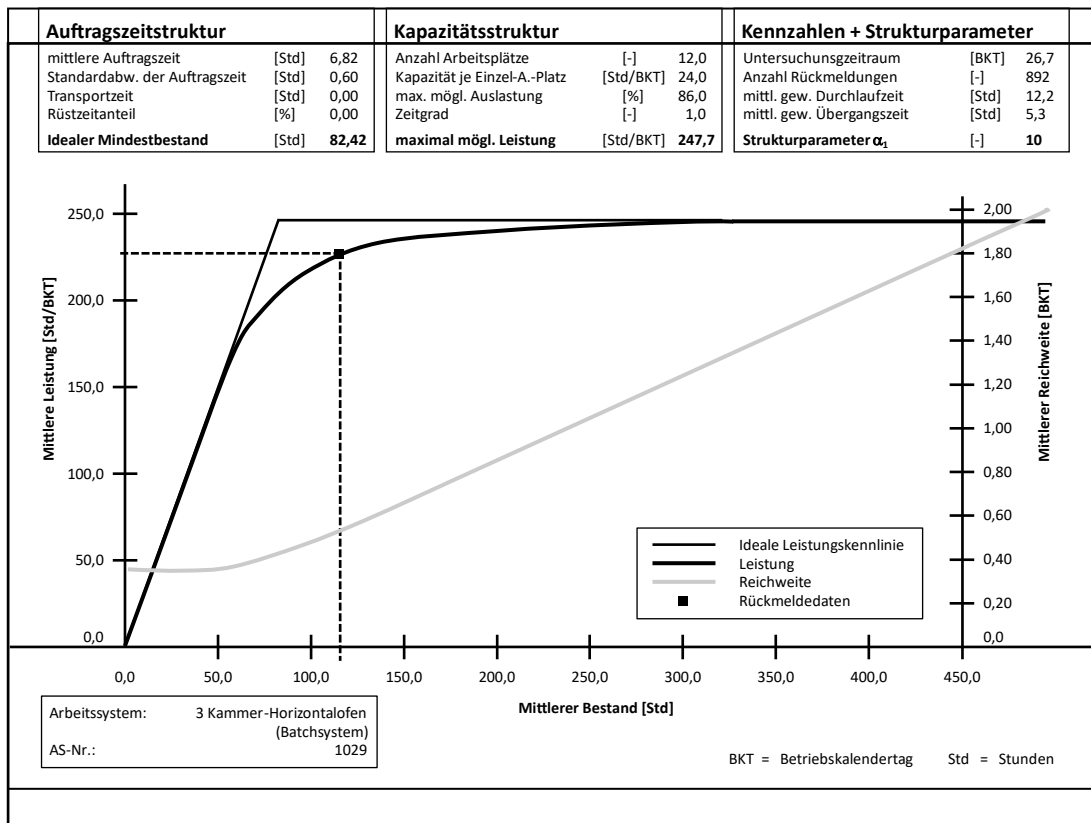


Abbildung 3.2 Produktionskennlinie eines Chargenarbeitssystems [in Anlehnung an STÜH99, S. 17]

Die Güte der Modellierung ist in diesem Beispiel hoch. Der Betriebspunkt liegt knapp unter der berechneten Produktionskennlinie.

Stühler, Schmidt und Wiendahl weisen somit nach, dass der beispielhafte Betriebspunkt des Chargenarbeitssystems mit der Kennlinientheorie abgebildet werden kann. Eine Verallgemeinerung dieser ersten Erkenntnisse erfolgt bislang nicht. Die Kennliniengleichung liegt nur für eine feste Chargengröße von 12 Aufträgen bzw. Arbeitsplätzen vor. Ferner wurden nur gleichartige Prozesse untersucht. Die zusätzlichen Zeitanteile, wie beispielsweise die Zeit zum Sammeln der Aufträge, werden nicht modellbasiert berücksichtigt. Simulationsversuche und eine Evaluierung stehen aus.

3.3 Ablaufplanung von Chargenprozessen

Die Ablaufplanung von Chargenprozessen plant die Aufträge an einem Chargenarbeitssystem in einer Feinterminierung ein. Dabei ordnet sie die Aufträge den Chargen zu und plant die Chargen nacheinander ein. Ziel ist es, wie im

Operations Research üblich, Chargenprozesse in Bezug auf ausgewählte logistische Zielgrößen zu optimieren. Dies kann beispielsweise die Minimierung von Durchlaufzeiten oder die Maximierung der Auslastung sein.

Anschütz klassifiziert in seiner Dissertation die elementaren Verfahren der Ablaufplanung [ANSC01, S. 46]. Auf dieser Grundlage zeigt Abbildung 3.3 die verbreiteten Lösungsverfahren der Ablaufplanung für den Sonderfall der Chargenprozesse.

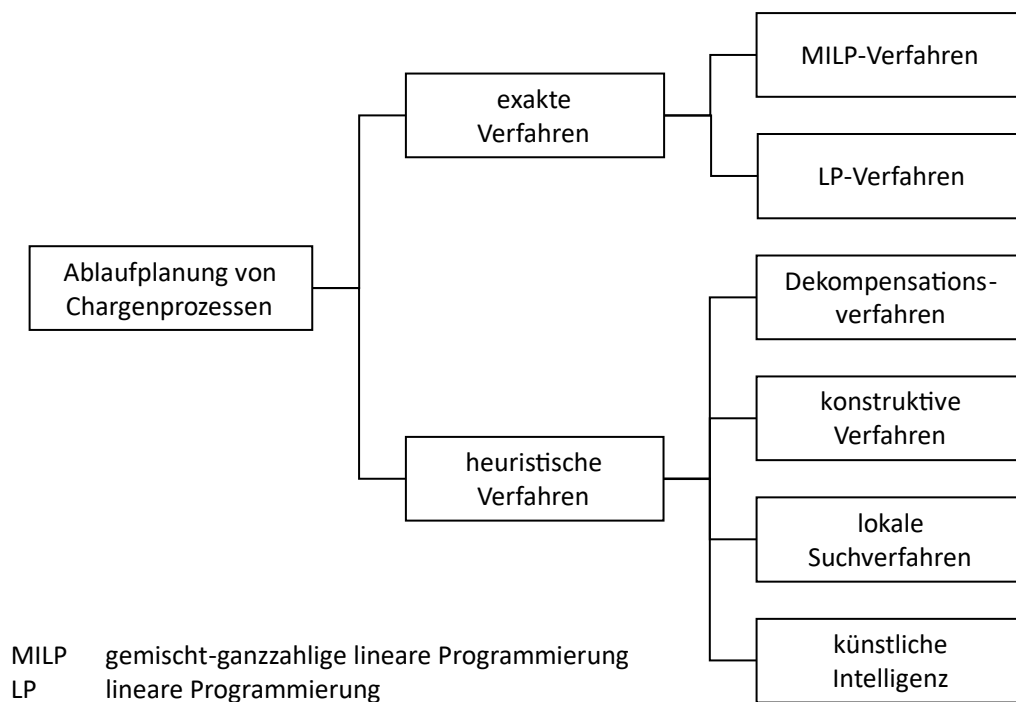


Abbildung 3.3 Verfahren der Ablaufplanung von Chargenprozessen

Die Verfahren der Ablaufplanung unterteilen sich gemäß dem Grad der Optimalität in exakte und heuristische Verfahren. Exakte Verfahren erbringen den mathematischen Nachweis, dass eine Lösung bezüglich der gewählten Zielgröße des Verfahrens optimal ist. Heuristische Verfahren ermöglichen eine methodische Lösungssuche, die auf die Problemstruktur abgestimmt ist [ANSC01, S. 45].

Kern der exakten Verfahren ist eine lineare Zielfunktion, die um lineare Nebenbedingungen ergänzt wird. Die Nebenbedingungen können das Problem der Ablaufplanung sowohl in Gleichungen als auch in Ungleichungen abbilden. Die Verwendung der exakten Verfahren erfordert keine spezifische

Verfahrensstruktur und nur wenig Detailwissen zum Planungsproblem. Die **gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung (MILP)** nutzt ganzzahlige Entscheidungsvariablen. Die **lineare Programmierung (LP)** erlaubt hingegen den reellen Zahlenraum für die Entscheidungsvariablen [ANSC01, S. 45 ff.].

Detaillierte Beschreibungen der gemischt ganzzahligen linearen Programmierung und der linearen Programmierung für Chargenarbeitssysteme bieten Anschütz [ANSC01, S. 49-66], Blömer [BLÖM99, S. 53-61] und Kießwetter [KIEß99, S. 51-56].

Die dargestellten heuristischen Verfahren unterscheiden sich von den exakten Verfahren nicht allein durch den Definitionsbereich, sondern sind jeweils abweichende Ansätze. Das **Dekompensationsverfahren** zerlegt die Ablaufplanung in kleine Teilprobleme. Diese Teilprobleme löst der Ansatz unter Zuhilfenahme anderer exakter oder heuristischer Ansätze. Das Dekompensationsverfahren reduziert so die Schwere des Problems. **Konstruktive Verfahren** sind Algorithmen, die ohne eine bestehende Lösung einen neuen Ablaufplan erzeugen. Ein Beispiel dafür ist das Verfahren der Prioritätsregel First in – First out (FIFO) für die Auswahl des nächsten Auftrags der Bearbeitung. Die Anwendung von konstruktiven Verfahren ist überwiegend einfach und zeitsparend. Zugleich resultieren diese Verfahren teilweise in Lösungen mit geringerer Qualität. **Lokale Suchverfahren** beginnen die Suche mit einer zufällig gewählten Anfangslösung. Diese wird dann gemäß der Suchmethodik mit weiteren Lösungen verglichen, um iterativ ein lokales Optimum zu finden. Bekannte Formen der lokalen Suchverfahren sind die evolutionären Algorithmen und die Tabu-Search-Methode. Verfahren, die **künstliche Intelligenz** nutzen, gewinnen an Bedeutung. Zwei elementare Vorgehensweisen sind das Constrained Based Programming, das auf Reihenfolge- und Kapazitätsrestriktionen beruht, und die Künstlichen Neuronalen Netze, die Planungsprobleme auf der Basis von biologischen neuronalen Netzen nachgestalten [ANSC01, S. 46-49].

Einen umfassenden Literaturüberblick zu konkreten Verfahren der Ablaufplanung von Chargenprozessen stellt Blömer grafisch dar [BLÖM99, S. 82 ff.]. Er vergleicht 31 Lösungsansätze in folgenden Hauptkriterien: Anlagentyp, Reinigungsprozesse, Lagerstrategie, Haltbarkeit, Kuppelproduktion, Zeitdarstellung, Lösungsansatz und Problemgröße. Ein Großteil der Ansätze setzt jedoch eine Chargenidentität (siehe Abschnitt 3.1) voraus.

Für die Werkstattfertigung haben sich die Ansätze der Ablaufplanung nicht durchgesetzt, da die Zugangszeitpunkte nicht genau planbar sind. Daher erfolgt die Terminierung häufig, ähnlich der Terminierung an normalen Arbeitssystemen, durch eine Rückwärtsterminierung mit Standarddurchlaufzeiten. Eine Modellierung der Durchlaufzeit kann helfen, die erreichbare Durchlaufzeit zu bestimmen.

3.4 Forschungsbedarf

Die zum Teil außerordentlich große Leistung von Chargenarbeitssystemen geht einher mit hohen Beständen und langen Durchlaufzeiten. Daher ist die logistische Positionierung von Chargenarbeitssystemen in vielen Unternehmen ein elementarer Stellhebel für die gesamte Auftragsdurchlaufzeit und somit von großer Relevanz. Die Ergebnisse von Schneider et al. [SCHN02] veranschaulichen die Bedeutung einer durchgängigen Modellierung für die Kennlinientheorie.

Die Untersuchungen von Gold [GOLD91; GOLD92] zeigen analytische und simulative Untersuchungen von Chargenarbeitssystemen auf der Basis der Warteschlangentheorie für einen Poisson-Ankunftsprozess, eine Prozessvariante und eine Mindestfüllung der Chargen. Eine logistische Positionierung von Chargenarbeitssystemen mit der wesentlichen Stellgröße des Bestands ist jedoch auf dieser Basis nicht möglich. Der Ansatz von Stühler et al. [STÜH99] beschreibt die Möglichkeit der logistischen Modellierung von Chargenarbeitssystemen an einem Beispiel. Ein allgemeingültiges Modell wird nicht abgeleitet. Die Ablaufplanung von Chargenarbeitssystemen terminiert die Aufträge und plant spezielle Probleme mit einer Zielgröße. Diese Verfahren eignen sich nur in seltenen Fällen für die Werkstattfertigung. Eine logistische Positionierung ist nicht möglich. Die Modellierung der Terminabweichung aus Rückstand und Reihenfolgeabweichung von Chargenarbeitssystemen erfolgt bislang nicht.

Daher ist es das Ziel der Arbeit, die elementaren logistischen Zielgrößen und deren Abhängigkeiten zu modellieren und Handlungsempfehlungen für die Positionierung von Chargenarbeitssystemen für die industrielle Praxis abzuleiten.

4 Beschreibung von Chargenarbeitssystemen

Chargenarbeitssysteme unterscheiden sich technologisch und organisatorisch von anderen Arbeitssystemen. Dieses Kapitel stellt Chargenarbeitssysteme mit ihren Besonderheiten vor. Die Abschnitte 4.1 bis 4.3 übertragen das Durchlaufelement, das Durchlaufdiagramm und das Trichtermodell von Standardarbeitssystemen auf Chargenarbeitssysteme. Die Logik der Chargenbildung und die Reihenfolge der Chargenbearbeitung werden in den Abschnitten 4.4 und 4.5 erläutert. Abschließend stellt Abschnitt 4.6 verschiedene Einheiten vor, die zur Analyse von Chargenarbeitssystemen geeignet sind. Im Rahmen der Forschungsarbeit zu den Chargenarbeitssystemen sind unter anderen die Abschlussarbeiten von Aleksej Oboskalov¹, Jonas Lehmann², Christoph Kalis³, Leif Leiser⁴, Tilmann Schwenzow⁵ und Alexander Luttkau⁶ entstanden. Kapitel 4, 5 und 6 enthalten Ergebnisse dieser unveröffentlichten Arbeiten.

4.1 Durchlaufelement

Gedanklich verortet diese Arbeit das Chargenarbeitssystem in der Werkstattfertigung. Die Aufträge gehen dem Chargenarbeitssystem daher unkoordiniert zu. Die nachfolgenden Absätze beschreiben die Zeitpunkte und Zeitspannen des Chargenarbeitssystems im Durchlaufelement (vgl. Abbildung 4.1).

Liegen nach Bearbeitung. Der erste Zeitanteil im Durchlaufelement ist das Liegen nach der Bearbeitung des Vorgängers. Der Beginn der Liegezeit ist das Bearbeitungsende des Vorgängers und das Ende ist durch den Transportbeginn zum

¹ Oboskalow, Aleksej (Betreuer: Winter, Michael): Entwicklung logistischer Kennlinien für Chargenprozesse. Masterarbeit, TU Hamburg, 2018

² Lehmann, Jonas (Betreuer: Winter, Michael): Einfluss der Auftragsfreigabe auf die logistischen Kennlinien von Chargenarbeitssystemen. Projektarbeit, TU Hamburg, 2018

³ Kalis, Christoph (Betreuer: Winter, Michael): Modellierung der reihenfolgebedingten Terminabweichung von Chargenarbeitssystemen. Bachelorarbeit, TU Hamburg, 2018

⁴ Leiser, Leif Eric (Betreuer: Winter, Michael): Entwicklung logistischer Kennlinien für parallele Chargenarbeitssysteme mit gemeinsamer Warteschlange. Masterarbeit, TU Hamburg, 2018

⁵ Schwenzow, Tilmann (Betreuer: Winter, Michael): Entwicklung parametrisierter Kennlinien für Chargenprozesse. Masterarbeit, TU Hamburg, 2019

⁶ Luttkau, Alexander (Betreuer: Winter, Michael): Terminabweichung von Chargenarbeitssystemen. Masterarbeit, TU Hamburg, 2022

Chargenarbeitssystem definiert. Somit entspricht dieser Zeitanteil dem Durchlaufelement nach Nyhuis.

Transport. Die Transportzeit schließt sich an das Liegen nach der Bearbeitung an und endet mit dem Anfang der Chargenvorbereitung. Sie beschreibt die Zeitdauer für den Transport vom Vorgängerarbeitssystem zum Chargenarbeitssystem.

Chargenvorbereitung. Die Chargenvorbereitung ist spezifisch für Chargenarbeitssysteme und somit ein zusätzlicher Zeitanteil, der im klassischen Durchlaufelement nicht zu finden ist. Chargenarbeitssysteme benötigen oftmals eine zusätzliche Zeit zur Vorbereitung. Ein Beispiel der Vorbereitung ist die Montage von Werkstücken auf spezielle Haltevorrichtungen.

Die Chargenvorbereitung tritt in der Praxis in zwei Szenarien auf. Als Vorbereitung eines einzelnen Auftrags, um diesen Auftrag der Charge hinzuzufügen (z.B. Montage auf der Haltevorrichtung, Szenario 1) oder als Vorbereitung einer vollständigen Charge vor dem Bearbeitungsprozess (Reinigung einer zuvor komplettierten Charge, Szenario 2). Nachfolgend wird die Chargenvorbereitung als Vorbereitung eines einzelnen Auftrags verstanden (Szenario 1). Die Vorbereitung von vollständigen Chargen kann als weiteres Arbeitssystem modelliert und so in den logistischen Zielgrößen berücksichtigt werden. Zudem wird die Annahme getroffen, dass die Aufträge direkt nach dem Transport zum Chargenarbeitssystem vorbereitet werden. In der Praxis können zwischen dem Transport und der Vorbereitung zusätzliche Wartezeiten vorliegen, die aber nur einen geringen Einfluss auf die logistischen Zielgrößen der Chargenarbeitssysteme haben.

Komplettierung einer Charge. Ein weiterer zusätzlicher Zeitanteil ist die Komplettierung einer Charge. Trifft ein Auftrag am Arbeitssystem ein, kann er in den meisten Fällen erst nach der Ankunft weiterer Aufträge bearbeitet werden. Die Zeit, die ein Auftrag auf die Ankunft anderer Aufträge wartet, ist die Komplettierungszeit. Unter welchen Voraussetzungen eine Charge als komplettiert gilt, beschreibt Abschnitt 4.4.

4 Beschreibung von Chargenarbeitssystemen

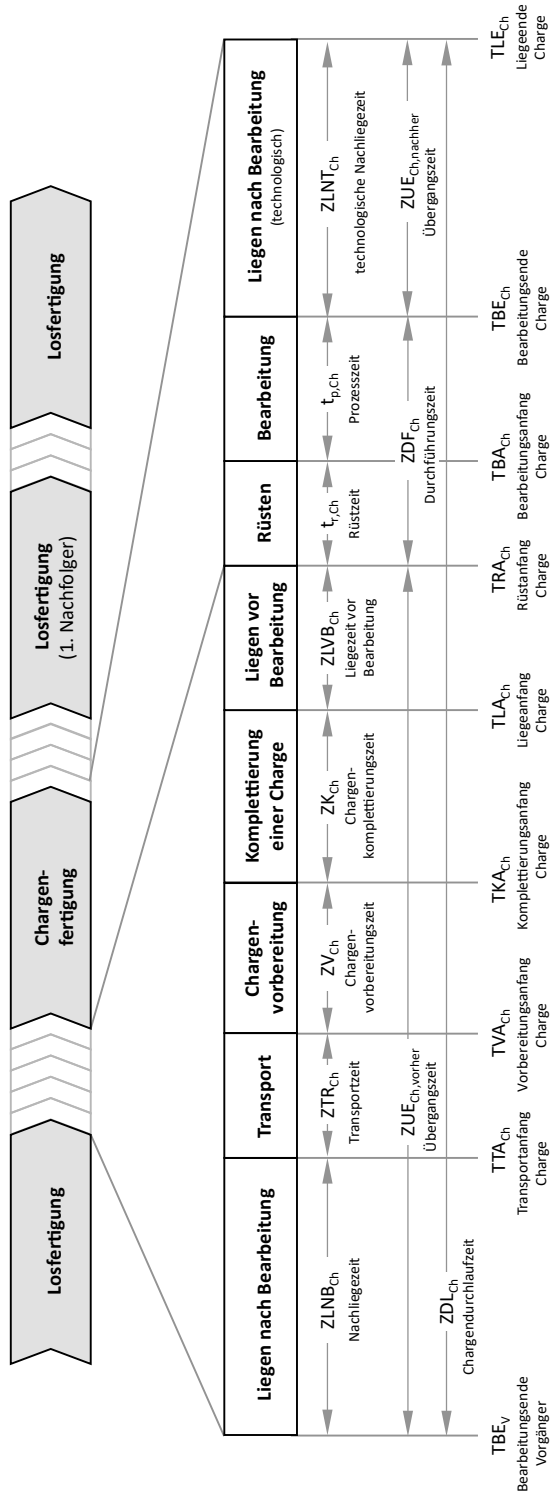


Abbildung 4.1 Durchlaufelement von Chargenarbeitssystemen

Liegen vor Bearbeitung. Während der Liegezeit vor der Bearbeitung warten die einzelnen Aufträge, gebündelt als Charge, auf das Arbeitssystem. Dieser Zeitannteil entspricht der Wartezeit im konventionellen Fertigungsprozess. Die Zeitannteile vom Liegen nach der Bearbeitung bis zum Liegen vor der Bearbeitung beschreiben die Übergangszeit vor dem Chargenarbeitssystem.

Rüsten. Das Rüsten bildet den ersten Teil der Durchführungszeit. Es entspricht dem Rüsten des Standardarbeitssystems.

Bearbeitung. Im Unterschied zum konventionellen Fertigungsprozess ist die Prozesszeit der Bearbeitung durch technologische Randbedingungen festgelegt. Die Losgröße hat keinen oder nur einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Prozesszeit, da die Aufträge parallel bearbeitet werden. Um diesen Unterschied sprachlich abzubilden, wird als Pendant zur Auftragszeit von Standardarbeitssystemen der Begriff der Prozesszeit für Chargenarbeitssysteme verwendet. Die elementaren Einflussgrößen der Durchführungszeit sind somit die Rüstzeit und die Prozesszeit.

Liegen nach Bearbeitung. Das Liegen nach der Bearbeitung teilt sich bei Chargenarbeitssystemen in zwei Teile: das technologisch bedingte Nachliegen und das (organisatorisch bedingte) Liegen nach der Bearbeitung. Das technologisch bedingte Nachliegen umfasst die Zeitannteile nach der Bearbeitung, in denen eine Bearbeitung oder ein Transport nicht möglich sind. Beispiele dafür sind Abkühl- oder Materialruhezeiten. Die technologisch bedingte Nachliegezeit wird dem Chargenarbeitssystem zugeordnet, da dies einerseits verursachungsgerecht ist und andererseits die Terminierung vereinfacht. Da ihre Länge bekannt ist, ist auch der Vergleich mit Rückmeldedaten aus der Praxis problemlos möglich. Im Gegensatz dazu ist die Länge des (organisatorisch bedingten) Liegen nach Bearbeitung unbekannt und somit dem oder den Nachfolgearbeitssystemen zuzuordnen.

Dort erzeugen die Aufträge durch die zeitgleiche Fertigstellung eine Belastungsspitze. Weil die nachfolgenden Arbeitssysteme die Aufträge nur einzeln bearbeiten können, entstehen erhöhte Bestände und Durchlaufzeiten.

4.2 Trichtermodell

Abbildung 4.2 erweitert das Trichtermodell (vgl. Abbildung 2.3) auf den Auftragsdurchlauf von Chargenarbeitssystemen.

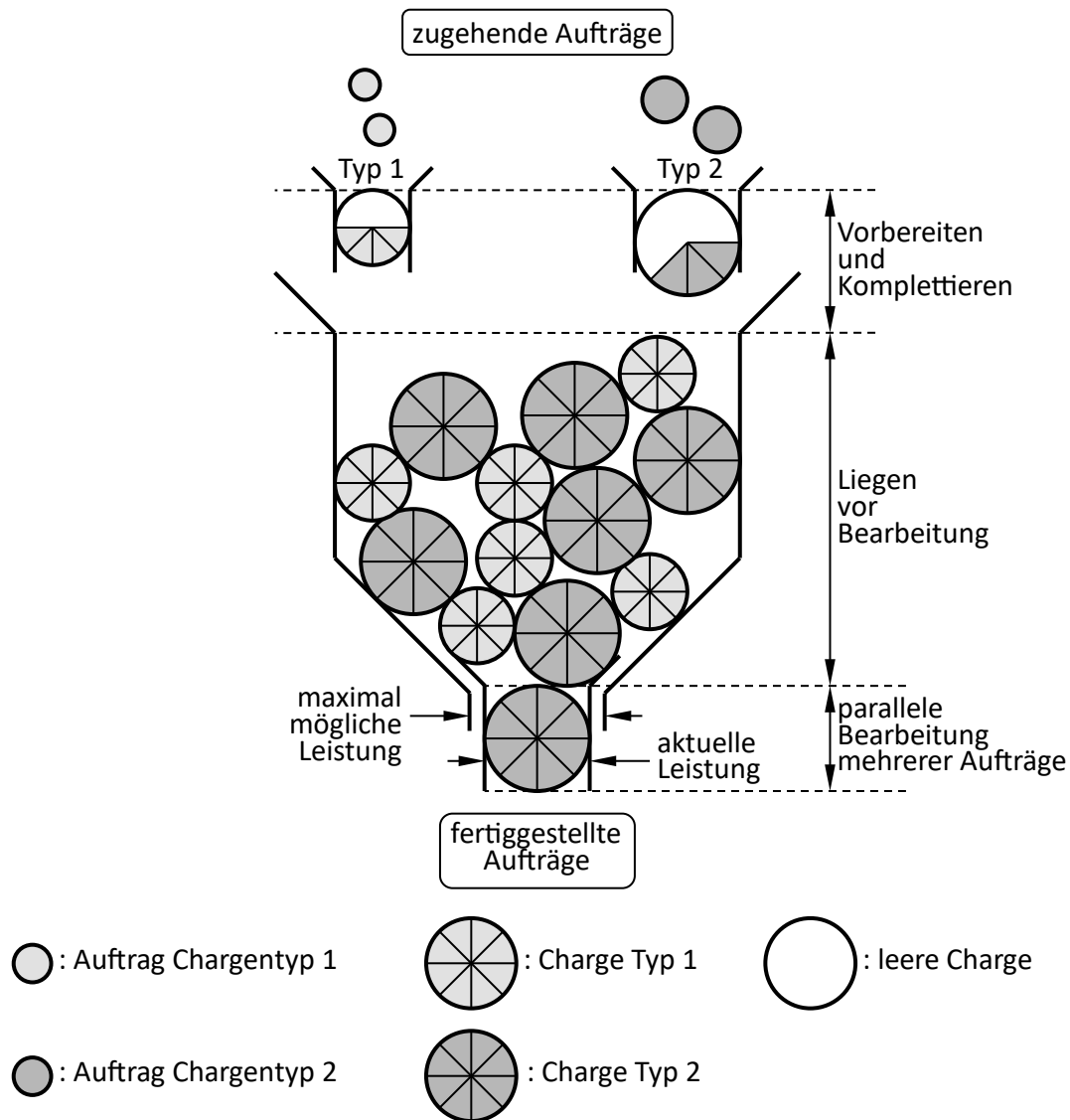


Abbildung 4.2 Trichtermodell von Chargenarbeitssystemen¹

Die Kreise bilden die zugehenden Aufträge unterschiedlicher Typen ab. Mehrere Aufträge eines gleichen Typs werden vorbereitet, zu einer Charge komplettiert und gehen in den Trichter über. Die untere Öffnung stellt analog zum klassischen Trichtermodell die aktuelle sowie die maximal mögliche Leistung dar. Für den Fall eines leeren Trichters werden unkomplettierte Chargen bis hin zu einzelnen Aufträgen bearbeitet. Die für Chargenarbeitssysteme charakteristischen

Eigenschaften zeigen sich insbesondere in den zusätzlichen Zeitanteilen für die Vorbereitung sowie Komplettierung und in der gesteigerten Leistung durch die parallele Bearbeitung von mehreren Aufträgen.

4.3 Durchlaufdiagramm

Das Durchlaufdiagramm in Abbildung 4.3 stellt schematisch den Verlauf des Zugangs und Abgangs eines Chargenarbeitssystems dar.

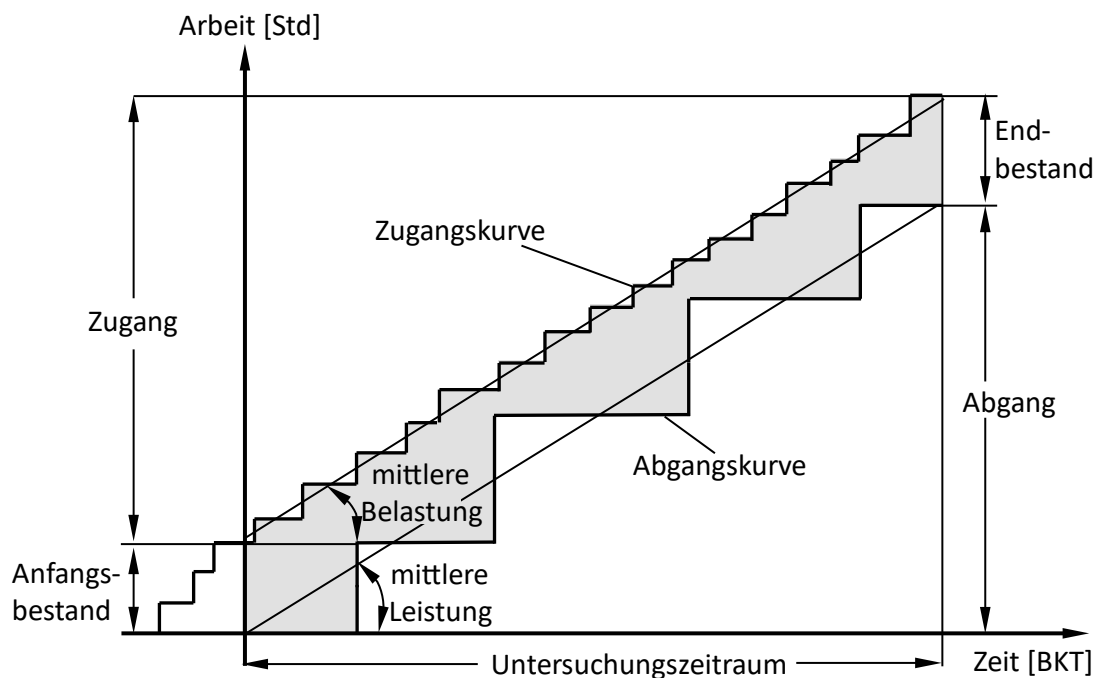


Abbildung 4.3 Durchlaufdiagramm von Chargenarbeitssystemen¹

Der Zugang erfolgt unkoordiniert und in einzelnen Aufträgen. Die mittlere Steigung des Zugangs entspricht der mittleren Belastung des Chargenarbeitssystems. Der Abgang zeigt größere Sprünge, die aus den Chargen entstehen. Die Fertigstellung der Aufträge erfolgt für alle Aufträge einer Charge zeitgleich. Die mittlere Steigung der Abgangskurve bildet die mittlere Leistung ab.

4.4 Logik der Chargenbildung

Die Chargenbildungslogik beschreibt, nach welchen Kriterien die Aufträge zu einer Charge gruppiert werden. Dabei können nur Aufträge der gleichen Variante bzw. des gleichen Chagentyps kombiniert werden. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten der Chargenbildung: ‚komplettierte Chargen‘ und

„unkomplettierte Chargen“. Die Logik der unkomplettierten Chargenbildung erstellt eine neue Charge, wenn das Arbeitssystem frei wird. Das Arbeitssystem bearbeitet also durchgängig eine Charge, wenn zu jedem Fertigstellungszeitpunkt mindestens ein neuer Auftrag vorliegt. Die erstellte Charge ist jedoch nicht zwingend komplett gefüllt. Die Logik der komplettierten Chargenbildung bearbeitet die Chargen hingegen nur dann, wenn diese vollständig gefüllt sind. Im Unterlastbereich wartet das Chargenarbeitssystem im Regelfall auf die nächste vollständige Charge. Arbeitssysteme, die im Sättigungsbereich arbeiten, erbringen die maximal mögliche Leistung (vgl. Kapitel 2). In diesem Fall liegen in beiden Logiken nur komplettierte Chargen vor.

