

# Ausarbeitung und Verifikation eines Vorschlages zur Berücksichtigung der Bearbeitungsreihenfolge im DePlaVis-Algorithmus

Masterthesis

Autor: Dipl. Wirt.-Ing.(FH) Johannes Schultheiß

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jochen Kreuzfeldt

Zweigutachter: Prof. Dr.-Ing. Carlos Jahn

Abgabedatum: 06.05.2009

Adresse: Hochschule für Angewandte Wissenschaft  
Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion  
Berliner Tor 21  
20099 Hamburg

### I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis .....	I
II.	Abkürzungsverzeichnis .....	II
III.	Abbildungsverzeichnis .....	III
IV.	Tabellenverzeichnis .....	VI
V.	Symbolverzeichnis .....	VII
1	Einleitung .....	1
1.1	Forschungsprojekt DePlaVis an der HAW Hamburg .....	1
1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit .....	2
2	Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien .....	4
2.1	Beschreibung der Durchsatzkennlinientheorie .....	4
2.1.1	Vorstellung des DePlaVis-Algorithmus .....	4
2.1.2	Anwendungsdemonstration anhand eines Fallbeispiels .....	12
2.2	Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge im aktuellen DePlaVis-Algorithmus ....	26
2.2.1	Probleme durch Nichtberücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge .....	26
2.2.2	Erläuterung des Problems anhand eines Fallbeispiels .....	29
3	Einführung in die belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BOA) .....	37
4	Erarbeitung eines Lösungsansatzes zur Berücksichtigung der .....	
	Arbeitsgangreihenfolge .....	42
4.1	Allgemeine Überlegungen zum Abfertigungsfaktor .....	42
4.2	Vorstellung eines Lösungsansatzes durch arbeitsstationsspezifische Abfertigungsfaktoren .....	45
4.3	Differenzierung des Durchsatzpotentials nach der Arbeitsstation .....	67
5	Verifikation und Bewertung des Lösungsvorschlages .....	74
5.1	Erstellung eines Fallbeispiels in plant Simulation .....	74
5.2	Verifikation des neuen Algorithmus durch eine Simulation .....	83
5.2.1	Simulation mit konstanten Auftragsinhalten und Abständen .....	83
5.2.2	Simulation mit konstanten Auftragsinhalten und variablen Abständen .....	98
5.2.3	Simulation mit variablen Auftragsinhalten und konstanten Abständen .....	111
5.2.4	Simulation mit variablen Auftragsinhalt und variablen Auftragsabständen .....	124
5.3	Bewertung der Simulation und der Berechnungsalgorithmen .....	134
6	Implementierungsvorschlag des neuen Lösungsalgorithmus .....	138
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	143
8	Literaturverzeichnis .....	145
Anhang A	.....	148

Anhang B .....	152
Anhang C .....	155
Anhang D .....	159
Anhang E .....	163
Anhang F .....	165
Anhang G .....	166
Anhang H .....	170
Anhang I .....	172
Anhang J .....	174
Anhang K .....	176
Anhang L .....	178
Anhang M .....	180
Anhang N .....	183
Anhang O .....	186
Anhang P .....	188
Anhang Q .....	191
Anhang R .....	194
Anhang S .....	196
Anhang T .....	198

### II. Abkürzungsverzeichnis

A	Auftrag
ABFA	Abzinsungsfaktor
ABFE	Abfertigungsfaktor
AS	Arbeitsstation
ASTR	Auftragsstrom
B	Belastung
BE	bewegliches Element
BOA	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
D	Durchsatz
DSS	Durchsatzschranke
$DP_{dir}$	direktes Durchsatzpotential
$DP_{ind}$	indirektes Durchsatzpotential
DPQ	Durchsatzpotentialquotient
DQ	Durchsatzquotient
E	Einlastung
EPS	Einlastungsprozentsatz
h	Stunde
K	Kapazität
MS	Materialstrom
P	Periode
R	Widerstand
VQ	Variationsqualität
W	Wertschöpfung

III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auswirkungen eines Engpasses auf das Zielsystem der Produktionslogistik ....	4
Abbildung 2: Darstellung der „Theory of Constraints“ als Kreislauf .....	6
Abbildung 3: Kennliniendarstellung eines Produktionssystems.....	8
Abbildung 4: Analogie elektrisches Netzwerk zu einem Fertigungsnetzwerk .....	11
Abbildung 5: Darstellung einer Durchsatzkennlinie .....	11
Abbildung 6: Bildliche Darstellung des Produktionssystems .....	14
Abbildung 7: Durchsatzkennlinie von ASTR1 im Demonstrationsbeispiel .....	19
Abbildung 8: Durchsatzkennlinie von ASTR2 im Demonstrationsbeispiel .....	22
Abbildung 9: Gesamtdurchsatzkennlinie des Basisszenarios .....	25
Abbildung 10: Analyse der Teilefertigung eines Werkzeugmaschinenherstellers.....	26
Abbildung 11: Engpässe aufgrund disproportionaler Teilkapazitäten.....	27
Abbildung 12: Materialströme im Fallbeispiel mit diskreten Aufträgen .....	30
Abbildung 13: Auftragsströme im Fallbeispiel mit diskreten Aufträgen.....	31
Abbildung 14: Auftragsabarbeitung durch die ersten drei Bearbeitungsstationen .....	32
Abbildung 15: Auftragsabarbeitung des gesamten Systems in einer Periode .....	33
Abbildung 16: Durchlaufmodell für BOA an einem Arbeitssystem.....	38
Abbildung 17: Abgangswahrscheinlichkeit eines Auftrages nach p Arbeitsstationen .....	41
Abbildung 18: Belastungskonto von AS2.....	47
Abbildung 19: Belastungskonto von AS1 .....	48
Abbildung 20: Belastungskonto von AS3.....	49
Abbildung 21: Belastungskonto von AS4.....	50
Abbildung 22: Belastungskonto von AS5.....	50
Abbildung 23: Belastungskonto von AS6.....	51
Abbildung 24: Belastungskonto von AS7 .....	51
Abbildung 25: Zusammenfassung ASTR1 mit Reihenfolgeberücksichtigung .....	55
Abbildung 26: Vergleich der alten und neuen Durchsatzkennlinie von ASTR1 .....	57
Abbildung 27: Zusammenfassung ASTR2 mit Reihenfolgeberücksichtigung .....	59
Abbildung 28: Vergleich der alten und neuen Durchsatzkennlinie von ASTR2 .....	61
Abbildung 29: Vergleich der alten und neuen Gesamtdurchsatzkennlinie mit gleichverteilter Einlastung .....	63
Abbildung 30: Vergleich der alten und neuen Gesamtdurchsatzkennlinie mit gleicher Einlastungssteigerung .....	66
Abbildung 31: Optimale und berechnete Durchsatzkennlinie von ASTR1 .....	68
Abbildung 32: Durchsatzkennlinie von ASTR1 mit Durchsatzpotentialdifferenzierung .....	71
Abbildung 33: Durchsatzkennlinie von ASTR2 mit Durchsatzpotentialdifferenzierung .....	73
Abbildung 34: Symbol einer Quelle in plant simulation .....	76

Abbildung 35: Symbol einer Bearbeitungsstation in plant simulation .....	76
Abbildung 36: Symbol einer Senke in plant simulation .....	76
Abbildung 37: Symbol eines Puffer in plant simulation .....	77
Abbildung 38: Symbol einer Flussteuerung in plant simulation .....	77
Abbildung 39: Symbol einer Kante in plant simulation .....	77
Abbildung 40: Symbol des Ereignisverwalters in plant simulation.....	78
Abbildung 41: Symbol des Plotters in plant simulation.....	78
Abbildung 42: Aufbau des Fallbeispiels als Simulationsmodell.....	80
Abbildung 43: Vier grundsätzliche Simulationsmodell der Durchsatzkennlinie.....	81
Abbildung 44: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit Auftragsinhalt 1h/Auftrag im Fall 1.....	84
Abbildung 45: Durchsatzdifferenzen ASTR1 bei Auftragsgröße 1h/Auftrag im Fall 1.....	85
Abbildung 46: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit Auftragsinhalt 0,125 h/Auftrag im Fall 1.....	86
Abbildung 47: Durchsatzdifferenzen ASTR1 bei Auftragsgröße 0,125 h/Auftrag im Fall 1.....	88
Abbildung 48: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit Auftragsinhalt 1 h/Auftrag im Fall 1.....	89
Abbildung 49: Durchsatzdifferenzen ASTR2 bei Auftragsgröße 1 h/Auftrag im Fall 1.....	90
Abbildung 50: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit Auftragsinhalt 0,125 h/Auftrag im Fall 1.....	91
Abbildung 51: Durchsatzdifferenzen ASTR2 bei Auftragsgröße 0,125 h/Auftrag im Fall 1.....	92
Abbildung 52: Gesamtdurchsatzkennlinie mit Auftragsinhalt 1 h/Auftrag im Fall 1.....	94
Abbildung 53: Gesamtdurchsatzdifferenzen bei Auftragsgröße 1 h/Auftrag im Fall 1.....	95
Abbildung 54: Gesamtdurchsatzkennlinie mit Auftragsinhalt 0,125 h/Auftrag im Fall 1.....	96
Abbildung 55: Gesamtdurchsatzdifferenzen bei Auftragsgröße 0,125 h/Auftrag im Fall 1.....	97
Abbildung 56: Normalverteilung der Freigabeabstände .....	99
Abbildung 57: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 3.....	100
Abbildung 58: Durchsatzdifferenzen bei ASTR1 mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 3.....	101
Abbildung 59: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit $\sigma = 338$ Sekunden im Fall 3.....	102
Abbildung 60: Durchsatzdifferenzen ASTR1 bei $\sigma = 338$ Sekunden im Fall 3.....	103
Abbildung 61: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 3.....	104
Abbildung 62: Abweichung bei ASTR2 mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 3.....	105
Abbildung 63: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit $\sigma = 338$ Sekunden im Fall 3.....	106
Abbildung 64: Durchsatzdifferenzen ASTR2 bei $\sigma = 338$ Sekunden im Fall 3.....	106
Abbildung 65: Gesamtdurchsatzkennlinie mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 3.....	107
Abbildung 66: Durchsatzdifferenzen Gesamtkennlinie mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 3.....	108
Abbildung 67: Gesamtdurchsatzkennlinie mit proportionaler Einlastung bei $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 3.....	109
Abbildung 68: Durchsatzdifferenzen Gesamtkennlinie mit proportionaler Einlastung bei $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 3.....	110
Abbildung 69: Verteilung der Arbeitsinhalte bei Harburg Freudenbergler .....	112

Abbildung 70: Beispielhafte Darstellung einer Chi-Quadrat Verteilung .....	112
Abbildung 71: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 2 .....	115
Abbildung 72: Durchsatzdifferenzen ASTR1 mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 2.....	115
Abbildung 73: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit $\sigma = 338$ Sekunden im Fall 2 .....	116
Abbildung 74: Durchsatzdifferenzen ASTR1 mit $\sigma = 338$ Sekunden im Fall 2.....	117
Abbildung 75: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 2 .....	118
Abbildung 76: Durchsatzdifferenzen ASTR2 mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 2.....	119
Abbildung 77: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit $\sigma = 338$ Sekunden im Fall 2 .....	120
Abbildung 78: Durchsatzdifferenzen ASTR2 mit $\sigma = 338$ Sekunden im Fall 2.....	120
Abbildung 79: Gesamtdurchsatzkennlinie mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 2.....	121
Abbildung 80: Gesamtdurchsatzkennlinie mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 2.....	122
Abbildung 81: Gesamtdurchsatzkennlinie mit $\sigma = 338$ Sekunden mit proportionaler Steigerung im Fall 2 .....	123
Abbildung 82: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 4 .....	125
Abbildung 83: Durchsatzdifferenzen ASTR1 mit $\sigma = 45$ Sekunden bei Fall 4.....	125
Abbildung 84: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit $\sigma = 338$ Sekunden im Fall 4 .....	126
Abbildung 85: Durchsatzdifferenzen ASTR1 mit $\sigma = 338$ Sekunden im Fall 4.....	127
Abbildung 86: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 4 .....	128
Abbildung 87: Durchsatzdifferenzen ASTR2 mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 4.....	128
Abbildung 88: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit $\sigma = 338$ Sekunden im Fall 4 .....	129
Abbildung 89: Durchsatzdifferenzen ASTR2 mit $\sigma = 338$ Sekunden im Fall 4.....	130
Abbildung 90: Gesamtkennlinie mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 4 .....	131
Abbildung 91: Durchsatzdifferenzen Gesamtkennlinie mit $\sigma = 45$ Sekunden im Fall 4.....	131
Abbildung 92: Gesamtkennlinie mit $\sigma = 338$ Sekunden .....	132
Abbildung 93: Durchsatzdifferenzen Gesamtkennlinie mit $\sigma = 338$ Sekunden im Fall 4.....	133
Abbildung 94: Implementierungsvorschlag zur Berechnung der Abfertigungsfaktoren.....	139
Abbildung 95: Implementierungsvorschlag zur Berechnung der Durchsatzkennlinie .....	141

IV. Tabellenverzeichnis	
Tabelle 1: Kapazitätsverteilung der Arbeitsstationen .....	13
Tabelle 2: Arbeitsinhalt der Materialströme.....	13
Tabelle 4: Auslastung der Arbeitsstationen vor der zweiten .....	
Durchsatzkennlinienberechnung .....	20
Tabelle 5: Kennwerte zur zweiten Kennlinienberechnung.....	22
Tabelle 6: Wirkungsgrade der Auftragsströme im Demonstrationsbeispiel .....	23
Tabelle 7: Errechnung der Knickpunkte im Basisbeispiel.....	24
Tabelle 8: Gegenüberstellung der Durchsatzberechnung .....	35
Tabelle 9: Bestände in der Simulation vor den Bearbeitungsstationen .....	36
Tabelle 10: Auslastung von AS1 und AS2 im Fallbeispiel.....	46
Tabelle 11: Korrigierte Einlastung an AS3 und AS4.....	49
Tabelle 12: Wertschöpfung an AS3 und AS4.....	49
Tabelle 13: Korrigierte Auslastung an den Arbeitsstationen.....	52
Tabelle 14: Gesamtabfertigungsfaktoren MS2 und MS3.....	53
Tabelle 15: Numerische Berechnung des Durchsatzes von ASTR1 .....	57
Tabelle 16: Numerische Berechnung des Durchsatzes von ASTR2 .....	60
Tabelle 17: Numerische Berechnung des der Gesamtdurchsatzkennlinie mit gleichverteilter Einlastung .....	62
Tabelle 18: Numerische Berechnung des der Gesamtdurchsatzkennlinie mit gleicher Einlastungssteigerung .....	65
Tabelle 19: Variation der Auftragsgröße in den vier Simulationsfällen .....	82
Tabelle 20: Variation der Standardabweichung des Freigabeabstandes .....	100
Tabelle 21: Variation der Standardabweichung des Arbeitsinhaltes .....	114
Tabelle 22: Variation der Standardabweichung von Freigabeabstand und Arbeitsinhalt .....	124