Die Arbeit untersucht nachfolgend vorrangig die Logik der unkomplettierten Chargen. Abschnitt 5.1.6 zeigt die Auswirkung der Chargenbildungslogik auf die logistischen Zielgrößen.

4.5 Reihenfolge der Chargenbearbeitung

Dieser Abschnitt stellt verschiedene Verfahren der Reihenfolgebildung an Chargenarbeitssystemen dar. Die Reihenfolgebildung bezieht sich auf die Reihenfolge der Chargentypen. Innerhalb eines Chargentyps ist eine Bearbeitung nach FIFO weit verbreiteter Standard. Somit ist die Reihenfolgebildung nur für Arbeitssysteme mit zwei oder mehr Chargentypen relevant.

Eine zentrale Einflussgröße auf die Reihenfolge der Bearbeitung können prozessbedingte Beschränkungen sein. So kann es beispielsweise aus energetischer Sicht notwendig sein, verschiedene Temperaturen in einem Sinterofen in einer fest definierten Reihenfolge zu bearbeiten. Weiterhin ist eine Bearbeitung nach dem Reinheitsgrad möglich. Diese Formen sind Sonderformen der Reihenfolgebildung und erfordern bei einem unkoordinierten Zugang einen zusätzlichen Pufferbestand. Nachfolgend wird ein Chargenarbeitssystem mit einer variablen Bearbeitungsreihenfolge als Referenzsystem definiert. Arbeitssysteme ohne prozessbedingte Einschränkungen können unterschiedliche Verfahren der Reihenfolgebildung nutzen. Weit verbreitet ist die Wahl des nächsten Chargentyps entsprechend der Füllung der verschiedenen Chargentypen. Das Arbeitssystem wählt den Chargentyp mit dem höchsten Bestand zum Entscheidungszeitpunkt aus. Ein alternatives Verfahren ist die Wahl des Chargentyps nach dem Auftrag mit der längsten Wartezeit. Ziel ist es, dadurch die Streuung der Durchlaufzeit zu reduzieren.

4.6 Einheiten

Die Untersuchung und Modellierung von Chargenarbeitssystemen sind in verschiedenen Einheiten möglich. Im Verlauf der Forschungsarbeit wurden Chargenarbeitssysteme in verschiedenen Einheiten analysiert:

Im ersten Schritt wurde die Analyse eng an die Arbeit von Nyhuis angelehnt. Standardarbeitssysteme werden vorrangig in ‚Vorgabestunden‘ oder in ‚Anzahl an Aufträgen‘ beschrieben. So wurde für die Chargenarbeitssysteme zunächst die Einheit ‚Vorgabestunden der Prozesszeit‘ bzw. die ‚Anzahl an Chargen‘ gewählt. Es zeigte sich jedoch bei diesem Ansatz, dass der Füllgrad der Charge als zentrale Größe nicht in der Leistung abgebildet ist.

Aus diesem Grund wurden im zweiten Schritt die ‚Vorgabestunden der Prozesszeit‘ mit der ‚Anzahl an Werkstücken‘ kombiniert. Dieses Vorgehen ermöglichte eine genauere Beschreibung der Chargenarbeitssysteme. Zugleich resultiert die Annahme in komplexen Gleichungen.

Daher beschreibt die Arbeit Chargenarbeitssysteme nachfolgend vorrangig in der Einheit ‚Anzahl an Aufträgen‘. Diese ist im Forschungsbereich verbreitet und ermöglicht eine angemessen genaue Untersuchung der Arbeitssysteme.

5 Modellierung von Chargenarbeitssystemen mit einem Chargentyp

An Chargenarbeitssystemen mit einem Chargentyp kann prozesstechnisch jeder Auftrag mit jedem beliebigen anderen Auftrag kombiniert werden. Beispiele sind ein Glühofen, in dem alle Werkstücke mit der gleichen Temperatur und Zeit spannungsarm geglüht werden, eine Reinigungsanlage, die alle Aufträge mit dem gleichen Prozess reinigt oder eine Beschichtungsanlage, die alle Aufträge mit den gleichen Prozessbedingungen behandelt.

Die Modellierung der logistischen Zielgrößen von Chargenarbeitssystemen mit einem Chargentyp erfolgt in drei Schritten. Abschnitt 5.1 leitet die idealen Produktionskennlinien ab. Auf dieser Basis entwickelt Abschnitt 5.2 die genäherten Produktionskennlinien. Einen Schwerpunkt setzen die Abschnitte 5.1 und 5.2 auf die Modellierung des Bestands und der Leistung. Abschnitt 5.3 untersucht die Terminabweichung von Chargenarbeitssystemen mit einem Chargentyp, da diese nicht direkt aus dem Bestand oder der Leistung ableitbar ist. Einzelne Ergebnisse aus den Kapiteln 5 und 6 wurden vorab in einem Konferenzbeitrag diskutiert⁷.

5.1 Ideale Produktionskennlinie

Die Ableitung der idealen Produktionskennlinien für Chargenarbeitssysteme ist an das Vorgehen von Nyhuis angelehnt. Auf der Grundlage des idealen Prozesses (Abschnitt 5.1.1) leiten die Abschnitte 5.1.2 und 5.1.3 die maximal mögliche Leistung und den idealen Mindestbestand ab. Der Abschnitt 5.1.4 beschreibt anhand von zwei Ansätzen die Ermittlung der minimalen Durchlaufzeit. Die Ermittlung spezifischer Kennzahlen und der Vergleich von Chargenarbeitssystemen mit Standardarbeitssystemen erfolgt in den Abschnitten 5.1.5 bis 5.1.7.

5.1.1 Definition des Idealprozesses

Der ideale Prozess eines Chargenarbeitssystems beschreibt die Annahmen für die Herleitung der charakteristischen Punkte. Diese Abstraktion ermöglicht eine

⁷ Winter, Michael; Lödding, Hermann: Modelling Logistic Operating Curves for Batch Workstations. Twenty-first International Working Seminar on Production Economics, Innsbruck, 2020 (unveröffentlicht)

mathematische bzw. grafische Untersuchung des Arbeitssystems, das im industriellen Umfeld von großer Komplexität geprägt ist.

Für Standardarbeitssysteme definiert Nyhuis, dass zu jeder Zeit ein Auftrag am Arbeitssystem bearbeitet wird und dass die Aufträge direkt nach der Ankunft in die Bearbeitung übergehen (vgl. Abschnitt 2.5.1). Für Chargenarbeitssysteme werden die Annahmen angepasst:

- Nach dem Bearbeitungsende einer Charge steht dem Arbeitssystem unmittelbar eine neue Charge zur Verfügung.
- Die zu bearbeitenden Chargen sind vollständig gefüllt.

Basierend auf diesen Annahmen leiten die nachfolgenden Abschnitte elementare Kennzahlen für die idealen Produktionskennlinien ab.

5.1.2 Maximal mögliche Leistung

Die maximal mögliche Leistung von Standardarbeitssystemen resultiert aus der verfügbaren Kapazität (vgl. Abschnitt 2.1.1). Diese Einflussgröße ist auch für Chargenarbeitssysteme relevant und als das Minimum aus verfügbarer Betriebsmittelkapazität und nutzbarer Personalkapazität definiert⁷:

$$KAP_{\text{verf}} = \min \{ BKAP_{\text{verf}}, PKAP_n \} \quad 5.1$$

KAP_{verf}	verfügbare Kapazität [Std/BKT]
$BKAP_{\text{verf}}$	verfügbare Betriebsmittelkapazität [Std/BKT]
$PKAP_n$	nutzbare Personalkapazität [Std/BKT]

Die maximal mögliche Leistung erreicht das Chargenarbeitssystem, wenn es durchgängig Chargen mit der maximalen Chargengröße bearbeitet. Weitere Einflussgrößen auf die maximal mögliche Leistung sind die verfügbare Kapazität und die Prozesszeit:

$$LA_{\text{max}} = \frac{KAP_{\text{verf}}}{ZP} \cdot CGA_{\text{max}} \quad 5.2$$

LA_{max}	maximal mögliche Leistung [AnzAuf/BKT]
KAP_{verf}	verfügbare Kapazität [Std/BKT]
ZP	Prozesszeit [Std]
CGA_{max}	maximale Chargengröße [AnzAuf]

Der Quotient aus der verfügbaren Kapazität und der Prozesszeit beschreibt die Anzahl der bearbeiteten Chargen pro Betriebskalendertag. Diese wird in

Gleichung 5.2 mit der Anzahl an Aufträgen pro Charge multipliziert, um die maximal mögliche Leistung in der Einheit ‚Anzahl Aufträge pro Betriebskalender-tag‘ zu ermitteln. Gleichung 5.3 berechnet die maximal mögliche Leistung in der Einheit ‚Anzahl Chargen pro Betriebskalendertag‘:

$$LC_{\max} = \frac{KAP_{\text{verf}}}{ZP} \quad 5.3$$

LC_{\max} maximal mögliche Leistung (in Anzahl Chargen) [1/BKT]
 KAP_{verf} verfügbare Kapazität [Std/BKT]
 ZP Prozesszeit [Std]

Nach der Ermittlung der maximal möglichen Leistung beschreiben die beiden folgenden Gleichungen die mittlere ideale Leistung. Dazu wird die erste Annahme des Idealprozesses aufgehoben. Leistungsverluste können auf zwei Arten auftreten: einerseits durch nicht ausgelastete Chargen und andererseits durch Wartezeiten des Chargenarbeitssystems. Die resultierende Auslastung ergibt sich als das Produkt der füllgradbedingten Auslastung und der wartezeitbedingten Auslastung:

$$A_{\text{Ch}} = A_{\text{FG}} \cdot A_{\text{ZW}} \quad 5.4$$

A_{Ch} Auslastung des Chargenarbeitssystems [-]
 A_{FG} füllgradbedingte Auslastung [-]
 A_{ZW} wartezeitbedingte Auslastung [-]

Die mittlere ideale Leistung entspricht dem Produkt aus der maximal möglichen Leistung und der Auslastung des Arbeitssystems. Im Regelfall kann die wartezeitbedingte Auslastung für eine unkomplettierte Chargenbildungslogik gut mit einem Wert von eins angenähert werden. Die füllgradbedingte Auslastung ist der Quotient der mittleren und der maximalen Chargengröße:

$$LA_{\text{m}} = LA_{\max} \cdot A_{\text{FG}} \cdot A_{\text{ZW}} = LA_{\max} \cdot \frac{CGA_{\text{m}}}{CGA_{\max}} \cdot A_{\text{ZW}} \quad 5.5$$

LA_{m} mittlere Leistung [AnzAuf/BKT]
 LA_{\max} maximal mögliche Leistung [AnzAuf/BKT]
 A_{FG} füllgradbedingte Auslastung [-]
 A_{ZW} wartezeitbedingte Auslastung [-]
 CGA_{m} mittlere Chargengröße [AnzAuf]
 CGA_{\max} maximale Chargengröße [AnzAuf]

Die mittlere ideale Leistung ergibt sich als Funktion der maximal möglichen Leistung, der mittleren und maximalen Chargengröße sowie der wartezeitbedingten Auslastung.

5.1.3 Idealer Mindestbestand

Die zweite elementare Kennzahl für Chargenarbeitssysteme ist der ideale Mindestbestand. Dieser Abschnitt leitet den idealen Mindestbestand aus den Bestandselementen im Durchlaufdiagramm (vgl. Abbildung 5.1) ab.

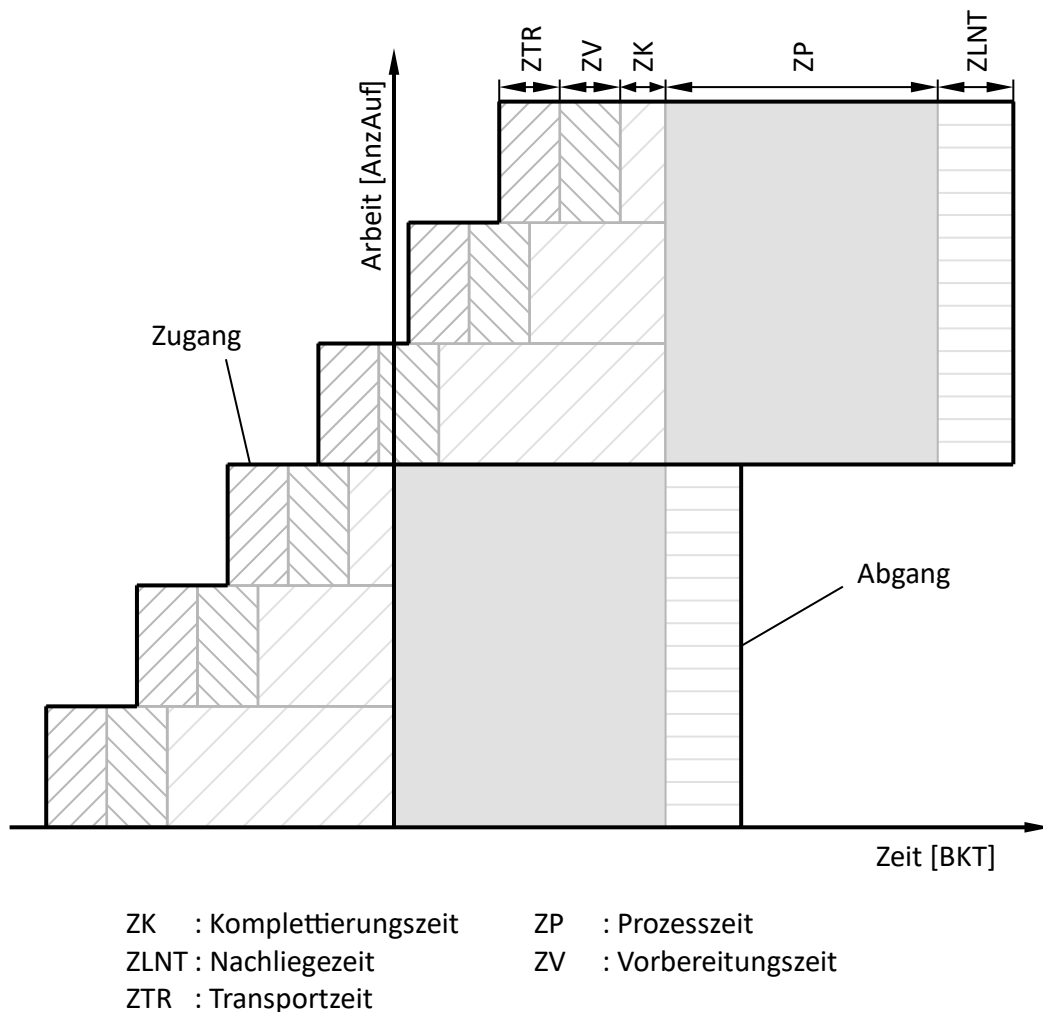


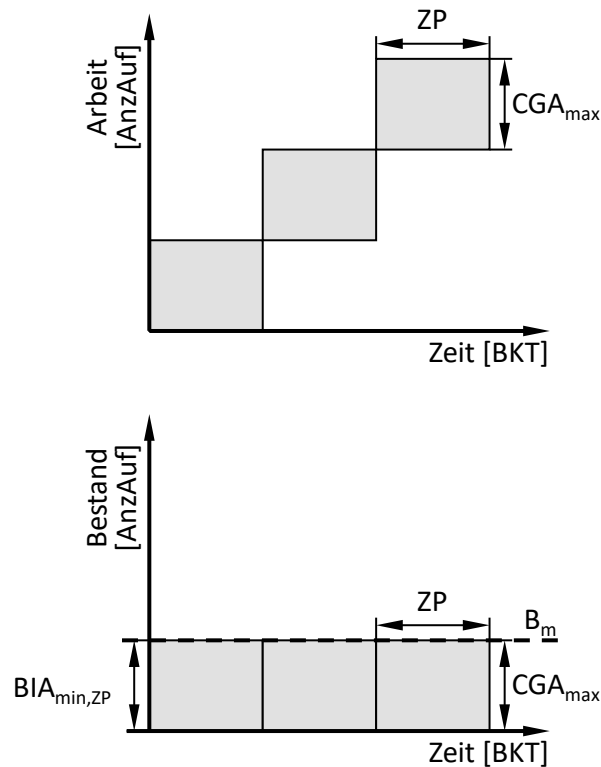
Abbildung 5.1 Detailliertes Durchlaufdiagramm von Chargenarbeitssystemen⁷

Die nachfolgenden Abschnitte detaillieren die Bestandsflächen aus Abbildung 5.1 und ermitteln die erforderlichen Mindestbestände. Die Reihenfolge der Herleitung lehnt sich an das Vorgehen von Nyhuis an (vgl. Abschnitt 2.5.1). Zunächst wird der ideale Mindestbestand durch Bearbeitung abgeleitet. Die weiteren Bestandsanteile werden entsprechend ihrer zeitlichen Abfolge im Durchlaufelement ergänzt.

Der Einbezug der Auslastung (siehe Gleichung 5.4) für die Berechnung der mittleren Leistung ist linear möglich. Die nachfolgenden Gleichungen verzichten daher auf die Darstellung der Auslastung. Eine Ausnahme bildet die Herleitung des Bestands durch die Komplettierung.

Idealer Mindestbestand durch Bearbeitung

Das Chargenarbeitssystem bearbeitet die Aufträge für die Zeitspanne der Prozesszeit. In dieser Zeit liegt gemäß Annahme 2 des Idealprozesses eine komplett gefüllte Charge am Arbeitssystem vor. Weiterhin definieren die Annahmen 1 und 2, dass direkt im Anschluss an das Bearbeitungsende eine neue Charge mit der maximalen Füllung vorliegt. Abbildung 5.2 zeigt im oberen Teil das entsprechende Durchlaufdiagramm und im unteren Teil den resultierenden Bestandsverlauf.



- B_m : mittlerer Bestand $BIA_{min,ZP}$: idealer Mindestbestand
 CGA_{max} : maximale Chargengröße durch Bearbeitung
 ZP : Prozesszeit

Abbildung 5.2 Idealer Mindestbestand durch Bearbeitung

Im idealen Prozess liegt folglich zu jedem Zeitpunkt die maximale Chargengröße als Bestand durch die Bearbeitung vor:

$$BIA_{min,ZP} = CGA_{max} \quad 5.6$$

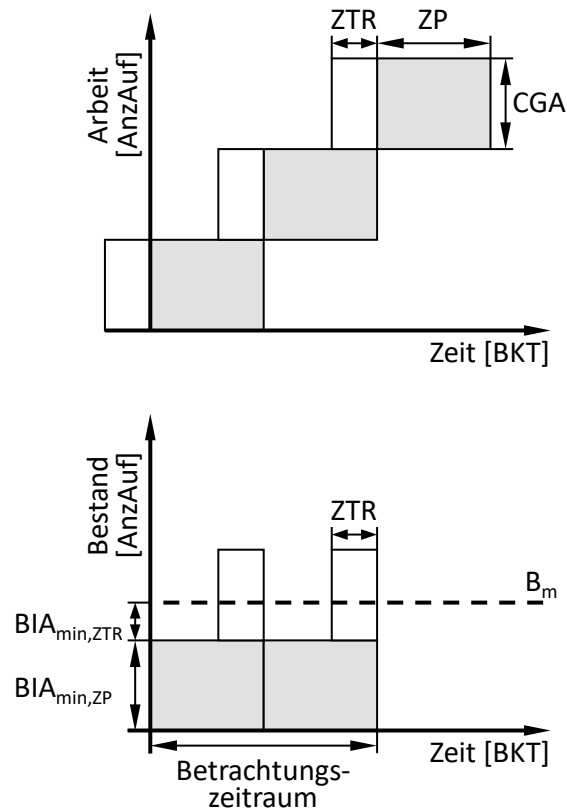
- $BIA_{min,ZP}$ idealer Mindestbestand durch Prozesszeit [AnzAuf]
 CGA_{max} maximale Chargengröße [AnzAuf]

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die jeweiligen Mindestbestandsanteile mit der Referenz des Mindestbestands durch Bearbeitung.

Idealer Mindestbestand durch Transport

Da organisatorische Liegezeiten im Idealprozess nicht auftreten, ist die Transportzeit das erste Element der Untersuchung. Alle Aufträge werden vom

jeweiligen Vorgänger zum Chargenarbeitssystem transportiert. Diese Transporte treten zu verschiedenen Zeitpunkten auf. Da sie jedoch die gleiche Zeitdauer umfassen, werden sie vereinfacht analysiert. Abbildung 5.3 zeigt die Bestandsfläche der Transportzeit im Durchlaufdiagramm und im Bestandsverlauf.



- | | |
|---------------------------|---|
| B_m : mittlerer Bestand | $BIA_{min,ZP}$: idealer Mindestbestand durch Bearbeitung |
| CGA : Chargengröße | $BIA_{min,ZTR}$: idealer Mindestbestand durch Transport |
| ZP : Prozesszeit | |
| ZTR : Transportzeit | |

Abbildung 5.3 Idealer Mindestbestand durch Transport

Die zentrale Größe für die Ableitung des idealen Mindestbestands durch den Transport ist der Quotient der Transportzeit und der Prozesszeit. Dieser wird mit der maximalen Chargengröße multipliziert:

$$BIA_{min,ZTR} = \frac{ZTR}{ZP} \cdot CGA_{max} \quad 5.7$$

- | | |
|-----------------|---|
| $BIA_{min,ZTR}$ | idealer Mindestbestand durch Transportzeit [AnzAuf] |
| ZTR | Transportzeit [Std] |

ZP Prozesszeit [Std]
CGA_{max} maximale Chargengröße [AnzAuf]

Chargenarbeitssysteme benötigen im Regelfall lange Prozesszeiten. Somit ist der Einfluss der in der Regel kurzen Transportzeit entsprechend Gleichung 5.7 im Regelfall gering.

Idealer Mindestbestand durch Chargenvorbereitung

Die Herleitung des idealen Mindestbestands durch die Chargenvorbereitung entspricht der Herleitung des Mindestbestands durch den Transport. Der Zeitanteil der Vorbereitung fällt bei jedem Auftrag an (vgl. Abschnitt 4.1) und wird entsprechend des Vorgehens aus Abbildung 5.3 berücksichtigt:

$$BIA_{\min,ZV} = \frac{ZV}{ZP} \cdot CGA_{\max} \quad 5.8$$

BIA_{min,ZV} idealer Mindestbestand durch Chargenvorbereitungszeit [AnzAuf]
ZV Chargenvorbereitungszeit [Std]
ZP Prozesszeit [Std]
CGA_{max} maximale Chargengröße [AnzAuf]

Idealer Mindestbestand durch Chargenkomplettierung

Die Aufträge treffen in einer Werkstattfertigung unabgestimmt am Chargenarbeitssystem ein. Daher sind sowohl kürzere als auch längere Wartezeiten möglich. Abbildung 5.4 zeigt unterschiedliche Möglichkeiten des Zugangs, jeweils unter der Annahme, dass die Aufträge sukzessiv am Arbeitssystem eintreffen.

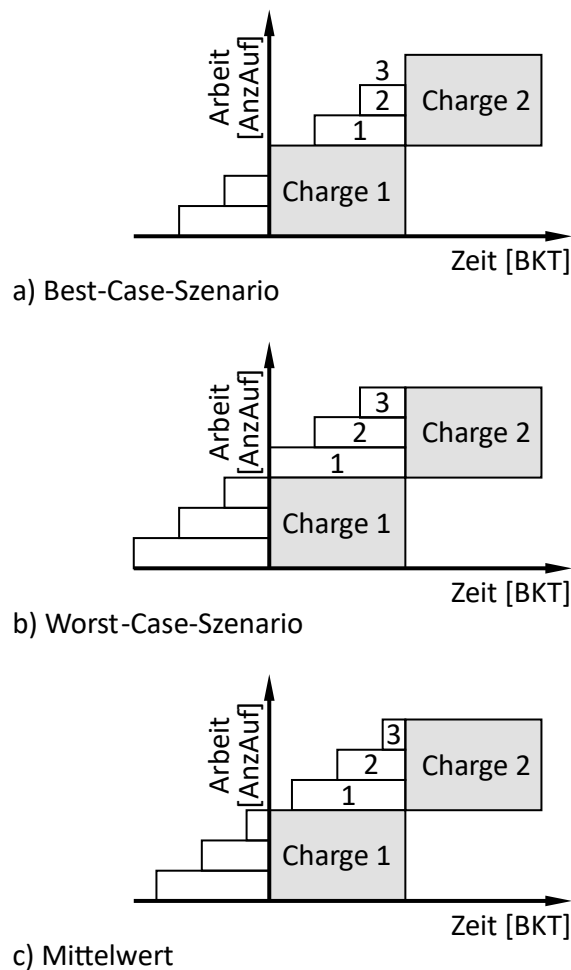
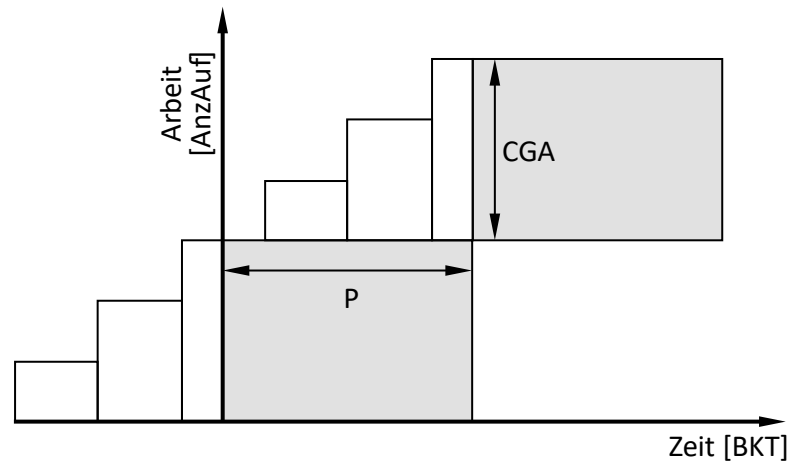


Abbildung 5.4 Auswirkung des Zugangs zum Chargenarbeitssystem

Im Best-Case-Szenario trifft der letzte Auftrag einer Charge jeweils zeitgleich zum Bearbeitungsbeginn ein. Der letzte Auftrag wird daher ohne einen Zeitanteil für die Komplettierung bearbeitet. Dieser Fall ist für hohe Auslastungen und Pufferbestände besonders relevant, weil sich die Chargen dann unmittelbar nach der Komplettierung in die Warteschlange komplettierter Chargen einreihen. Abschnitt 6.2.3 untersucht das Best-Case-Szenario detailliert. Im Worst-Case-Szenario erreichen die Aufträge das Arbeitssystem so, dass sie eine Zwischenankunftszeit länger warten. Da die Ankunftszeiten und der Bearbeitungsbeginn unabhängig voneinander sind, verteilt sich die Wartezeit in der Realität zufällig über die Spanne vom Best- zum Worst-Case-Szenario. Teil c) der Abbildung 5.4 zeigt den resultierenden Mittelwert.

Nachfolgend wird der ideale Mindestbestand durch die Chargenkomplettierung mit zwei verschiedenen Vorgehensweisen abgeleitet. Zunächst erfolgt die Herleitung mit dem Hilfsmittel der geometrischen Reihe. Abbildung 5.5 zeigt den idealen Bestand durch die Chargenkomplettierung der maximal möglichen Leistung an einem Beispiel von einem Chargenarbeitssystem mit einer maximalen Chargengröße von drei Aufträgen.



CGA : Chargengröße

P : Länge des Bezugszeitraums

Abbildung 5.5 Bestandsflächen der Komplettierung

Der ideale Mindestbestand durch die Chargenkomplettierung entspricht dem Quotienten der Bestandsfläche und der Länge des Bezugszeitraums:

$$BIA_{\min,ZK,CGA_{\max}} = \frac{FBA}{P} \quad 5.9$$

$BIA_{\min,ZK,CGA_{\max}}$ idealer Mindestbestand durch Komplettierung bei maximaler Chargenfüllung [AnzAuf]

FBA Bestandsfläche [AnzAuf · BKT]

P Länge des Bezugszeitraums [BKT]

Unabhängig von dem Beispiel aus Abbildung 5.5 kann die gesamte Bestandsfläche in Teilflächen entsprechend der Zwischenankunftszeit aufgeteilt werden. Vor dem Eintreffen des ersten Auftrags einer neuen Charge ist der Bestand null. Die erste Fläche hat eine Höhe von null Aufträgen und eine Breite der Hälfte der ersten Zwischenankunftszeit, die zweite Fläche hat eine Höhe von einem Auftrag und eine Breite der zweiten Zwischenankunftszeit usw. Die Länge des Betrachtungszeitraums entspricht der Summe der Zwischenankunftszeiten:

$$BIA_{\min,ZK,CGA_{\max}} = \frac{0 \cdot \frac{ZAZ_1}{2} + \dots + (CGA_{\max} - 1) \cdot ZAZ_{CGA_{\max}} + CGA_{\max} \cdot \frac{ZAZ_{CGA_{\max}+1}}{2}}{\sum_{i=1}^{CGA_{\max}} ZAZ_i} \quad 5.10$$

$BIA_{\min,ZK,CGA_{\max}}$ idealer Mindestbestand durch Komplettierung bei maximaler Chargenfüllung [AnzAuf]
 ZAZ Zwischenankunftszeit [BKT]
 CGA_{\max} maximale Chargengröße [AnzAuf]

Mit dem Gesetz der großen Zahlen für die Berechnung der Zwischenankunftszeiten und der geometrischen Reihe für die Berechnung der Höhe der Flächen ergibt sich:

$$BIA_{\min,ZK,CGA_{\max}} = \frac{ZAZ_m \cdot \left(\frac{CGA_{\max} - 1}{2} \cdot CGA_{\max} + \frac{CGA_{\max}}{2} \right)}{ZAZ_m \cdot CGA_{\max}} \quad 5.11$$

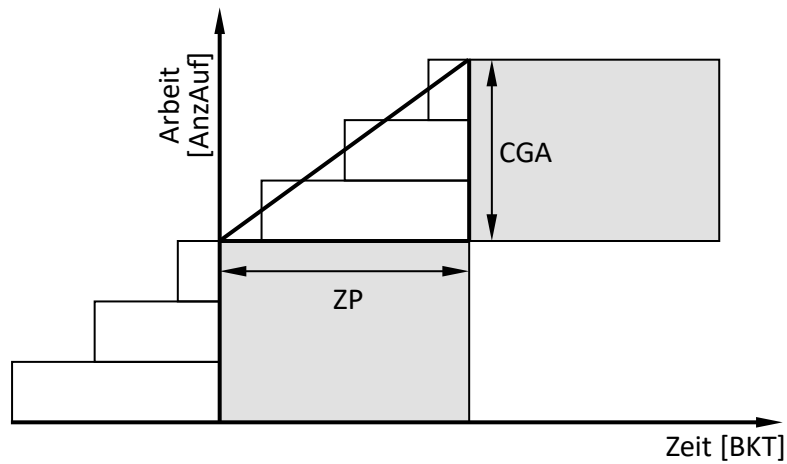
$BIA_{\min,ZK,CGA_{\max}}$ idealer Mindestbestand durch Komplettierung bei maximaler Chargenfüllung [AnzAuf]
 ZAZ_m mittlere Zwischenankunftszeit [BKT]
 CGA_{\max} maximale Chargengröße [AnzAuf]

Nach dem Kürzen der mittleren Zwischenankunftszeit und der maximalen Chargengröße zeigt sich, dass allein die maximale Chargengröße den idealen Mindestbestand durch die Chargenkomplettierung beeinflusst:

$$BIA_{\min,ZK,CGA_{\max}} = \frac{CGA_{\max}}{2} \quad 5.12$$

$BIA_{\min,ZK,CGA_{\max}}$ idealer Mindestbestand durch Komplettierung bei maximaler Chargenfüllung [AnzAuf]
 CGA_{\max} maximale Chargengröße [AnzAuf]

Alternativ zur Herleitung über die geometrische Reihe ist auch eine grafische Herleitung des Mindestbestands durch die Komplettierung möglich. Abbildung 5.6 zeigt den idealen Mindestbestand durch die Komplettierung mit drei Aufträgen.

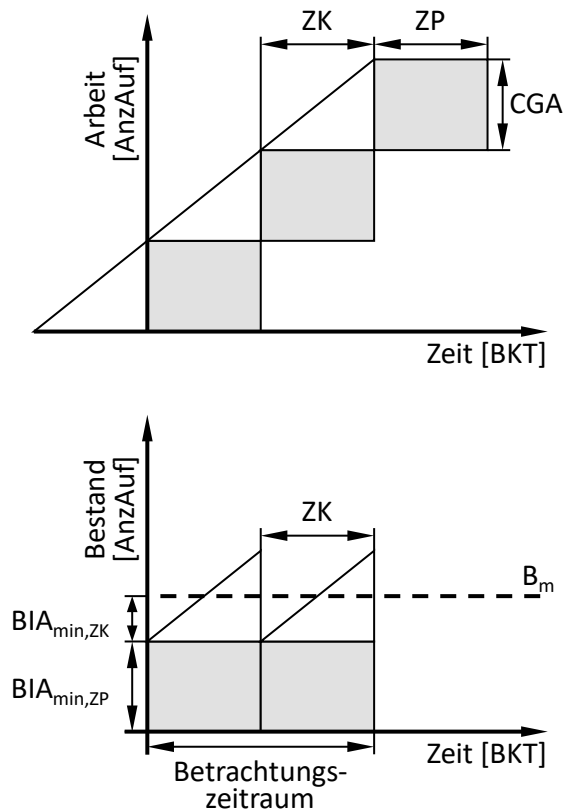


CGA : Chargengröße

ZP : Prozesszeit

Abbildung 5.6 Berechnung des Mindestbestands durch Kompletierung

Die Kompletierungsfläche entspricht einem Dreieck mit der Breite der Prozesszeit und der Höhe der Chargengröße. In Anlehnung an das Vorgehen aus Abbildung 5.2 zeigt Abbildung 5.7 den resultierenden idealen Mindestbestand durch die Kompletierung.



- | | |
|---------------------------|--|
| B_m : mittlerer Bestand | $BIA_{min,ZP}$: idealer Mindestbestand durch Bearbeitung |
| CGA : Chargengröße | $BIA_{min,ZK}$: idealer Mindestbestand durch Komplettierung |
| ZP : Prozesszeit | |
| ZK : Komplettierungszeit | |

Abbildung 5.7 Mindestbestand der Komplettierung mit einem Chargentyp

Die mittlere Höhe der Dreiecksflächen entspricht der halben Höhe der Katheten:

$$BIA_{min,ZK} = \frac{1}{2} \cdot CGA \quad 5.13$$

$BIA_{min,ZK}$ idealer Mindestbestand durch Komplettierungszeit [AnzAuf]
 CGA Chargengröße [AnzAuf]

Die grafische Herleitung führt somit zum gleichen Ergebnis wie die Herleitung über das Hilfsmittel der geometrischen Reihe (vgl. Gleichung 5.12).

Für geringe Leistungen und folglich auch geringe Bestandsniveaus bildet der Bestand durch die Komplettierung ein Ausnahme. Der Bestand tritt nur auf, wenn mehrere Aufträge zu einer Charge zusammengefasst werden. Ein Auftrag benötigt keine Komplettierung und daher auch keinen Komplettierungsbestand. Die

Leistungskurve für Chargenarbeitssysteme weist daher ein Plateau auf (vgl. Abbildung 5.8).

Idealer Mindestbestand durch technologisches Nachliegen

Die Bestandsfläche des idealen Mindestbestands durch das technologische Nachliegen hat die gleiche Form wie die der Transportzeit (vgl. Abbildung 5.3). Folglich wird der ideale Mindestbestand durch den Quotienten der Nachliegezeit und der Prozesszeit sowie durch die maximale Chargengröße bestimmt:

$$BIA_{\min,ZLNT} = \frac{ZLNT}{ZP} \cdot CGA_{\max} \quad 5.14$$

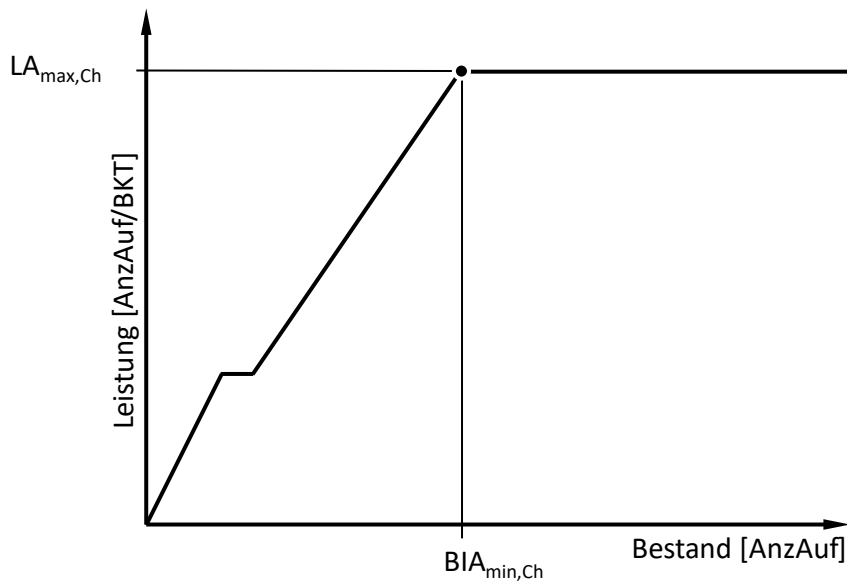
- $BIA_{\min,ZLNT}$ idealer Mindestbestand durch technologisches Nachliegen [AnzAuf]
- $ZLNT$ technologische Nachliegezeit [Std]
- ZP Prozesszeit [Std]
- CGA_{\max} maximale Chargengröße [AnzAuf]

Gemäß dem Vorgehen von Nyhuis (vgl. Abschnitt 2.5.1) ergibt die Summe der einzelnen idealen Mindestbestände den (gesamten) idealen Mindestbestand⁷:

$$BIA_{\min} = BIA_{\min,ZTR} + BIA_{\min,ZV} + BIA_{\min,ZK} + BIA_{\min,ZP} + BIA_{\min,ZLNT} \quad 5.15$$

- BIA_{\min} idealer Mindestbestand [AnzAuf]
- $BIA_{\min,ZTR}$ idealer Mindestbestand durch Transportzeit [AnzAuf]
- $BIA_{\min,ZV}$ idealer Mindestbestand durch Chargenvorbereitungszeit [AnzAuf]
- $BIA_{\min,ZK}$ idealer Mindestbestand durch Komplettierungszeit [AnzAuf]
- $BIA_{\min,ZP}$ idealer Mindestbestand durch Prozesszeit [AnzAuf]
- $BIA_{\min,ZLNT}$ idealer Mindestbestand durch technologisches Nachliegen [AnzAuf]

Abbildung 5.8 zeigt die ideale Leistungskennlinie für Chargenarbeitssysteme. Sie bildet die mittlere Leistung als Funktion des mittleren Bestands ab. Die elementaren Einflussgrößen auf den Verlauf der Leistung sind die Chargengröße und die Prozesszeit. Weitere Einflussgrößen sind die Transportzeit, die Chargenvorbereitungszeit und die technologisch bedingte Nachliegezeit.



$BIA_{min,Ch}$: idealer Mindestbestand des Chargenarbeitssystems

$LA_{max,Ch}$: maximal mögliche Leistung des Chargenarbeitssystems

Abbildung 5.8 Leistungskennlinie mit einem Chargentyp

Die Leistungskurve verläuft aus dem Ursprung linear bis zu dem Plateau, das durch die ersten Zeitanteile für die Komplettierung entsteht. Das Plateau tritt bei einer Leistung von einem Auftrag pro BKT auf und damit bei einer Auslastung, die dem Kehrwert der maximalen Chargengröße entspricht. Für Bestandsniveaus oberhalb des Plateaus und unterhalb des idealen Mindestbestands steigt die Leistung erneut linear an. Ab dem idealen Mindestbestand bleibt die Leistung konstant, da die maximal mögliche Leistung erreicht ist.

5.1.4 Minimale Durchlaufzeit

Die minimale Durchlaufzeit kann mit zwei Vorgehensweisen ermittelt werden: einerseits ist eine Ableitung über die Zeitanteile von Chargenarbeitssystemen möglich und andererseits kann der mathematische Zusammenhang der Durchlaufzeit, des Bestands und der Leistung genutzt werden.

Zunächst leitet dieser Absatz die minimale Durchlaufzeit über die Zeitanteile des Durchlaufelements ab (vgl. Abbildung 4.1). Definitionsgemäß entfallen die Wartezeiten. Die minimale mittlere Durchlaufzeit ist der Quotient der verbleibenden Zeitanteile und der verfügbaren Kapazität:

$$ZDL_{\min} = \frac{ZTR + ZV + ZK + ZP + ZLNT}{KAP_{\text{verf}}} \quad 5.16$$

ZDL _{min}	Minstdurchlaufzeit [BKT]
ZTR	Transportzeit [Std]
ZV	Chargenvorbereitungszeit [Std]
ZK	Komplettierungszeit [Std]
ZP	Prozesszeit [Std]
ZLNT	technologische Nachliegezeit [Std]
KAP _{verf}	verfügbare Kapazität [Std/BKT]

In Gleichung 5.16 sind alle Größen außer der Komplettierungszeit bekannt. Analog zur Bestandsberechnung in Abbildung 5.7 folgt die Berechnung für die Komplettierungszeit:

$$ZK = \frac{ZP}{2} \quad 5.17$$

ZK	Komplettierungszeit [Std]
ZP	Prozesszeit [Std]

Unterhalb des Plateaus ist in jeder Charge nur ein Auftrag enthalten und die Zeit für die Komplettierung entfällt.

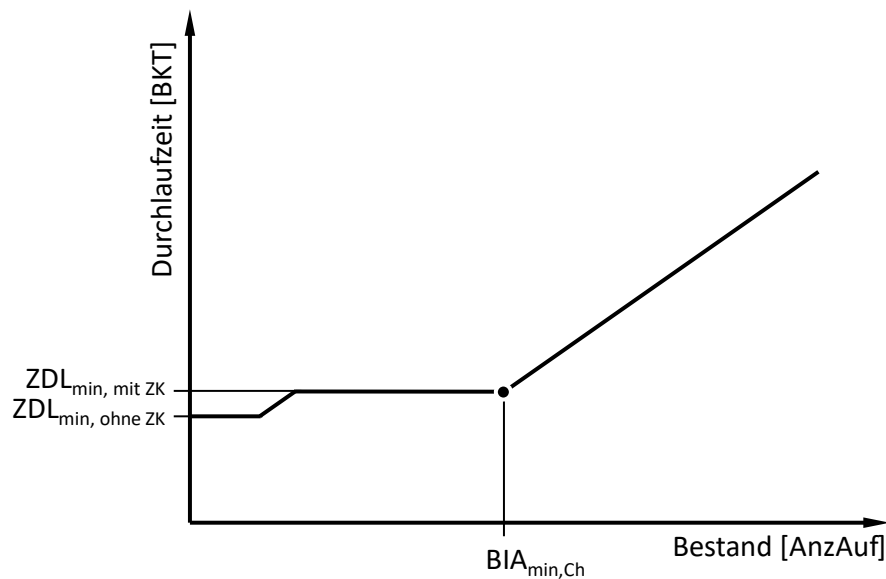
Die zweite Vorgehensweise beschreibt die minimale Durchlaufzeit über die Trichterformel (vgl. Abschnitt 2.4) als Quotient des idealen Mindestbestands (Gleichung 5.15) und der maximal möglichen Leistung (Gleichung 5.2)⁷:

$$ZDL_{\min} \approx \frac{BIA_{\min}}{LA_{\max}} \quad 5.18$$

ZDL _{min}	Minstdurchlaufzeit [BKT]
BIA _{min}	idealer Mindestbestand [AnzAuf]
LA _{max}	maximal mögliche Leistung [AnzAuf/BKT]

Die zweite Vorgehensweise kann zusätzlich zur Kennzahl der minimalen Durchlaufzeit auch den gesamten Kurvenverlauf ableiten und ist somit deutlich aussagekräftiger.

Abbildung 5.9 stellt den Verlauf der idealen Durchlaufzeitkennlinie von Chargenarbeitssystemen mit einem Chargentyp dar.



$BIA_{\min, \text{Ch}}$: idealer Mindestbestand des Chargenarbeitssystems

$ZDL_{\min, \text{Ch}}$: minimale Durchlaufzeit des Chargenarbeitssystems

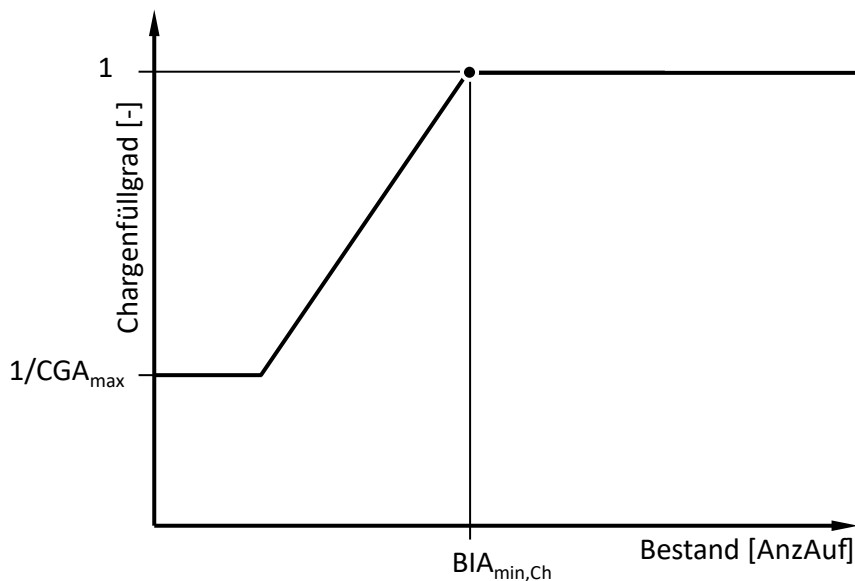
ZK : Komplettierungszeit

Abbildung 5.9 Ideale Durchlaufzeitkennlinie mit einem Chargentyp

Die Durchlaufzeit verläuft im Unterlastbereich konstant und steigt ab dem idealen Mindestbestand proportional mit dem Bestand an. Eine Ausnahme bildet der begrenzte Anstieg der Durchlaufzeit im Unterlastbereich. Dieser Anstieg liegt in dem Bestandsbereich, in dem die Leistungskennlinie (vgl. Abbildung 5.8) das Plateau aufweist. Vor dem begrenzten Anstieg umfasst jede Charge nur einen Auftrag und somit entstehen keine Zeiten für das Komplettieren der Chargen. Der zusätzliche Zeitanteil der Komplettierung nach dem begrenzten Anstieg entspricht der Hälfte der Prozesszeit. Im Vergleich zu Standardarbeitssystemen weisen Chargenarbeitssysteme folglich größere Durchlaufzeiten auf.

5.1.5 Chargenfüllgrad

Der Chargenfüllgrad bezeichnet den Quotienten aus der mittleren Chargengröße und der maximalen Chargengröße. Abbildung 5.10 zeigt den Chargenfüllgrad als Funktion des Bestands.



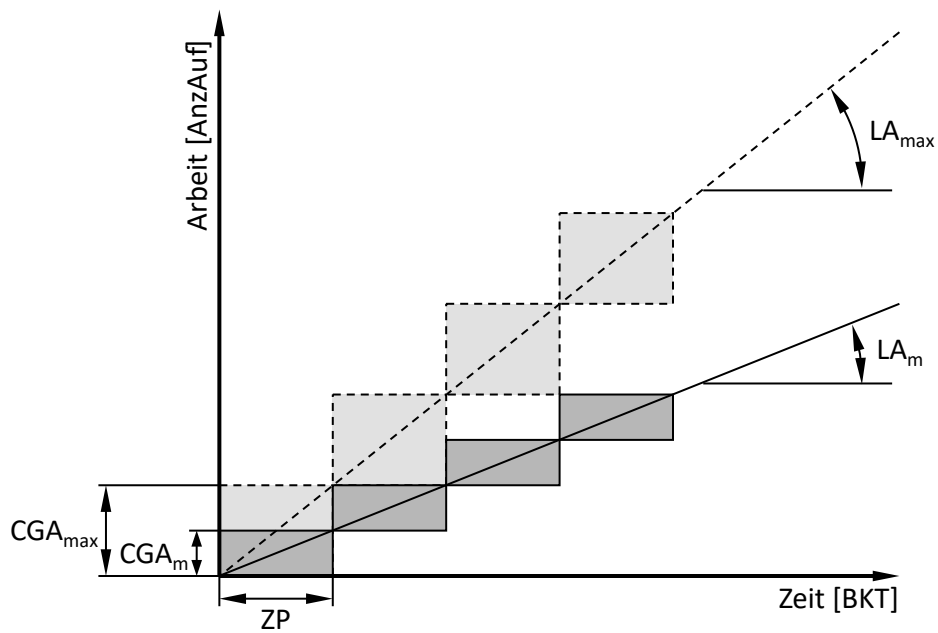
$BIA_{min,Ch}$: idealer Mindestbestand des Chargenarbeitssystems
 CGA_{max} : maximale Chargengröße

Abbildung 5.10 Idealer Verlauf des Chargenfüllgrads

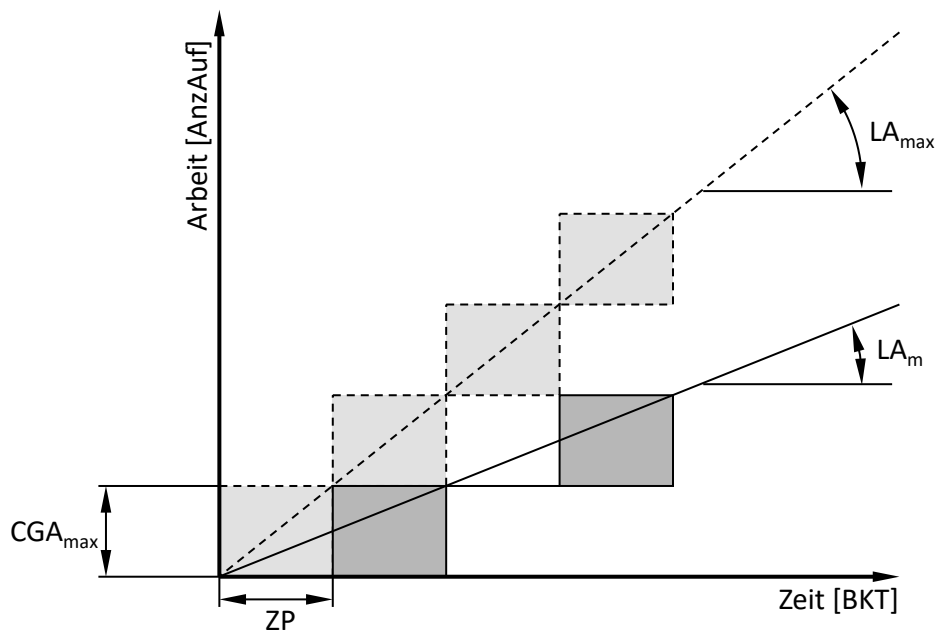
Der Verlauf des Chargenfüllgrads ähnelt dem Verlauf der Leistung. Der maximale Chargenfüllgrad von eins tritt auf, wenn alle Chargen vollständig gefüllt sind. Diese Bedingung ist für die idealen Kennlinien ab dem idealen Mindestbestand erfüllt. Für Bestände, die geringer als der ideale Mindestbestand sind, fällt der Chargenfüllgrad linear ab. Da in jeder Charge mindestens ein Auftrag vorliegt, hat der Chargenfüllgrad sein Minimum beim Kehrwert der maximalen Chargengröße.

5.1.6 Verhalten des Arbeitssystems im Unterlastbereich

Abschnitt 4.4 stellt die komplettierte und die unkomplettierte Chargenbildungslogik für den Unterlastbereich vor. Arbeitssysteme, die Chargen nach der komplettierenden Logik bilden, bearbeiten durchgängig vollständig gefüllte Chargen. Die Auslastungsverluste entstehen durch Wartezeiten des Chargenarbeitssystems. Arbeitssysteme, die Chargen mit der Logik der unkomplettierten Chargen erstellen, arbeiten im Regelfall durchgängig. Die Auslastungsverluste entstehen durch den geringeren Füllgrad der Chargen. Abbildung 5.11 stellt die Durchlaufdiagramme der beiden Chargenbildungslogiken bei einer Auslastung von 50 Prozent dar.



a) unkomplettierte Chargen

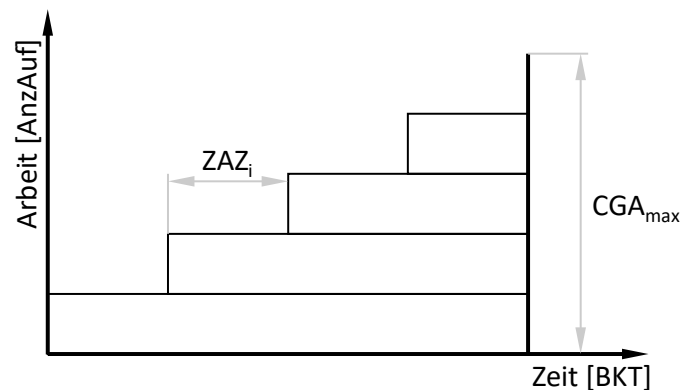


b) komplettierte Chargen

CGA_m : mittlerer Chargengröße CGA_{max} : maximale Chargengröße
 LA_m : mittlere Leistung LA_{max} : maximal mögliche Leistung
 ZP : Prozesszeit

Abbildung 5.11 Auswirkung der Chargenbildung auf das Durchlaufdiagramm¹

Beide Durchlaufdiagramme weisen die gleiche Prozesszeit, maximale Chargengröße sowie mittlere und maximal mögliche Leistung auf. Als Referenz ist in beiden Durchlaufdiagrammen eine Auslastung von 100 Prozent eingezeichnet. Der Unterschied zeigt sich in der Anzahl der bearbeiteten Chargen und im Füllgrad der Chargen. Das Durchlaufdiagramm mit unkomplettierten Chargen zeigt vier Chargen, die jeweils zur Hälfte gefüllt sind. Das Durchlaufdiagramm mit der Arbeitssystemwartezeit stellt zwei komplett gefüllte Chargen dar. Die Durchlaufdiagramme zeigen die Auswirkung der Chargenbildungslogik auf die Produktionskennlinien. Im Sättigungsbereich sind die Durchlaufdiagramme und folglich auch die Produktionskennlinien identisch. Bei einer Auslastung von 50 Prozent zeigt sich, dass die Aufträge bei der komplettierten Logik längere Durchlaufzeiten benötigen. Bei einem nicht abgestimmten Zugang erfordert diese Logik darüber hinaus einen Mindestbestand für die Komplettierung, ohne den das Chargenarbeitssystem keine Chargen komplettieren kann. Dieser Grenzbestand ist der kritische ideale Mindestbestand. Die notwendige Bestandsfläche für die Komplettierung zeigt Abbildung 5.12.

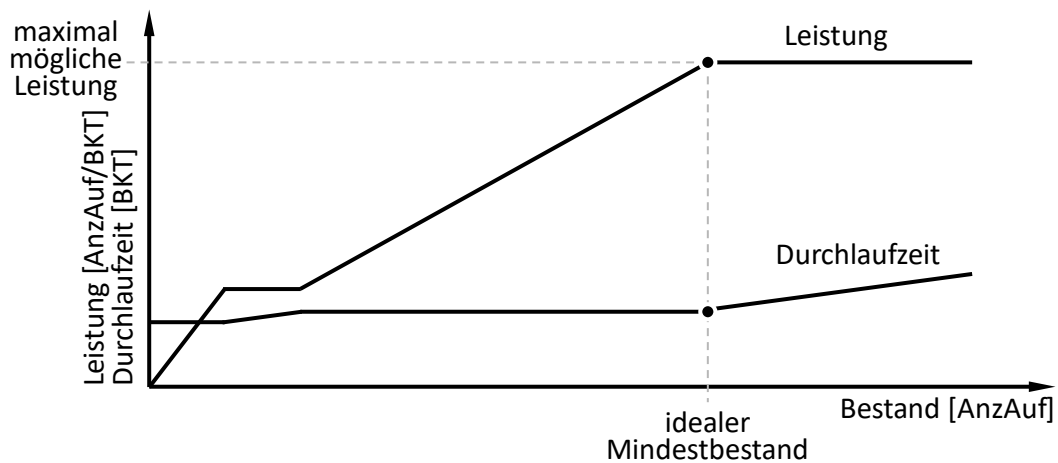


CGA_{max} : Prozesszeit
 ZAZ_i : Zwischenankunftszeit des Auftrags i

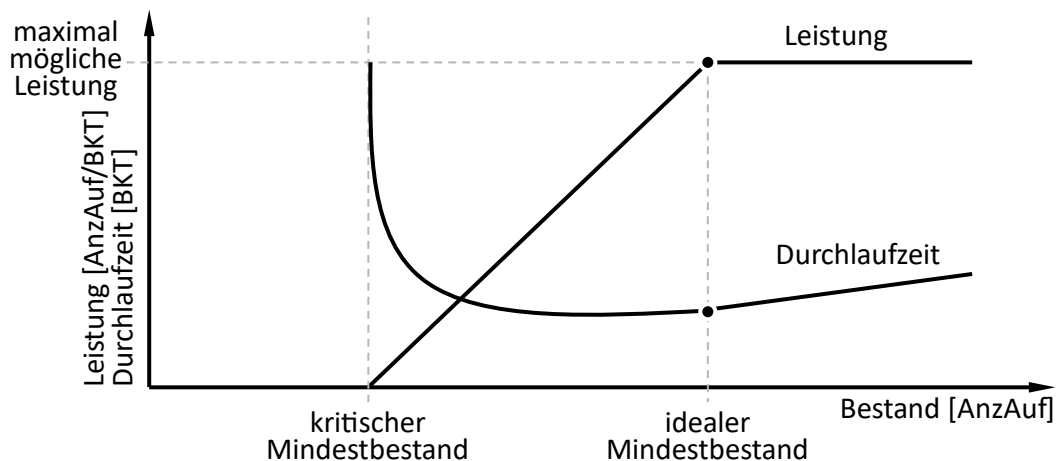
Abbildung 5.12 Kritischer idealer Mindestbestand⁵

Für Zwischenankunftszeiten, die deutlich größer als die Prozesszeit sind, entspricht der kritische ideale Mindestbestand für die Komplettierung und die Bearbeitung dem idealen Mindestbestand bei maximaler Füllung (Gleichung 5.12).

Abbildung 5.13 stellt den resultierenden Verlauf der Produktionskennlinien schematisch dar.



a) Arbeitssystem mit unkomplettierter Chargenfreigabe



b) Arbeitssystem mit komplettierter Chargenfreigabe

Abbildung 5.13 Schematischer Vergleich der Chargenfreigabe¹

Auf den ersten Blick scheint die komplettierte Chargenfreigabe gegenüber der unkomplettierten Chargenfreigabe logistisch nachteilig, da sie längere Durchlaufzeiten verursacht und zusätzliche Restriktionen einbringt. Es finden sich aber ebenso Chargenarbeitssysteme, an denen die komplettierte Freigabe zweckmäßig ist. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn die Prozesskosten des Arbeitssystems hoch sind. Häufig sind die Prozesskosten unabhängig vom Füllgrad des Arbeitssystems, da die Kosten durch den Energieeinsatz oder durch Verbrauchsmaterialien bestimmt werden. In der Folge bedeutet dies, dass die halb gefüllten Chargen aus Abbildung 5.11 für unkomplettierte Chargen die doppelten Prozesskosten verursachen. Im Regelfall bearbeiten Chargenarbeitssysteme in der

industriellen Praxis jedoch unkomplettierte Chargen, sodass diese nachfolgend vertieft untersucht werden.

5.1.7 Vergleich von Chargen- und Standardarbeitssystemen

Abbildung 5.14 vergleicht Chargenarbeitssysteme mit Standardarbeitssystemen bzw. Normalarbeitssystemen.

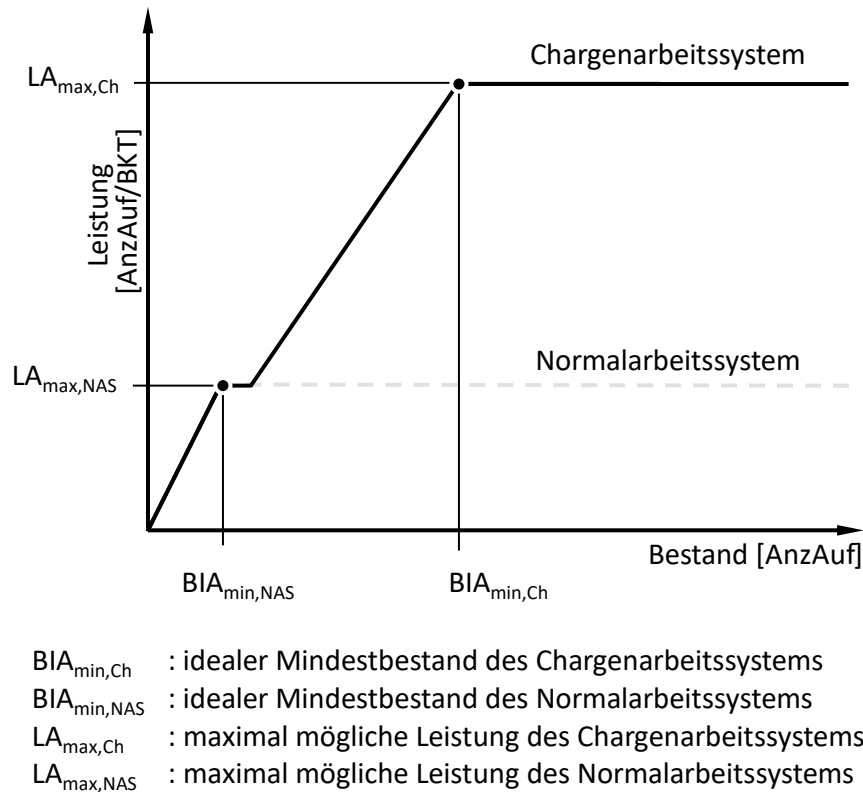


Abbildung 5.14 Einordnung des Chargenarbeitssystems

Da Chargenarbeitssysteme in der Regel mehrere Aufträge parallel bearbeiten, ist ihre Leistung erheblich höher als die von Normalarbeitssystemen. Der entscheidende Faktor der Leistungssteigerung ist die Chargengröße. Das Beispielsystem in der Abbildung verdreifacht die Leistung des Chargenarbeitssystems im Vergleich zum Normalarbeitssystem. Zugleich ist der Bestand des Chargenarbeitssystems größer. Die Bestandszunahme übersteigt die lineare Steigerung, da am Chargenarbeitssystem weitere Zeitanteile auftreten. Diese weiteren Zeitanteile binden zusätzlichen Bestand. Drei Normalarbeitssysteme benötigen

somit in Summe einen geringeren Bestand als ein Chargenarbeitssystem, das drei Aufträge zugleich bearbeitet.

Das Plateau in der Leistungskennlinie tritt ab dem Punkt auf, an dem Aufträge zu einer Charge vereint werden. Somit ist diese Leistung auch die maximal mögliche Leistung des Normalarbeitssystems.