- V. Symbolverzeichnis
- $\mu$  Mittelwert
- $\sigma$  Standardabweichung

### 1 Einleitung

Engpässe sind ein weit verbreitetes Problem in produzierenden Unternehmen. In vielen Produktionsumgebungen beeinflussen sie die Leistung der Fertigung. Engpässe besitzen vielfältige Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen eines Unternehmens. Sie führen zu Überlastungen in den Arbeitssystemen, Bestandsaufbau, Streuung in den Durchlaufzeiten, Ineffizienzen und Durchsatzverlusten. Jedoch bietet eine detaillierte Kenntnis der eigenen Engpässe auch immer eine Chance zur Optimierung. Denn die Engpässe sind die neuralgischen Punkte in einem Produktionsprozess. Durch gezielte Verbesserungsmaßnahmen an diesen Punkt kann unter Umständen, die gesamte Systemleistung signifikant verbessert werden. Deshalb sollte der Engpasserkennung und der Bewertung der vorhandenen Optimierungspotentiale besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

#### 1.1 Forschungsprojekt DePlaVis an der HAW Hamburg

Das BMBF<sup>1</sup>-Projekt DePlaVis wird als Forschungsvorhaben am Department Maschinenbau und Produktion der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, kurz HAW Hamburg, durchgeführt.<sup>2</sup> Die Abkürzung DePlaVis steht für „Durchsatzsteigerung im Maschinen- und Anlagenbau durch engpassorientierte Planung und Visualisierung“.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Ausarbeitung eines Algorithmus zur Feststellung und Bewertung von Kapazitätsengpässen innerhalb eines Produktionssystems<sup>3</sup>. Der Algorithmus basiert auf der Berechnung der sogenannten Durchsatzkennlinie.<sup>4</sup> Dabei wird der Durchsatz eines Auftragsstromes als Funktion der Einlastung aufgetragen. Dies ermöglicht die Identifikation der Station, die für die Abarbeitung der Aufträge des Auftragsstromes ausschlaggebend ist.

Weiterhin lassen sich zwei Kennzahlen zur Bewertung des Engpasses ableiten.<sup>5</sup> Einerseits kann der Bestand an nicht-durchsetzbaren Aufträgen ermittelt werden, das sogenannte Durchsatzpotential. Dieses Arbeitsvolumen kann in der betrachteten Periode nicht mehr abgearbeitet werden und bleibt als Liegebestand zurück. Weiterhin kann die Auswirkung des Engpasses auf vor- und nachgelagerte Prozessschritte quantifiziert werden. Dazu wird aus dem direkten und indirekten Durchsatz der Grenzdurchsatz ermittelt.<sup>6</sup> Dabei handelt es sich um die Ableitung des Auftragsstromdurchsatzes nach der Engpasskapazität. Somit kann

---

<sup>1</sup> BMBF bedeutet Bundesministerium für Bildung und Forschung.

<sup>2</sup> Vgl. Kreuzfeldt(2007), S.1.

<sup>3</sup> Vgl. Ebenda, S.2f.

<sup>4</sup> Vgl. Kreuzfeldt(1995), S.70f.

<sup>5</sup> Vgl. Ebenda, S.74ff.

<sup>6</sup> Vgl. Schultheiss(2008), S.48ff

errechnet werden, welche Durchsatzsteigerung eine Erhöhung der Engpasskapazität um eine Einheit mit sich bringt.

Im Rahmen früherer Arbeiten wurden der Algorithmus und seine Funktionen, zusammen mit weiteren Optimierungsfunktionen, in einer Software implementiert<sup>7</sup>. Allerdings werden noch nicht alle reellen Gegebenheiten aus der Praxis im Berechnungsansatz berücksichtigt.<sup>8</sup> Eine besonders wichtige Aufgabe stellt dabei die Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge dar. Bisher wird die Durchsetzbarkeit eines Auftrages lediglich von der Überlastung der Durchsatzschranke abhängig gemacht. Eine explizite Berücksichtigung einzelner Arbeitsgänge findet nicht statt. Dies führt zu Berechnungsfehler und ermittelt so einen jeweils zu hohen Durchsatz.

### 1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Ziele dieser Arbeit sind die Formulierung eines Lösungsansatzes zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge im DePlaVis-Algorithmus, sowie dessen Verifikation anhand einer ereignisdiskreten Simulation. Weiterhin soll ein Implementierungsvorschlag für die Demonstrationssoftware ausgearbeitet werden.

Im zweiten Abschnitt der Arbeit erfolgt eine Beschreibung des DePlaVis-Algorithmus und der Durchsatzkennlinie. Zunächst wird die Durchsatzkennlinie grundsätzlich betrachtet und anschließend ein Fallbeispiel zum besseren Verständnis demonstriert. Danach werden die Probleme bei der Nicht-Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge aufgezeigt und an einer Beispielrechnung vertieft.

Der Lösungsvorschlag wird im vierten Kapitel der Arbeit ausgearbeitet. Dabei werden zunächst grundlegende Überlegungen zum Abfertigungsfaktor aufgestellt. Auf dieser Basis wird ein Lösungsansatz mit arbeitsstationsspezifischen Abfertigungsfaktoren abgeleitet. Dieser wird als Algorithmusänderung formuliert. Als Nebenprodukt wird eine Differenzierung des Durchsatzpotentials nach der Arbeitsstation möglich. Der verbesserte Algorithmus wird anhand des Fallbeispiels aus dem vorherigen Kapitel abschließend eingehend demonstriert.

Im fünften Kapitel erfolgt eine Verifikation des beschriebenen Lösungsalgorithmus. Dazu wird das besprochene Fallbeispiel in der Software Plant Simulation nachgebildet. Anschließend wird der Auftragsdurchsatz simuliert und die Ergebnisse von Simulation und Berechnung

---

<sup>7</sup> Vgl. Altfeld(2008), S.48ff.

<sup>8</sup> Vgl. Kreuzfeldt(2007), S.5f.

werden gegenübergestellt. Daraus wird anschließend eine Bewertung der Praxistauglichkeit des neuen Berechnungsansatzes abgeleitet.

Ein Implementierungsvorschlag für den neuen Algorithmus wird im sechsten Kapitel ausgearbeitet. Dazu wird ein Ablaufdiagramm des Algorithmus erzeugt und die dafür notwendigen Tabellen dargestellt. Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Arbeiten gegeben.

## 2 Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

Ansätze zum Engpassmanagement sind bereits seit längerem bekannt, aus diesem Grund werden in den nachfolgenden Kapiteln einige grundlegende Modelle des Engpassmanagements vorgestellt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Durchsatzkennlinie gelegt. Sie stellt die Basis des DePlaVis-Algorithmus dar und ist damit Ausgangspunkt für spätere Verbesserungsvorschläge.

### 2.1 Beschreibung der Durchsatzkennlinientheorie

Ein Mittel zur Engpassbewertung stellt die Durchsatzkennlinie dar. Sie stellt einen visuellen Zusammenhang zwischen dem Durchsatz und der Einlastung eines Auftragsstromes dar. Im nachfolgenden Kapitel wird die Theorie dazu allgemein hergeleitet und beschrieben.

#### 2.1.1 Vorstellung des DePlaVis-Algorithmus

Engpässe sind die beschränkenden Elemente innerhalb eines Produktionssystems und wirken auf alle Systemelemente. Dies kann hinsichtlich der Erfolgsfaktoren in das Zielsystem der Produktionslogistik eingeordnet werden<sup>9</sup>. Beispielhaft werden die Auswirkungen in der folgenden Abbildung dargestellt:

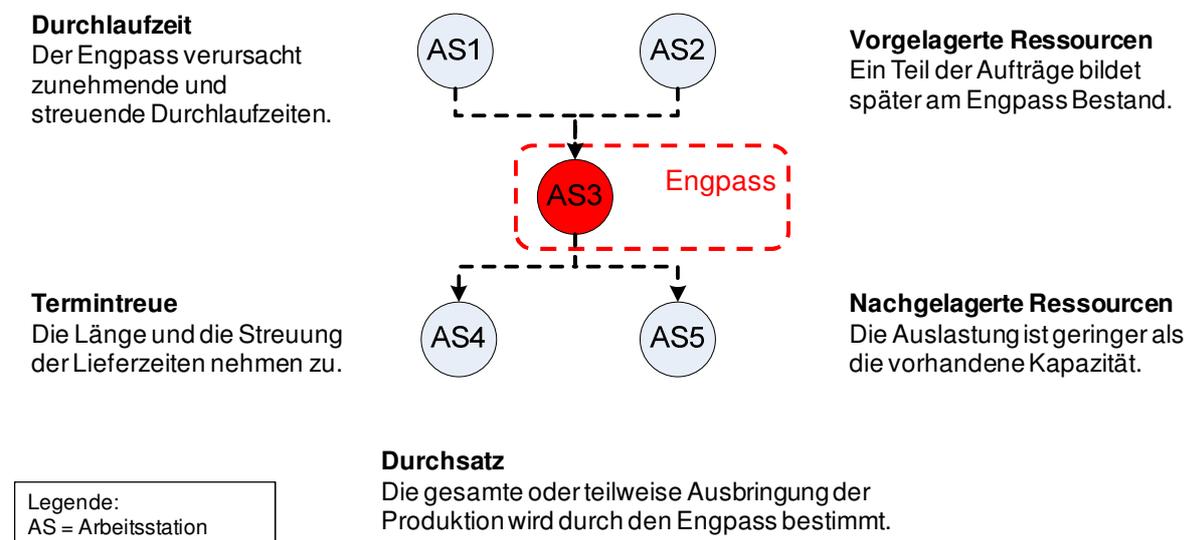


Abbildung 1: Auswirkungen eines Engpasses auf das Zielsystem der Produktionslogistik

Quelle: Schultheiß(2008), S.4.

<sup>9</sup> Vgl. Wiendahl(2002), S.3f.

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

Das Produktionssystem verfügt über fünf, als Kreise dargestellte, Arbeitsstationen und zwei als Pfeile gekennzeichnete Materialflüsse. Unter der Voraussetzung gleicher Kapazitäten ergibt sich bei voller Auslastung der Stationen eins und zwei bei Arbeitsstation drei ein Engpass. Dies führt zur Bestandsbildung vor Arbeitsstation drei und zu steigenden Kapitalkosten. Steigende Bestände führen zu längeren und, durch die Priorisierung von Aufträgen, streuenden Durchlaufzeiten. Dadurch kann es zu negativen Auswirkungen auf die Termintreue und im schlimmsten Fall auf die Liefertreue kommen. Weiterhin werden auf Arbeitsstation drei nicht alle Aufträge abgearbeitet, die auf den Arbeitsstationen vier und fünf eingeplant sind. Daraus resultiert wiederum eine Unterlast der Stationen vier und fünf und es kommt aufgrund von Ineffizienzen zu steigenden Stückkosten. Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die Engpässe eines Produktionssystems ausschlaggebend für dessen Leistung und Durchsatz sind.

Dieses Postulat wurde zum ersten Mal von **Gutenberg** verfasst.<sup>10</sup> Er beschreibt einen Engpass als produktiven Faktor, der nur bis zu einer bestimmten Kapazität ausgenutzt werden kann. Dieser spezifische Faktor stellt den schwächsten Bestandteil im Produktionssystem dar und zwingt die Unternehmensführung zur Planungsausrichtung an diesem Engpass. Dieses Phänomen wird als „*Dominanz des Minimumfaktors*“<sup>11</sup> bezeichnet.

Als Lösungsstrategie wird das „*Ausgleichsgesetz der Planung*“<sup>12</sup> vorgeschlagen. Dabei richtet sich die Unternehmensplanung kurzfristig an den Systemengpässen aus. Langfristig jedoch wird die Engpasskapazität an das Gesamtsystem angepasst.

Ausgehend von der Dominanz des Engpasses wurde von Goldratt die „*Theory of Constraints*“ entwickelt.<sup>13</sup> Sie stellt einen systematischen und kontinuierlichen Verbesserungszyklus mit fünf Schritten dar:

- 1 Die Systemengpässe werden bestimmt und priorisiert.
- 2 Es wird über die Ausnutzung der Systemengpässe entschieden.
- 3 Alle anderen Entscheidungen und Systembestandteile werden dem Engpass untergeordnet.
- 4 Der Systemengpass wird erweitert.
- 5 Das System wird erneut auf Engpässe überprüft. Wird ein neuer Engpass festgestellt, dann beginnt der Zyklus von Neuem.

---

<sup>10</sup> Vgl. Gutenberg(1976), S.163f.

<sup>11</sup> Ebenda, S.164

<sup>12</sup> Ebenda, S.164.

<sup>13</sup> Vgl. Goldratt (1990), S.5ff.

In der folgenden Abbildung ist der Zyklus noch einmal anschaulich dargestellt:

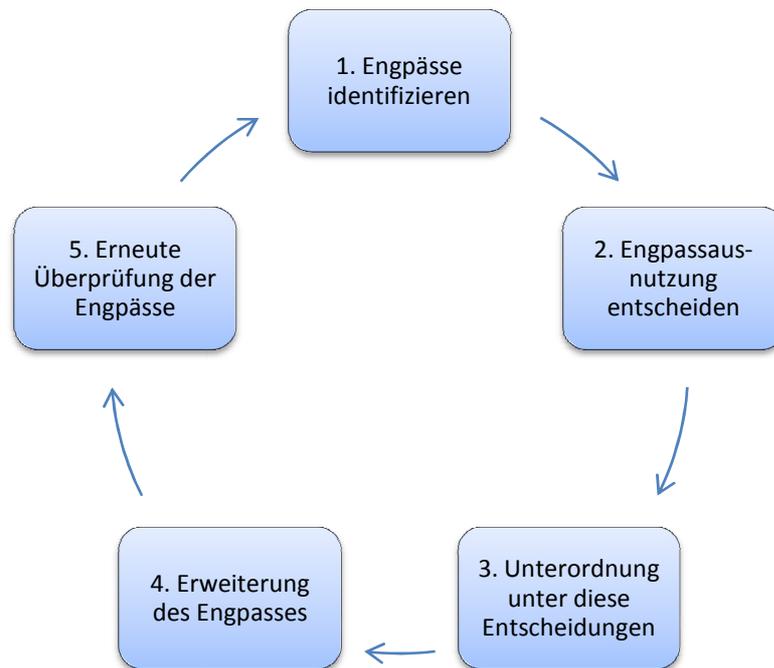


Abbildung 2: Darstellung der „Theory of Constraints“ als Kreislauf

Quelle: Schultheiß(2008), S.6.