5.1.8 Evaluierung

Dieser Abschnitt evaluiert die Erkenntnisse zu den idealen Produktionskennlinien mit einem Chargentyp simulativ. Dazu folgen im ersten Teil die Beschreibung der Simulationsumgebung und des Vorgehens der Simulation. Der zweite Teil zeigt die Evaluierungsergebnisse.

Simulation von Chargenarbeitssystemen

Das Simulationsmodell wurde in dem Programm „Tecnomatix Plant Simulation“ in der Version 15.2.1 entwickelt. Es orientiert sich an dem Durchlaufelement von Chargenarbeitssystemen (vgl. Abbildung 4.1). Die Abbildung 5.15 zeigt die Struktur des Simulationsmodells und den Bezug zu den resultierenden Rückmeldedaten.

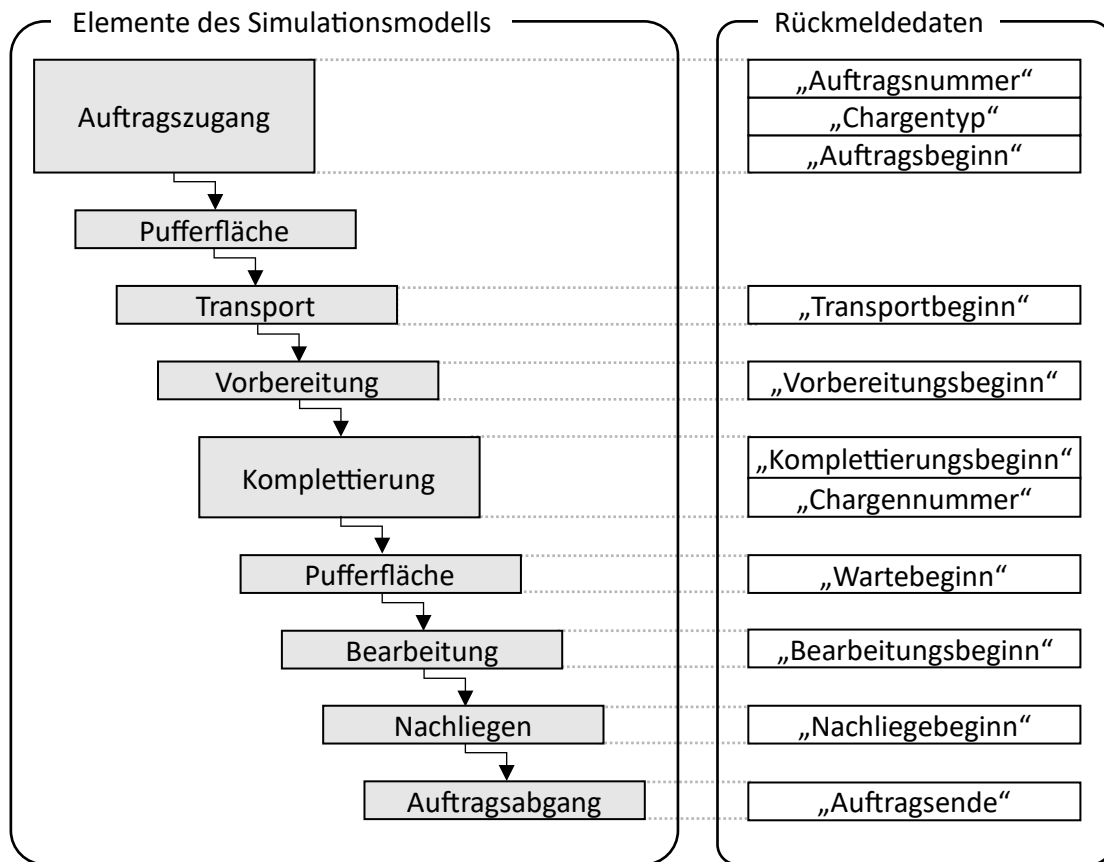


Abbildung 5.15 Simulationsmodell für Chargenarbeitssysteme

Den Auftragszugang bildet das Simulationselement ‚Quelle‘ ab und der Auftragsabgang ist durch eine ‚Senke‘ realisiert. Die Pufferflächen sind mit ‚Pufferelementen‘ in Plant Simulation umgesetzt worden. Die verbleibenden Elemente werden als ‚Arbeitsstationen‘ modelliert. Die rechte Seite der Abbildung stellt die im Simulationslauf entstehenden Rückmeldedaten dar. So speichert der Auftragszugang beispielsweise für jeden Auftrag die Auftragsnummer, den Chargentyp und den Auftragsbeginn.

Im Vergleich zu Standardarbeitssystemen unterscheidet sich die Logik der Simulation bei Chargenarbeitssystemen. Verbreitete Praxis für Standardarbeitssysteme ist es, den Bestand über ein bestandsregelndes Verfahren einzustellen. Für diesen vorgegebenen Bestand wird die zugehörige Leistung ermittelt. Dieses Verfahren beeinflusst die Chargenbildung erheblich, sodass die Logik für Chargenarbeitssysteme abgewandelt wurde. Das Modell für Chargenarbeitssysteme

stellt über die Belastung ein Leistungsniveau ein und simuliert den resultierenden Bestand.

Jeder Simulationslauf bildet einen Betriebspunkt der simulierten Kennlinie. Die Leistung berechnet sich als Quotient der abgegangenen Aufträge und der Länge des Betrachtungszeitraums. Das Simulationsmodell unterscheidet zwischen der Simulationsdauer und der Länge des Betrachtungszeitraums. Die erste Phase des Simulationslaufs ist durch ein Einschwingverhalten geprägt und wird somit nicht in die Analyse einbezogen. Das Modell errechnet für jeden Auftrag die Durchlaufzeit als Differenz des Auftragsendes und des Auftragsbeginns. Die mittlere Durchlaufzeit eines Betriebspunkts ist der Mittelwert aller Aufträge aus dem Betrachtungszeitraum. Der Bestand im Betrachtungszeitraum wird an zufälligen Zeitpunkten gemessen und als Mittelwert dieser Messpunkte ausgegeben. Zulässige Simulationsläufe liegen nur dann vor, wenn die Belastung und die Leistung langfristig im Gleichgewicht stehen. Falls diese Randbedingung nicht erfüllt ist, gibt das Modell eine Warnung aus.

Eine simulierte Produktionskennlinie besteht aus 100 simulierten Betriebspunkten. Diese Arbeit erstellt jede Produktionskennlinie auf der Basis der Betriebspunkte als Liniendiagramm. Die Darstellung kann aufwandsarm entweder in Microsoft Excel oder in Matlab erfolgen und ermöglicht so einen Abgleich der modellierten Produktionskennlinie mit der simulierten Produktionskennlinie.

Die Validierung des Simulationsmodells erfolgte in drei Schritten. Zunächst wurden die Abläufe im Simulationsmodell sowie die Berechnung der Kennzahlen in einer Einzelschrittprüfung getestet. Im zweiten Schritt wurden die Ergebnisse der simulierten idealen Produktionskennlinien mit den entsprechenden mathematischen Berechnung abgeglichen. Die letzte Prüfung umfasste Grenzwerttests für sehr kleine und sehr hohe Bestandsniveaus.

Abbildung 5.16 stellt die grundlegenden Parameter der Simulationsversuche für Chargenarbeitssysteme einschließlich des erst später behandelten Falls mit mehreren Chargentypen dar.

Anzahl Chargentypen [-]	1	3	9
mittlere Prozesszeit [Std]	2,5	4	4
Chargengröße [AnzAuf]	5	10	50
Transportzeit [Std]	0		0,5
Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit [-]	0	0,3	0,5
Variationskoeffizient der Prozesszeit [-]	0		0,3
mittlere Zwischenankunftszeit [Std]	in 100 Stufen		

Abbildung 5.16 Grundlegende Simulationsparameter

Diese Parameter wurden in einem teilfaktoriellen Versuchsplan mit 3400 Versuchsläufen geprüft. Für jeden Evaluationsabschnitt definiert die Arbeit ein praxisnahes Referenzszenario. Nach der detaillierten Beschreibung des Referenzversuchs stellen die Abschnitte weitere ausgewählte Versuchsreihen dar, um den Einfluss und die Modellierungsgüte verschiedener Parameterkonstellationen zu zeigen. Insgesamt umfasst diese Arbeit drei Evaluierungen. Nach diesem Abschnitt folgen die weiteren Evaluierungen in den Abschnitten 5.2.4 und 6.2.4. Alle Evaluierungen folgen einem einheitlichen Aufbau.

Evaluierungsergebnisse

Der Schwerpunkt der Betrachtungen ist die Modellierung der Bestands-Leistungskennlinien. Die Modellierungsgüte der Referenzkennlinie beschreibt eine Tabelle anhand der relativen Abweichung der modellierten und der simulierten Leistung. Der grüne Kennlinienverlauf zeigt die modellierten Größen und der schwarz gestrichelte Verlauf zeigt die simulierten Werte. Die Legende der Formelzeichen ist in jeder Abbildung identisch und wird daher nur in der Kennlinienübersicht (vgl. Abbildung 5.19) gezeigt.

Abbildung 5.17 evaluiert die ideale Produktionskennlinie von Chargenarbeitssystemen mit einem Chargentyp.

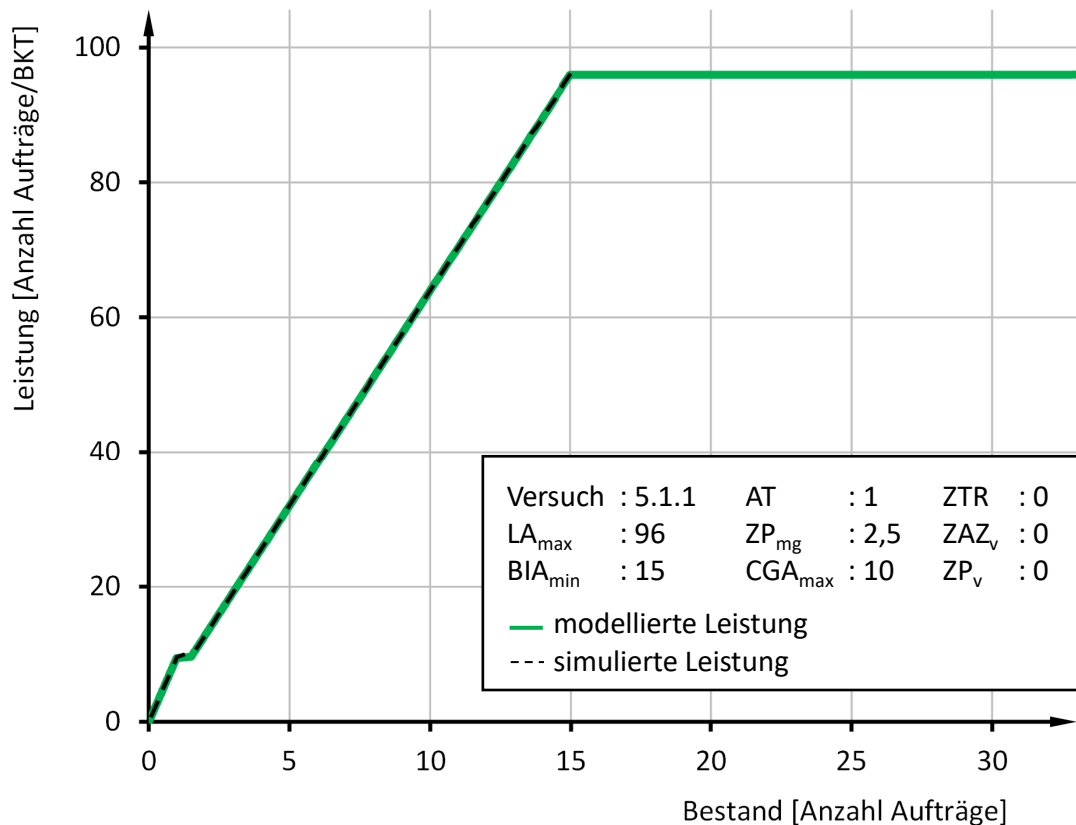


Abbildung 5.17 Ideale Kennlinie mit einem Chargentyp

Die maximal mögliche Leistung beträgt 96 Aufträge pro Betriebskalendertag bei einem idealen Mindestbestand von 15 Aufträgen. Der Prozess benötigt 2,5 Stunden für die Bearbeitung von maximal 10 Aufträgen.

Die modellierte und die simulierte Produktionskennlinie beschreiben den Proportionalbereich. Wie für ideale Kennlinien üblich bleibt die Leistung ab dem Punkt der maximal möglichen Leistung für jede weitere Bestandserhöhung konstant. Das beschriebene Simulationsverfahren setzt keine Anfangsbestände voraus, sodass der Überlastbereich nicht simuliert wird.

Tabelle 5.1 zeigt die relative Abweichung der Modellierung des Referenzarbeitsystems.

Tabelle 5.1 Ideale Kennlinie mit einem Chargentyp

Anteil vom idealen Mindestbestand	modellierte Leistung	simulierte Leistung	relative Abweichung
15 %	14,4	14,4	0,0 %
25 %	24,0	24,0	0,0 %
50 %	48,0	48,0	0,0 %
75 %	72,0	72,0	0,0 %
95 %	91,2	91,3	-0,1 %

Um alle nachfolgenden Evaluierungsversuche mit einem vergleichbaren Vorgehen zu untersuchen, werden relative Bestandsniveaus geprüft. So entspricht im Versuch 5.1.1 beispielsweise 50 Prozent des idealen Mindestbestands einem Bestand von 7,5 Aufträgen. Für die idealen Produktionskennlinien (Abschnitt 5.1 und Abschnitt 6.1) werden die Anteile von 15 Prozent bis zu 95 Prozent des idealen Mindestbestands dargestellt. Die in den Tabellen dargestellten Ergebnisse wurden interpoliert, um die Wertepaare der modellierten und der simulierten Leistung exakt vergleichen zu können.

Die Güte der Modellierung der idealen Produktionskennlinie ist hoch, da alle Einflüsse analytisch abgeleitet wurden. Abbildung 5.18 stellt die Evaluierung der Durchlaufzeit dar.

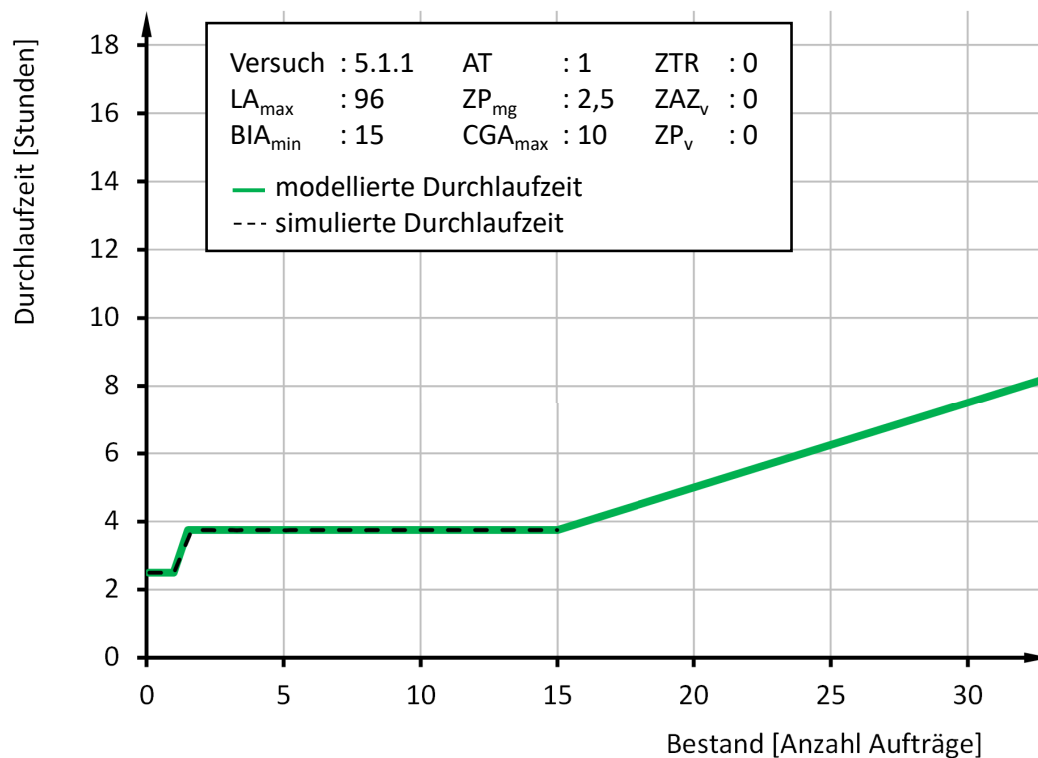


Abbildung 5.18 Durchlaufzeit mit einem Chargentyp

Um einen Abgleich der Durchlaufzeit mit den Parametern der Produktionskennlinie zu ermöglichen, wird die Durchlaufzeit nicht in Betriebskalendertagen, sondern in Stunden angegeben. Die niedrigste Durchlaufzeit entspricht der Prozesszeit und wird nur erreicht, wenn das Chargenarbeitssystem nur einen Auftrag pro Charge bearbeitet. Ab dem Zeitpunkt, an dem mindestens zwei Aufträge pro Charge bearbeitet werden, steigt die Durchlaufzeit auf 3,75 Stunden.

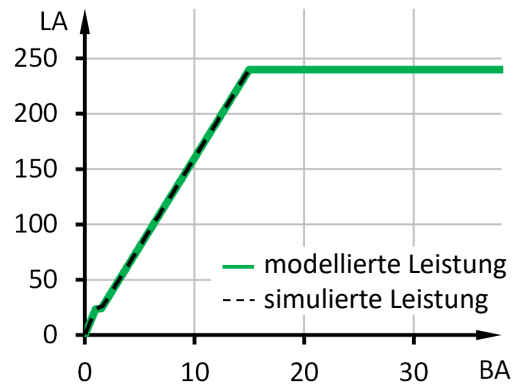
Der Verlauf zeigt, dass die Güte der Modellierung der Durchlaufzeit der Güte der Modellierung der Leistung entspricht. Da dieses Ergebnis gemäß Gleichung 2.17 erwartbar ist, wird die Durchlaufzeit in den weiteren Evaluierungen nachrangig untersucht.

Abbildung 5.19 stellt weitere Evaluierungsversuche für die ideale Produktionskennlinie mit einem Chargentyp dar.

5 Modellierung von Chargenarbeitssystemen mit einem Chargentyp

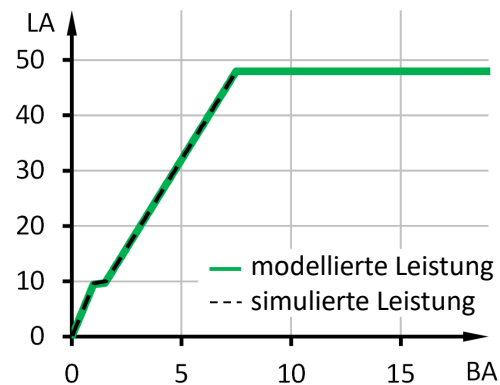
Versuchsparameter					
Versuch	: 5.1.2	AT	: 1	ZTR	: 0
LA _{max}	: 240	ZP _{mg}	: 1	ZAZ _v	: 0
BIA _{min}	: 15	CGA _{max}	: 10	ZP _v	: 0

BIA _{min,rel}	LA _{mod}	LA _{sim}	Abw
15 %	36,0	36,0	0,0 %
25 %	60,0	60,0	0,0 %
50 %	120,0	120,0	0,0 %
75 %	180,0	180,1	-0,1 %
95 %	228,0	228,4	-0,2 %



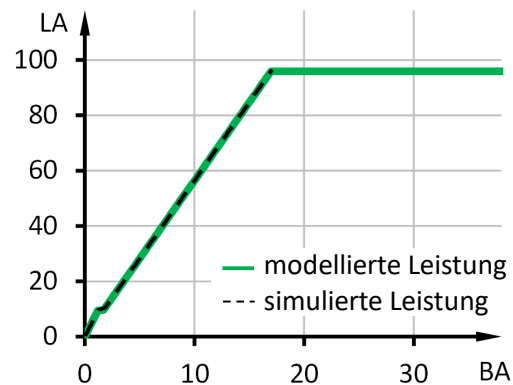
Versuchsparameter					
Versuch	: 5.1.3	AT	: 1	ZTR	: 0
LA _{max}	: 48	ZP _{mg}	: 2,5	ZAZ _v	: 0
BIA _{min}	: 7,5	CGA _{max}	: 5	ZP _v	: 0

BIA _{min,rel}	LA _{mod}	LA _{sim}	Abw
15 %	9,5	9,7	-2,1 %
25 %	12,0	12,0	0,0 %
50 %	24,0	24,0	0,0 %
75 %	36,0	36,0	0,0 %
95 %	45,6	45,6	0,0 %



Versuchsparameter					
Versuch	: 5.1.4	AT	: 1	ZTR	: 0,5
LA _{max}	: 96	ZP _{mg}	: 2,5	ZAZ _v	: 0
BIA _{min}	: 17	CGA _{max}	: 10	ZP _v	: 0

BIA _{min,rel}	LA _{mod}	LA _{sim}	Abw
15 %	14,4	14,4	0,0 %
25 %	24,0	24,0	0,0 %
50 %	48,0	48,0	0,0 %
75 %	72,0	72,0	0,0 %
95 %	91,2	91,2	0,0 %



Abw : relative Abweichung [-]
 AT : Anzahl Chargentypen [-]
 BA : Bestand [AnzAuf]
 BIA_{min} : idealer Mindestbestand [AnzAuf]
 BIA_{min,rel} : relativer, idealer Mindestbestand [-]
 CGA_{max} : maximale Chargengröße [AnzAuf]
 LA : Leistung [AnzAuf/BKT]

LA_{max} : maximal mögliche Leistung [AnzAuf/BKT]
 LA_{mod} : modellierte Leistung [AnzAuf/BKT]
 LA_{sim} : simulierte Leistung [AnzAuf/BKT]
 ZAZ_v : Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit [-]
 ZP_{mg} : mittlere gewichtete Prozesszeit [Std]
 ZP_v : Variationskoeffizient der Prozesszeit [-]
 ZTR : Transportzeit [Std]

Abbildung 5.19 Weitere ideale Kennlinien mit einem Chargentyp

Versuch 5.1.2 untersucht eine reduzierte Prozesszeit von einer Stunde. Die anderen Parameter entsprechen dem Referenzversuch. Das Chargenarbeitssystem kann unter diesen Rahmenbedingungen eine maximal mögliche Leistung von 240 Aufträgen bei einem idealen Mindestbestand von 15 Aufträgen erreichen. Die Prozesszeit verändert im Vergleich zum Referenzsystem ausschließlich die maximal mögliche Leistung des Systems. Versuch 5.2.3 zeigt die Auswirkung einer Reduktion der maximal möglichen Chargengröße auf fünf Aufträge. Die Leistung und der Bestand verringern sich in gleichem Maß, sodass der Verlauf der Produktionskennlinie mit der ersten Hälfte der Referenzkennlinie übereinstimmt. Versuch 5.1.4 erweitert den Referenzversuch um den Einfluss der Transportzeit. Diese erhöht den erforderlichen Bestand.

Die Grafiken und die relativen Abweichungen der Versuche 5.1.2 bis 5.1.4 bestätigen die hohe Güte des Referenzversuchs für weitere Parameter. Die Abweichung von -2,1 Prozent in einem Versuch ist auf eine Messung im Sprungbereich zurückzuführen.

5.2 Genäherte Produktionskennlinie

Dieser Abschnitt hebt die Annahmen des idealen Prozesses auf und leitet genäherte Kennlinien für Chargenarbeitssysteme mit einem Chargentyp ab. Dazu wählt Abschnitt 5.2.1 den Modellierungsansatz aus. Abschnitt 5.2.2 zeigt die Einflussgrößen auf die genäherten Kennlinien und Abschnitt 5.2.3 stellt die parametrisierte Näherungskennlinie vor. Abschnitt 5.2.4 evaluiert die Ergebnisse.

5.2.1 Auswahl des Modellierungsansatzes

Die zwei wesentlichen Modellierungsansätze für genäherte Produktionskennlinien sind die Näherungsgleichung nach Nyhuis und die aus der Warteschlangentheorie abgeleiteten Näherungsgleichungen. Die verbreiteten Ansätze der Warteschlangentheorie gliedern sich in den M/M/1-Ansatz, den M/G/1-Ansatz und den G/G/1-Ansatz (Kingman).

Abbildung 5.20 vergleicht die Verläufe der genäherten Produktionskennlinie mit der idealen Produktionskennlinie⁸.

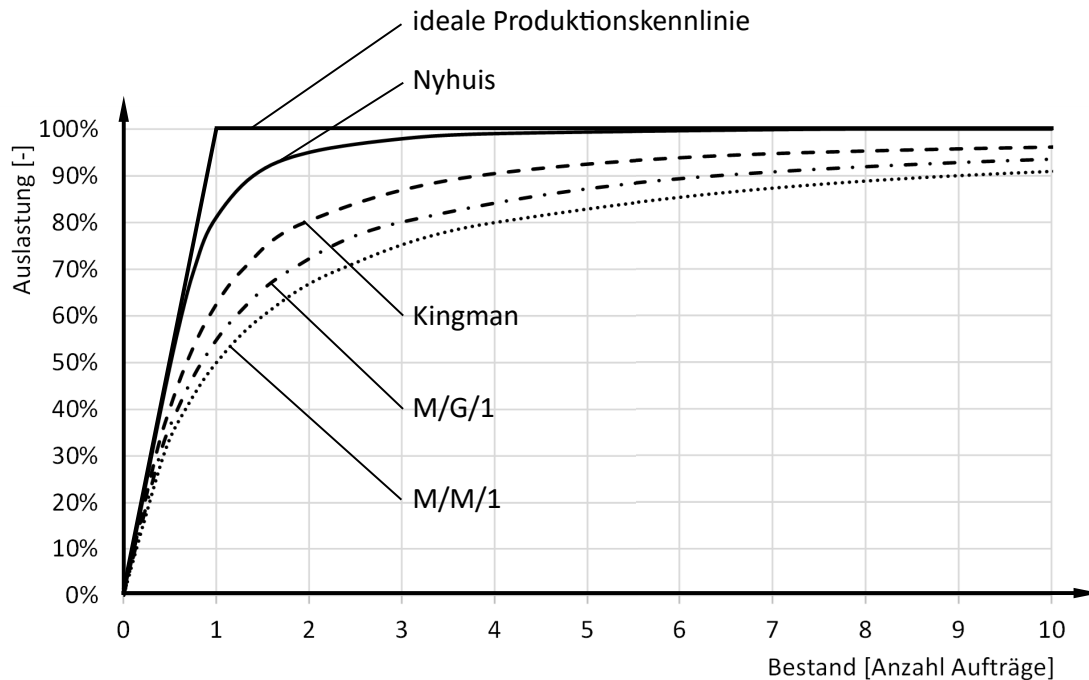


Abbildung 5.20 Kennlinienvergleich

Der Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit und der Auftragszeit beträgt bei allen beliebigen Verteilungen 0,6 und es liegt ein Streckfaktor von zehn zugrunde. Die Näherungsgleichungen auf Basis der Warteschlangentheorie prognostizieren erheblich größere Bestände als die Näherungsgleichung nach Nyhuis. Beispielsweise benötigt die Kingman-Gleichung bei einer Auslastung von 90 Prozent mehr als doppelt so viel Bestand wie die Näherungsgleichung nach Nyhuis. Die Unterschiede der Kennlinienverläufe entstehen aus den Modellierungsprämissen. Diese Prämissen stellt Tabelle 5.2 dar.

⁸ Teile des Abschnitts 5.2.1 basieren auf dem nicht veröffentlichten Forschungsantrag und Abschlussbericht des DFG-Projekts „Modellgestützte Ableitung einer allgemeingültigen Näherungsgleichung für Bestands-Auslastungs-Kennlinien“. Die Projektnummer lautet 415040468.

Tabelle 5.2 Annahmen der Modellierungsansätze

	Nyhuis	M/M/1	M/G/1	Kingman
Zwischenankunftszeit	nicht berücksichtigt	exponential-verteilt	exponential-verteilt	beliebig verteilt
Auftragszeit	beliebig verteilt	exponential-verteilt	beliebig verteilt	beliebig verteilt
Kapazität und Belastung	flexibel (Streckfaktor)	nur durch Erweiterung berücksichtigt	nur durch Erweiterung berücksichtigt	nur durch Erweiterung berücksichtigt

Die zentralen Unterschiede zwischen dem Ansatz von Nyhuis und den Modellen der Warteschlangentheorie zeigen sich in der Berücksichtigung der Zwischenankunftszeit und der Kapazitäts- sowie der Belastungsflexibilität. Der Vorteil des Ansatzes von Nyhuis ist, dass er die Kapazitäts- sowie die Belastungsflexibilität einbezieht. Nyhuis berücksichtigt die Verteilung der Zwischenankunftszeit jedoch nicht modellbasiert, sondern über den Streckfaktor. Dies hat zur Folge, dass die Flexibilitäten nicht einstellbar sind.

Im Warteschlangenmodell ist die Verteilung der Zwischenankunftszeit eine Eingangsgröße. Das Grundmodell der Warteschlangentheorie setzt allerdings starre Kapazitäten und keine Möglichkeit der Belastungsverschiebungen voraus. In einem Forschungsprojekt der DFG (vgl. Fußnote 8) konnte die Warteschlangentheorie um den Einfluss der Kapazitätsflexibilität [WINT21a] und der Belastungsflexibilität [WINT21b] erweitert werden.

Die Modellierung von Chargenarbeitssystemen ist mit dem Ansatz von Nyhuis und dem Ansatz von Kingman möglich. Die Erweiterung der Näherungsgleichung nach Kingman ermöglicht es, alle zuvor beschriebenen Einflussgrößen zu berücksichtigen. Somit wird nachfolgend die Gleichung nach Kingman gewählt und für Chargenarbeitssysteme angepasst.

5.2.2 Einflussgrößen

Chargenarbeitssysteme unterscheiden sich in zahlreichen Punkten von Normalarbeitssystemen. Viele dieser Besonderheiten (z.B. Vorbereitungszeiten, Komplettierungszeiten und Nachliegezeiten) kann die Modellierung des idealen Prozesses analytisch berücksichtigen. Zwei Parameter sind jedoch stochastisch und

können daher nicht mit ausreichender Genauigkeit im Idealprozess des Chargenarbeitssystems betrachtet werden. Diese zentralen stochastischen Parameter der Chargenarbeitssysteme sind der Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit im Zugang und der Variationskoeffizient der Prozesszeiten.

Kapitel 5 untersucht Chargenarbeitssysteme mit einem Chargentyp. Dabei gilt, dass die Prozesszeit verschiedener Chargen des gleichen Chargentyps identisch ist. Folglich ist der Variationskoeffizient der Prozesszeit für Chargenarbeitssysteme mit einem Chargentyp gleich null. Die Betrachtung der Einflussgrößen auf die Näherungsgleichung vereinfacht sich auf den Einfluss des Variationskoeffizienten der Zwischenankunftszeit. Das Ziel der Näherungsgleichung ist es, die Schwankung der Zwischenankunftszeiten durch einen Pufferbestand abzubilden.

5.2.3 Parametrisierte Näherungskennlinie

Zunächst leitet dieser Abschnitt eine allgemeine Näherungskennlinie für Chargenarbeitssysteme ab. Diese soll unabhängig von der Anzahl der Chargentypen gültig sein und so eine durchgängige Modellierung in der gesamten Arbeit ermöglichen. Gemäß Abschnitt 5.2.1 basiert die Näherungsgleichung auf dem Ansatz von Kingman (vgl. Gleichung 2.23). Dieser beschreibt in der Ausgangsgleichung den idealen Mindestbestand nicht explizit, da der ideale Mindestbestand für Standardarbeitssysteme einen Auftrag groß ist und somit das Produkt der Auslastung und des Bestands aufgrund des Faktors von eins nicht beeinflusst.

Gleichung 5.19 erweitert diese Ausgangsgleichung um den idealen Mindestbestand und beschreibt den Bestand als Funktion der mittleren Leistung:

$$BA_m = \underbrace{BIA_{\min} \cdot \frac{LA_m}{LA_{\max}}}_{\text{idealer Bestand}} + \underbrace{\frac{LA_m^2}{1 - \frac{LA_m}{LA_{\max}}} \cdot \left(\frac{ZAZ_v^2 + ZP_v^2}{2} \right)}_{\text{Pufferbestand}} \quad 5.19$$

BA_m	mittlerer Bestand [AnzAuf]
BIA_{\min}	idealer Mindestbestand [AnzAuf]
LA_m	mittlere Leistung [AnzAuf/BKT]
LA_{\max}	maximal mögliche Leistung [AnzAuf/BKT]
ZAZ_v	Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit [-]

ZP_v Variationskoeffizient der Prozesszeit [-]

Der erste Summand bildet den Anteil für den idealen Bestand ab und der zweite Summand beschreibt den Pufferbestand. Der Variationskoeffizient der Durchführungszeit im Standardarbeitssystem entspricht im Chargenarbeitssystem dem Variationskoeffizienten der Prozesszeit. Eine Besonderheit der Modellierung ist die Unabhängigkeit des Pufferbestands vom idealen Mindestbestand. Der Pufferbestand entspricht im Wesentlichen dem Standard nach Kingman.

Um die Struktur der Gleichung zu vereinfachen, ersetzt Gleichung 5.20 den Quotienten der mittleren Leistung und der maximal möglichen Leistung durch die Auslastung.

$$BA_m = BIA_{\min} \cdot A_m + \frac{A_m^2}{1 - A_m} \cdot \left(\frac{ZAZ_v^2 + ZP_v^2}{2} \right) \quad 5.20$$

BA_m mittlerer Bestand [AnzAuf]
 BIA_{\min} idealer Mindestbestand [AnzAuf]
 A_m mittlere Auslastung [-]
 ZAZ_v Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit [-]
 ZP_v Variationskoeffizient der Prozesszeit [-]

Die Arbeit stellt jedoch weiterhin die Bestands-Leistungskennlinien in den Fokus der Untersuchung. Die Auslastung wird in der Evaluierung und in den Grafiken durch die Leistung ersetzt.

Für Chargenarbeitssysteme mit einem Chargentyp entfällt der Variationskoeffizient der Prozesszeit (vgl. Abschnitt 5.2.2). Als Näherungsgleichung resultiert:

$$BA_m = BIA_{\min} \cdot A_m + \frac{A_m^2}{1 - A_m} \cdot \frac{ZAZ_v^2}{2} \quad 5.21$$

BA_m mittlerer Bestand [AnzAuf]
 BIA_{\min} idealer Mindestbestand [AnzAuf]
 A_m mittlere Auslastung [-]
 ZAZ_v Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit [-]

5.2.4 Evaluierung

Der zentrale Unterschied zu der Evaluierung im Abschnitt 5.1.8 ist die Betrachtung der Zwischenankunftszeitstreuung. Im Allgemeinen werden die Zwischenankunftszeiten für Arbeitssysteme in der Werkstattfertigung als normalverteilt mit einem Minimum von null oder als exponentialverteilt abgeschätzt.

Um den Worst-Case zu prüfen, stellt der Referenzversuch die Exponentialverteilung mit einem Variationskoeffizienten von eins dar. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Modellierungsgüte mit sinkendem Variationskoeffizienten der Zwischenankunftszeit steigt.

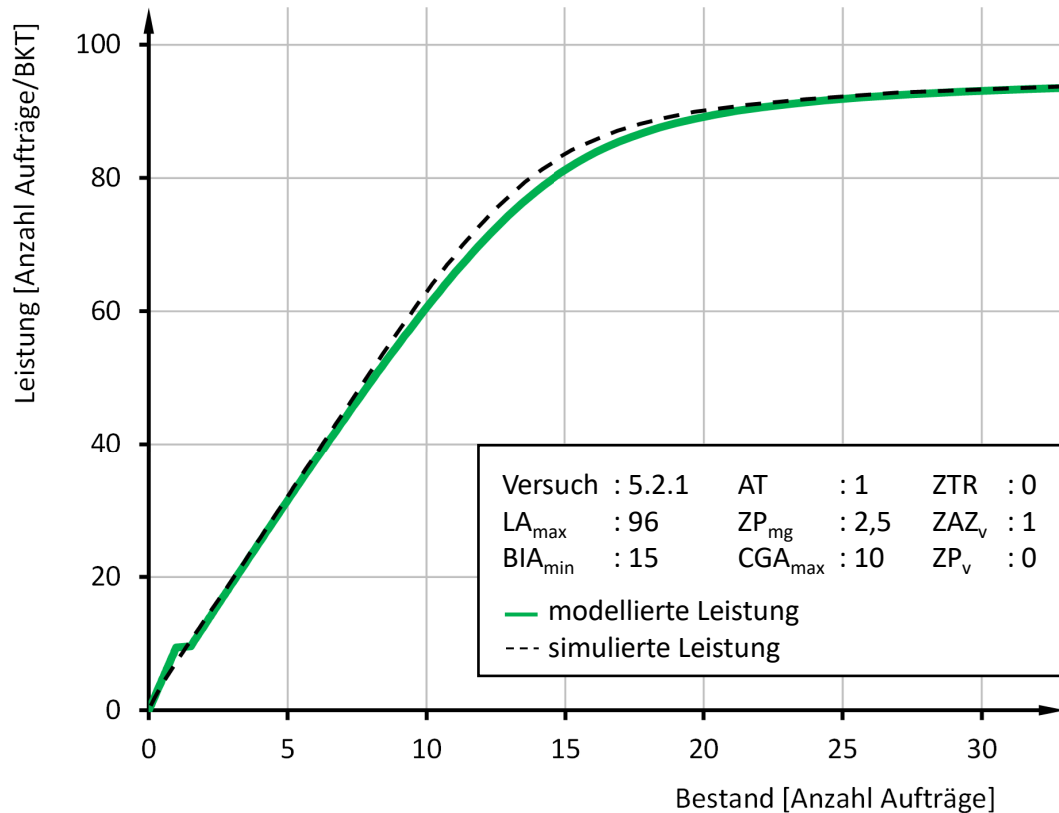


Abbildung 5.21 Genäherte Kennlinie mit einem Chargentyp

Im Gegensatz zu der idealen Produktionskennlinie mit einem Chargentyp basiert die genäherte Produktionskennlinie nicht ausschließlich auf analytischen Herleitungen. Die Gleichungen 5.19 und 5.20 verwenden mit dem zweiten Summanden eine Näherung. Die Güte der Gleichung ist somit nicht vergleichbar mit der idealen Produktionskennlinie, aber für einen Großteil der industriellen Anwendungen hinreichend. Die modellbasierte Bestandsberechnung ist eine konservative Abschätzung der simulierten Werte. Tabelle 5.3 vergleicht die modellierten und simulierten Leistungswerte für Bestandsniveaus von 50 Prozent bis 150 Prozent des idealen Mindestbestands.

Tabelle 5.3 Genäherte Kennlinie mit einem Chargentyp

Anteil vom idealen Mindestbestand	modellierte Leistung	simulierte Leistung	relative Abweichung
50 %	46,5	47,8	-2,8 %
75 %	66,9	69,7	-4,2 %
100 %	81,2	83,6	-3,0 %
125 %	87,9	89,1	-1,4 %
150 %	90,8	91,3	-0,6 %

Insbesondere im Übergangsbereich ist eine Abweichung festzustellen, die auf zwei Ursachen zurückzuführen ist. Einerseits kalkuliert die Näherungsgleichung den Pufferbestand für die Schwankung der Zwischenankunftszeit der einzelnen Aufträge und nicht der Chargen. Andererseits benötigen die Chargenarbeitssysteme im Übergangsbereich einen geringeren Komplettierungsbestand. Diesen Effekt zeigt die Erweiterung der Modellierung im Abschnitt 6.2.3 detailliert auf. Eine Berücksichtigung der Erweiterung steigert die Güte erheblich. Beispielsweise reduziert sich die Abweichung bei einem Bestandsniveau von 75 Prozent des idealen Mindestbestands von 4,2 Prozent auf 1,3 Prozent.

Abbildung 5.22 stellt die Evaluierung weiterer Parameterkombinationen dar.

5 Modellierung von Chargenarbeitssystemen mit einem Chargentyp

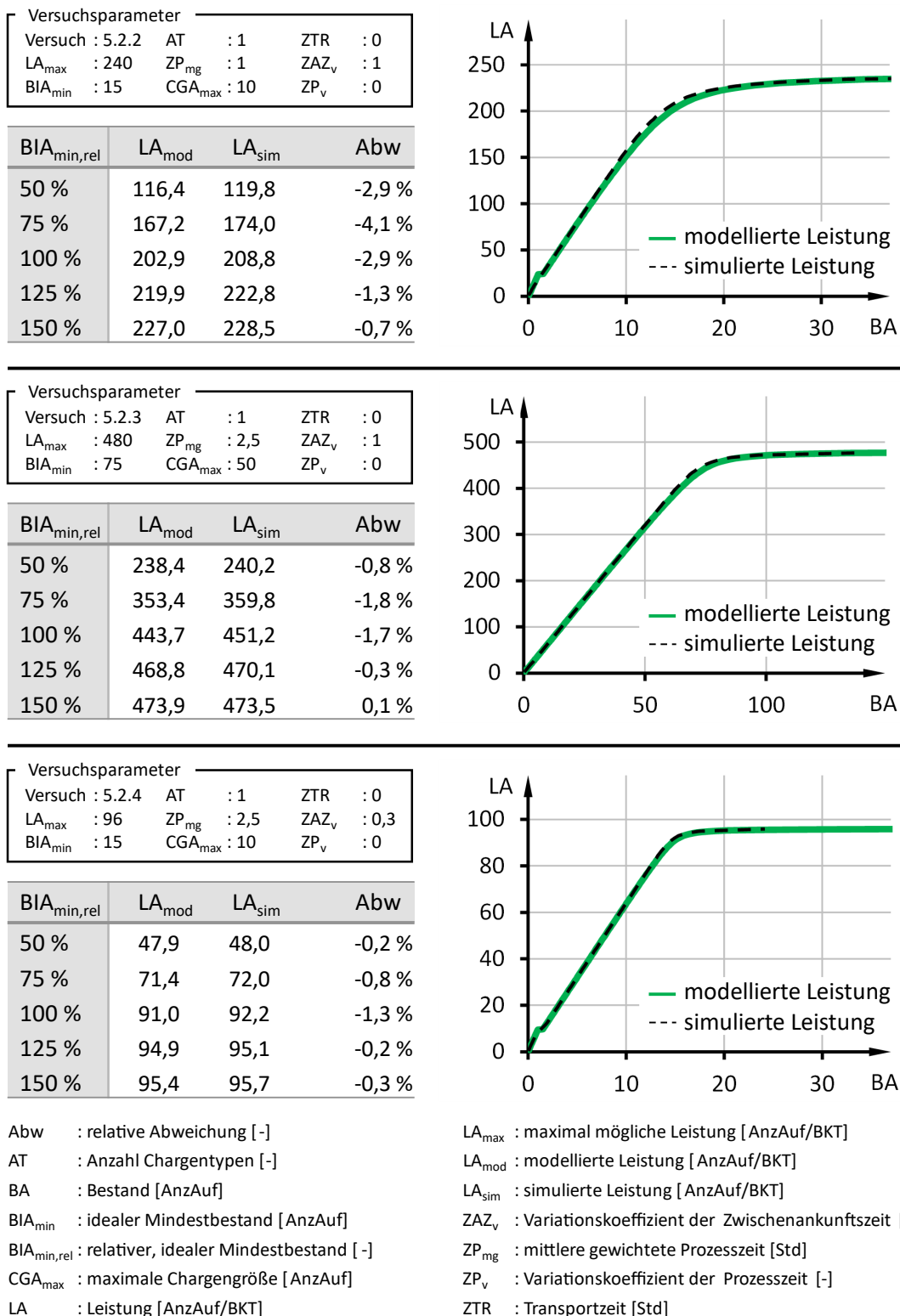


Abbildung 5.22 Weitere genäherte Kennlinien mit einem Chargentyp

Versuch 5.2.2 reduziert die Prozesszeit von 2,5 auf eine Stunde, Versuch 5.2.3 erhöht die maximale Chargengröße auf 50 Aufträge und Versuch 5.2.4 verringert den Variationskoeffizienten der Zwischenankunftszeit auf 0,3. Die weiteren Parameter entsprechen dem Referenzversuch. Die drei Versuche haben gemeinsam, dass die größten relativen Abweichungen bei 75 Prozent und 100 Prozent des idealen Mindestbestands auftreten. Diese Abweichungen erklären die zwei beschriebenen Effekte aus dem Referenzversuch.

5.3 Terminabweichung

Die Untersuchung der Terminabweichung steht nicht im Fokus der Arbeit. Der Einfluss der Chargenarbeitssysteme ist jedoch so charakteristisch, dass im Folgenden einige grundlegende Zusammenhänge beschrieben werden. Die Terminabweichung von Arbeitssystemen ist im Allgemeinen die Summe der rückstandsbedingten Terminabweichung und der reihenfolgebedingten Terminabweichung (vgl. Abschnitt 2.1.4). Die Beschreibung der Chargenarbeitssysteme ordnet sich in diese Struktur ein und erläutert im Abschnitt 5.3.1 die rückstandsbedingte Terminabweichung von Chargenarbeitssystemen und im Abschnitt 5.3.2 die reihenfolgebedingte Terminabweichung mit einem Chargentyp. Der Abschnitt setzt einen Schwerpunkt auf die Terminabweichung, die durch das Chargenarbeitssystem verursacht wird. Systematische Unterschiede in der geplanten und der tatsächlichen Leistung werden nicht analysiert. Zudem setzt die Arbeit eine Planung mit konstanten Übergangszeiten voraus.

5.3.1 Rückstand

Chargenarbeitssysteme verursachen durch ihren stoßweisen Abgang Rückstandsstreuungen. Abbildung 5.23 leitet den entstehenden Rückstand aus dem Durchlaufdiagramm eines Chargenarbeitssystems ab.

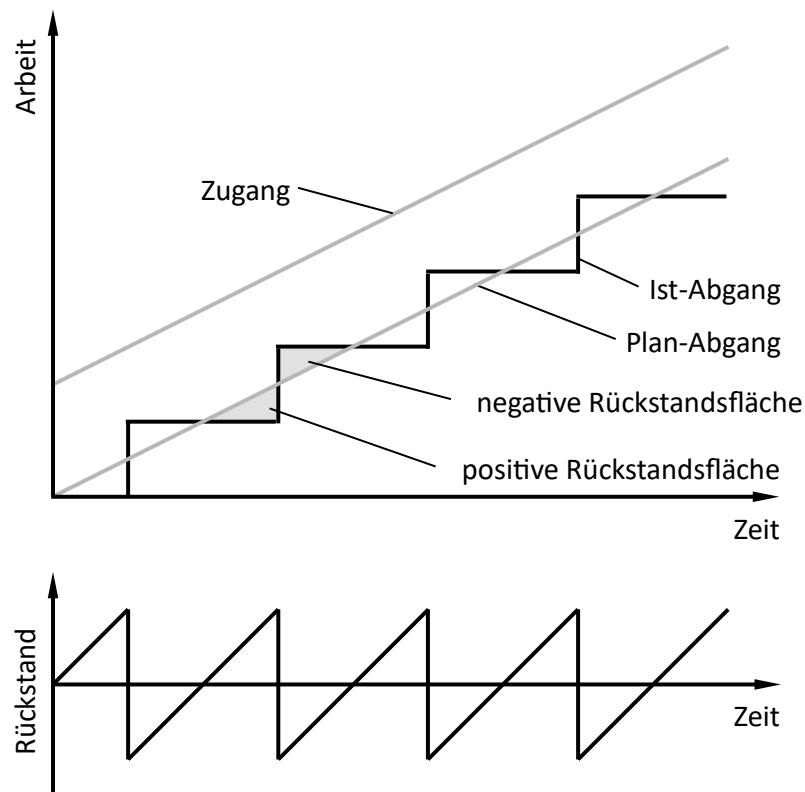


Abbildung 5.23 Rückstand bei einem Chargentyp⁶

Der Ist-Abgang im Durchlaufdiagramm ist für die Dauer der Prozesszeit konstant und steigt nach dem Prozessende um die Chargengröße an. Im Verbund mit dem kontinuierlichen Verlauf des Plan-Abgangs erzeugt der stufenförmige Ist-Abgangsverlauf positive und negative Rückstandsflächen. Trägt man den Rückstand als Differenz des Ist-Abgangs und des Plan-Abgangs über die Zeit auf, ergibt sich ein Sägezahnmuster. Der Rückstand baut sich über die Prozesszeit auf und reduziert sich zum Ende des Prozesses.

Abbildung 5.24 stellt den Rückstandsverlauf für die unkomplettierte und für die komplettierte Chargenfreigabe dar.

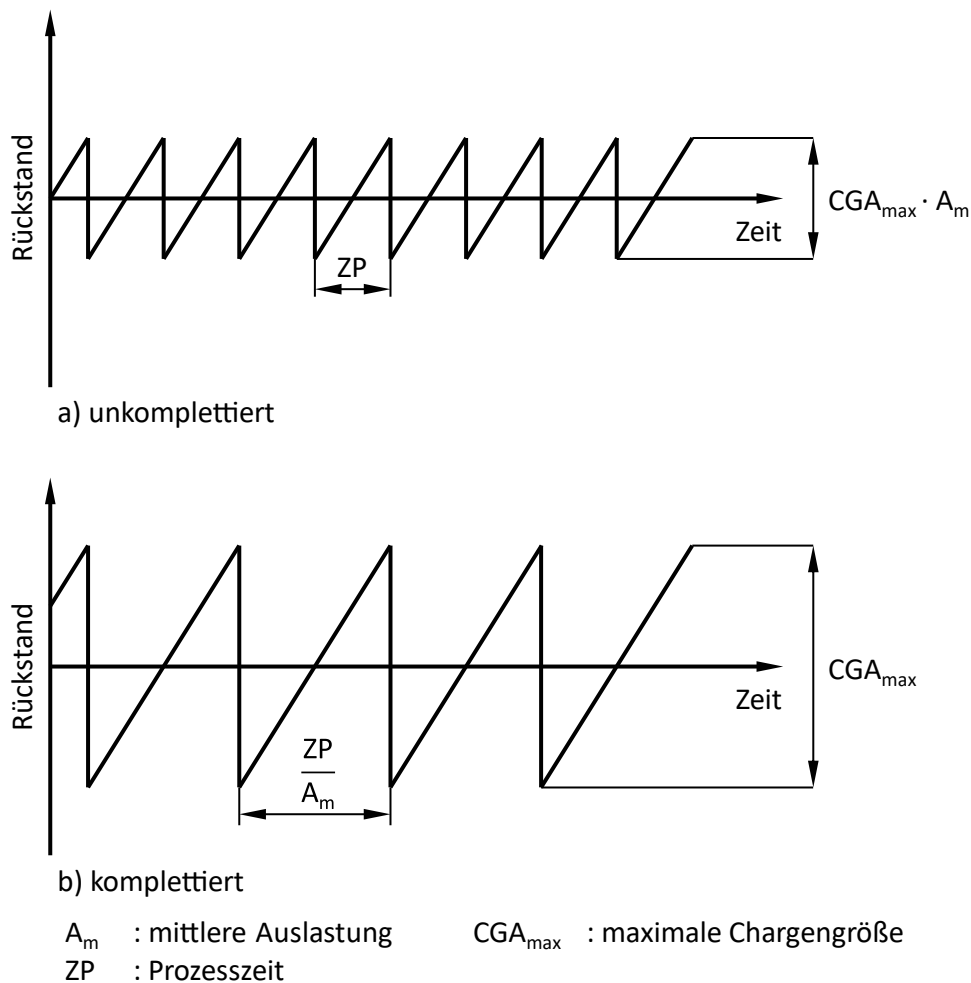


Abbildung 5.24 Auswirkung der Chargenbildung auf den Rückstand

Die Chargengröße bei der unkomplettierten Chargenfreigabe ist geringer als bei der komplettierten Chargenfreigabe. Zudem starten Arbeitssysteme mit der unkomplettierten Freigabe den Chargenprozess häufiger. Somit stellt die Breite des Zahnmusters für unkomplettierte Systeme die Prozesszeit dar und die Höhe ergibt sich aus der maximalen Chargengröße sowie der Auslastung. Komplettierte Chargenarbeitssysteme haben definitionsgemäß eine Chargenauslastung von 100 Prozent. Der Rückstand ändert sich folglich in der Höhe der maximalen Chargengröße.

Gleichung 5.22 berechnet den minimalen und den maximalen Rückstand für Chargenarbeitssysteme mit unkomplettierter Freigabe:

$$\begin{aligned}
 \text{RSA}_{\min} &= -\frac{1}{2} \cdot \text{CGA}_{\max} \cdot A_m \\
 \text{RSA}_{\max} &= +\frac{1}{2} \cdot \text{CGA}_{\max} \cdot A_m
 \end{aligned}
 \tag{5.22}$$

RSA_{\min} minimaler Rückstand [AnzAuf]
 RSA_{\max} maximaler Rückstand [AnzAuf]
 CGA_{\max} maximale Chargengröße [AnzAuf]
 A_m mittlere Auslastung [-]

Die rückstandbedingte Terminabweichung leitet sich gemäß den Gleichungen für Standardarbeitssysteme als Quotient des Rückstands und der Leistung ab (vgl. Abschnitt 2.1.4).

5.3.2 Reihenfolgeabweichung

Chargenarbeitssysteme können die eintreffenden Aufträge nach dem FIFO-Prinzip bearbeiten. Daher resultieren für Arbeitssysteme mit einem Chargentyp keine Reihenfolgeabweichungen (vgl. Abbildung 5.25).



Abbildung 5.25 Reihenfolgeabweichung mit einem Chargentyp

Die zugehenden Aufträge sind im dargestellten Beispiel in ihrer Ankunftsreihenfolge nummeriert. Sie werden nach dieser Reihenfolge den einzelnen Chargen zugeordnet und im Anschluss parallel bearbeitet. Nach dem zeitgleichen Prozessende vereinzelt das Arbeitssystem die Aufträge und leitet sie entsprechend der Zugangsreihenfolge weiter. Die Reihenfolgeabweichung und damit auch die Terminabweichung aus der Reihenfolgeabweichung sind gleich null.

Die Terminabweichung von Chargenarbeitssystemen mit einem Chargentyp resultiert ausschließlich aus dem Rückstand.

6 Modellierung von Chargenarbeitssystemen mit mehreren Chargentypen

Chargenarbeitssysteme mit mehreren Chargentypen weisen die Besonderheit auf, dass sie die zugehenden Aufträge nicht beliebig miteinander kombinieren können. Jeder Auftrag gehört zu einem Chargentyp, den das Chargenarbeitssystem nur typenrein bearbeiten kann. Ein Beispiel für ein Chargenarbeitssystem mit mehreren Chargentypen ist eine Beschichtungsanlage mit verschiedenen Legierungen der Beschichtung.

Die Struktur des Kapitels orientiert sich an der Modellierung von Kennlinien mit einem Chargentyp. Zunächst leitet Abschnitt 6.1 die idealen Produktionskennlinien ab. Die Modellierung basiert auf den Ergebnissen aus Kapitel 5. Diese idealen Produktionskennlinien erweitert Abschnitt 6.2 um die nichtlinearen Einflüsse. Abschließend untersucht Abschnitt 6.3 die Terminabweichung von Chargenarbeitssystemen mit mehreren Chargentypen.

6.1 Erweiterung der idealen Produktionskennlinie

Dieser Abschnitt untersucht die idealen Kennlinien für Chargenarbeitssysteme mit mehreren Chargentypen in zwei Schritten. Zunächst ermittelt Abschnitt 6.1.1 die maximal mögliche Leistung. Abschnitt 6.1.2 leitet den idealen Mindestbestand für Chargenarbeitssysteme mit mehreren Chargentypen her.

6.1.1 Maximal mögliche Leistung

Als Grundlage für die folgenden Herleitungen wird eine Hilfsgröße eingeführt, die die Komplexität der Gleichungen reduziert. Verschiedene Chargentypen können mit unterschiedlicher Häufigkeit und dazu mit voneinander abweichenden Prozesszeiten auftreten. Daher wird die Prozesszeit gemittelt und mit dem Auftragsanteil der Chargentypen gewichtet⁷:

$$ZP_{\text{mg}} = \sum_{i=1}^{AT} AA_i \cdot ZP_i \quad 6.1$$

ZP_{mg}	mittlere gewichtete Prozesszeit [Std]
AT	Anzahl Chargentypen [-]
AA_i	Auftragsanteil des Chargentyps i [-]
ZP_i	Prozesszeit des Chargentyps i [Std]

Der Einfachheit halber wird die maximale Chargengröße zunächst als einheitlich für alle Chargentypen angenommen. Diese Annahme löst Abschnitt 6.2.3 auf. Bei gleichen Chargengrößen entspricht der Anteil der Chargen dem Anteil der Aufträge.

Die maximal mögliche Leistung ist als Funktion der maximalen Chargengröße, der mittleren gewichteten Prozesszeit und der verfügbaren Kapazität der Gleichung für Arbeitssysteme mit einem Chargentyp ähnlich⁷:

$$LA_{\max} = \frac{CGA_{\max}}{ZP_{\text{mg}}} \cdot KAP_{\text{verf}} \quad 6.2$$

LA_{\max}	maximal mögliche Leistung [AnzAuf/BKT]
CGA_{\max}	maximale Chargengröße [AnzAuf]
ZP_{mg}	mittlere gewichtete Prozesszeit [Std]
KAP_{verf}	verfügbare Kapazität [Std/BKT]

Mit Gleichung 5.4, die den Zusammenhang der mittleren und der maximal möglichen Leistung beschreibt, ergibt sich für die mittlere Leistung von Chargenarbeitssystemen mit mehreren Chargentypen:

$$LA_{\text{m}} = \frac{CGA_{\max}}{ZP_{\text{mg}}} \cdot KAP_{\text{verf}} \cdot A_{\text{FG}} \cdot A_{\text{ZW}} \quad 6.3$$

LA_{m}	mittlere Leistung [AnzAuf/BKT]
CGA_{\max}	maximale Chargengröße [AnzAuf]
ZP_{mg}	mittlere gewichtete Prozesszeit [Std]
KAP_{verf}	verfügbare Kapazität [Std/BKT]
A_{FG}	füllgradbedingte Auslastung [-]
A_{ZW}	wartezeitbedingte Auslastung [-]

6.1.2 Idealer Mindestbestand

Die Herleitung des Mindestbestands von Arbeitssystemen mit mehreren Chargentypen weist eine große Übereinstimmung mit Arbeitssystemen auf, die nur einen Chargentyp bearbeiten. Die Logik für den idealen Mindestbestand durch die Komplettierung umfasst jedoch eine weitere Einflussgröße. Diese ist die Anzahl der Chargentypen, die dieser Abschnitt nachfolgend untersucht. Tabelle 6.1 fasst die weiteren Größen im Anschluss zusammen. Für die Herleitung des idealen Mindestbestands nimmt dieser Abschnitt einen zyklischen Zugang an. So treffen die unterschiedlichen Chargentypen in einer festgelegten Reihenfolge am Chargenarbeitssystem ein.

Abbildung 6.1 vergleicht den Komplettierungsbestand von einem Chargenarbeitssystem mit einem Chargentyp (Teil a) und einem Chargenarbeitssystem mit zwei Chargentypen (Teil b).

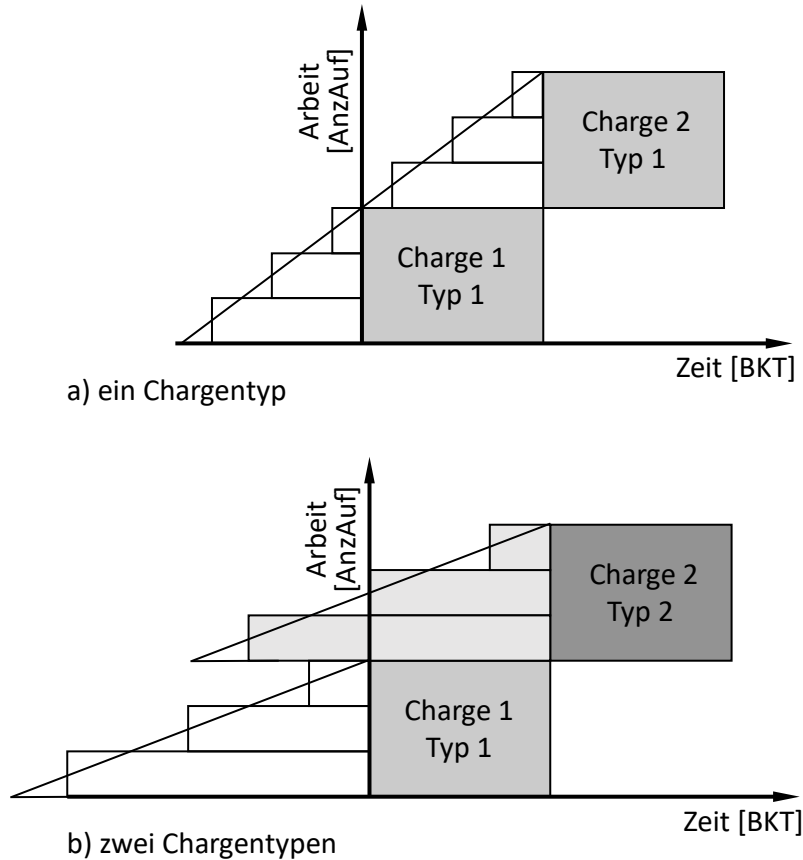


Abbildung 6.1 Komplettierungsbestand bei mehreren Chargentypen

In beiden Fällen treffen die Aufträge so ein, dass die Chargen jeweils mit drei Aufträgen gefüllt werden. Fall b) zeigt eine abwechselnde Ankunft der beiden Chargentypen. Ein Auftrag, der erst in der zweiten Charge bearbeitet wird, trifft vor dem Prozessbeginn der ersten Charge ein.

Die Bestandsfläche, die durch die Komplettierung erzeugt wird, steigt bei Chargenarbeitssystemen mit mehreren Typen an. Sie ist wie bei einem Chargentyp als Dreieck beschreibbar und führt zu einem idealen Mindestbestand von⁷:

$$BIA_{\min,ZK} = \frac{AT}{2} \cdot CGA_{\max} \quad 6.4$$

$BIA_{\min,ZK}$ idealer Mindestbestand durch Komplettierungszeit [AnzAuf]

AT Anzahl Chargentypen [-]
 CGA_{max} maximale Chargengröße [AnzAuf]

Die weiteren Kennzahlen für Chargenarbeitssysteme mit mehreren Chargentypen sind denen mit einem Chargentyp ähnlich. Ausschließlich die Prozesszeit ist durch die entsprechende mittlere gewichtete Größe zu ersetzen. Tabelle 6.1 führt die verbleibenden Bestandsanteile ein und zeigt die Kennzahlen für einen und für mehrere Chargentypen im Vergleich⁷.