Allerdings wurde von Goldratt nie eine Methodik zur Erkennung und Bewertung von Engpässen veröffentlicht<sup>14</sup>. Um jedoch einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess auszuführen, ist eine Bewertung und Priorisierung der Engpässe hinsichtlich der Unternehmensziele notwendig. Die Bewertung der Engpässe sollte nach messbaren Kriterien vorgenommen werden. Dazu muss das Produktionssystem quantitativ beschrieben werden. Drei mögliche Lösungswege sind prinzipiell denkbar<sup>15</sup>:

1. Bei der ereignisdiskreten Simulation<sup>16</sup> wird ein Produktionssystem als Abbild in einer Software nachgestellt. Anhand von Veränderungen der Simulationsparameter kann das Systemverhalten nachgestellt und quantitativ beschrieben werden. Vorteilhaft ist dabei vor allem die dynamische Nachbildung diskreter Produktionsprozesse. Als problematisch zeigt sich die fehlende Allgemeingültigkeit eines jeden Simulationsmodells und das bei komplexen Produktionssystemen eine Ableitung konkreter Extrempunkte sehr schwierig ist. Dadurch ist lediglich ein iterativer Lern- und Verbesserungsprozess möglich.

<sup>14</sup> Vgl. Haberlandt(1999), S.18f.

<sup>15</sup> Vgl. Nyhuis(2005), S.418ff.

<sup>16</sup> Simulation ist ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentellen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. VDI Richtlinie 3633.

2. Ein weiterer Ansatz ist die Warteschlangentheorie. Dabei wird ein Produktionssystem als ein Netzwerk aus Warteschlangen und Bearbeitungsstationen modelliert. Als vorteilhaft erweist sich die gegebene Allgemeingültigkeit aufgrund der abgeleiteten Parameter.<sup>17</sup> Allerdings sind die getroffenen Annahmen des Modells teilweise unrealistisch und die Akzeptanz in der Praxis fehlt.
3. Auf Basis des Trichtermodells wird die Kennlinientheorie zur Beschreibung von Produktionssystemen entwickelt.<sup>18</sup> Ausgehend von den zentralen Annahmen des Zielsystems der Produktionslogistik werden die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Einflussgrößen in einer Kennlinie modelliert. Dabei wird eine C-Norm Funktion über einen Parameter an die Kennlinie aus empirisch gewonnenen Erkenntnissen angepasst. Es wird ein allgemeingültiger Ansatz möglich, der auf jedes Produktionssystem übertragen werden kann und somit auch die systematische Einstellung von optimalen Betriebspunkten ermöglicht. Allerdings gilt die Kennlinie nur im statischen Fall und die Initialisierung des Anfangsparameters erweist sich als aufwändig, nicht zuletzt aufgrund des fehlenden kausalen Zusammenhangs.

Da jedoch die Kennlinientheorie eine allgemeingültige Lösung ermöglicht, stellt sie auch den Ausgangspunkt für die Durchsatzkennlinie dar. Zunächst soll hier jedoch noch einmal kurz die Kennlinientheorie von *Wiendahl* und *Nyhuis* dargestellt werden<sup>19</sup>.

Ausgehend vom Trichtermodell<sup>20</sup> werden die Wechselwirkungen zwischen den Bezugsgrößen im Zielsystem der Produktionslogistik abgeleitet. Dabei wird der Bestand im Produktionssystem als unabhängige Größe dargestellt und Leistung, Durchlaufzeit und Termintreue als resultierende Größen. Diese drei Kennlinien sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

---

<sup>17</sup> Vgl. Nyhuis(2005), S.418ff.

<sup>18</sup> Vgl. Wiendahl(1992), S.3f.

<sup>19</sup> Vgl. Nyhuis(2003), S.61ff.

<sup>20</sup> Vgl. Wiendahl(1992), S.3f.

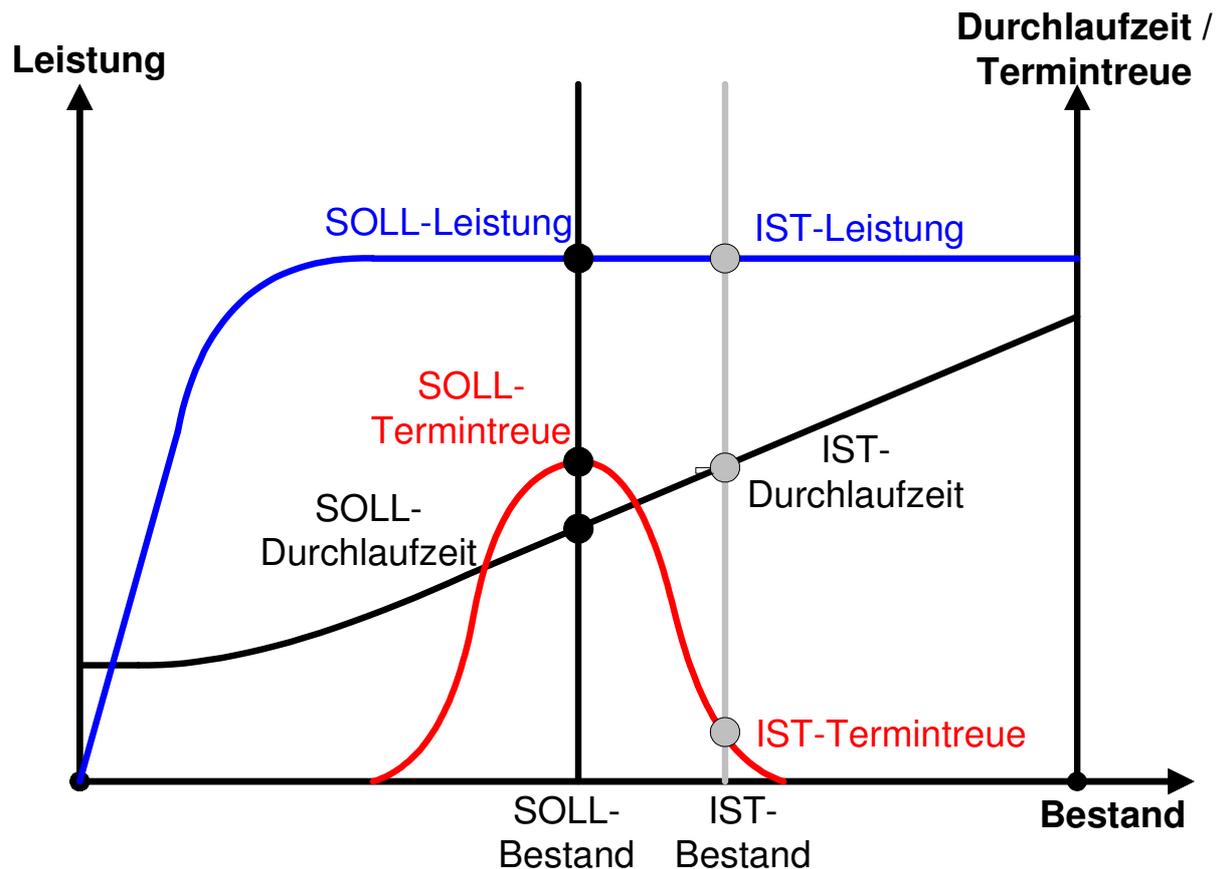


Abbildung 3: Kennliniendarstellung eines Produktionssystems

Quelle: in Anlehnung an Nyhuis(2004), S.39.

Die Leistungskennlinie ist hier in blau dargestellt. Es ist zu erkennen, dass diese Kennlinie zunächst stark ansteigt, anschließend abflacht und asymptotisch gegen einen Grenzwert läuft.<sup>21</sup> Dies bedeutet, dass ein Mindestbestand im Produktionssystem vorhanden sein muss, damit die maximale Leistung erreicht wird. Wird dieser Mindestbestand unterschritten, so entstehen immer wieder Leerzeiten auf den Arbeitsstationen und es kommt zu einer ineffizienten Produktion. In diesem Anfangsbereich ist die Leistung proportional zum Systembestand. Im Bereich des Mindestbestandes entstehen keine Leerzeiten und Wartezeiten auf den Arbeitsstationen. Das System wird mit der bestmöglichen Leistung betrieben. Bei weiterem Überschreiten dieses Mindestbestandes ist jedoch kein Leistungszuwachs mehr möglich. Es entstehen lediglich Warteschlangen vor den Arbeitsstationen. Da diese jedoch bereits mit ihrer vollen Kapazität arbeiten, kann kein Leistungszuwachs erreicht werden.

<sup>21</sup> Vgl. Nyhuis(2003), S.61ff.

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

Als schwarze Linie ist hier die Durchlaufzeit<sup>22</sup> dargestellt. Unterhalb des Mindestbestandes liegt die Durchlaufzeit auf einem Niveau, das nicht unterschritten werden kann. Diese Mindestdurchlaufzeit setzt sich aus der notwendigen Bearbeitungszeit<sup>23</sup> und der Mindestübergangszeit<sup>24</sup> zusammen.<sup>25</sup> Wird der Mindestbestand überschritten und es bilden sich erste Warteschlangen im System, so steigt die Übergangszeit an und damit auch die Durchlaufzeit. Je größer der Bestand im Produktionssystem wächst, umso länger wird auch die durchschnittliche Durchlaufzeit.

Die Termintreue wird als rote Linie dargestellt. Hierbei wird die Termintreue als minimale Abweichung vom ursprünglich geplanten Termin betrachtet.<sup>26</sup> Das bedeutet, dass sich sowohl verfrühte als auch verspätete Aufträge negativ auf die Termintreue auswirken. Der geplante Endtermin eines Auftrages hängt direkt mit seiner Durchlaufzeit zusammen. Im normalen Betriebsablauf ist jedoch die Durchlaufzeit nicht fix, sondern streut um einen gewissen Mittelwert. Grund hierfür ist die Variation der Arbeitsgangreihenfolge bei Aufträgen, ihrer Soll Termine und Stückzahlen. Daraus entstehen dynamische Engpässe und Verschiebungen, die zu Verzug bei der Abarbeitung führen können und somit Variationen um die durchschnittliche Durchlaufzeit hervorrufen.

Da nun die Wechselwirkungen zwischen Bestand, Leistung, Durchlaufzeit und Termintreue modelliert sind, kann ein Produktionssystem quantitativ beschrieben und die Auswirkung von Bestandsveränderungen berechnet werden. Weiterhin können die Parameter des Produktionssystems nun auf einen optimalen Betriebspunkt eingestellt und ausgerichtet werden. Dies ermöglicht einen Vergleich mit der heutigen Situation, wodurch auf Abweichungen im System sofort reagiert werden kann.

Zur Erkennung und Bewertung von Engpässen wurde daraus die sog. Durchsatzkennlinie entwickelt. Sie wurde zum ersten Mal 1995 von Kreuzfeldt beschrieben.<sup>27</sup> Dabei werden drei Grundannahmen getroffen, um eine Durchsatzkennlinie berechnen zu können:

---

<sup>22</sup> Als Durchlaufzeit wird die Zeit bezeichnet, die ein Auftrag von seinem Beginn bis zum Ende seiner vollständigen Abarbeitung benötigt.

<sup>23</sup> Als Bearbeitungszeit wird die Summe aus Rüstzeit und Einzelbearbeitungszeit multipliziert mit der Losgröße berechnet.

<sup>24</sup> Die Übergangszeit ist die Zeitdauer zwischen dem Anfang eines Bearbeitungsganges und dem Ende seines Vorgängers. Sie setzt sich zusammen aus Liegezeit vor und nach der Bearbeitung, sowie einer möglichen Transportzeit.

<sup>25</sup> Vgl. Nyhuis(2003), S.61ff.

<sup>26</sup> Vgl. Nyhuis(2004), S.3ff.

<sup>27</sup> Vgl. Kreuzfeldt(1995), S.70ff.

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

1. Die Leistung und Kosten eines Systems werden durch seine Engpässe bestimmt. Die Engpassleistung wiederum kann durch den Durchsatz<sup>28</sup> an Aufträgen gemessen werden, den die betroffene Arbeitsstation erzeugt.<sup>29</sup> Im Gegensatz zur Wertschöpfung werden nur fertiggestellte Aufträge betrachtet. Somit wird der Auftragsbestand vor dem Engpass nicht berücksichtigt.
2. Der Durchsatz eines jeden Auftrages wird durch eine Durchsatzschranke beschränkt.<sup>30</sup> Eine Durchsatzschranke ist definiert als die Station mit dem größten Verhältnis von Belastung und Kapazität, die den Durchsatz eines bestimmten Auftrages beschränkt.
3. Alle Aufträge, die durch die gleiche Durchsatzschranke laufen, werden zu einem kontinuierlichen Auftragsstrom zusammengefasst.<sup>31</sup> Dabei wird der Auftragsstrom vereinfacht als frei skalierbar angesehen. Er enthält die durchschnittliche Einlastung<sup>32</sup> über alle Arbeitsstationen innerhalb einer Periode.

Damit wird ein Produktionssystem als ein Netzwerk aus Durchsatzschranken und Auftragsströmen modellieren. In einer Analogie zur Elektrotechnik lässt sich nun ein Algorithmus zur Bestimmung und Bewertung von Engpässen auf der Basis von Durchsatzkennlinien erstellen.<sup>33</sup> In diesem Vergleich wird der Engpass ähnlich einem elektrischen Widerstand aufgefasst. Mit steigendem Widerstandswert behindert er den Durchfluss des Auftragsstromes, die dem elektrischen Strom entspricht. Die eingelasteten Aufträge üben wie eine Potentialdifferenz Spannung auf die einzelnen Aufträge aus. Ähnlich der Berechnung elektrischer Netzwerke kann nun ein Algorithmus abgeleitet werden, der den Engpass anhand seiner Wirkung auf den Systemdurchsatzes bestimmt. Die Analogie ist in folgender Abbildung noch einmal dargestellt:

---

<sup>28</sup> Der Durchsatz ist ein Synonym für die Ausbringung oder Produktionsleistung. Vgl. DIN 8743.

<sup>29</sup> Vgl. Kreuzfeldt(1995), S.51.

<sup>30</sup> Vgl. ebenda, S.68f.

<sup>31</sup> Vgl. ebenda, S.69.

<sup>32</sup> Als Einlastung wird der Arbeitsinhalt aller, innerhalb einer Periode, eingeplanten Aufträge auf einer Arbeitsstation oder in einem Auftragsstrom.

<sup>33</sup> Vgl. Kreuzfeldt(2007), S.12.

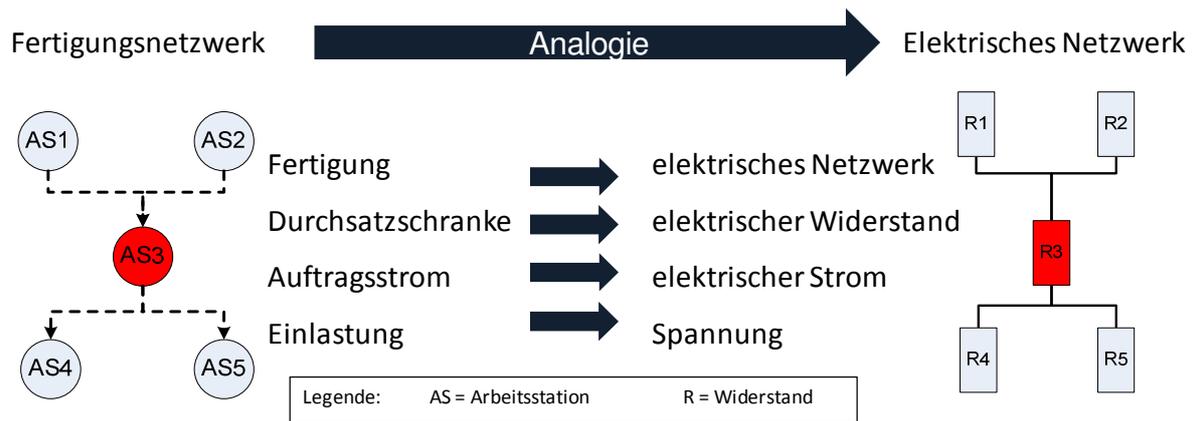


Abbildung 4: Analogie elektrisches Netzwerk zu einem Fertigungsnetzwerk

Quelle: In Anlehnung an Kreuzfeldt(2007), S.12.

Daraus folgend kann für jede Durchsatzschranke eine Durchsatzkennlinie gezeichnet werden. Sie stellt als Funktion den Zusammenhang zwischen Durchsatz<sup>34</sup> als abhängiger Größe und Einlastung als unabhängiger Größe dar.<sup>35</sup> In der folgenden Abbildung ist beispielhaft eine Durchsatzkennlinie dargestellt<sup>36</sup>:

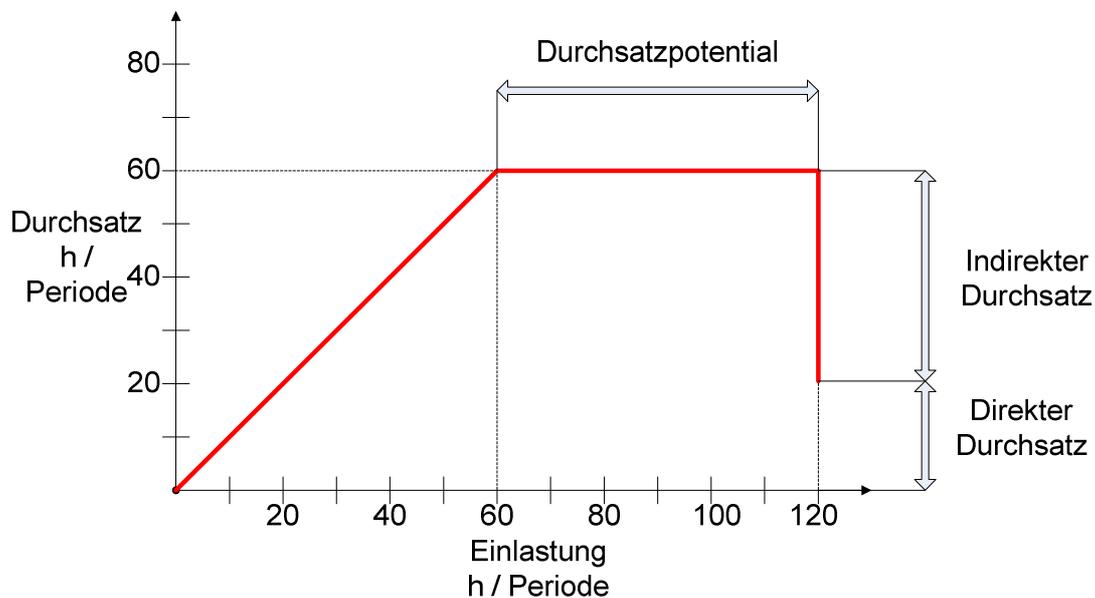


Abbildung 5: Darstellung einer Durchsatzkennlinie

Quelle: Schultheiß(2008), S.12.

Dabei wird auf der Abszisse die eingelastete Arbeit aufgetragen und auf der Ordinate die durchgesetzte Arbeit. In diesem Beispiel wurden  $120 \frac{h}{\text{Periode}}$  eingelastet und  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$  durch-

<sup>34</sup> Der Durchsatz kann als fertiggestellte Produktanzahl pro Zeiteinheit verstanden werden. Synonyme für diesen Begriff sind Ausbringung, Produktionsleistung oder Produktivität. Vgl. DIN 8743.

<sup>35</sup> Vgl. Kreuzfeldt(1995), S.70ff.

<sup>36</sup> Eine gesonderte Beispielrechnung erfolgt in Kapitel 2.1.2.

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

gesetzt. Bis zu einer Einlastung von  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$  können alle Aufträge durchgesetzt werden. Dies wird durch die Winkelhalbierende am Anfang der Kennlinie dargestellt.

Werden Aufträge darüber hinaus eingeplant, so können diese an der Durchsatzschranke nicht mehr abgearbeitet werden und bilden Bestand. Dies wird als horizontale Linie dargestellt und als Durchsatzpotential bezeichnet. Der Begriff gründet sich darauf, dass dieses Potential bei Erhöhung der Engpasskapazität maximal gehoben werden kann. Eine Kapazitätssteigerung über diesen Betrag hinaus ist nicht sinnvoll, da er lediglich zu weiteren Freikapazitäten und damit zu Ineffizienzen führt. Wird eine Optimierung des Produktionssystems im Sinne einer Bestandsreduzierung angestrebt, so sollten zuerst die Engpassstationen mit dem größten Durchsatzpotential betrachtet werden.

Weiterhin lassen sich anhand der Durchsatzkennlinie auch die Auswirkungen des Engpasses auf vor- und nachgelagerte Prozessschritte ermitteln. Dazu wird die gesamte durchgesetzte Arbeit des Auftragsstromes untersucht und danach unterschieden, ob der Arbeitsanteil auf der Durchsatzschranke selbst oder auf einer anderen Station im Verlauf des Auftragsstromes abgearbeitet wurde. Die durchgesetzte Arbeit auf der Durchsatzschranke wird als direkter Durchsatz bezeichnet, während hingegen der Durchsatzbeitrag der anderen Stationen als indirekter Durchsatz benannt wird. Daraus lässt sich der sogenannte Grenzdurchsatz ableiten.<sup>37</sup> Er ist definiert als

$$\text{Grenzdurchsatz}_{ASTR i} = \frac{\text{Durchsatz}_{\text{indirekt } ASTR i} + \text{Durchsatz}_{\text{direkt } ASTR i}}{\text{Kapazität}_{\text{Durchsatzschranke}}} \quad [2.1]$$

Der Grenzdurchsatz ist die Ableitung des Auftragsstromdurchsatzes nach der Engpasskapazität. Er trifft eine Aussage darüber, in welchem Maße sich der Durchsatz eines Auftragsstromes verändert, wenn die Kapazität der Engpassstation verändert wird. Ist eine Optimierung hinsichtlich Produktivität gewünscht, so sollten zuerst die Engpassstationen mit einem großen Grenzdurchsatz betrachtet werden, da sie große Auswirkungen auf die vor- und nachgelagerten Prozessschritte besitzen.

### 2.1.2 Anwendungsdemonstration anhand eines Fallbeispiels

Zur Verdeutlichung soll nun die Berechnung des Algorithmus nach Kreuzfeldt anhand eines Fallbeispiels dargestellt werden.<sup>38</sup> Dieses Fallbeispiel wird später auch zur Verifikation und Anwendungsdemonstration einer möglichen Lösung eingesetzt. Um eine konsistente Dar-

---

<sup>37</sup> Vgl. Schultheiß(2008), S.48ff.

<sup>38</sup> Vgl. Kreuzfeldt(1994), S.65 – S.95.

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

stellung über mehrere Entwicklungsstände hinweg zu dokumentieren, wurde auf ein bereits bestehendes Fallbeispiel zurückgegriffen.<sup>39</sup>

Dabei wird ein Produktionssystem berechnet, dass aus sieben Arbeitsstationen besteht. Die Kapazitätsverteilung der Arbeitsstationen in einer Periode ist in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt:

Arbeitsstation	Kapazität [h/Periode]
1	20
2	20
3	20
4	30
5	20
6	30
7	20

Tabelle 1: Kapazitätsverteilung der Arbeitsstationen

Quelle: Schultheiß(2008), S.16.

Im Folgenden wird die Kapazität einer Arbeitsstation mit dem Buchstaben und der Nummer der jeweiligen Arbeitsstation abgekürzt, z.B. Kapazität der Arbeitsstation drei wird als K3 bezeichnet. Weiterhin wird für jede Arbeitsstation die Abkürzung AS zusammen mit der Arbeitsstationsnummer eingeführt, z.B. AS2 für die Arbeitsstation zwei.

Das Produktionssystem wird von drei Materialströmen durchflossen. Die Stärke der Materialflüsse in Arbeitsstunden pro Periode und Arbeitsstation ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

Materialstrom	Arbeitsinhalt [h/Periode und Arbeitsstation]
1	15
2	20
3	20

Tabelle 2: Arbeitsinhalt der Materialströme

Quelle: Schultheiß(2008), S.16.

---

<sup>39</sup> Vgl. Schultheiß(2008), S.18ff.

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

Im Folgenden wird die Bezeichnung eines Materialstroms mit MS und der jeweiligen Materialstromnummer abgekürzt, z.B. Materialstrom eins wird als MS1 bezeichnet.

Weiterhin spielt zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge die räumliche Lage der Arbeitsstationen und die Reihenfolge der Arbeitsstationen eine Rolle, in der sie von den Materialströmen passiert werden. In der folgenden Abbildung sollen die Arbeitsstationen ähnlich zum Trichtermodell als Drosseln dargestellt werden, da sich das System zum Berechnungszeitpunkt in einem eingeschwungenen Zustand befindet.<sup>40</sup> Dies bedeutet, dass der An- und Auslauf des gesamten Systems nicht in die Betrachtung einbezogen werden. In der folgenden Abbildung ist das Produktionssystem bildlich dargestellt:

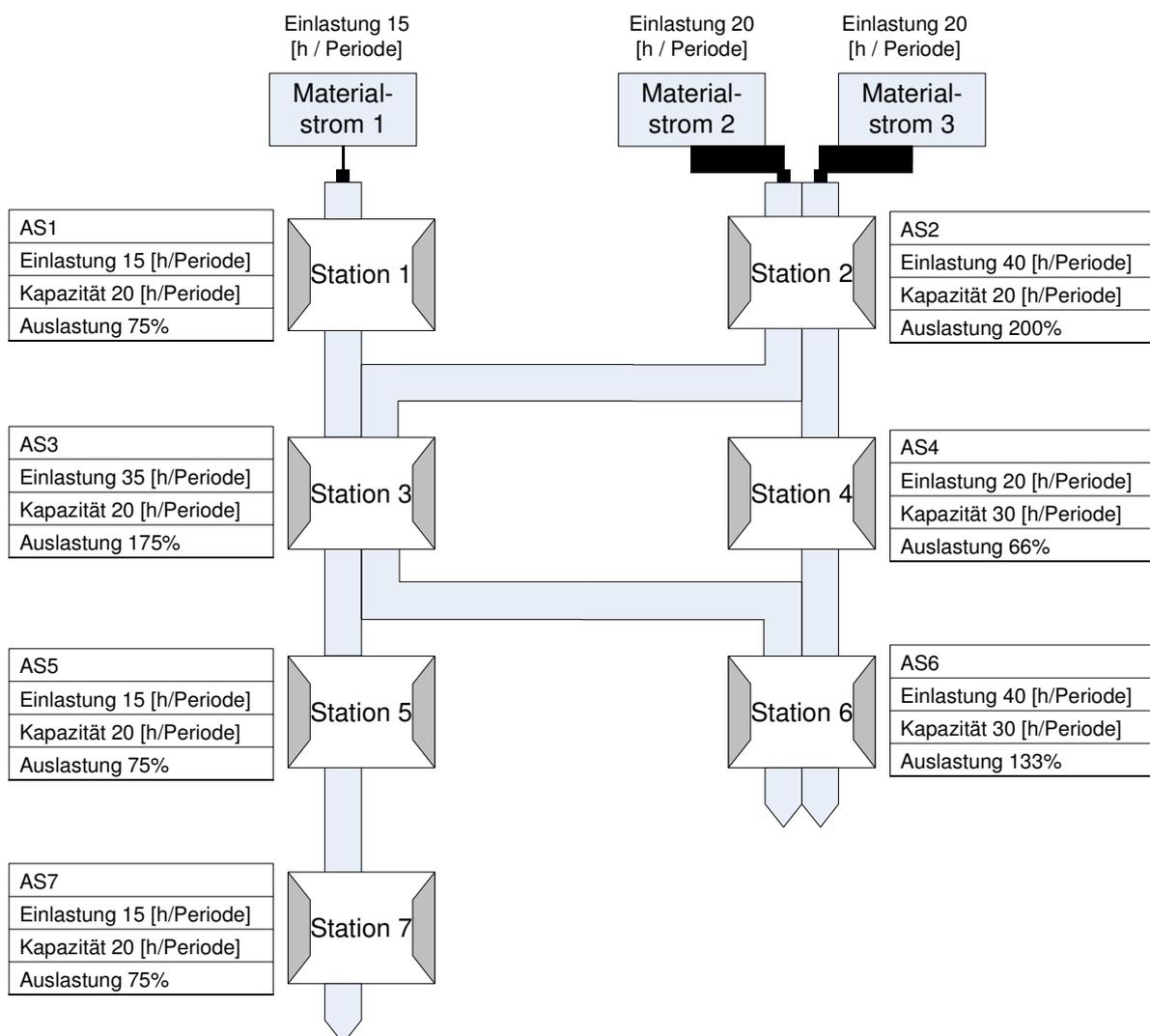


Abbildung 6: Bildliche Darstellung des Produktionssystems im Ausgangszustand

Quelle: Schultheiß(2008), S.17.