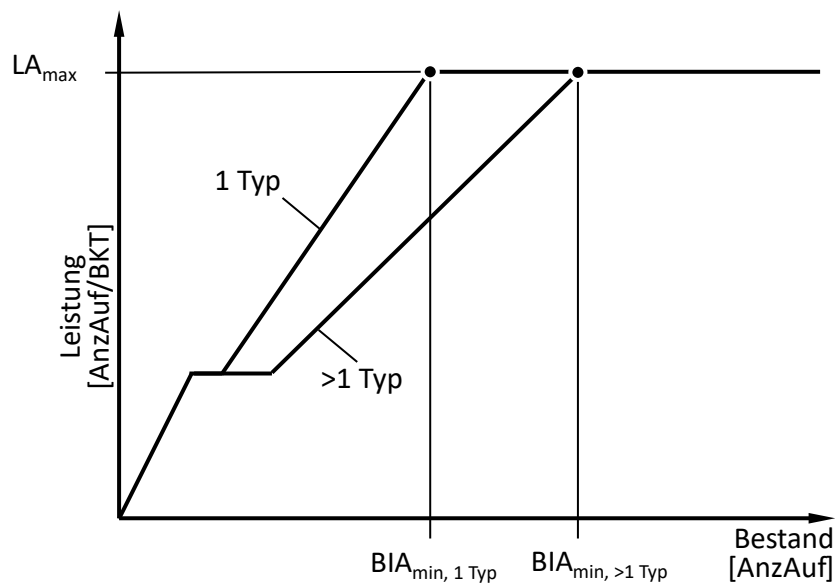
Tabelle 6.1 Kennzahlenvergleich mit mehreren Typen

Ein Chargentyp	Mehrere Chargentypen
Maximal mögliche Leistung	
$LA_{\max} = \frac{CGA_{\max}}{ZP} \cdot KAP_{\text{verf}}$	$LA_{\max} = \frac{CGA_{\max}}{ZP_{\text{mg}}} \cdot KAP_{\text{verf}}$ 6.5
Idealer Mindestbestand durch Transport	
$BIA_{\min,ZTR} = \frac{ZTR}{ZP} \cdot CGA_{\max}$	$BIA_{\min,ZTR} = \frac{ZTR}{ZP_{\text{mg}}} \cdot CGA_{\max}$ 6.6
Idealer Mindestbestand durch Chargenvorbereitungszeit	
$BIA_{\min,ZV} = \frac{ZV}{ZP} \cdot CGA_{\max}$	$BIA_{\min,ZV} = \frac{ZV}{ZP_{\text{mg}}} \cdot CGA_{\max}$ 6.7
Idealer Mindestbestand durch Chargenkomplettierungszeit	
$BIA_{\min,ZK} = \frac{1}{2} \cdot CGA_{\max}$	$BIA_{\min,ZK} = \frac{AT}{2} \cdot CGA_{\max}$ 6.8
Idealer Mindestbestand durch Prozesszeit	
$BIA_{\min,\text{Bearb}} = CGA_{\max}$	$BIA_{\min,\text{Bearb}} = CGA_{\max}$ 6.9
Idealer Mindestbestand durch technologisches Nachliegen	
$BIA_{\min,ZLNT} = \frac{ZLNT}{ZP} \cdot CGA_{\max}$	$BIA_{\min,ZLNT} = \frac{ZLNT}{ZP_{\text{mg}}} \cdot CGA_{\max}$ 6.10

AT Anzahl Chargentypen [-]
 BIA_{min} idealer Mindestbestand [AnzAuf]
 CGA_{max} maximale Chargengröße [AnzAuf]

KAP _{verf}	verfügbare Kapazität [Std/BKT]
LA _{max}	maximal mögliche Leistung [AnzAuf/BKT]
ZP	Prozesszeit [Std]
ZP _{mg}	mittlere gewichtete Prozesszeit [Std]
ZTR	Transportzeit [Std]
ZV	Chargenvorbereitungszeit [Std]
ZLNT	technologische Nachliegezeit [Std]

Die maximal mögliche Leistung der Arbeitssysteme ist identisch, wenn die maximalen Chargengrößen und die mittleren gewichteten Prozesszeiten der Systeme nicht voneinander abweichen. Beide Arbeitssysteme haben mit der Ausnahme der Komplettierung den gleichen Bestandsbedarf. Dies führt dazu, dass die Produktionskennlinien bis zum Plateau identisch sind. Der höhere Komplettierungsbestand der Arbeitssysteme mit mehreren Chargentypen führt zu einer geringeren Steigung nach dem Plateau und einem größeren idealen Mindestbestand. Abbildung 6.2 stellt den idealen Mindestbestand für mehrere Typen schematisch dar.



- $BIA_{min, 1 Typ}$: idealer Mindestbestand mit einem Chargentyp
- $BIA_{min, > 1 Typ}$: idealer Mindestbestand mit mehr als einem Chargentypen
- LA_{max} : maximal mögliche Leistung

Abbildung 6.2 Leistungskennlinie mit mehreren Chargentypen

Das Beispiel enthält eine Transportzeit, die den idealen Mindestbestand erhöht. Die Durchlaufzeit der Chargenarbeitssysteme ist unterhalb des Plateaus identisch. Oberhalb des Plateaus haben die beiden Arbeitssysteme für ein Leistungsniveau bis zum idealen Mindestbestand der Kennlinie für mehrere Chargentypen verschiedene Bestandsniveaus. Gemäß der Trichterformel benötigt das Chargenarbeitssystem mit mehreren Chargentypen in diesem Bereich eine längere Durchlaufzeit.

6.2 Genäherte Produktionskennlinie

Zunächst zeigt Abschnitt 6.2.1 die Einflussgrößen auf, die die genäherte Produktionskennlinie abbildet. Abschnitt 6.2.2 leitet aus diesen Größen eine grundlegende Produktionskennlinie ab, die Abschnitt 6.2.3 in zwei Schritten erweitert. Abschnitt 6.2.4 evaluiert die genäherten Produktionskennlinien.

6.2.1 Einflussgrößen

Neben der Wirkweise, die für Chargenarbeitssysteme mit einem Chargentyp gelten (vgl. Abschnitt 5.2), treten bei mehreren Chargentypen drei weitere Einflüsse auf den Pufferbestand auf. Zunächst beschreibt dieser Abschnitt die Auswirkung von unbesetzten Chargentypen. Abbildung 6.1 und Gleichung 6.4 gehen von einem zyklischen Zugang der Chargentypen am Chargenarbeitssystem aus. Dieser Zugang hat zur Folge, dass sich die Chargen stets gleichmäßig füllen. In der Praxis ist der Zugang der Chargentypen jedoch nicht zyklisch, sondern leitet sich zufällig gemäß der Nachfrageverteilung der jeweiligen Typen ab. Dies führt dazu, dass einzelne Chargentypen mehr gefüllt sind und andere Chargentypen unbesetzt bleiben. Abbildung 6.3 zeigt ein Beispiel mit vier Chargentypen und acht Aufträgen.

a) gleichmäßige Verteilung der Chargentypen



b) ungleichmäßige Verteilung der Chargentypen

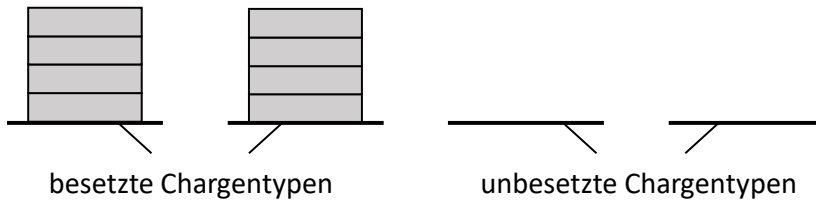


Abbildung 6.3 Verteilung der Aufträge auf die Chargentypen

Die Anzahl unbesetzter Chargentypen bezeichnet die Arbeit verkürzt als ‚Anzahl freier Felder‘ (AFF). Chargentypen, die nicht mit Aufträgen besetzt sind, binden keinen Komplettierungsbestand. Daher kann der Mindestbestand durch die Komplettierungszeit (Gleichung 6.4) auf die besetzten Chargentypen reduziert werden:

$$BIA_{\min,ZK} = \frac{AT - AFF}{2} \cdot CGA_{\max} \quad 6.11$$

$BIA_{\min,ZK}$ idealer Mindestbestand durch Komplettierungszeit [AnzAuf]

AT Anzahl Chargentypen [-]

AFF Anzahl freier Felder [-]

CGA_{\max} maximale Chargengröße [AnzAuf]

Die Anzahl der freien Felder lässt sich über eine rekursive Funktion der Auftragsanteile, der mittleren Chargengröße und der Anzahl der Chargentypen berechnen:

$$\begin{aligned} f^{(15)}(AFF) &= \sum_{i=1}^{AT} (1 - AA_i)^{BA_{m,ZK}} \\ &= \sum_{i=1}^{AT} (1 - AA_i)^{\frac{1}{2} \cdot CGA_{\max} \cdot A_m \cdot (AT - AFF)} \end{aligned} \quad 6.12$$

AFF Anzahl freier Felder [-]

AT Anzahl Chargentypen [-]

AA_i Auftragsanteil des Chargentyps i [-]

$BA_{m,ZK}$	mittlerer Mindestbestand durch Komplettierungszeit [AnzAuf]
CGA_{max}	maximale Chargengröße (in Anzahl Aufträgen) [-]
A_m	mittlere Auslastung [-]

Die Summe ermittelt die Wahrscheinlichkeiten der Nichtbelegung der einzelnen Chargentypen. Die Basis beschreibt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Chargentyp bei einem Komplettierungsbestand von eins nicht belegt ist. Der Exponent schätzt den mittleren Komplettierungsbestand zum Entscheidungszeitpunkt ab. Als Startwert der iterativen Funktion kann die Anzahl der freien Felder konservativ mit null abgeschätzt werden. 15 Iterationen führen zu einer sehr guten Annäherung des Funktionswerts.

Da die Anzahl der freien Felder eine nichtlineare Funktion der Auslastung ist, ergibt sich insgesamt ein nichtlinearer Einfluss durch die unbesetzten Chargentypen.

Der zweite nichtlineare Einfluss ist die Zwischenankunftszeitstreuung. Abschnitt 6.1 untersucht Arbeitssysteme, die keine Varianz der Zwischenankunftszeit aufweisen. Diese Annahme bedingt, dass nach einem festen Zeitintervall ein Auftrag am Chargenarbeitssystem eintrifft. Der Chargentyp des Auftrags ist jedoch zufällig, da die Annahmen keine Feinterminierung beinhalten. Abbildung 6.4 zeigt die Auswirkung des zufälligen Ankunftsprozesses auf die Zwischenankunftszeit der einzelnen Chargentypen.

6 Modellierung von Chargenarbeitssystemen mit mehreren Chargentypen

a) ein Chargentyp											
1 1 1 1 1 1 1 1 1										$ZAZ_m = 1 \text{ ZAZ}$	$ZAZ_v = 0$
b) drei Chargentypen (zyklische Ankunft)											
1 2 3 1 2 3 1 2 3										$ZAZ_m = 1 \text{ ZAZ}$	$ZAZ_v = 0$
je Chargentyp	1			1			1			$ZAZ_{m,1} = 3 \text{ ZAZ}$	$ZAZ_{v,1} = 0$
	2		2		2		2		$ZAZ_{m,2} = 3 \text{ ZAZ}$	$ZAZ_{v,2} = 0$	
	3		3		3		3		$ZAZ_{m,3} = 3 \text{ ZAZ}$	$ZAZ_{v,3} = 0$	
c) drei Chargentypen (zufällige Ankunft)											
1 1 3 2 1 2 3 2 3										$ZAZ_m = 1 \text{ ZAZ}$	$ZAZ_v = 0$
je Chargentyp	1	1			1					$ZAZ_{m,1} = 3 \text{ ZAZ}$	$ZAZ_{v,1} > 0$
	2		2		2		2		$ZAZ_{m,2} = 3 \text{ ZAZ}$	$ZAZ_{v,2} > 0$	
	3		3		3		3		$ZAZ_{m,3} = 3 \text{ ZAZ}$	$ZAZ_{v,3} > 0$	

ZAZ : Zwischenankunftszeit
 ZAZ_m : Mittelwert der Zwischenankunftszeit
 ZAZ_v : Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit

Abbildung 6.4 Streuung der Zwischenankunftszeit durch zufällige Ankunft

Fall a) beschreibt den Vergleichsprozess mit einem Chargentyp. Der mittlere Abstand zwischen zwei Ankünften entspricht der Dauer einer Zwischenankunft. Eine Streuung tritt nicht auf. Fall b) erweitert die Ankunft auf drei Typen mit einer zyklischen Reihenfolge. Der Mittelwert der Ankunft je Chargentyp erhöht sich von einer Zwischenankunftszeit auf die dreifache Zeit, ohne dabei Streuung zu verursachen. Fall c) zeigt ein Beispiel einer zufälligen Ankunft der drei Chargentypen. Der Mittelwert entspricht dem Wert aus Fall b), jedoch steigt der Variationskoeffizient erheblich an. Falls die Nachfrage der Chargentypen ungleich ist, weichen die Mittelwerte der einzelnen Chargentypen voneinander ab. Simulationsversuche haben gezeigt, dass die Variationskoeffizienten in Abhängigkeit von der relativen Verteilung der Chargentypen

einer Exponentialverteilung ähnlich sind und um den Wert von eins schwanken. Folglich schätzt die Modellierung den Variationskoeffizienten durch die zufällige Ankunft der Aufträge mit einem Wert von eins. Die Wirkweise der aus der zufälligen Ankunft resultierenden Zwischenankunftszeitstreuung ähnelt der Wirkweise der in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Zwischenankunftszeitstreuung. Beide Streuungen haben zur Folge, dass das Chargenarbeitssystem einen Pufferbestand aufbaut. Der resultierende Variationskoeffizient der beiden Effekte ergibt sich vereinfacht als:

$$ZAZ_{v,res} \approx \max\{ZAZ_{v,Zufall}; ZAZ_v\} \quad 6.13$$

$ZAZ_{v,res}$ resultierender Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit [-]

$ZAZ_{v,Zufall}$ Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit durch Zufall [-]

ZAZ_v Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit (der Ankunft) [-]

Die dritte Einflussgröße ist die Varianz der Prozesszeit des Chargenarbeitssystems. Die Wirkweise der Prozesszeitschwankung zeigt Abbildung 6.5 beispielhaft.

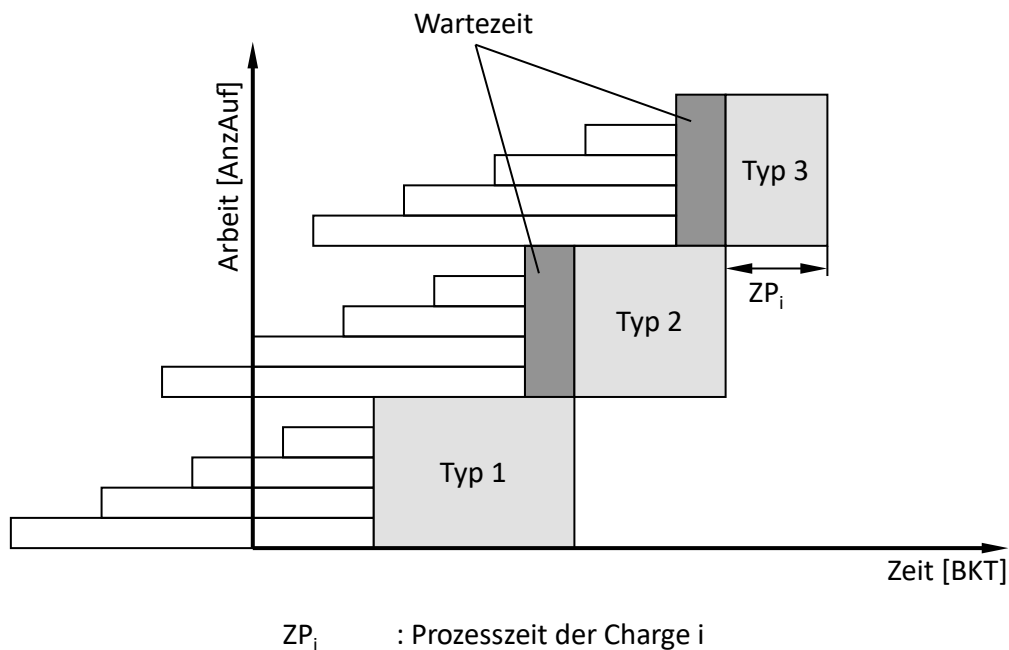


Abbildung 6.5 Auswirkung schwankender Prozesszeiten

Der erste Chargentyp benötigt eine lange Prozesszeit, der zweite Chargentyp eine mittellange Prozesszeit und der dritte Chargentyp eine kurze Prozesszeit.

Die Ankunft der einzelnen Typen erfolgt im Beispiel zyklisch. Die Charge des zweiten Chargentyps wartet nach der Komplettierung auf die Bearbeitung. Die Wartezeit entspricht im Beispiel der zusätzlichen Bearbeitungszeit der Charge vom Typ eins. Da die zweite Charge die längere Bearbeitungszeit der ersten Charge nicht ausgleichen kann, wartet auch die dritte Charge auf die Bearbeitung.

Es zeigt sich, dass die Prozesszeitvarianz von Chargenarbeitssystemen anders wirkt als die Auftragszeitvarianz von Standardarbeitssystemen. Bei Standardarbeitssystemen ist die Streuung der Losgröße der wesentliche Einfluss auf die Streuung der Auftragszeit. Bei Chargenarbeitssystemen ist die Prozesszeit unabhängig vom Füllgrad und vorrangig technologisch festgelegt. Im Allgemeinen führt diese Wirkweise zu einem deutlich geringeren Variationskoeffizienten der Prozesszeit.

6.2.2 Parametrisierte Näherungskennlinie

Ziel dieses Abschnitts ist es, die parametrisierte Näherungskennlinie aus Kapitel 5 um die zusätzlichen Einflussgrößen der Chargenarbeitssysteme mit mehreren Chargentypen zu erweitern. Aufgrund der großen Ähnlichkeit der Wirkweise der Einflussgrößen ist eine Modellierung anzustreben, die auf der Modellierung aus Kapitel 5 basiert.

Die Anzahl der freien Felder wirkt sich ausschließlich auf den idealen Mindestbestand des Arbeitssystems aus. Für eine Berücksichtigung des Effektes ist folglich die Gleichung 6.8 durch die erweiterte Gleichung 6.11 zu ersetzen. Gleichung 6.13 detailliert weiterhin den Variationskoeffizienten der Zwischenankunftszeit aus der Grundgleichung 5.20:

$$BA_m = BIA_{\min} \cdot A_m + \frac{A_m^2}{1 - A_m} \cdot \left(\frac{ZAZ_{v,res}^2 + ZP_v^2}{2} \right) \quad 6.14$$

BA_m	mittlerer Bestand [AnzAuf]
BIA_{\min}	idealer Mindestbestand [AnzAuf]
A_m	mittlere Auslastung [-]
$ZAZ_{v,res}$	resultierender Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit [-]
ZP_v	Variationskoeffizient der Prozesszeit [-]

Der erforderliche Bestand für Chargenarbeitssysteme mit mehreren Chargentypen setzt sich aus dem idealen Mindestbestand und dem Pufferbestand

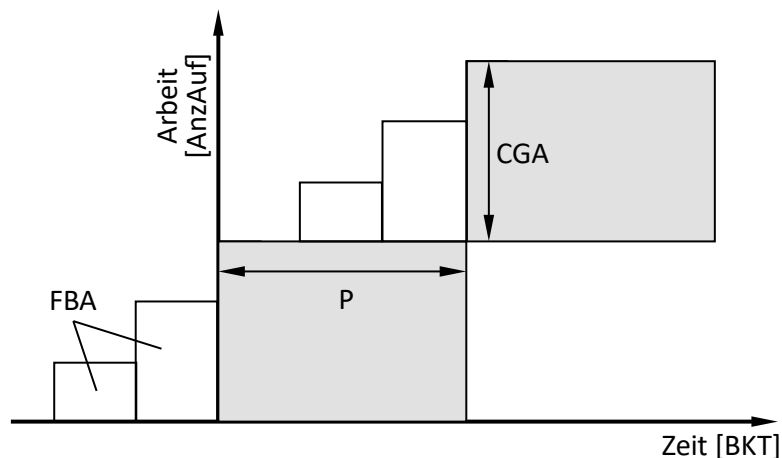
zusammen. Der Pufferbestand für Chargenarbeitssysteme entspricht in etwa dem Bestand der Standardarbeitssysteme. Da der ideale Mindestbestand des Chargenarbeitssystems durch den Einfluss der maximalen Chargengröße und der Anzahl der Chargentypen stark ansteigt, reduziert sich der Anteil des Pufferbestands am Gesamtbestand. Die Berechnung des idealen Mindestbestands hat somit bei Chargenarbeitssystemen eine besondere Relevanz.

6.2.3 Erweiterung der Modellierung

Dieser Abschnitt erweitert die Modellierung in zwei Schritten. Zunächst detailliert der erste Teil den Komplettierungsbestand von Chargenarbeitssystemen. Der zweite Teil modelliert die Auswirkung unterschiedlicher maximaler Chargengrößen je Chargentyp. Die Ergebnisse dieses Abschnitts wurden anhand von Beispielen plausibilisiert, aber nicht in umfangreichen Simulationsversuchen evaluiert.

Reduzierung des Komplettierungsbestands bei hohen Auslastungen

Chargen binden weniger Bestand als in Abbildung 5.4 dargestellt, wenn sie nach der Komplettierung entweder direkt bearbeitet werden oder in den Pufferbestand übergehen. Abbildung 6.6 stellt diesen Fall dar.



CGA : Chargengröße

FBA : Bestandsfläche

P : Länge des Bezugszeitraums

Abbildung 6.6 Komplettierung bei hohen Auslastungen und Pufferbeständen

Der erste Auftrag einer Charge von drei Aufträgen wartet zwei Zwischenankunftszeiten und der zweite Auftrag eine Zwischenankunftszeit auf die

Komplettierung. Der dritte Auftrag erfährt dagegen aus den eingangs genannten Gründen keine Komplettierungszeit.

Die Berechnung des erforderlichen Bestands orientiert sich an den Schritten aus den Gleichungen 5.9 bis 5.12:

$$\begin{aligned}
 BIA_{\min,ZK} &= \frac{FBA}{P} \\
 &= \frac{0 \cdot ZAZ_1 + 1 \cdot ZAZ_2 + \dots + (CGA_{\max} - 1) \cdot ZAZ_{CGA}}{\sum_{i=1}^{CGA} ZAZ_i} \\
 &= \frac{ZAZ_m \cdot \frac{CGA_{\max} - 1}{2} \cdot CGA_{\max}}{ZAZ_m \cdot CGA_{\max}} \\
 &= \frac{CGA_{\max} - 1}{2}
 \end{aligned}
 \tag{6.15}$$

$BIA_{\min,ZK}$	idealer Mindestbestand durch Komplettierungszeit [AnzAuf]
FBA	Bestandsfläche [AnzAuf · BKT]
P	Länge des Bezugszeitraums [BKT]
ZAZ	Zwischenankunftszeit [BKT]
ZAZ_m	mittlere Zwischenankunftszeit [BKT]
CGA_{\max}	Chargengröße [AnzAuf]

Die Gleichung 6.15 berechnet im Vergleich zur Gleichung 5.12 einen idealen Mindestbestand, der um einen halben Auftrag verringert ist. Durch die Multiplikation des Komplettierungsbestands mit der Anzahl der Chargentypen resultiert der ideale Mindestbestand für Chargenarbeitssysteme mit mehr als einem Chargentypen:

$$BIA_{\min,ZK} = (AT - AFF) \cdot \frac{CGA_{\max} - 1}{2}
 \tag{6.16}$$

$BIA_{\min,ZK}$	idealer Mindestbestand durch Komplettierungszeit [AnzAuf]
AT	Anzahl Chargentypen [-]
AFF	Anzahl freier Felder [-]
CGA_{\max}	Chargengröße [AnzAuf]

Simulationsversuche zeigen, dass die um eins verringerte Chargengröße die Güte der Kennlinien mit Pufferbestand im Übergangsbereich erheblich erhöht.

Unterschiede in der maximalen Chargengröße je Chargentyp

Die Chargengröße ist ein elementarer Parameter und beeinflusst sowohl die Leistung als auch den Bestand des Chargenarbeitssystems. Eine größere Charge eines Chargentyps ermöglicht eine höhere Systemleistung und bindet mehr Bestand. Zugleich verändert sie die Auflagehäufigkeit des Chargentyps. Beispielsweise muss ein Chargentyp mit der doppelten Chargengröße nur etwa halb so häufig aufgelegt werden, um eine vergleichbare Nachfrage abzudecken.

Für die Erweiterung ist es zunächst hilfreich, den Abgang eines Chargenarbeitssystems in unterschiedlichen Einheiten zu messen (vgl. Abschnitt 4.6):

- in Anzahl Aufträgen: Dies ist die in dieser Arbeit überwiegend verwendete Einheit, die mit den Fertigungsaufträgen korrespondiert.
- in Anzahl Chargen: Die Einheit ist für Chargenarbeitssysteme charakteristisch, weil die Chargen die produktionsrelevante Größe sind.
- in Stunden: Addiert man die Prozesszeiten der Chargen im Untersuchungszeitraum auf, erhält man den Abgang des Chargenarbeitssystems in Stunden. Er ermöglicht eine Bewertung der Zeitdauer, die das Chargenarbeitssystem im Zeitraum für die Bearbeitung von Chargen verwendet hat.

Aus den unterschiedlich definierten Abgängen ergeben sich durch den Bezug auf die Zeitdauer des Untersuchungszeitraums die unterschiedlichen Leistungen:

LA	Leistung in Anzahl Aufträgen pro Betriebskalendertag
LC	Leistung in Anzahl Chargen pro Betriebskalendertag
L	Leistung in Stunden pro Betriebskalendertag

In Anlehnung an das Vorgehen in Abschnitt 6.1.1 definiert dieser Abschnitt fünf Hilfsgrößen als Grundlage für die Berechnung der Kennzahlen von Chargenarbeitssystemen mit unterschiedlichen maximalen Chargengrößen je Chargentyp.

Die ersten beiden Hilfsgrößen sind der Chargenanteil und der Auflagestundenanteil und beschreiben Gewichtungsfaktoren zur Berechnung von mittleren gewichteten Kennzahlen. Bei Chargenarbeitssystemen mit einer einheitlichen Chargengröße entspricht der Chargenanteil eines Chargentyps dem

Auftragsanteil des Chargentyps. Für ungleiche Chargengrößen berechnet sich der Chargenanteil aus der Leistung und der Chargengröße:

$$AC_i = \frac{LC_{m,i}}{\sum_{j=1}^{AT} LC_{m,j}} = \frac{\frac{LA_{m,i}}{CGA_{m,i}}}{\sum_{j=1}^{AT} \frac{LA_{m,j}}{CGA_{m,j}}} \quad 6.17$$

AC_i	Chargenanteil des Chargentyps i [-]
$LC_{m,i}$	mittlere Leistung des Chargentyps i (in Anzahl Chargen) [1/BKT]
AT	Anzahl Chargentypen [-]
$LA_{m,i}$	mittlere Leistung des Chargentyps i [AnzAuf/BKT]
$CGA_{m,i}$	mittlere Chargengröße des Chargentyps i [AnzAuf]

Der Chargenanteil kann folglich nicht direkt aus dem Auftragsanteil errechnet werden, sondern ergibt sich über den Auflagezyklus und die Chargenleistungen. Der Aufлагestundenanteil beschreibt analog den prozentualen Anteil der zur Verfügung stehenden Zeit, in der ein Chargentyp bearbeitet wird. Um diesen zu bestimmen, rechnet man die Chargenleistung eines Chargentyps über die Prozesszeiten in die Einheit ‚Stunden pro Betriebskalendertag‘ um:

$$L_{m,i} = LC_{m,i} \cdot ZP_i \quad 6.18$$

$L_{m,i}$	mittlere Leistung des Chargentyps i [Std/BKT]
$LC_{m,i}$	mittlere Leistung des Chargentyps i (in Anzahl Chargen) [1/BKT]
ZP_i	Prozesszeit des Chargentyps i [Std]

Der Aufлагestundenanteil ist eine Funktion der chargentypspezifischen Leistungen, Prozesszeiten und Chargengrößen:

$$AS_i = \frac{L_{m,i}}{\sum_{j=1}^{AT} L_{m,j}} = \frac{LC_{m,i} \cdot ZP_i}{\sum_{j=1}^{AT} LC_{m,j} \cdot ZP_j} = \frac{\frac{LA_{m,i}}{CGA_{m,i}} \cdot ZP_i}{\sum_{j=1}^{AT} \frac{LA_{m,j}}{CGA_{m,j}} \cdot ZP_j} \quad 6.19$$

AS_i	Auflagestundenanteil des Chargentyps i [-]
$L_{m,i}$	mittlere Leistung des Chargentyps i [Std/BKT]
AT	Anzahl Chargentypen [-]
$LC_{m,i}$	mittlere Leistung des Chargentyps i (in Anzahl Chargen) [1/BKT]
ZP_i	Prozesszeit des Chargentyps i [Std]
$LA_{m,i}$	mittlere Leistung des Chargentyps i [AnzAuf/BKT]
$CGA_{m,i}$	mittlere Chargengröße des Chargentyps i [AnzAuf]

Zwei weitere Hilfsgrößen sind die durch den Chargenanteil gewichtete Prozesszeit und Chargengröße. Die mittlere gewichtete Prozesszeit wird analog zu Gleichung 6.1 berechnet, wobei der Auftragsanteil des Chargentyps durch den Chargenanteil ersetzt wird:

$$ZP_{\text{mgAC}} = \sum_{i=1}^{\text{AT}} AC_i \cdot ZP_i \quad 6.20$$

ZP_{mgAC} mittlere gewichtete Prozesszeit gemäß Chargenanteil [Std]
 AT Anzahl Chargentypen [-]
 AC_i Chargenanteil des Chargentyps i [-]
 ZP_i Prozesszeit des Chargentyps i [Std]

In gleicher Weise leitet sich die mittlere gewichtete Chargengröße ab:

$$CGA_{\text{mgAC}} = \sum_{i=1}^{\text{AT}} AC_i \cdot CGA_{\text{m},i} \quad 6.21$$

CGA_{mgAC} mittlere gewichtete Chargengröße gemäß Chargenanteil [AnzAuf]
 AT Anzahl Chargentypen [-]
 AC_i Chargenanteil des Chargentyps i [-]
 $CGA_{\text{m},i}$ mittlere Chargengröße des Chargentyps i [AnzAuf]

Die fünfte Hilfsgröße ist die Chargengröße, die entsprechend dem Aufлагestundenanteil gewichtet wird:

$$CGA_{\text{mgAS}} = \sum_{i=1}^{\text{AT}} AS_i \cdot CGA_{\text{m},i} \quad 6.22$$

CGA_{mgAS} mittlere gewichtete Chargengröße gemäß Aufлагestundenanteil [AnzAuf]
 AT Anzahl Chargentypen [-]
 AS_i Aufлагestundenanteil des Chargentyps i [-]
 $CGA_{\text{m},i}$ mittlere Chargengröße des Chargentyps i [AnzAuf]

Auf der Basis der Hilfsgrößen können die maximal mögliche Leistung und die Elemente des idealen Mindestbestands der Erweiterung abgeleitet werden. Tabelle 6.2 zeigt eine Übersicht über die Kennzahlen, bei denen die mittlere Chargengröße eines Chargentyps durch die maximale Chargengröße ersetzt wurde. Überwiegend gewichten die Gleichungen die maximale Chargengröße gemäß dem Chargenanteil. Eine Ausnahme bildet der Bearbeitungsbestand, der auf den Aufлагestundenanteil bezogen wird.