<sup>40</sup> Vgl. Kreuzfeldt(1995), S.81.

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

Zur Berechnung der Durchsatzkennlinie muss nun zuerst die größte Durchsatzschranke bestimmt werden. Dies geschieht durch die Berechnung der Auslastung, d.h. es wird das Verhältnis von Einlastung zu Kapazität pro Arbeitsstation gebildet. Im vorliegenden Beispiel kann somit AS2 als Station mit der größten Überlast identifiziert werden. Sie wird nun zur Durchsatzschranke eins erklärt, im Folgenden kurz DSS1, und alle Materialströme, die sich durch AS2 bewegen werden zu einem Auftragsstrom zusammengefasst. Da es sich hier um den ersten berechneten Auftragsstrom handelt, ist dieser hier Auftragsstrom eins. Im Folgenden wird Auftragsstrom mit ASTR und der jeweiligen Auftragsstromnummer abgekürzt, z.B. ASTR2 für den Auftragsstrom zwei. Im vorliegenden Beispiel ergibt sich somit ASTR1 aus der Summe von MS2 und MS3. Dies wird in der nachfolgenden Darstellung abgebildet:

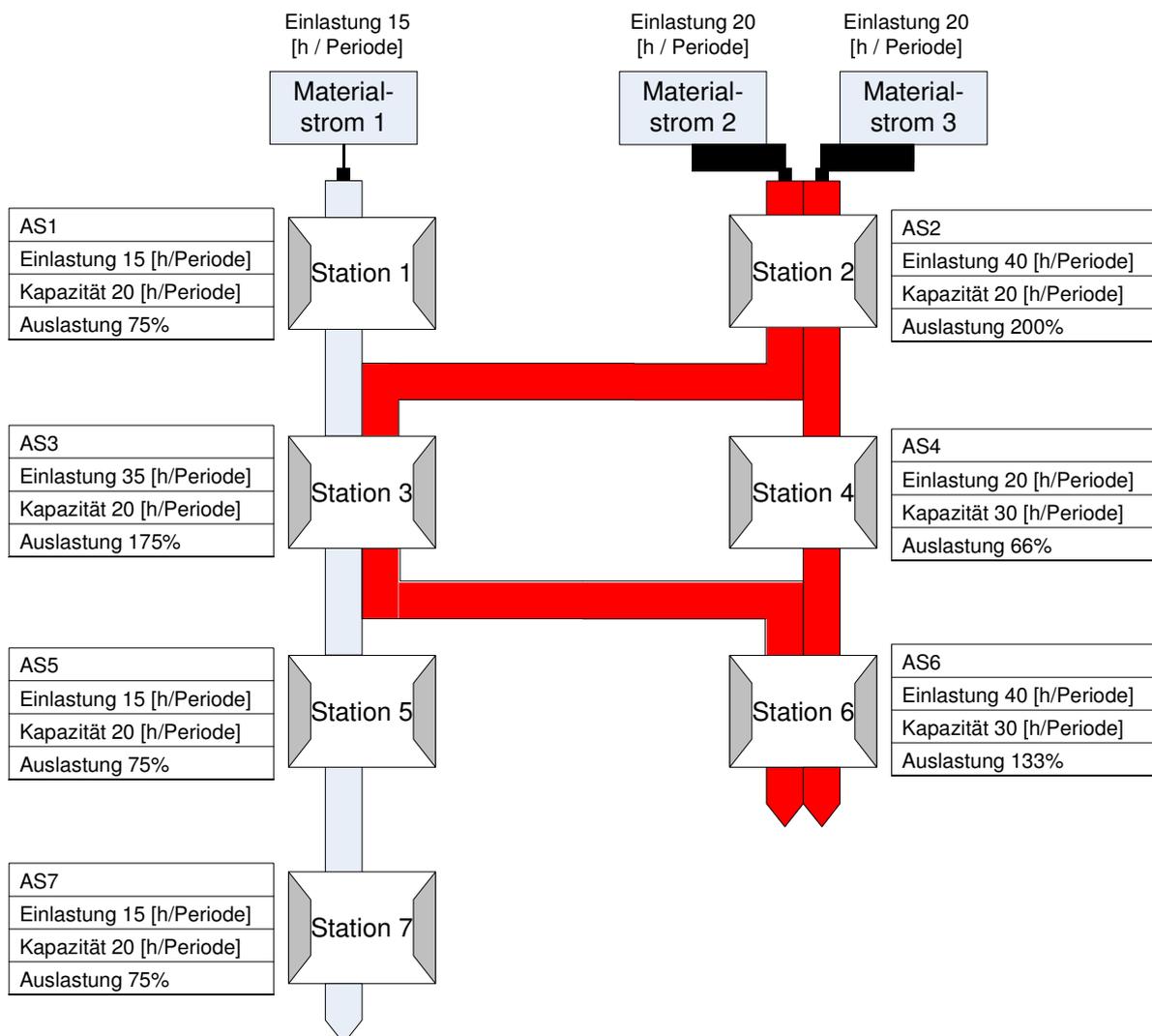


Abbildung 7: Bildliche Darstellung des Produktionssystems mit ASTR1

Quelle: eigene Darstellung.

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

Nun wird zunächst der Abfertigungsfaktor, im Folgenden kurz ABFE, berechnet. Er bildet die Wahrscheinlichkeit ab, mit der ein Auftrag den Engpass innerhalb des Auftragsstromes passieren kann. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit gelten zwei Prämissen:

1. Die Arbeitsaufträge werden in ihrer Abarbeitung nicht priorisiert und nach dem FIFO-Prinzip<sup>41</sup> abgearbeitet.
2. Es handelt sich bei den Materialströmen um kontinuierliche Flüsse, so dass aufgrund der großen Auftragsanzahl auf Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung zurückgegriffen werden kann.

Unter diesen Voraussetzungen gilt für ABFE:

*für Einlastung  $\geq$  Kapazität*

$$ABFE_{ASTR\ i} = \frac{Kapazität_{AS\ j}}{Einlastung_{AS\ j}}$$

[2.2]

*für Einlastung  $<$  Kapazität*

$$ABFE = 1,0$$

Damit ergibt sich als ABFE für ASTR1:

$$ABFE_{ASTR1} = \frac{Kapazität_{AS2}}{Einlastung_{AS2}} = 0,5 \quad [2.2a]$$

Eine Alternativberechnung wäre hier der Kehrwert der Auslastung zu bilden:

$$ABFE_{ASTR\ i} = (Auslastung_{AS\ j})^{-1} \quad [2.3]$$

Dies führt jedoch zum gleichen Ergebnis.

Nun wird zunächst die Einlastung des Auftragsstromes über alle Stationen berechnet. Dazu wird der Arbeitsinhalt des Auftragsstromes über alle Stationen und alle Materialströme summiert:

$$Einlastung_{ASTR\ i} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Einlastung_{MS\ i, AS\ j} \quad [2.3]$$

Im vorliegenden Fall ist dies also die Einlastungssumme von MS2 und MS3 über AS2, AS3, AS4 und AS6:

---

<sup>41</sup> FIFO bedeutet „First in, first out“, d.h. die Abarbeitungsreihenfolge richtet sich nach Ankunftsreihenfolge der Arbeitsaufträge.

$$Einlastung_{ASTR1} = \sum_{i=2}^3 \sum_{j=2}^6 Einlastung_{MSi, ASj} = 120 \frac{h}{Periode} \quad [2.3a]$$

Nun wird die Annahme getroffen, dass der Durchsatz eines Auftrages durch das gesamte System lediglich von seinem Durchsatz an der Durchsatzschranke abhängig ist. Dazu wird die Einlastung des gesamten Auftragsstromes mit ABFE multipliziert. Der Durchsatz berechnet sich also wie folgt:

$$Durchsatz_{ASTRi} = ABFE_{ASTRi} \times Einlastung_{ASTRi} \quad [2.3]$$

Im vorliegenden Fall ergibt sich also für ASTR1 folgender Durchsatz.

$$Durchsatz_{ASTR1} = ABFE_{ASTR1} \times Einlastung_{ASTR1} = 60 \frac{h}{Periode} \quad [2.3a]$$

Die Differenz zwischen Einlastung und Durchsatz kann nicht abgearbeitet werden und bildet Bestand vor der Durchsatzschranke. Um die Bestände in der Fertigung gering zu halten, sollten diese Aufträge nicht freigegeben werden. Da jedoch eine Erweiterung der Durchsatzschrankenkapazität die Abarbeitung dieser Aufträge ermöglichen könnte, wird dieser Arbeitsinhalt als Durchsatzpotential bezeichnet. Das Durchsatzpotential ergibt sich dann aus:

$$Durchsatzpotential_{ASTRi} = Einlastung_{ASTRi} - Durchsatz_{ASTRi} \quad [2.4]$$

Im vorliegenden Fall kann folgendes Durchsatzpotential errechnet werden:

$$\begin{aligned} Durchsatzpotential_{ASTR1} &= Einlastung_{ASTR1} - Durchsatz_{ASTR1} = \quad [2.4a] \\ 120 \frac{h}{Periode} - 60 \frac{h}{Periode} &= 60 \frac{h}{Periode} \end{aligned}$$

Nun kann der Gesamtdurchsatz des Auftragsstromes noch einmal nach direktem und indirektem Durchsatz differenziert werden. Dazu sollte zunächst der direkte Durchsatz berechnet werden. Es handelt sich dabei um den Durchsatzbeitrag der Durchsatzschranke selbst. Er berechnet sich aus der Einlastung an der Durchsatzschranke, multipliziert mit dem Abfertigungsfaktor des Auftragsstromes:

$$Durchsatz_{direkt\ ASTRi} = Durchsatz_{ASi} = Einlastung_{ASi} \times ABFE_{ASTRi} \quad [2.5]$$

Im vorliegenden Fallbeispiel wird als die Einlastung von AS2 mit ABFE von ASTR1 multipliziert:

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

$$\text{Durchsatz}_{\text{direkt } ASTR1} = \text{Durchsatz}_{AS2} = \text{Einlastung}_{AS2} \times ABFE_{ASTR1} = 20 \frac{h}{\text{Periode}} \quad [2.5a]$$

Der indirekte Durchsatz hingegen lässt sich nun sehr einfach als Differenz zwischen dem Gesamtdurchsatz und dem direkten Durchsatz bestimmen:

$$\text{Durchsatz}_{\text{indirekt } ASTR i} = \text{Durchsatz}_{ASTR i} - \text{Durchsatz}_{\text{direkt } ASTR i} \quad [2.6]$$

Im genannten Fallbeispiel ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} \text{Durchsatz}_{\text{indirekt } ASTR 1} &= \text{Durchsatz}_{ASTR 1} - \text{Durchsatz}_{\text{direkt } ASTR 1} = \quad [2.6a] \\ 60 \frac{h}{\text{Periode}} - 20 \frac{h}{\text{Periode}} &= 40 \frac{h}{\text{Periode}} \end{aligned}$$

Aus diesen Werten lässt sich nun der Grenzdurchsatz bestimmen, der die Ableitung des Durchsatzes nach der Engpasskapazität darstellt.<sup>42</sup> Er wird berechnet aus dem direkten und indirekten Durchsatz, sowie der Kapazität der Durchsatzschranke:

$$\begin{aligned} \text{Grenzdurchsatz}_{ASTR1} &= \frac{\text{Durchsatz}_{\text{indirekt } ASTR1} + \text{Durchsatz}_{\text{direkt } ASTR1}}{\text{Kapazität}_{AS2}} = \quad [2.1a] \\ \frac{20 \frac{h}{\text{Periode}} + 40 \frac{h}{\text{Periode}}}{20 \frac{h}{\text{Periode}}} &= 3 \end{aligned}$$

Damit lässt sich die Aussage treffen, dass der Durchsatz von ASTR1 um  $3 \frac{h}{\text{Periode}}$  steigt, wenn die Kapazität von AS2 um  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  erhöht wird. Aufbauend auf diesen Kennzahlen kann sich nun die Durchsatzkennlinie von ASTR1 gezeichnet werden:

---

<sup>42</sup> Vgl. Formel [2.1].

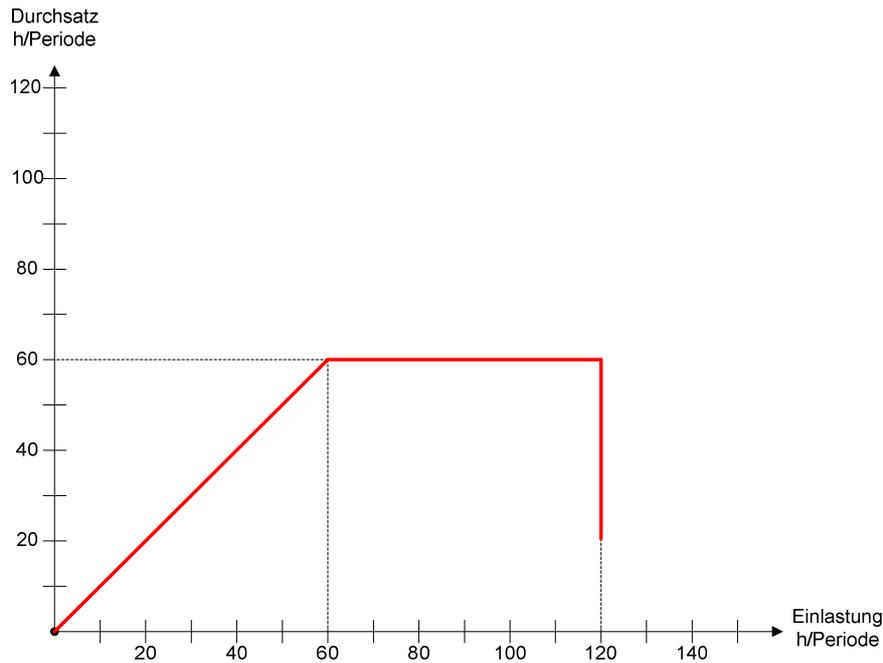


Abbildung 8: Durchsatzkennlinie von ASTR1 im Demonstrationsbeispiel

Quelle: Schultheiß(2008), S.22.

Es wird sichtbar, dass bis zu einer Einlastung von  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$  in ASTR1 der Durchsatz kontinuierlich anwächst und alle Aufträge durchgesetzt werden können. Wird jedoch mehr eingelastet, so bildet sich Liegebestand vor dem Engpass, hier AS2. Dieses Durchsatzpotential in Höhe von ebenfalls  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$  kann durch eine Kapazitätserhöhung am Engpass gehoben werden.

Da noch nicht alle Aufträge einem Auftragsstrom bzw. einer Durchsatzschranke zugewiesen sind, wird nun der Algorithmus ein zweites Mal angewandt. Vorher wird jedoch der bereits berechnete Auftragsstrom aus dem Produktionssystem herausgenommen. Dadurch wird dem Prinzip Rechnung getragen, den größten Engpass am höchsten zu gewichten.

Da AS2, AS4 und AS6 lediglich von ASTR1 in Anspruch genommen werden, spielen sie bei weiteren Betrachtungen keine Rolle mehr und müssen auch nicht korrigiert werden. AS1, AS5 und AS7 werden von ASTR1 in keiner Weise berührt und dementsprechend ergibt sich hier auch kein weiterer Korrekturbedarf. Lediglich AS3 wird von ASTR1 und MS1, einem unberechneten Materialstrom, beansprucht. Für den Durchsatz von MS2 werden  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$  benötigt. Die dafür notwendige Kapazität wird auf AS3 reserviert und muss von der ursprünglichen Kapazität abgezogen werden. Damit ergibt sich an AS3 eine verbleibende Kapazität von  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Nun wird erneut die Arbeitsstation mit der höchsten Auslastung ermittelt:

Arbeitsstation	Kapazität [h/Periode]	Einlastung [h/Periode]	Auslastung [Prozent]
1	20	15	75%
2			
3	10	15	150%
4			
5	20	15	75%
6			
7	20	15	75%

Tabelle 3: Auslastung der Arbeitsstationen vor der zweiten Durchsatzkennlinienberechnung

Quelle: in Anlehnung an Schultheiß(2008), S.25.

Alle vorher berechneten Materialströme und Arbeitsstationen werden nun nicht mehr berücksichtigt. Zum besseren Verständnis ist der Sachverhalt in der nachfolgenden Abbildung noch einmal als Schaubild zu sehen:

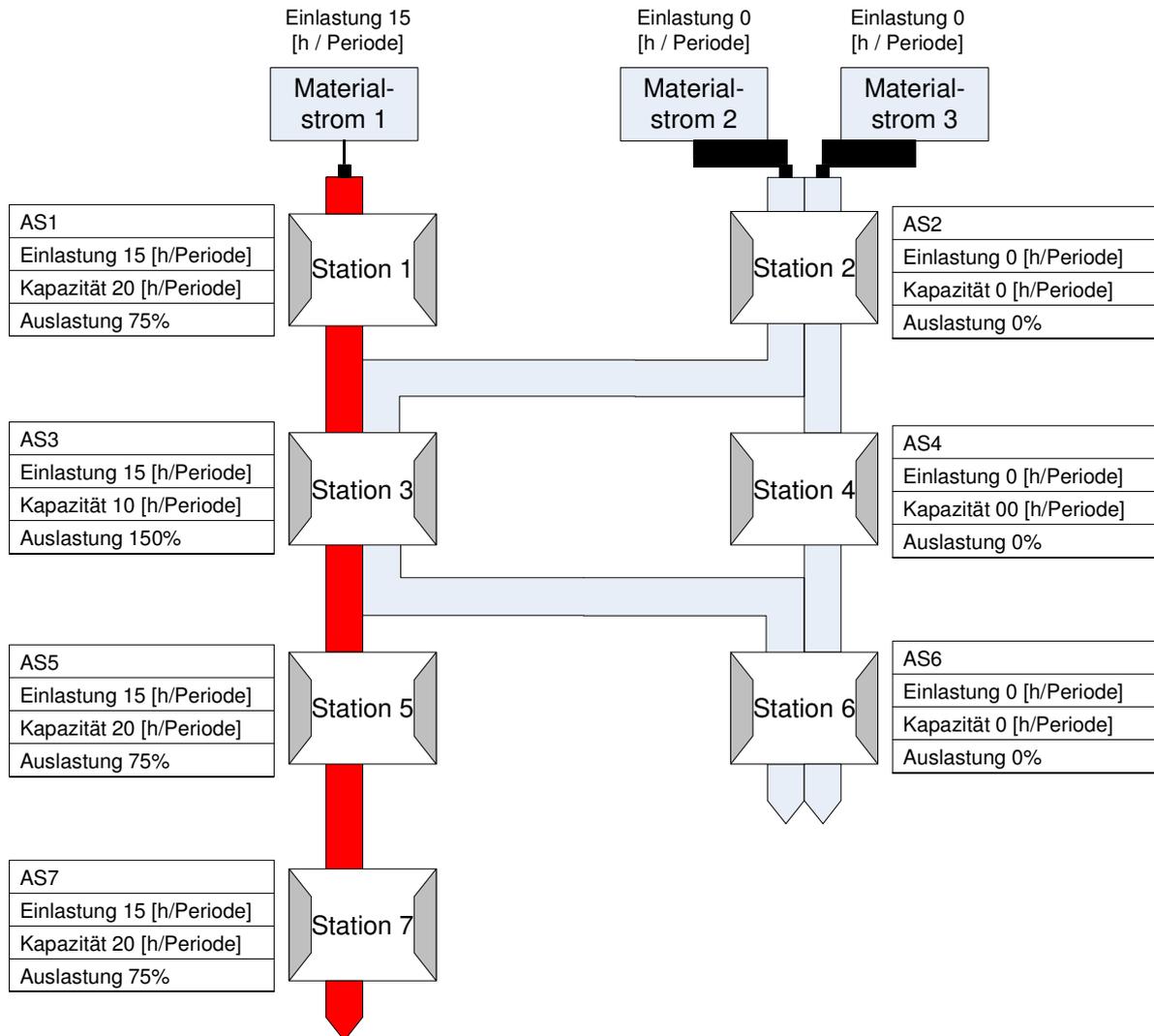


Abbildung 9: Bildliche Darstellung des Produktionssystems mit ASTR2

Quelle: eigene Darstellung.

Wie zu sehen ist, liegt der Engpass für ASTR2 an AS3. Damit bildet MS1 den ASTR2. Nun werden die Berechnungen, wie bereits oben demonstriert erneut ausgeführt. Dabei werden analog zur ersten Iteration die Formeln [2.1] bis [2.6] angewendet. Zur übersichtlichen Darstellung sind die Ergebnisse hier in tabellarischer Formel abgebildet:

$AF_{AS3}$	$\frac{2}{3}$
$Durchsatz_{ASTR2}$	$40 \frac{h}{\text{Periode}}$
$Einlastung_{ASTR2}$	$60 \frac{h}{\text{Periode}}$
$Durchsatz_{\text{direkt } ASTR2}$	$10 \frac{h}{\text{Periode}}$
$Durchsatz_{\text{indirekt } ASTR2}$	$30 \frac{h}{\text{Periode}}$
$Durchsatzpotential_{ASTR2}$	$20 \frac{h}{\text{Periode}}$
$Grenzdurchsatz_{ASTR2}$	4

Tabelle 4: Kennwerte zur zweiten Kennlinienberechnung

Quelle: in Anlehnung an Schultheiß(2008), S.26.

Unter Einbezug obiger Daten ergibt sich nachfolgende Durchsatzkennlinie. Daraus kann nun folgende Durchsatzkennlinie gezeichnet werden:

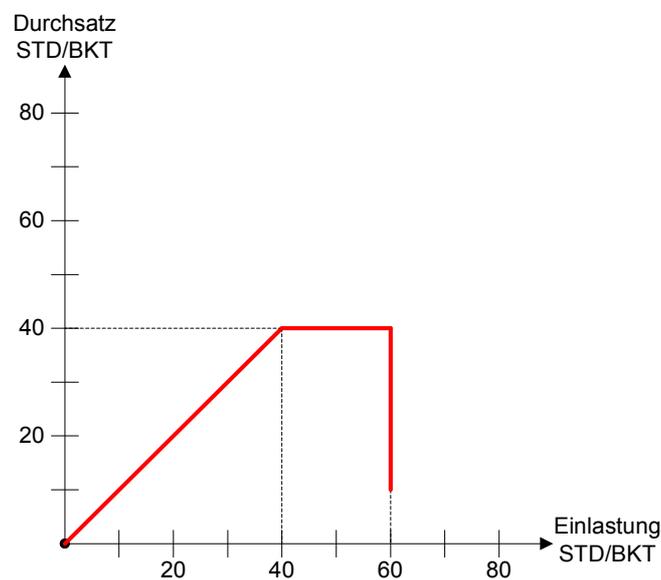


Abbildung 10: Durchsatzkennlinie von ASTR2 im Demonstrationsbeispiel

Quelle: Schultheiß(2008), S.27.

Bei ASTR2 kann also von einer Einlastung in Höhe von  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$  ein Anteil von  $40 \frac{h}{\text{Periode}}$  durchgesetzt werden. Die verbleibenden  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  bilden Durchsatzpotential vor der Durch-

satzschranke AS3. Auch hier ergibt sich der Grenzdurchsatz aus dem Verhältnis von Gesamtdurchsatz zu direktem Durchsatz. Das Verhältnis beträgt hier jedoch 4.

Es ist nun möglich die Gesamtkennlinie für das ganze Produktionssystem zu zeichnen. Dazu muss zunächst der Wirkungsgrad jedes Auftragsstromes errechnet werden. Physikalisch berechnet sich der Durchsatz als das Verhältnis von nutzbarer Arbeit zu eingesetzter Arbeit<sup>43</sup>. Dies kann hier als das Verhältnis von Einlastung zu Durchsatz interpretiert werden. Damit ergibt sich der Wirkungsgrad als:

$$\eta_{ASTR i} = \frac{\text{Durchsatz}_{ASTR i}}{\text{Einlastung}_{ASTR i}} \quad [2.7]$$

Für jeden Auftragsstrom wird nun ein Wirkungsgrad errechnet. Diese sind in der folgenden Tabelle abgebildet:

ASTR	$\eta_{ASTR i}$
1	0,5
2	$\frac{2}{3}$

Tabelle 5: Wirkungsgrade der Auftragsströme im Demonstrationsbeispiel

Quelle: Schultheiß(2008), S.28.

Nun werden diese Wirkungsgrade benutzt, um die Knickpunkte der Gesamtkennlinie aus den Einzelkennlinien zu berechnen. Anhand von Anfangs-, End- und Knickpunkten kann die Gesamtkennlinie gezeichnet werden. Bei jedem Knickpunkt ist der Beitrag jeder einzelnen Kennlinie zu berücksichtigen. Dazu wird pro Wirkungsgrad und Kennlinie ein Vektor ermittelt. Aus der Summe aller Vektoren eines Wirkungsgrades kann der Vektor eines Knickpunktes berechnet werden.

Im ersten Schritt wird die Einlastungskordinate berechnet. Sie ergibt sich aus der Multiplikation eines Wirkungsgrades mit der Einlastung eines Auftragsstromes:

$$\text{Einlastungskordinate}_{\text{Wirkungsgrad } n, \text{ ASTR } i} = \text{Einlastung}_{ASTR i} \times \eta_{n, \text{ ASTR } i} \quad [2.8]$$

Für die erste Einlastungskordinate von ASTR1 ergibt sich damit beispielsweise:

<sup>43</sup> Vgl. Hering; Martin; Stohrer(2002) S.50.

Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

$$\begin{aligned} \text{Einlastungskordinate}_{1, \text{ASTR}1} &= \text{Einlastung}_{\text{ASTR}i} \times \eta_{1, \text{ASTR}1} = \\ &120 \frac{h}{\text{Periode}} \times 0,5 = 60 \frac{h}{\text{Periode}} \quad [2.8a] \end{aligned}$$

Diese Einlastungskordinate wird nun auf die Durchsatzkennlinie von ASTR1 angewandt und der zugehörige Durchsatz wird dafür ermittelt. Es ergibt sich ein Durchsatz von  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Daraus kann nun der erste Vektor zur Errechnung des ersten Knickpunktes der Gesamtkennlinie erstellt werden. Dieser kann allgemein beschrieben werden als:

$$\text{Durchsatzkennlinienvektor}_{\text{Wirkungsgrad } n, \text{ASTR}i} = \begin{pmatrix} \text{Einlastung}_{\text{Wirkungsgrad } n} \\ \text{Durchsatz}_{\text{Wirkungsgrad } n} \end{pmatrix} \quad [2.9]$$

Auf den oben genannten Fall für das Demonstrationsbeispiel ergibt sich folglich:

$$\text{Durchsatzkennlinienvektor}_{\text{Wirkungsgrad } 1, \text{ASTR}1} = \begin{pmatrix} 60 \\ 60 \end{pmatrix} \text{ in } \frac{h}{\text{Periode}} \quad [2.9a]$$

Für jeden Wirkungsgrad kann nun ein Vektor pro Auftragsstrom ermittelt werden. Das bedeutet, die Zahl aller Vektoren ergibt sich aus dem Produkt der Wirkungsgrade und Auftragsströme bzw. dem Quadrat der Auftragsströme. Werden nun alle Vektoren eines Wirkungsgrades addiert, so erhält man die Koordinaten eines Knickpunktes der Gesamtkennlinie:

$$\text{Durchsatzkennlinienvektor}_{\text{Gesamt, Wirkungsgrad } n} = \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} \text{Einlastung}_{\text{Wirkungsgrad } n} \\ \text{Durchsatz}_{\text{Wirkungsgrad } n} \end{pmatrix}_{\text{ASTR}i} \quad [2.10]$$

Für das genannte Demonstrationsbeispiel können nun analog dazu alle Vektoren, sowie die Koordinaten der Knickpunkte berechnet und wie folgt in einer Tabelle abgebildet werden:

	ASTR1 in $\frac{h}{\text{Periode}}$	ASTR2 in $\frac{h}{\text{Periode}}$	Gesamtkennlinie in $\frac{h}{\text{Periode}}$
Wirkungsgrad $\eta_1$	$\begin{pmatrix} 60 \\ 60 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 30 \\ 30 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 90 \\ 90 \end{pmatrix}$
Wirkungsgrad $\eta_2$	$\begin{pmatrix} 80 \\ 60 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 40 \\ 40 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 120 \\ 100 \end{pmatrix}$

Tabelle 6: Errechnung der Knickpunkte im Basisbeispiel

Quelle: Schultheiß(2008), S.30.