Tabelle 6.2 Kennzahlenvergleich

Mehrere Chargentypen	Erweiterung
Maximal mögliche Leistung 6.23	
$LA_{\max} = \frac{CGA_{\max} \cdot KAP_{\text{verf}}}{ZP_{\text{mg}}}$	$LA_{\max} = \frac{CGA_{\max, \text{mgAC}} \cdot KAP_{\text{verf}}}{ZP_{\text{mgAC}}}$
Idealer Mindestbestand durch Transport 6.24	
$BIA_{\min, ZTR} = \frac{ZTR}{ZP_{\text{mg}}} \cdot CGA_{\max}$	$BIA_{\min, ZTR} = \frac{ZTR}{ZP_{\text{mgAC}}} \cdot CGA_{\max, \text{mgAC}}$
Idealer Mindestbestand durch Chargenvorbereitungszeit 6.25	
$BIA_{\min, ZV} = \frac{ZV}{ZP_{\text{mg}}} \cdot CGA_{\max}$	$BIA_{\min, ZV} = \frac{ZV}{ZP_{\text{mgAC}}} \cdot CGA_{\max, \text{mgAC}}$
Idealer Mindestbestand durch Chargenkomplettierungszeit ⁹ 6.26	
$BIA_{\min, ZK} = \frac{AT}{2} \cdot CGA_{\max}$	$BIA_{\min, ZK} = \frac{AT - \text{AFF}}{2} \cdot (CGA_{\max, \text{mgAC}}[-1])$
Idealer Mindestbestand durch Prozesszeit 6.27	
$BIA_{\min, \text{Bearb}} = CGA_{\max}$	$BIA_{\min, \text{Bearb}} = CGA_{\max, \text{mgAS}}$
Idealer Mindestbestand durch technologisches Nachliegen 6.28	
$BIA_{\min, ZLNT} = \frac{ZLNT}{ZP_{\text{mg}}} \cdot CGA_{\max}$	$BIA_{\min, ZLNT} = \frac{ZLNT}{ZP_{\text{mgAC}}} \cdot CGA_{\max, \text{mgAC}}$

AFF Anzahl freier Felder [-]
 AT Anzahl Chargentypen [-]
 BIA_{min} idealer Mindestbestand [AnzAuf]
 CGA_{max} maximale Chargengröße [AnzAuf]
 CGA_{max, mgAC} mittlere gewichtete maximale Chargengröße gemäß Chargenanteil [AnzAuf]

⁹ Die Chargengröße reduziert sich bei hohen Auslastungen um einen Auftrag (vgl. Gleichung 6.15). Diese Unterscheidung bilden die eckigen Klammern in Gleichung 6.26 ab.

$CGA_{\max,mgAS}$	mittlere gewichtete maximale Chargengröße gemäß Auflagestundenanteil [AnzAuf]
KAP_{verf}	verfügbare Kapazität [Std/BKT]
LA_{\max}	maximal mögliche Leistung [AnzAuf/BKT]
ZLNT	technologische Nachliegezeit [Std]
ZP_{mg}	mittlere gewichtete Prozesszeit (gemäß Auftragsanteil) [Std]
ZP_{mgAC}	mittlere gewichtete Prozesszeit gemäß Chargenanteil [Std]
ZTR	Transportzeit [Std]
ZV	Chargenvorbereitungszeit [Std]

Berechnet man mit diesen Kennzahlen die Produktionskennlinien, trifft man implizit die Annahme, dass die Chargenanteile der Chargentypen unabhängig von der Auslastung sind. Insbesondere bei geringen Auslastungen ist dies nicht immer der Fall, so dass Abweichungen von der Modellierung entstehen können.

6.2.4 Evaluierung

Dieser Abschnitt evaluiert die genäherten Produktionskennlinien für Chargenarbeitssysteme mit mehreren Chargentypen. Abbildung 6.7 stellt die Referenzkennlinie für diese Kennlinien dar.

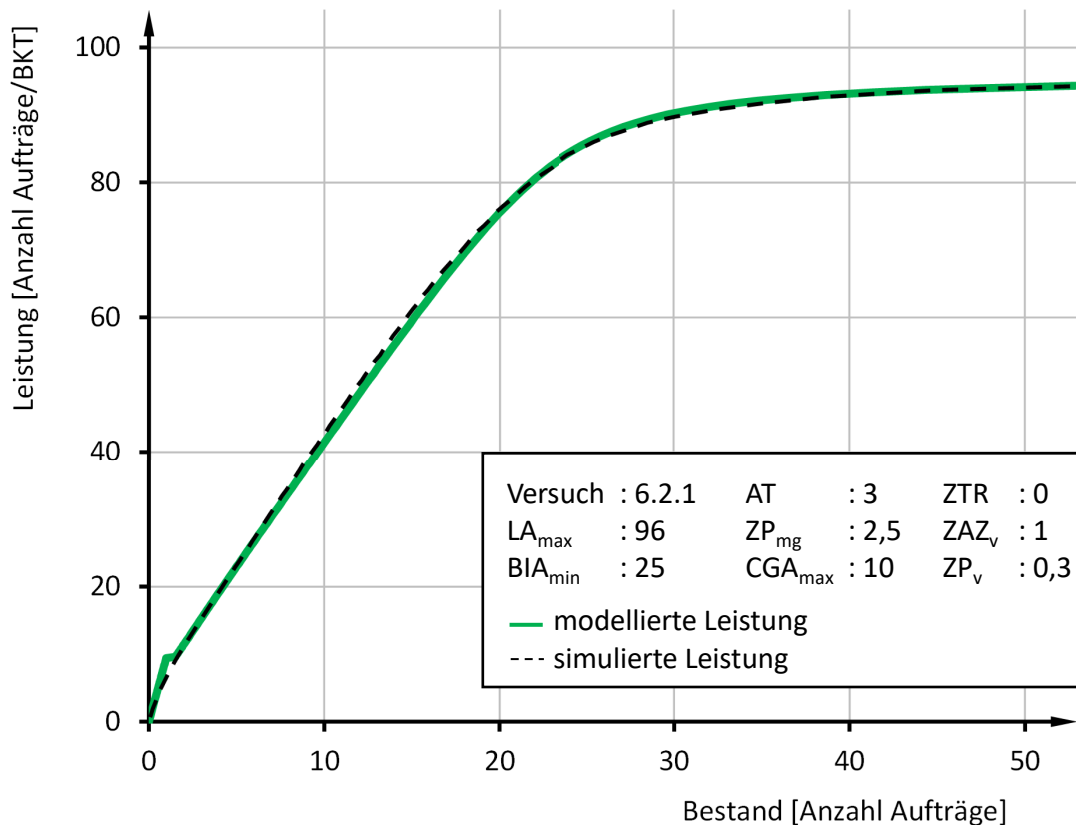


Abbildung 6.7 Genäherte Kennlinie mit mehreren Chargentypen

Das Referenzsystem hat eine mittlere gewichtete Prozesszeit von 2,5 Stunden und kann maximal zehn Aufträge pro Charge bearbeiten. Dem System gehen drei unterschiedliche Chargentypen zu. Die Zwischenankunftszeit ist exponentialverteilt und der Variationskoeffizient der Prozesszeit beträgt 0,3.

Die modellierten Leistungswerte bilden die simulierten Werte überwiegend mit hoher Güte ab. Eine Ausnahme bildet der Sprungbereich bei einer Leistung von etwa zehn Aufträgen pro Betriebskalendertag. Der Übergang zwischen der Phase der Bearbeitung einzelner Aufträge pro Charge und der Phase mit Komplettierung verläuft im Referenzarbeitssystem nicht sprunghaft, sondern fließend. Daher prognostiziert das Modell in diesem Bereich zu geringe Bestände. Für die Anwendung der Produktionskennlinie ist dieser Bereich nur von sehr geringer Bedeutung. Im praxisrelevanten Übergangsbereich der Produktionskennlinie ist die Güte der Modellierung hoch.

Tabelle 6.3 zeigt die relativen Abweichungen der modellierten und der simulierten Leistungswerte.

Tabelle 6.3 Genäherte Kennlinie mit mehreren Chargentypen

Anteil vom idealen Mindestbestand	modellierte Leistung	simulierte Leistung	relative Abweichung
50 %	50,6	52,1	-3,0 %
75 %	71,9	72,8	-1,3 %
100 %	85,8	85,4	0,5 %
125 %	90,9	90,3	0,7 %
150 %	92,7	92,4	0,3 %

Die relativen Abweichungen bestätigen die Erkenntnisse zur Güte aus Abbildung 6.7. Abbildung 6.8 zeigt die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus der Leistungskennlinie auf den Verlauf der Durchlaufzeit.

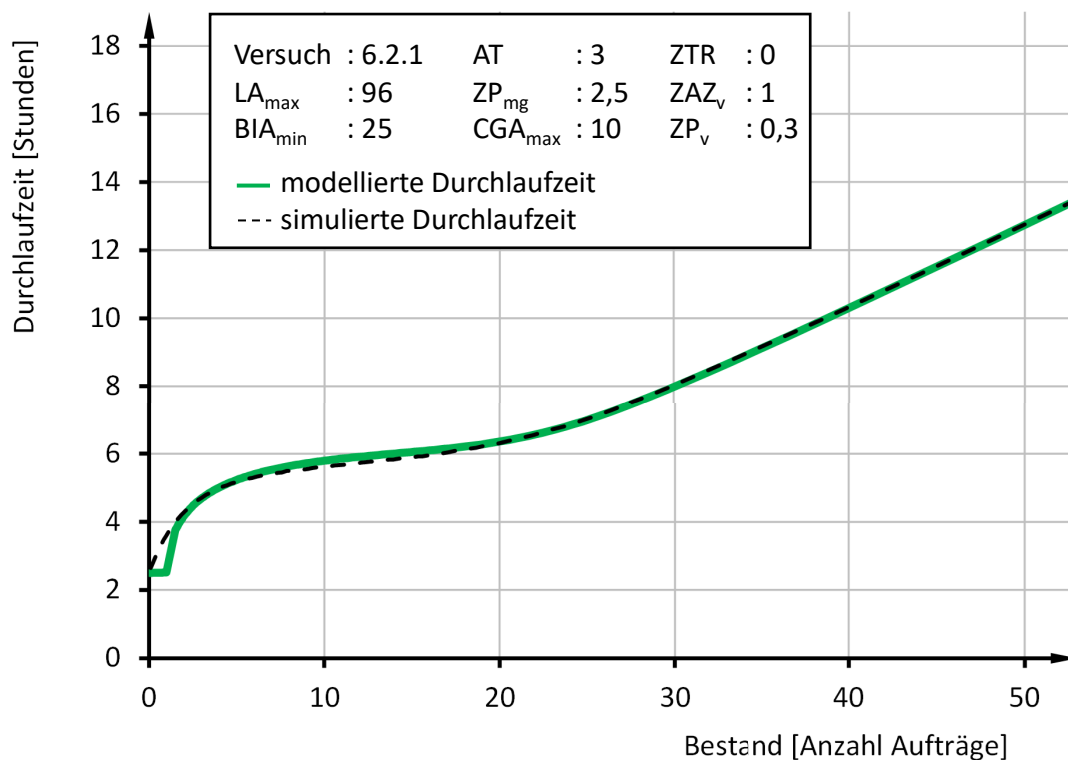


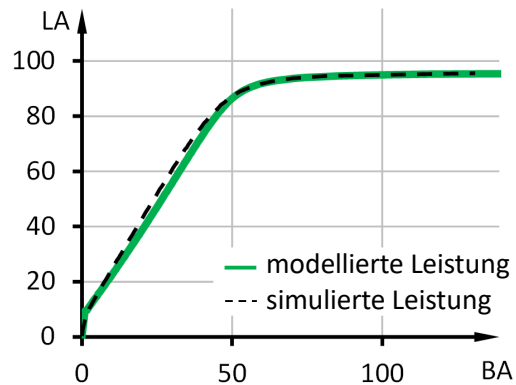
Abbildung 6.8 Durchlaufzeit mit mehreren Chargentypen

Mit der Ausnahme des zuvor beschriebenen Sprungbereichs bilden die modellierten Werte die simulierten Werte mit einer hohen Genauigkeit ab. Abbildung 6.9, Abbildung 6.10 und Abbildung 6.11 stellen weitere Parameterkombinationen dar.

6 Modellierung von Chargenarbeitssystemen mit mehreren Chargentypen

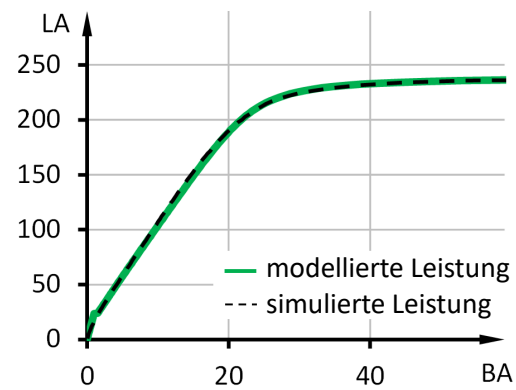
Versuchsparameter			
Versuch : 6.2.2	AT : 9	ZTR : 0	
LA _{max} : 96	ZP _{mg} : 2,5	ZAZ _v : 1	
BIA _{min} : 55	CGA _{max} : 10	ZP _v : 0,3	

BIA _{min,rel}	LA _{mod}	LA _{sim}	Abw
50 %	51,4	56,0	-8,9 %
75 %	74,9	78,1	-4,3 %
100 %	90,0	90,0	0,0 %
125 %	93,5	93,5	0,0 %
150 %	94,5	94,6	-0,1 %



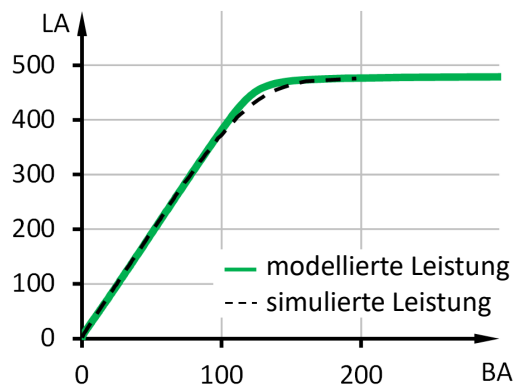
Versuchsparameter			
Versuch : 6.2.3	AT : 3	ZTR : 0	
LA _{max} : 240	ZP _{mg} : 1	ZAZ _v : 1	
BIA _{min} : 25	CGA _{max} : 10	ZP _v : 0,3	

BIA _{min,rel}	LA _{mod}	LA _{sim}	Abw
50 %	126,4	130,4	-3,2 %
75 %	179,8	181,8	-1,1 %
100 %	214,5	213,5	0,5 %
125 %	227,2	225,8	0,6 %
150 %	231,8	230,9	0,4 %



Versuchsparameter			
Versuch : 6.2.4	AT : 3	ZTR : 0	
LA _{max} : 480	ZP _{mg} : 2,5	ZAZ _v : 1	
BIA _{min} : 125	CGA _{max} : 50	ZP _v : 0,3	

BIA _{min,rel}	LA _{mod}	LA _{sim}	Abw
50 %	240,4	243,4	-1,2 %
75 %	358,6	353,8	1,3 %
100 %	452,5	434,1	4,1 %
125 %	472,6	468,2	0,9 %
150 %	476,0	474,4	0,3 %



Abw : relative Abweichung [-]
 AT : Anzahl Chargentypen [-]
 BA : Bestand [AnzAuf]
 BIA_{min} : idealer Mindestbestand [AnzAuf]
 BIA_{min,rel} : relativer, idealer Mindestbestand [-]
 CGA_{max} : maximale Chargengröße [AnzAuf]
 LA : Leistung [AnzAuf/BKT]

LA_{max} : maximal mögliche Leistung [AnzAuf/BKT]
 LA_{mod} : modellierte Leistung [AnzAuf/BKT]
 LA_{sim} : simulierte Leistung [AnzAuf/BKT]
 ZAZ_v : Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit [-]
 ZP_{mg} : mittlere gewichtete Prozesszeit [Std]
 ZP_v : Variationskoeffizient der Prozesszeit [-]
 ZTR : Transportzeit [Std]

Abbildung 6.9 Weitere genäherte Kennlinien mit mehreren Chargentypen I

6 Modellierung von Chargenarbeitssystemen mit mehreren Chargentypen

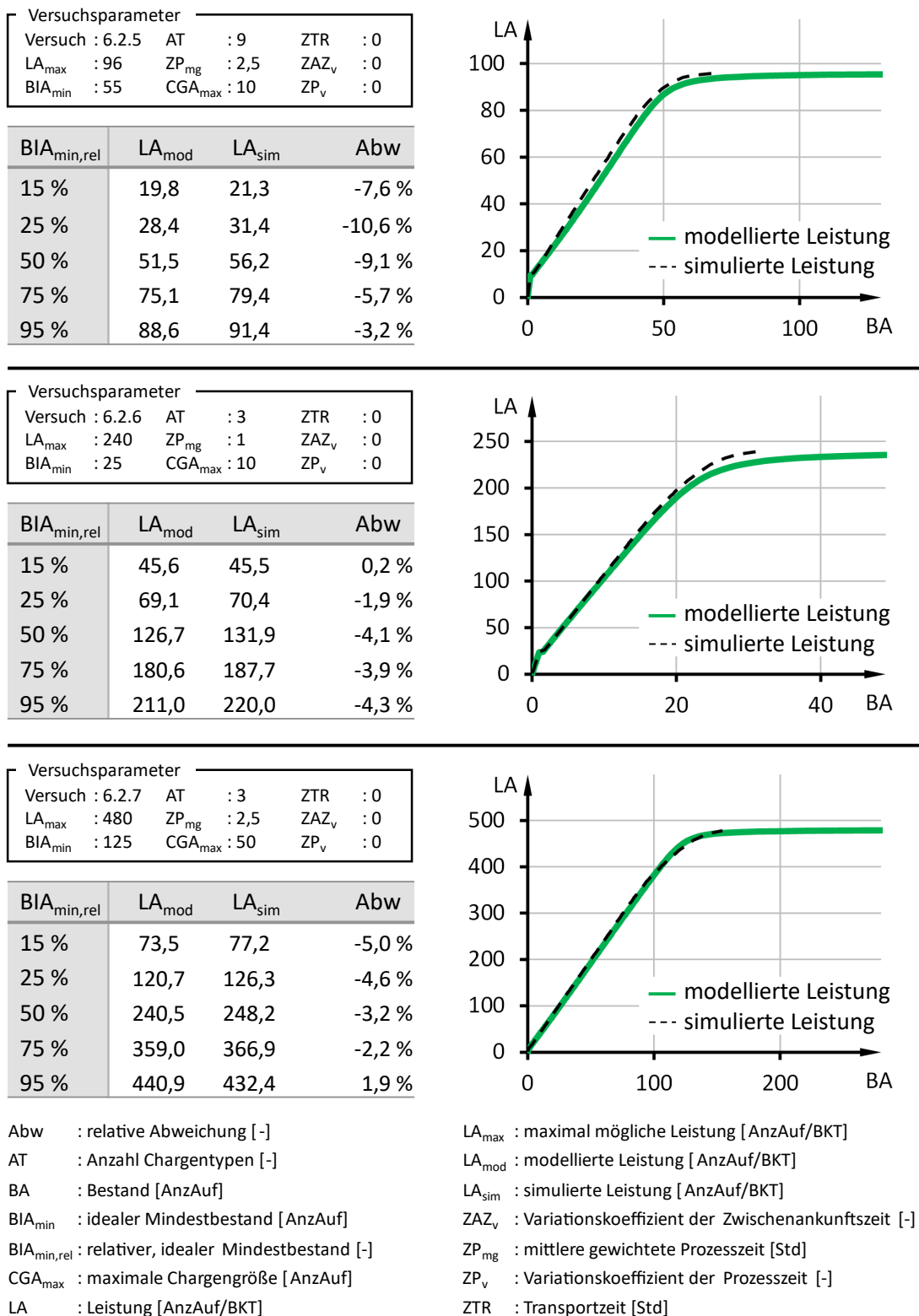


Abbildung 6.10 Weitere genäherte Kennlinien mit mehreren Chargentypen II

6 Modellierung von Chargenarbeitssystemen mit mehreren Chargentypen

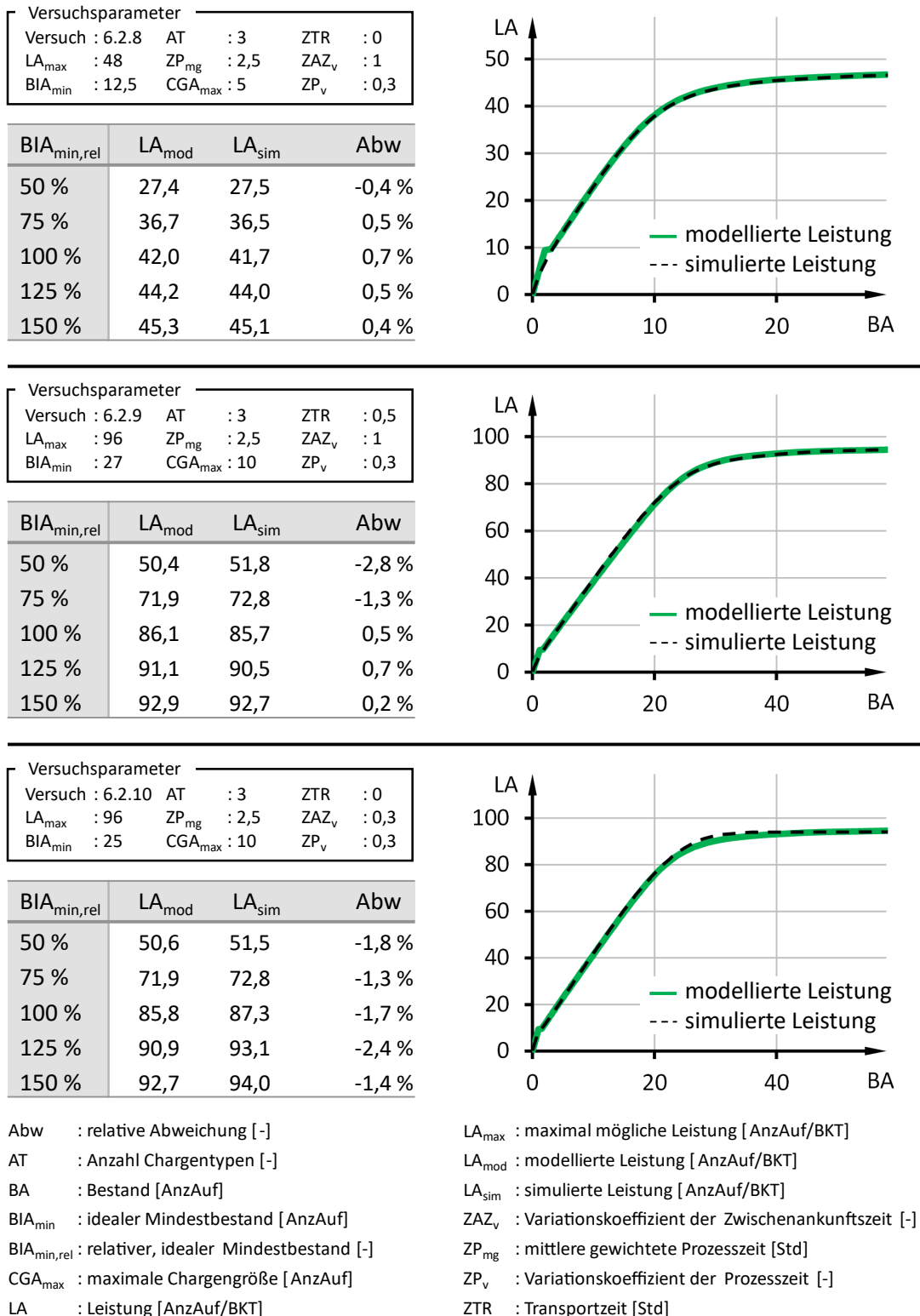


Abbildung 6.11 Weitere genäherte Kennlinien mit mehreren Chargentypen III

Abbildung 6.9 stellt drei Versuche dar, die jeweils nur in einem Parameter von dem Referenzversuch abweichen. Versuch 6.2.2 evaluiert die genäherte Produktionskennlinie mit 9 Chargentypen, Versuch 6.2.3 reduziert die mittlere Prozesszeit auf eine Stunde und Versuch 6.2.4 untersucht eine maximale Chargengröße von 50 Aufträgen. In Versuch 6.2.2 wölbt sich der Graph der modellierten Leistung rechtsseitig. Die maximale relative Abweichung tritt mit 8,9 Prozent bei einem relativen Bestand von 50 Prozent des idealen Mindestbestands auf. Diese Abweichung ist durch einen Leistungseffekt begründet, der bislang nicht modellbasiert abgebildet wurde. Neben der Anzahl der freien Felder (vgl. Gleichung 6.12) sind auch die besetzten Chargentypen am Chargenarbeitssystem nicht gleichermaßen gefüllt. Dieser ungleichmäßige Füllgrad hat einen Einfluss auf den am Arbeitssystem verbleibenden Bestand. Durch die vorrangige Bearbeitung der Chargen, die den höchsten Füllgrad haben, sinkt der erforderliche Bestand in der Simulation. Dieser Effekt zeigt sich insbesondere bei einer großen Zahl von Chargentypen. Versuch 6.2.4 weist eine Abweichung von 4,1 Prozent bei dem idealen Mindestbestand auf. Diese Unschärfe entsteht durch die Modellierungsannahme der Unabhängigkeit des Pufferbestands von der Chargengröße (vgl. Gleichung 5.19). Sehr große Chargen erfordern jedoch einen größeren Pufferbestand. Diese Abweichungen der Modellierung von der Simulation zeigen so weitere Möglichkeiten zur Detaillierung der Modellierung auf. Diese Erweiterungen resultieren jedoch in einer erheblichen gesteigerten Modellkomplexität.

Abbildung 6.10 zeigt drei weitere Evaluationsversuche von Produktionskennlinien für Chargenarbeitssysteme mit mehreren Chargentypen. Die Parameter der Versuche 6.2.5 bis 6.2.7 stimmen mit denen aus den Versuchen 6.2.2 bis 6.2.4 überein, weisen jedoch keine Prozesszeit- und Zwischenankunftszeitvarianz auf. Versuch 6.2.5 zeigt eine vergleichbare Rechtswölbung der modellierten Leistung wie der Versuch 6.2.2 in Abbildung 6.9, sodass die Abweichung ebenso mit dem Leistungseffekt erklärbar ist. Die Modellierung schätzt den erforderlichen Bestand überwiegend konservativ ab. Diese Abweichung ist vorrangig auf die Wahl des Variationskoeffizienten der Zwischenankunftszeit durch die zufällige Ankunft zurückzuführen. Die Abschätzung des Variationskoeffizienten mit einem Wert von eins führt in zu einer erhöhten Bestandprognose. Eine Ausnahme zur konservativen Abschätzung stellt die Linksverschiebung der Modellierung im Übergangsbereich des Versuch 6.2.7 dar. Diese ist auf die große Chargengröße des Arbeitssystems zurückzuführen (vgl. Versuch 6.2.4).

Abbildung 6.11 evaluiert drei weitere Parameterausprägungen. Versuch 6.2.8 beschreibt ein Arbeitssystem, das kleine Chargengrößen bearbeitet, Versuch 6.2.9 stellt ein Chargenarbeitssystem mit einer Transportzeit dar und Versuch 6.2.10 untersucht ein Arbeitssystem, das eine abweichende Zwischenankunftszeitvarianz aufweist. Die modellierte und die simulierte Leistung stimmen bei den drei Versuchen an zwei Stellen nicht überein: Einerseits in Versuch 6.2.8 am Sprungpunkt (vgl. Versuch 6.2.1) und andererseits in Versuch 6.2.10 im Übergangsbereich. Den Übergangsbereich schätzt die Modellierung für eine Zwischenankunftszeitvarianz von 0,3 zu konservativ ab (vgl. Abbildung 6.10).

Die Modellierungsgüte der Produktionskennlinien für Chargenarbeitssysteme mit mehreren Chargentypen ist etwas geringer als die für Arbeitssysteme mit einem Chargentyp. Für den überwiegenden Anteil der industriellen Anwendungen bietet das Modell jedoch eine ausreichende Abschätzung des Leistungsverlaufs.

6.3 Terminabweichung

Die Struktur der Untersuchung der Terminabweichung wird von Chargenarbeitssystemen mit einem Chargentyp (Abschnitt 5.3) auf Chargenarbeitssysteme mit mehreren Chargentypen übertragen. Die gesamte Terminabweichung entspricht der Summe der Terminabweichung durch den Rückstand (Abschnitt 6.3.1) und der Terminabweichung durch die Reihenfolgeabweichung (Abschnitt 6.3.2).

6.3.1 Rückstand

Die Anzahl der Chargentypen hat nur einen sehr geringen Einfluss auf den Rückstand. Daher verwendet diese Arbeit die Modellierung für Chargenarbeitssysteme mit einem Chargentyp (Gleichung 5.22) zugleich für Chargenarbeitssysteme mit mehreren Chargentypen. Die nachfolgenden Abschnitte zeigen die Unterschiede auf.

Da die ankommenden Aufträge auf verschiedene Chargentypen aufgeteilt werden, ist die Zwischenankunftszeit der Aufträge eines Chargentyps größer. Bei drei Chargentypen steigt der Mittelwert zum Beispiel um den Faktor drei (vgl. Abbildung 6.4). Aus einer geringeren Frequenz der Ankunft folgt eine geringere Auflagefrequenz je Chargentyp. Das Sägezahnmuster

(vgl. Abbildung 5.23 und Abbildung 5.24) für jeden Chargentyp hat weniger Zähne pro Zeiteinheit.

Ein zweite Abweichung kann die individuelle Chargengröße der einzelnen Chargentypen sein. Die Höhe der Zähne und auch des maximalen sowie minimalen Rückstands hängen vorrangig von der Chargengröße eines Chargentyps ab. Bei unterschiedlichen Chargengrößen weichen die Rückstandsschwankungen der Chargentypen voneinander ab.

6.3.2 Reihenfolgeabweichung

Der Mittelwert der Reihenfolgeabweichung in der Einheit ‚Anzahl Aufträge‘ ist definitionsgemäß null. Jeder Auftrag, der vorgezogen wird, verzögert einen oder mehrere andere Aufträge. Daher untersucht dieser Abschnitt vorrangig die minimale und maximale Reihenfolgeabweichung der Aufträge.

Die Untersuchung der Reihenfolgeabweichung von Chargenarbeitssystemen mit praxisnahen Parametern ist komplex. Daher unterteilt der Abschnitt diese in drei Schritte. Zunächst erfolgt die Beschreibung von Chargenarbeitssystemen, denen die Aufträge in einer zyklischen Reihenfolge zugehen und die nur komplettierte Chargen bearbeiten. Diese enge Eingrenzung ermöglicht eine analytische Ableitung der Reihenfolgeabweichung einzelner Aufträge und das Aufzeigen der Wirkweise der Einflussgrößen. Der zweite Schritt hebt die Annahme der komplettierten Chargenbearbeitung auf. Der dritte Schritt beschreibt beispielhaft Chargenarbeitssysteme ohne die beiden Annahmen.

Abbildung 6.12 zeigt ein Durchlaufdiagramm eines beispielhaften Chargenarbeitssystems mit drei Chargentypen und einer maximalen Chargengröße von drei Aufträgen. Der Zugang erfolgt zyklisch und das Arbeitssystem bearbeitet nur vollständig gefüllte Chargen.

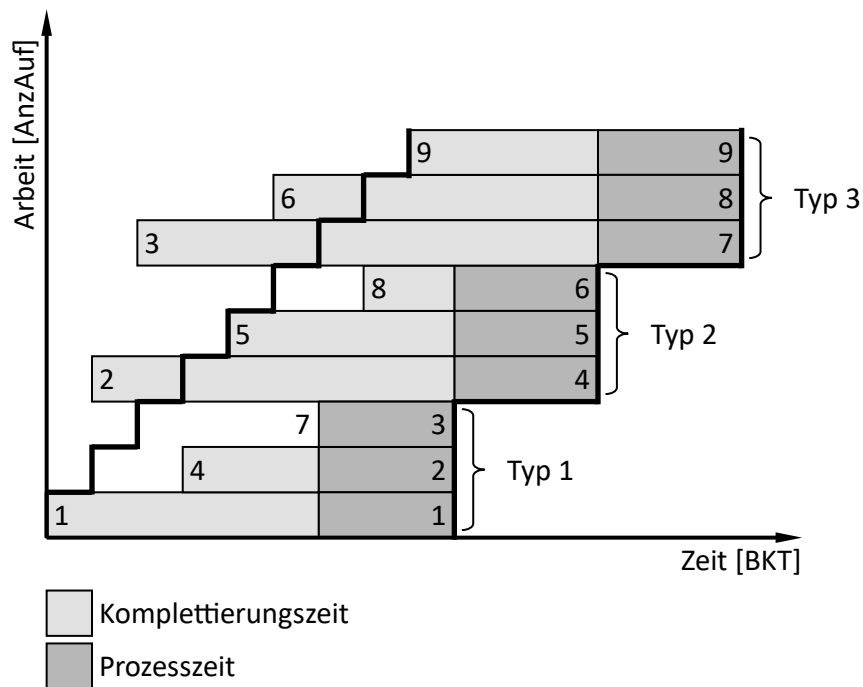


Abbildung 6.12 Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung am Beispiel

Die Aufträge vier und sieben werden vom Chargenarbeitssystem vorgezogen, da diese in der ersten Charge mit dem ersten Chargentyp bearbeitet werden. Ihnen zugunsten verzögert das System die Aufträge drei und sechs, da diese dem dritten Chargentyp zugeordnet sind. Beim zweiten Chargentyp verzögert das System den Auftrag zwei und zieht den Auftrag acht vor. Tabelle 6.4 stellt die Reihenfolgeabweichung für das beispielhafte Chargenarbeitssystem dar.