Der Start der Gesamtdurchsatzkennlinie beginnt im Koordinatenursprung. Der Endpunkt berechnet sich aus der Summe aller Endpunktvektoren der Einzelkennlinien:

$$\text{Durchsatzkennlinienvektor}_{\text{Endpunkt}} = \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} \text{Einlastung}_{\text{Endpunkt}} \\ \text{Durchsatz}_{\text{Endpunkt}} \end{pmatrix}_{\text{ASTR } i} \quad [2.11]$$

Auf diese Weise ergibt sich für den Endpunkt im vorliegenden Demonstrationsbeispiel:

$$\text{Durchsatzkennlinienvektor}_{\text{Endpunkt}} = \begin{pmatrix} 120 \\ 60 \end{pmatrix}_{\text{ASTR } 1} + \begin{pmatrix} 60 \\ 40 \end{pmatrix}_{\text{ASTR } 2} = \begin{pmatrix} 180 \\ 100 \end{pmatrix}_{\text{Endpunkt}} \quad [2.11a]$$

Damit sind alle relevanten Punkte bekannt und die Gesamtkennlinie kann gezeichnet werden. Dabei wird der Koordinatenursprung mit dem ersten Knickpunkt verbunden und anschließend alle Knickpunkte miteinander bis zum Endpunkt. Dadurch entsteht im vorliegenden Demonstrationsbeispiel folgende Kennlinie:

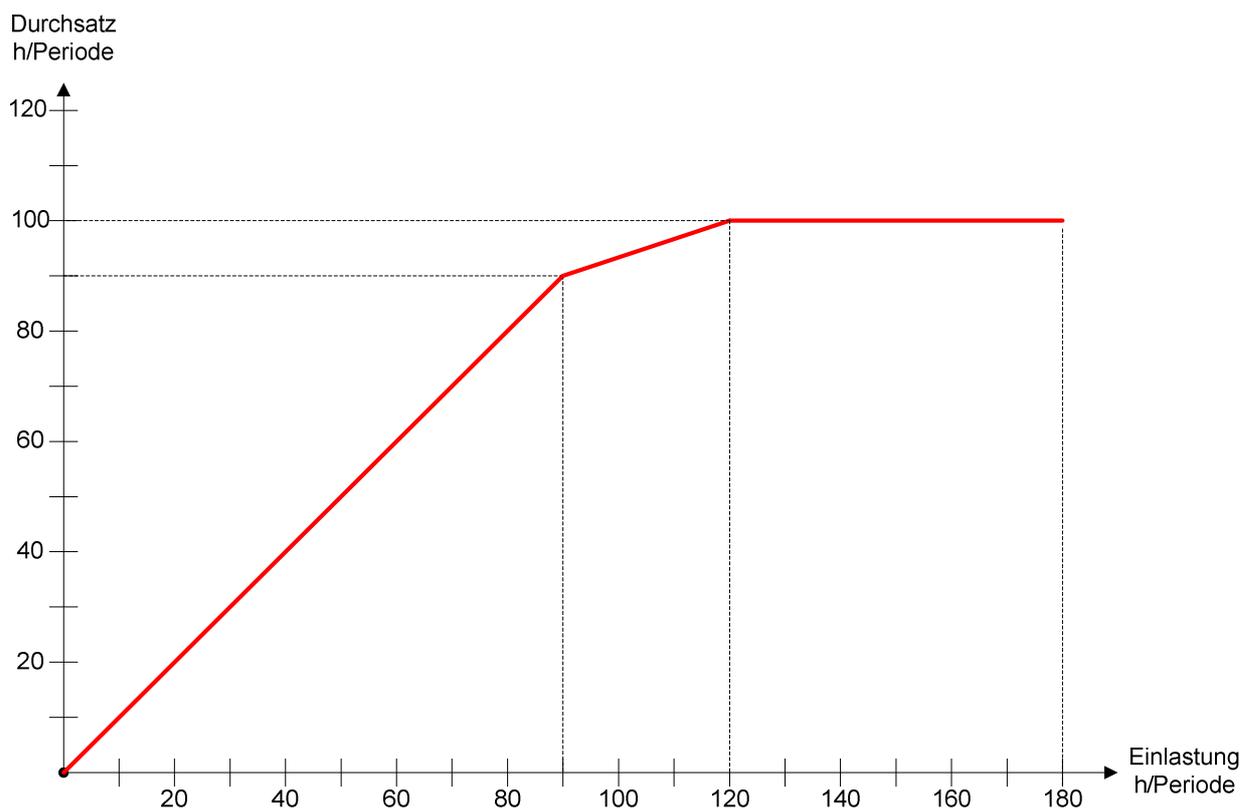


Abbildung 11: Gesamtdurchsatzkennlinie des Basisszenarios

Quelle: Schultheiß(2008), S.32.

Diese Gesamtkennlinie lässt sich wie folgt interpretieren. Bis zu einer Einlastung von 90  $\frac{h}{\text{Periode}}$  lässt sich im gesamten Produktionssystem der Durchsatz proportional zur Einlastung steigern. Ab einer darüber hinausgehenden Einlastung entstehen bereits die ersten Bestän-

de und der Durchsatz wächst nur noch unterproportional. Sobald eine Einlastung von  $120 \frac{h}{\text{Periode}}$  überschritten wird, lässt sich der Durchsatz nicht mehr erhöhen und alle weiteren Aufträge verbleiben als Bestand im System. Eine weitere Leistungssteigerung ist dann nicht mehr möglich.

## 2.2 Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge im aktuellen DePlaVis-Algorithmus

Das folgende Kapitel stellt die Probleme bei der Nichtberücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge dar. Dabei wird das Problem zunächst allgemein erläutert und anschließend anhand eines Fallbeispiels praktisch und nachvollziehbar dargestellt.

### 2.2.1 Probleme durch Nichtberücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge

Im folgenden Kapitel wird dargestellt welche Vereinfachungen hinsichtlich der Arbeitsgangreihenfolge bei der Durchsatzkennlinienberechnung getroffen werden und welche Einschränkungen sich daraus ergeben.

Bereits bei der ersten praktischen Erprobung der Durchsatzkennlinien wurden Abweichungen festgestellt.<sup>44</sup> Die Untersuchung wird noch einmal in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

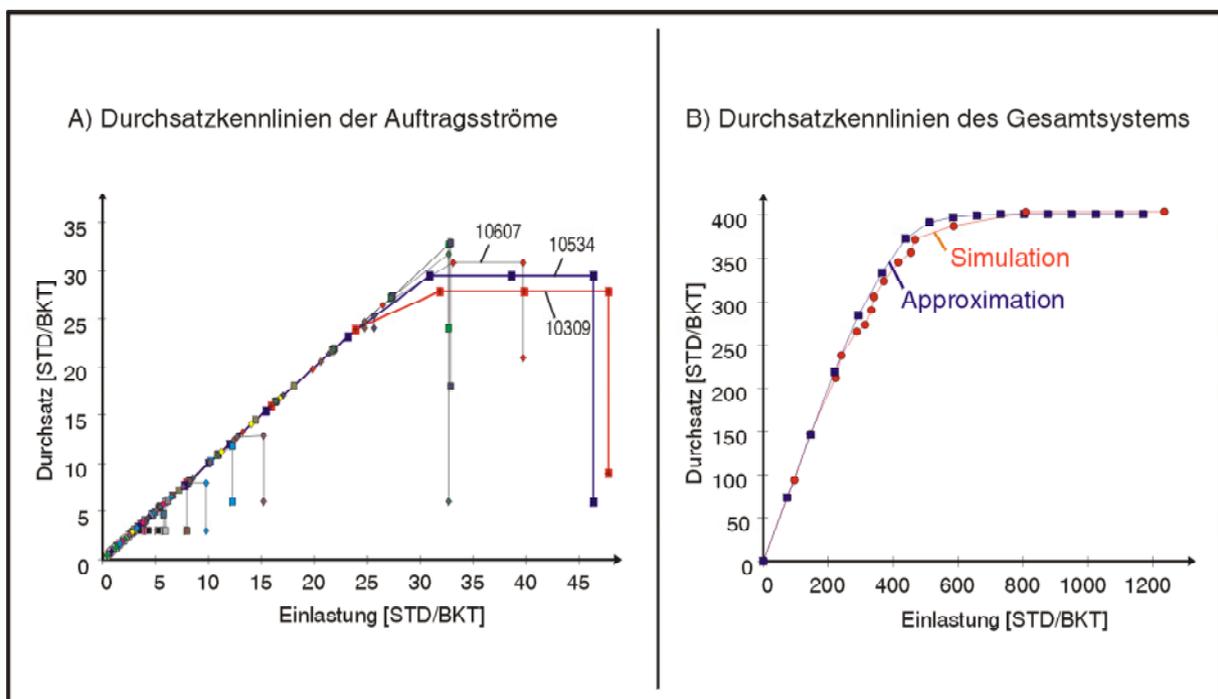


Abbildung 12: Analyse der Teilefertigung eines Werkzeugmaschinenherstellers

<sup>44</sup> Vgl. Kreuzfeldt(1995), S 90ff.

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

Quelle: in Anlehnung an Kreuzfeldt(1995), S.91.

Dabei sind auf der linken Seite, unter dem Kennzeichen A, die Durchsatzkennlinien der einzelnen Auftragsströme des analysierten Unternehmens gezeichnet. Unter dem Kennzeichen B wird die Gesamtkennlinie abgebildet. Die nach dem DePlaVis-Algorithmus berechnete blaue Kennlinie wird dabei mit dem Kennzeichen Approximation versehen. Ihr gegenübergestellt wird eine rote Gesamtkennlinie, die auf der Basis eines Simulationsmodells ermittelt wurde. Dabei wird sichtbar, dass sich im Einlastungsbereich von ca.  $200 \frac{h}{\text{Periode}}$  bis ca.  $800 \frac{h}{\text{Periode}}$  ein Unterschied aus beiden Kennlinien ergibt. Auffällig ist, dass dabei der simulierte Durchsatz immer unterhalb des berechneten Durchsatzes liegt.

Nun stellt sich die Frage, wie diese Abweichungen zustande kommen. Ein grundsätzliches Problem bei der Engpassermittlung stellt die Nichtberücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge dar.<sup>45</sup> Wenn Belastungs- oder Kapazitätsaussagen lediglich durch die Addition von Bearbeitungs- und Übergangszeiten getroffen werden, egal ob durch Vorwärts- oder Rückwärtsterminierung, so kommt es zur Ermittlung falscher Werte. Dies soll noch einmal anhand der folgenden Abbildung erläutert werden:

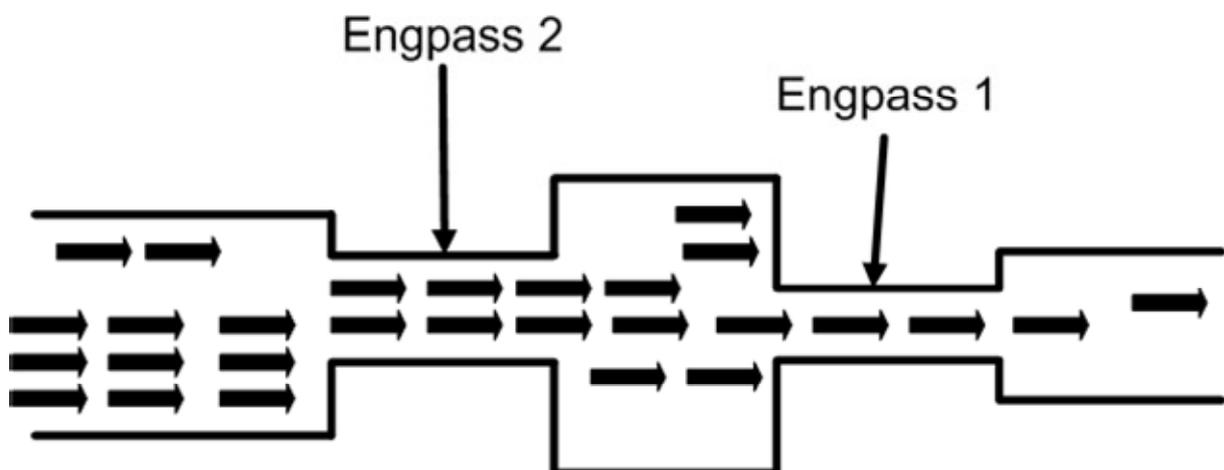


Abbildung 13: Engpässe aufgrund disproportionaler Teilkapazitäten

Quelle: Haberlandt(1999), S.18.

Hier wird ein Produktionssystem als eine Rohrleitung dargestellt, die von Aufträgen durchflossen wird. Die Aufträge sind als Pfeile abgebildet. Die Breite eines Teilrohres kann als Maß für die Teilkapazität angesehen werden. Je breiter das Rohr, desto größer ist die Kapazität der Bearbeitungsstation.

<sup>45</sup> Vgl. Haberlandt(1999), S.18ff.