Tabelle 6.4 Reihenfolgeabweichungen von Chargenarbeitssystemen

Auftragsnummer	Chargentyp	Plan-Rang	Ist-Rang	RAA
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	1	1	1	0
2	2	2	4	2
3	3	3	7	4
4	1	4	2	-2
5	2	5	5	0
6	3	6	8	2
7	1	7	3	-4
8	2	8	6	-2
9	3	9	9	0

RAA : Reihenfolgeabweichung (in Anzahl Aufträgen)

Die maximale Verzögerung und die maximale Beschleunigung betragen jeweils vier Aufträge und treten jeweils einmal auf. Die weiteren Reihenfolgeabweichungen nehmen die Werte minus zwei, null und zwei an. Der Mittelwert aller Reihenfolgeabweichungen beträgt null.

Für Chargenarbeitssysteme, die nur vollständige Chargen bearbeiten und einen zyklischen Zugang aufweisen, ergibt sich die minimale und maximale Reihenfolgeabweichung als⁶:

$$RAA_{\min} = -(AT - 1) \cdot (CGA_{\max} - 1) \tag{6.29}$$

$$RAA_{\max} = +(AT - 1) \cdot (CGA_{\max} - 1)$$

- RAA_{min} minimale Reihenfolgeabweichung (in Anzahl Aufträgen) [-]
- RAA_{max} maximale Reihenfolgeabweichung (in Anzahl Aufträgen) [-]
- AT Anzahl Chargentypen [-]
- CGA_{max} maximale Chargengröße (in Anzahl Aufträgen) [-]

Je größer die Anzahl der Chargentypen ist und je größer die maximale Chargengröße ist, desto größer sind die minimale und die maximale Reihenfolgeabweichung. Vom Betrag sind die minimale und die maximale Reihenfolgeabweichung identisch. Ein Einsetzen der Parameter aus dem Beispiel von Abbildung 6.12 deckt sich mit den Werten von minus vier und vier der Tabelle 6.4.

Unter diesen strikten Annahmen ist ergänzend die analytische Bestimmung der Reihenfolgeabweichung eines einzelnen Auftrags möglich⁶:

$$\begin{aligned} RAA_i = & \left((PRA_{Plan,i} - 1) \bmod(AT) \right) \cdot (CGA_{max} - 1) \\ & - \left((PRA_{Plan,i} - 1) \operatorname{div}(AT) \right) \cdot (AT - 1) \end{aligned} \quad 6.30$$

RAA_i Reihenfolgeabweichung des Auftrags i (in Anzahl Aufträgen) [-]
 $PRA_{Plan,i}$ Plan-Prioritätsrang des Auftrags i (in Anzahl Aufträgen) [-]
 AT Anzahl Chargentypen [-]
 CGA_{max} maximale Chargengröße (in Anzahl Aufträgen) [-]

Der Operator ‚mod‘ berechnet den Rest der Division des um eins reduzierten Plan-Prioritätsrangs und der Anzahl der Chargentypen. Der Operator ‚div‘ beschreibt die ganzzahlige Division. Auf Auftrag 8 aus Tabelle 6.4 angewendet, ergibt Gleichung 6.30:

$$\begin{aligned} RAA_8 = & \left((8 - 1) \bmod(3) \right) \cdot (3 - 1) - \left((8 - 1) \operatorname{div}(3) \right) \cdot (3 - 1) \\ = & 1 \cdot 2 - 2 \cdot 2 \\ = & -2 \end{aligned} \quad 6.31$$

RAA_8 Reihenfolgeabweichung des Auftrags 8 (in Anzahl Aufträgen) [-]

Der zweite Schritt hebt die Annahme der komplettierten Chargen auf. Die Annahme des zyklischen Zugangs bleibt bestehen. Die minimale und maximale Reihenfolgeabweichung reduzieren sich, da die Chargengröße bei niedrigen Auslastungen geringer ist⁶:

$$\begin{aligned} RAA_{min} \approx & -(AT - 1) \cdot \left(\frac{CGA_{max} \cdot A_m}{2} \right) \\ RAA_{max} \approx & +(AT - 1) \cdot \left(\frac{CGA_{max} \cdot A_m}{2} \right) \end{aligned} \quad 6.32$$

RAA_{min} minimale Reihenfolgeabweichung (in Anzahl Aufträgen) [-]
 RAA_{max} maximale Reihenfolgeabweichung (in Anzahl Aufträgen) [-]
 AT Anzahl Chargentypen [-]
 CGA_{max} maximale Chargengröße (in Anzahl Aufträgen) [-]
 A_m mittlere Auslastung [-]

Der dritte Schritt zeigt die minimale und maximale Reihenfolgeabweichung für eine zufällige Ankunft mit einer unterschiedlichen Nachfrage je Chargentyp. Abbildung 6.13 stellt die simulierten minimalen und maximalen Reihenfolgeabweichungen in Abhängigkeit vom Bestand für drei Chargentypen und eine maximale Chargengröße von drei Aufträgen dar.

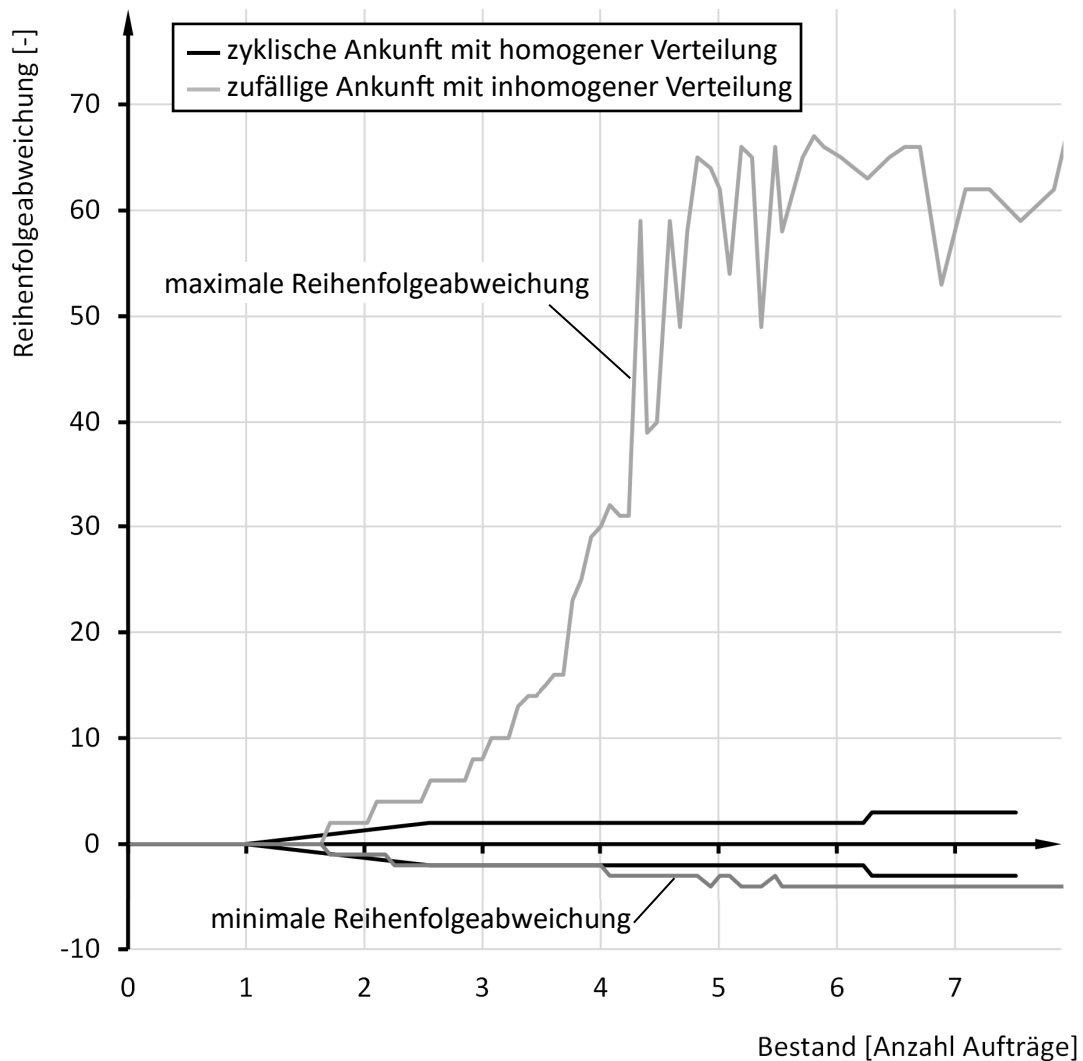


Abbildung 6.13 Reihenfolgeabweichung bei zufälliger Ankunft⁶

Der jeweilige untere Graph beschreibt die minimale und der obere Graph die maximale Reihenfolgeabweichung. Die Simulationsergebnisse zeigen bei erhöhten Beständen eine höhere Streuung der maximalen Reihenfolgeabweichung für Arbeitssysteme mit einer zufälligen Ankunft. Diese konnte bislang nicht modellbasiert abgebildet werden. Es ergeben sich jedoch drei grundlegende Zusammenhänge:

- Je größer die Chargengröße, desto größer der Betrag der minimalen und maximalen Reihenfolgeabweichung.
- Je größer die Anzahl der Chargentypen, desto größer der Betrag der minimalen und maximalen Reihenfolgeabweichung.

- Je größer der Bestand, desto größer der Betrag der minimalen und maximalen Reihenfolgeabweichung.

Die Reihenfolgeabweichung lässt sich durch die mittlere Leistung teilen, um die Terminabweichung zu bestimmen (Gleichung 2.15).

7 Leitlinien für die Gestaltung von Chargenarbeitssystemen

Auf der Basis der Modellierungsergebnisse für Arbeitssysteme mit einem Chargentyp (vgl. Kapitel 5) und mit mehreren Chargentypen (vgl. Kapitel 6) leitet dieses Kapitel Leitlinien für die Gestaltung von Chargenarbeitssystemen in der industriellen Fertigung ab:

1. Legen Sie das Chargenarbeitssystem auf der Basis der Modellierung aus.

Die Modellierung ermöglicht es, Chargenarbeitssysteme entsprechend ihren logistischen Eigenschaften auszulegen. Chargenarbeitssysteme bieten ein großes Leistungspotenzial im Vergleich zu Standardarbeitssystemen. Die zentrale Stellgröße, um das Potenzial zu heben, ist die Chargengröße. Zugleich benötigen größere Chargen längere Durchlaufzeiten. Diesem Nachteil der Chargenarbeitssysteme kann durch eine geringe Überdimensionierung entgegengewirkt werden. Eine Kapazitätsreserve reduziert zudem die Bestandsschwankungen am Arbeitssystem sowie die Terminabweichungen.

2. Reduzieren Sie die Anzahl der Chargentypen.

Die Anzahl der Chargentypen beeinflusst die Bestandsbindung des Arbeitssystems in besonderem Maß. Bei hohen Auslastungen benötigen Chargenarbeitssysteme für jeden weiteren Chargentyp eine halbe Charge zusätzlichen Bestand. Eine Reduzierung der Alternativen führt zu geringeren Beständen und kürzeren Durchlaufzeiten.

3. Nutzen Sie eine Modellierung für die Positionierung des Chargenarbeitssystems im logistischen Zielkonflikt.

Die Modellierung bildet die Leistung und die Durchlaufzeit der Chargenarbeitssysteme in Abhängigkeit vom Bestand ab. Somit ist eine aktive Positionierung des Arbeitssystems mit der Berücksichtigung der gegenläufigen logistischen Zielgrößen möglich. Mit steigendem Bestand am Arbeitssystem nimmt die Auslastung zu und ein reduzierter Bestand ermöglicht kürzere Durchlaufzeiten.

4. Leiten Sie Plandurchlaufzeiten für Chargenarbeitssysteme ab.

Die Ablaufplanung erfordert die Kenntnis von Plandurchlaufzeiten der Arbeitsschritte eines Produkts, um eine Terminierung durchzuführen. Je genauer die Plandurchlaufzeiten bestimmt werden, desto geringer ist die Terminabweichung. Das vorliegende Modell prognostiziert Mittelwerte für die Plandurchlaufzeiten aller Chargentypen.

5. Bearbeiten Sie auch Chargen, die nicht komplett gefüllt sind.

Im Unterlastbereich führen Chargen, die mit der maximalen Chargengröße bearbeitet werden, zu erhöhten Durchlaufzeiten und stärkeren Rückstandstreuungen sowie Terminabweichungen. Unkomplettierte Chargen sind in diesem Bestandsbereich logistisch vorteilhaft. Berücksichtigen Sie jedoch auch, dass die Prozesskosten durch unkomplettierte Chargen steigen.

6. Reduzieren Sie die Vorbereitungszeit am Chargenarbeitssystem.

Jeder Auftrag durchläuft die Vorbereitung am Chargenarbeitssystem und bindet in dieser Zeit Bestand. Zudem verlängert die Vorbereitungszeit die Durchlaufzeit der Aufträge. Insbesondere der letzte Auftrag einer Charge hat einen großen Einfluss auf die logistischen Zielgrößen, da die anderen Aufträge der Charge warten, bis die Vorbereitung des letzten Auftrags abgeschlossen ist.

8 Schlussbetrachtung

Ziel dieser Arbeit war es, die logistischen Zielgrößen von Chargenarbeitssystemen zu untersuchen und modellbasiert abzubilden. Dazu wählt die Arbeit einen deduktiv-experimentellen Forschungsansatz.

Die Besonderheiten von Chargenarbeitssystemen werden anhand von typischen Werkzeugen logistischer Untersuchungen aufgezeigt. Das Durchlaufelement stellt die zusätzlichen Zeitanteile der Chargenvorbereitung, der Chargenkomplettierung und der technologisch bedingten Nachliegezeit dar. Das TrichtermodeLL für Chargenarbeitssysteme zeigt die Abhängigkeiten der einzelnen Aufträge im Durchlauf auf. Das Durchlaufdiagramm beschreibt den charakteristischen Zugangs- und Abgangsverlauf und ermöglicht so Rückschlüsse auf Bestands- sowie Rückstandsschwankungen von Chargenarbeitssystemen.

Die Arbeit teilt die Modellierung der Chargenarbeitssysteme in zwei verschiedene Einsatzszenarien auf: Chargenarbeitssysteme mit einem Chargentyp und mit mehreren Chargentypen. Chargenarbeitssysteme mit einem Chargentyp erhalten nur Aufträge mit identischen Prozessparametern. Diese Aufträge kann das System beliebig miteinander bearbeiten. Chargenarbeitssysteme mit mehreren Chargentypen bilden den allgemeingültigen Fall und erlauben verschiedene Prozessparameter bei den Aufträgen. Dies hat zur Folge, dass nur die Aufträge des gleichen Chargentyps zu einer Charge vereint werden können.

Die Modellierung der Chargenarbeitssysteme erfolgt in drei Schritten. Zunächst werden ideale Kennzahlen auf der Grundlage eines idealen Produktionsprozesses mathematisch und grafisch abgeleitet. Die Leistung von Chargenarbeitssystemen kann die Leistung von Standardarbeitssystemen um ein Vielfaches übersteigen. Die zentralen Einflussgrößen auf die Leistung sind die Chargengröße und die Prozesszeit. Zugleich erfordern Chargenarbeitssysteme aber auch erheblich höhere Bestandsniveaus. Die wesentlichen Einflussgrößen auf den Bestand sind die Zeitanteile im Auftragsdurchlauf und die Anzahl der Chargentypen. Aus der Leistung und dem Bestand wird die Durchlaufzeit über allgemeingültige Zusammenhänge abgeleitet. Im Vergleich zu Standardarbeitssystemen ist die Durchlaufzeit an einem Chargenarbeitssystem größer. Der zweite Schritt leitet genäherte Produktionskennlinien für Chargenarbeitssysteme ab. Die Annahmen des idealen Produktionsprozesses werden aufgehoben und die Arbeit nutzt einen Modellierungsansatz aus der Warteschlangentheorie, um den

erforderlichen Bestandspuffer zu bestimmen. Die elementaren Einflussgrößen auf die genäherte Produktionskennlinie sind die Streuung der Zwischenankunftszeiten, die Streuung der Prozesszeiten und die Anzahl der Chargentypen. Die Arbeit zeigt, dass der Anteil des Pufferbestands am Gesamtbestand bei Chargenarbeitssystemen erheblich geringer ist als bei Standardarbeitssystemen. Der dritte Schritt untersucht den Einfluss der Chargenarbeitssysteme auf die Terminabweichung. Rückstandsbedingte Terminabweichungen treten auf, da die Systeme die bearbeiteten Aufträge stoßweise abfertigen. Bei Chargenarbeitssystemen mit mehr als einem Chargentyp entstehen zudem reihenfolgebedingte Terminabweichungen.

Die theoretischen Erkenntnisse überführt die Arbeit in praxisnahe Leitlinien für die Gestaltung von Chargenarbeitssystemen. Die Leitlinien thematisieren die Auslegung von Chargenarbeitssystemen und das Ableiten des Betriebspunkts im Zielkonflikt der logistischen Zielgrößen. Zudem zeigen sie auf, durch welche Parameter der Kennlinienverlauf positiv beeinflusst werden kann.

Der bestehende Forschungsstand bietet zwei mögliche Weiterentwicklungen: Zunächst betrachtet die Modellierung ausschließlich das Chargenarbeitssystem. Durch den stoßweisen Abgang der Aufträge verursacht die Bündelung der Aufträge zu Chargen jedoch auch am nachfolgenden Arbeitssystem zusätzliche Bestände. Diese könnten mit einem ähnlichen Forschungsvorgehen modellbasiert abgebildet werden. Zudem modelliert die Arbeit die reihenfolgebedingte Terminabweichung nicht. Diese Modellierung könnte zukünftig die Grundlage für die Ableitung von Plandurchlaufzeiten für einzelne Chargentypen bilden.

Insgesamt gliedert sich die vorliegende Arbeit in die Forschungsarbeiten der Kennlinientheorie ein. Sie schließt das bestehende Theoriedefizit für Chargenarbeitssysteme und ermöglicht so durchgängigere Analysen von Fertigungsbereichen.

Literaturverzeichnis

- [ANSC01] Anschütz, S.: Ablaufplanung bei Chargenproduktion. Ein Dekompositionsansatz auf der Basis Evolutionärer Algorithmen, Wiesbaden, Deutscher Universitätsverlag, 2001
- [BECH79] Bechte, W.: Methoden und Hilfsmittel der Durchlaufzeit- und Bestandsanalyse in Klein- und Mittelbetrieben. Fachbericht aus dem Institut für Fabrikanlagen der Technischen Universität Hannover, Berlin, Beuth Verlag, 1979
- [BECH84] Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung, Düsseldorf, VDI Verlag, 1984
- [BLÖM99] Blömer, F.: Produktionsplanung und -steuerung in der chemischen Industrie. Ressourceneinsatzplanung von Batchprozessen auf Mehrzweckanlagen, Wiesbaden, Deutscher Universitätsverlag, 1999
- [CHEN08] Cheng, H.-C.; Chiang, T.-C.; Fu, L.-C.: A memetic algorithm for parallel batch machine scheduling with incompatible job families and dynamic job arrivals. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Piscataway, IEEE, 2008, S. 541–546
- [DOMB88] Dombrowski, U.: Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung, Düsseldorf, VDI Verlag, 1988
- [GOLD91] Gold, H.; Grob, H.: Performance Analysis of a Batch Service System Operating in Pull Mode, Würzburg, Institute of Computer Science, 1991
- [GOLD92] Gold, H.: Performance Modelling of Batch Service Systems with Push and Pull Manufacturing Management Policies. Dissertation, Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg, 1992
- [GÜNT16] Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. Supply Chain und Operations Management, Norderstedt, Books on Demand, 2016
- [GUTE72] Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Die Produktion, Berlin, Springer Verlag, 1972

- [HOPP04] Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: To Pull or Not to Pull: What Is the Question? In: *Manufacturing & Service Operations Management*. 6. Jg., 2004, Nr. 2, S. 133–148
- [KAHL96] Kahle, E.: *Produktion. Lehrbuch zur Planung der Produktion und Materialbereitstellung*, München, Oldenbourg Verlag, 1996
- [KIEß99] Kießwetter, M.: *Ablaufplanung in der chemischen Industrie. Optimierung mit evolutionären Algorithmen*, Wiesbaden, Deutscher Universitätsverlag, 1999
- [KING61] Kingman, J. F. C.: The single server queue in heavy traffic. In: *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 57. Jg., 1961, Nr. 4, S. 902–904
- [KUYU13] Kuyumcu, A.: *Modellierung der Termintreue in der Produktion*. Dissertation, TU Hamburg, 2013
- [LÖDD14] Lödding, H.; Nyhuis, P.; Schmidt, M.; Kuyumcu, A.: Modelling lateness and schedule reliability: how companies can produce on time. In: *Production Planning & Control*. 25. Jg., 2014, Nr. 1
- [LÖDD16] Lödding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*, Berlin, Springer Verlag, 2016
- [LÖDD20] Lödding, H. (Hrsg.): *PPS-Report 2019. Studienergebnisse*, Garbsen, TEWISS, 2020
- [NYHU12] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: *Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*, Berlin, Springer Verlag, 2012
- [NYHU18] Nyhuis, P. (Hrsg.): *PPS-Report 2017/18. Studienergebnisse*, Garbsen, TEWISS Verlag, 2018
- [PETE96] Petermann, D.: *Modellbasierte Produktionsregelung*, Düsseldorf, VDI Verlag, 1996
- [SCHI21] Schilp, J. (Hrsg.): *PPS-Report 2021. Studienergebnisse*, Fraunhofer-Gesellschaft, 2021
- [SCHM08] Schmidt, E.-H.: *Material-, Produktions- und Absatzwirtschaft*, Hamburg, Feldhaus Verlag, 2008

- [SCHN02] Schneider, M.; Lödding, H.; Wiendahl, H.-P.: Ermittlung logistischer Rationalisierungspotenziale. In: PPS-Management, 2002, S. 15–17
- [STOM73] Stommel, H. J.: Untersuchungen über Durchlaufzeiten in Betrieben der metallverarbeitenden Industrie mit Einzel- und Kleinserienfertigung, Wiesbaden, Verlag für Sozialwissenschaften, 1973
- [STÜH99] Stühler; L.; Schmidt, M.; Wiendahl, H.-H.: Produzieren im turbulenten Umfeld der Halbleiterindustrie. Teil 2: Einsatz der Betriebskennlinie im turbulenten Umfeld. In: PPS Management, 1999, S. 14–20
- [VDI78] Verein Deutscher Ingenieure: Elektronische Datenverarbeitung bei der Produktionsplanung und -steuerung VI, Düsseldorf, VDI Verlag, 1978
- [WEDE89] Wedemeyer, H.-G. von: Entscheidungsunterstützung in der Fertigungssteuerung mit Hilfe der Simulation. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 1989
- [WIEN19] Wiendahl, H.-P.; Wiendahl, H.-H.: Betriebsorganisation für Ingenieure, München, Hanser Verlag, 2019
- [WIEN97] Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells, München, Hanser Verlag, 1997
- [WINT21a] Winter, M.; Luttkau, A.; Lödding, H.: Produktionskennlinien mit Kapazitätsflexibilität. In: wt Werkstattstechnik online. 111. Jg., 2021, Nr. 04, S. 190–194
- [WINT21b] Winter, M.; Schoop, B.; Lödding, H.: Produktionskennlinien mit Belastungsflexibilität. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 116. Jg., 2021, Nr. 11, S. 762–765
- [YU01] Yu, K.-W.: Terminkennlinie. Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich, Düsseldorf, VDI Verlag, 2001

Anlage 1: Übersicht der Fußnoten

Die Arbeit referenziert unveröffentlichte Quellen, an denen der Autor beteiligt war, in Fußnoten. Einzelne Fußnoten werden im Textverlauf auf verschiedenen Seiten verwendet. Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die Quellen, um Suchaufwände zu reduzieren.

¹ Oboskalow, Aleksej (Betreuer: Winter, Michael): Entwicklung logistischer Kennlinien für Chargenprozesse. Masterarbeit, TU Hamburg, 2018	Seite 35
² Lehmann, Jonas (Betreuer: Winter, Michael): Einfluss der Auftragsfreigabe auf die logistischen Kennlinien von Chargenarbeitssystemen. Projektarbeit, TU Hamburg, 2018	Seite 35
³ Kalis, Christoph (Betreuer: Winter, Michael): Modellierung der reihenfolgebedingten Terminabweichung von Chargenarbeitssystemen. Bachelorarbeit, TU Hamburg, 2018	Seite 35
⁴ Leiser, Leif Eric (Betreuer: Winter, Michael): Entwicklung logistischer Kennlinien für parallele Chargenarbeitssysteme mit gemeinsamer Warteschlange. Masterarbeit, TU Hamburg, 2018	Seite 35
⁵ Schwenzow, Tilmann (Betreuer: Winter, Michael): Entwicklung parametrisierter Kennlinien für Chargenprozesse. Masterarbeit, TU Hamburg, 2019	Seite 35
⁶ Luttkau, Alexander (Betreuer: Winter, Michael): Terminabweichung von Chargenarbeitssystemen. Masterarbeit, TU Hamburg, 2022	Seite 35
⁷ Winter, M.; Lödding, H.: Modelling Logistic Operating Curves for Batch Workstations. Twenty-first International Working Seminar on Production Economics, Innsbruck, 2020	Seite 43
⁸ Teile des Abschnitts 5.2.1 basieren auf dem nicht veröffentlichten Forschungsantrag und Abschlussbericht des DFG-Projekts „Modellgestützte Ableitung einer allgemeingültigen Näherungsgleichung für Bestands-Auslastungs-Kennlinien“. Die Projektnummer des Projekts lautet 415040468.	Seite 74

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 Spannbildung, 2010.

Band 11

Eggers, Daniel: Entwicklung von Dienstleistungsportfolios bei Investitionsgüterherstellern – dargestellt am Beispiel der maritimen Industrie, 2009.

Band 12

Kindler, Jörg: Werkstückqualität und Standzeitoptimierung von Zerspanwerkzeugen bei der Umrissbearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, 2010.

Band 13

Frömming, Hanno: Zerspanung von WC-Co-Hartmetall im unterbrochenen Schnitt, 2011.

Band 14

Schweitzer, Thomas: Nutzungsgradsteigerung verketteter Produktionslinien, 2011.

Band 15

Wagner, Lars Arne: Szenariobasierte Planung und Steuerung mit Simulation im Schiffbau, 2011.

Band 16

Schäfer, Christoph: Einsatzmodell zur systematischen Nutzung von Virtueller Realität in der Unikatproduktion, 2012.

Band 17

Hartmann, Dirk: Delamination an Bauteilkanten beim Umrissfräsen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe, 2012.

Band 18

Kuyumcu, Arif: Modellierung der Termintreue in der Produktion, 2013.

Band 19

Czumanski, Thomas: Handlungsorientierte Analyse der Arbeitsproduktivität in der Serienproduktion, 2013.

Band 20

Schütte, Christoph: Bohren und Hobeln von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Schneide-Faser-Lage, 2014.

Band 21

Wandt, Robert: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus, 2014.

Band 22

Eichenseer, Christiane: Beschichtung, thermomechanische Charakterisierung und Spannungsanalyse von Schneidkeramik, 2014.

Band 23

Heinig, Martin: Nutzung von Virtuellen Technologien für die Montageplanung von Unikaten, 2015.

Band 24

Körkel, Gregor K.: Zerspanbarkeitsbewertung von Faserverbundkunststoffen bei der Fräsbearbeitung dünnwandiger Bauteile in der Großserie, 2015.

Band 25

Ramirez Martinez, Juan A.: Flexible Automated Assembly Systems for Large CFRP-Structures using Geometrical and Force Information, 2015.

Band 26

Dose, Frank: Methode zur wissensbasierten Prozessentwicklung - Ein Ansatz für die Berücksichtigung sich wandelnder Teilsysteme beim Bohren von Schichtverbunden, 2015.

Band 27

Trzyna, Daniel: Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion, 2015.

Band 28

Griefahn, Dominik M.: Geometrieprüfung innerer Strukturen von Faserverbund-Sandwichbauteilen, 2015.

Band 29

Borrmann, Christof: Adaptive Montageprozesse für CFK-Großstrukturen mittels Offline-Programmierung von Industrierobotern, 2016.

Band 30

Klingelhöller, Christian: Trennschleifen von CFK-Schalenbauteilen mit räumlich gekrümmten Konturen, 2016.

Band 31

Titov, Fedor: Technologiegestützte Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter, 2016.

Band 32

Tietze, Florian: Analyse und Verbesserung der Arbeitsproduktivität in der Unikatproduktion, 2017.

Band 33

Geis, Tobias: Bearbeitungsstrategien zur Zerspanung von Faser-Verbund-Honeycomb-Sandwich, 2017.

Band 34

Koppold, Nico: Kapazitätsplanung und -steuerung in der Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern, 2017.

Band 35

Halata, Philipp S.: Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion, 2018.

Band 36

Brüggemann, Felix: Bauteilqualität und Werkzeugverschleiß beim Fräsen von CFK-Gelege unter räumlichen Eingriffsbedingungen, 2018.

Band 37

Benter, Martin: Analyse von Bewegungsabläufen mit 3D-Kameras, 2018.

Band 38

Koch, Christoph: Wertstromanalyse und -design für Auftragsfertiger, 2018.

Band 39

Cordes, Marcel: Modellierung von Bahngenaugigkeit und dynamischer Stabilität beim robotergeführten Fräsen, 2019.

Band 40

Piontek, Andreas: Modellierung der Termintreue im Auftragsdurchlauf, 2020.

Band 41

Grabner, Constantin: Methodengestütztes Produktivitätsmanagement. Entwicklung eines datenbasierten Vorgehens, 2020.

Band 42

Glöckner, Robert: Entwicklung eines Gesamtmodells der Arbeitsproduktivität und der logistischen Zielgrößen, 2020.

Band 43

Schröder, Henrik: Kompetenzentwicklung in der Montage mit Hilfe virtueller Technologien, 2020.

Band 44

Engelhausen, Friederike: Modellierung und Auslegung der Reihenfolgebildung mit Rüstfamilien, 2021.

Band 45

Sikorra, Jan Niklas: Frühzeitige Aufwands- und Termineinschätzung der schiffbaulichen Unikatproduktion, 2021.

Band 46

Haux, Moritz A.: Modellierung von Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion, 2021.

Band 47

von Wenserski, Robert: Helixfräsen und Bohren von laseradditiv gefertigten Bauteilen aus Titan für Luftfahrtanwendungen, 2021.

Band 48

Meluzov, Nikolaj: Informationsmanagement für ein digitales Instandhaltungsassistenzsystem, 2022.

Band 49

Rost, Jan Robert: Digitale Assistenzsysteme für kollaboratives Arbeiten in der Unikatproduktion, 2023.

Band 50

Steenwerth, Philipp: Analyse und Optimierung von Suchvorgängen in der industriellen Produktion, 2023.

Band 51

Brosche, Justus: Nutzung von Motion-Capture-Technologien zur individuellen Ergonomieanalyse in der Produktion, 2023.

Band 52

Mehnen, Jan: Modellgestützte Berechnung der thermischen Belastung bei der Zerspanung von unidirektionalem CFK, 2023.

Band 53

Mundt, Christopher: Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung, 2024.

Band 54

Winter, Michael: Logistische Modellierung von Chargenarbeitssystemen, 2024.