Werden nun einfach die Bearbeitungszeiten addiert, die innerhalb einer Periode auf einer Bearbeitungsstation geplant sind, so wird eine falsche Belastung ermittelt. Denn es wird keine Aussage darüber getroffen, ob die eingelasteten Aufträge die jeweilige Arbeitsstation überhaupt erreichen. Im vorliegenden Beispiel werden die ersten Aufträge bereits durch den Engpass 2 aufgehalten und können nicht mehr innerhalb einer Periode abgearbeitet werden. Sie haben somit gar nicht die Möglichkeit die nachfolgenden Bearbeitungsstationen und speziell den Engpass 1 zu erreichen. Die Belastung der nachfolgenden Stationen wird also hier als zu hoch eingeschätzt und es kommt zu sog. „Pseudoengpässen“, die in diesem Ausmaß gar nicht vorhanden sind.

Um dies zu unterbinden wird im DePlaVis-Algorithmus eine Reihenfolge nach dem größten Engpass gebildet.<sup>46</sup> Die Einlastung an der Durchsatzschranke mit der höchsten Belastung wird durch den Abfertigungsfaktor reduziert und die Kapazität auf den vor- und nachgelagerten Stationen korrigiert. Da es sich um einen kontinuierlichen Auftragsstroms<sup>47</sup>, vergleichbar einem Strom aus Flüssigkeit, Gasen oder elektronischen Ladungsträgern, handelt ist dieses Vorgehen zulässig. Ein solcher Strom lässt sich annähernd beliebig oft in infinitesimal kleine Bestandteile aufteilen und es entstehen keine Wartezeiten bei Abarbeitung einzelner Bestandteile. Der Durchsatz eines Auftragsstromes hängt also nur von der Abarbeitungswahrscheinlichkeit an der Durchsatzschranke ab.

Allerdings ist die Situation in der Praxis anders. Dort handelt es sich für gewöhnlich um eine endliche Anzahl an diskreten Aufträgen, die auch über einen genau definierten diskreten Arbeitsinhalt verfügen. Weiterhin unterliegen die Aufträge einer gewissen Verteilung in den Dimensionen Arbeitsinhalt und Termin, welche u.a. von Produktionsprozess, Produktionsplanung und Losgröße abhängig sind. Ein Auftragsstrom lässt sich demnach nicht in beliebig viele und kleine Bestandteile aufteilen. Vielmehr ist die Bearbeitungszeit eines Auftrages, die kleinste Menge, die betrachtet werden kann.

Ein weiteres Phänomen ist das dynamische Engpassverhalten. Da vom bisherigen Algorithmus nur Durchschnittswerte benutzt werden, sind diese Gegebenheiten nicht berücksichtigt. Da die Einlastung nicht zeitdifferenziert betrachtet wird, ist auch keine Information vorhanden, wann ein Auftrag an einer Arbeitsstation ankommt. Dies kann jedoch zu temporären Engpässen und somit Warteschlangen führen. Diese wiederum haben Verzögerungen im

---

<sup>46</sup> Vgl. Kapitel 2.1.2.

<sup>47</sup> Vgl. Kreuzfeldt(1995), S68f.

Ablauf zur Folge, die später nicht mehr aufgeholt werden können und anschließend zur Durchsatzverlusten führen.

Werden diese Gegebenheiten in die Betrachtung einbezogen, so entstehen in der Realität bzw. Simulation im Vergleich zum DePlaVis-Algorithmus unterschiedliche Ergebnisse. Diese Differenzen sind auf drei Gründe zurückzuführen, die durch Nichtberücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge und durch die Annahme kontinuierlicher Auftragsströme entstehen:

1. Durch die diskreten Arbeitsinhalte einzelner Aufträge entstehen Wartezeiten für nachfolgende Aufträge. Solange ein Auftrag auf einer Bearbeitungsstation abgefertigt wird, ist diese blockiert und nicht für andere Aufträge zugänglich. Kommen weiterhin Aufträge an, so entsteht eine Warteschlange. Diese behindert nachfolgende Aufträge bei ihrer Fertigstellung an der Arbeitsstation und reduziert so den Durchsatz. Das Verhalten tritt immer dann auf, wenn zwei Materialströme auf einer Bearbeitungsstation durchgesetzt werden müssen oder die Arbeitsinhalte der Aufträge verschieden groß sind. In diesem Fall spielt die Kenntnis, ob ein Auftrag auf einer vorherigen Station abgearbeitet wurde, eine bedeutende Rolle. Denn ist dies der Fall, so kann eine Aussage getroffen werden, ob sich eine Warteschlange bildet, die den Durchsatz behindert.
2. Ein Auftrag gilt erst dann als durchgesetzt, wenn er komplett abgeschlossen wurde. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass das Ende einer Periode terminlich immer mit dem Ende einer Auftragsbearbeitungszeit zusammenfällt. Ist dies nicht der Fall, so gilt der Auftrag mit seinem gesamten Arbeitsinhalt als nicht durchgesetzt. Daher muss der Durchsatz eines Auftragsstromes am Ende immer auf volle Aufträge abgerundet werden.
3. Außerdem spielt die Länge der Bearbeitungsreihenfolge eine Rolle bei der Abarbeitung eines Auftrages. Je später ein Auftrag gestartet wird, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass er noch in der laufenden Periode durchgesetzt werden kann. Dies geht einher mit der Länge der Bearbeitungsreihenfolge. Je länger diese Reihenfolge ist, desto unwahrscheinlicher ist es, dass ein Auftrag alle Stationen passieren und komplett abgearbeitet werden kann.

### 2.2.2 Erläuterung des Problems anhand eines Fallbeispiels

Zur Erläuterung und Demonstration der oben genannten Auswirkungen wird nun ein Fallbeispiel dargestellt. Es wird dabei auf die Struktur und die Daten des bereits bekannten Fallbeispiels zurückgegriffen.<sup>48</sup> Allerdings wird dabei die Einlastung der einzelnen Materialströme

---

<sup>48</sup> Vgl. Kapitel 2.1.2.

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

auf mehrere diskrete Aufträge verteilt. Zum besseren Verständnis wird hier die Darstellung zeichnerisch und nicht in einem Simulationsmodell dargestellt. Das gleiche Fallbeispiel wird später noch in ein Simulationsmodell übertragen und ergänzt<sup>49</sup>.

Hier wird zunächst davon ausgegangen, dass jeder Auftrag einen Arbeitsinhalt von einer Stunde besitzt. Aufträge mit variierendem Auftragsinhalt werden im weiteren Verlauf dargestellt.<sup>50</sup> Die einzelnen Aufträge werden zur Unterscheidung aufsteigend nummeriert. Damit ergibt sich für die drei Materialströme folgende Auftragsverteilung, die in der nächsten Abbildung dargestellt wird:

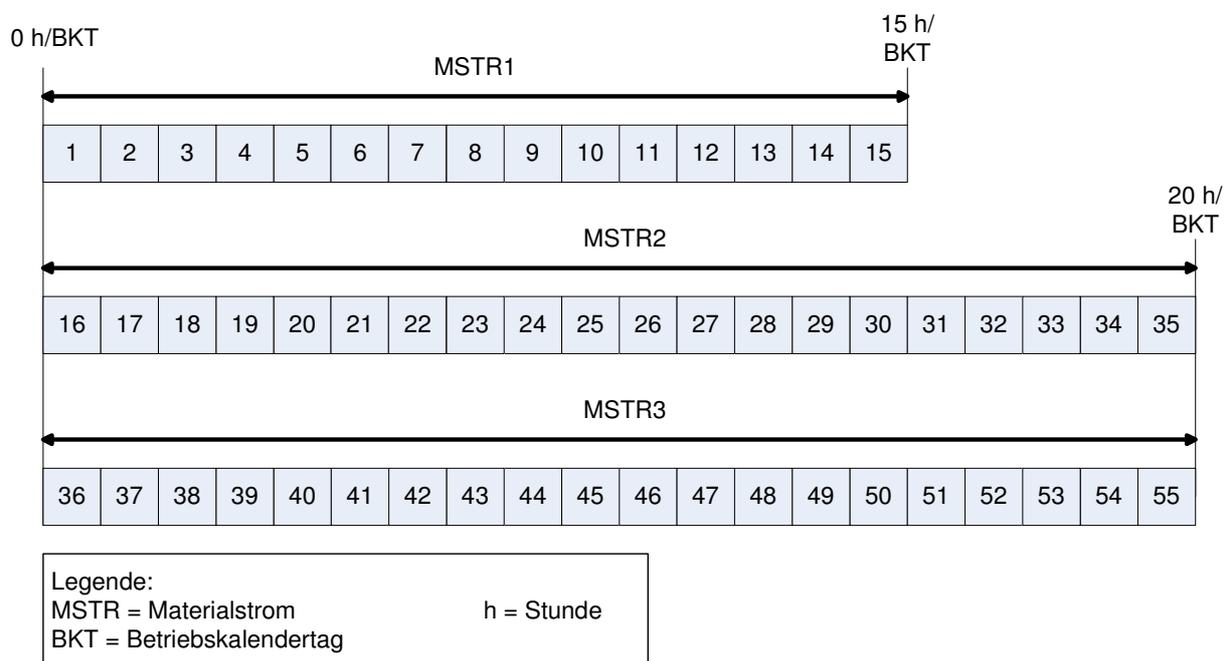


Abbildung 14: Materialströme im Fallbeispiel mit diskreten Aufträgen

Quelle: eigene Darstellung.

MS1 werden also die Aufträge 1 bis 15 zugeordnet, MS2 die Aufträge 16 bis 35 und MS3 die Aufträge 36 bis 55. Jeder Auftrag enthält dabei einen Arbeitsinhalt von einer Stunde auf jeder Bearbeitungsstation. Es wird als ein kontinuierlicher, gleichverteilter Materialfluss, wie bei einer Fließfertigung aufgefunden.<sup>51</sup> Dies entspricht der Einlastung aus dem Fallbeispiel.<sup>52</sup> Würden diese Materialströme nun, wie im Fallbeispiel genannt, in zwei Auftragsströme zusammengefasst, so ergibt sich folgendes Bild:

<sup>49</sup> Vgl. Kapitel 4.1.

<sup>50</sup> Vgl. ebenda.

<sup>51</sup> Vgl. Nebl(2007), S.11.

<sup>52</sup> Vgl. Kapitel 2.1.2.

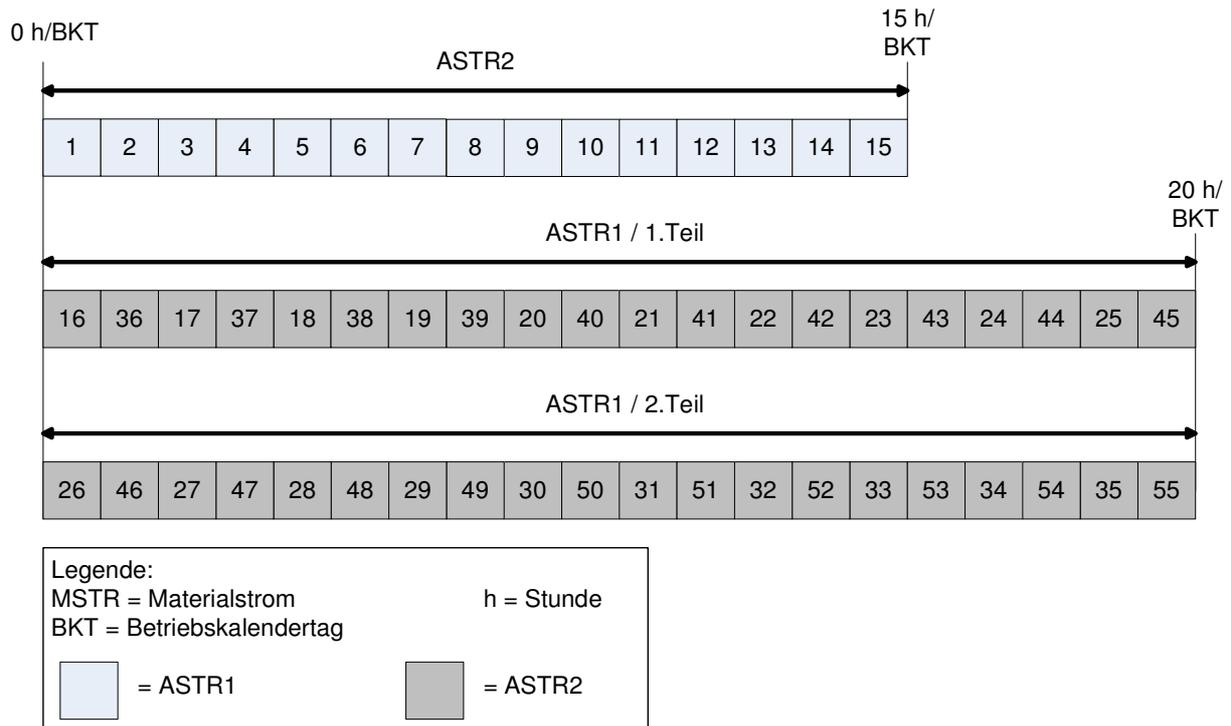


Abbildung 15: Auftragsströme im Fallbeispiel mit diskreten Aufträgen

Quelle: eigene Darstellung.

Hier wird ASTR1 dunkelgrau und ASTR2 hellgrau dargestellt. Im ersten Schritt sollen zunächst die Bearbeitungsstationen eins bis drei betrachtet werden. Hier ist zu beachten, dass die Aufträge vollkommen ohne Priorisierung nach dem FIFO-Prinzip<sup>53</sup> abgearbeitet werden. Für ASTR1 bedeutet dies, dass Aufträge von MS2 und MS3 jeweils alternierend auf AS2 bearbeitet werden. Die Reihenfolge beginnt willkürlich mit einem Auftrag von MS2. Da die Arbeitsinhalte über alle Bearbeitungsstationen und Arbeitsaufträge gleich groß sind, kann es im späteren Verlauf mehrfach zu gleichen Ankunftszeiten kommen. Dies resultiert aus der Annahme, Transportzeiten zwischen den einzelnen Stationen vereinfacht als nicht vorhanden anzunehmen. Kommen zwei Aufträge zweier verschiedener Materialströme zur gleichen Zeit an, so werden die Aufträge alternierend bevorzugt. Die Startwahl ist dabei ebenfalls willkürlich. Somit ergibt sich folgende Abarbeitungsreihenfolge auf den Bearbeitungsstationen eins, zwei und drei:

<sup>53</sup> FIFO bedeutet „First in – First out“ und wird auch als FCFS „First come – First serve“ bezeichnet. Im Rahmen der Auftragsabwicklung bedeutet dies, dass der Auftrag mit der längsten Wartezeit vor einer Bearbeitungsstation als erstes abgearbeitet wird.

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

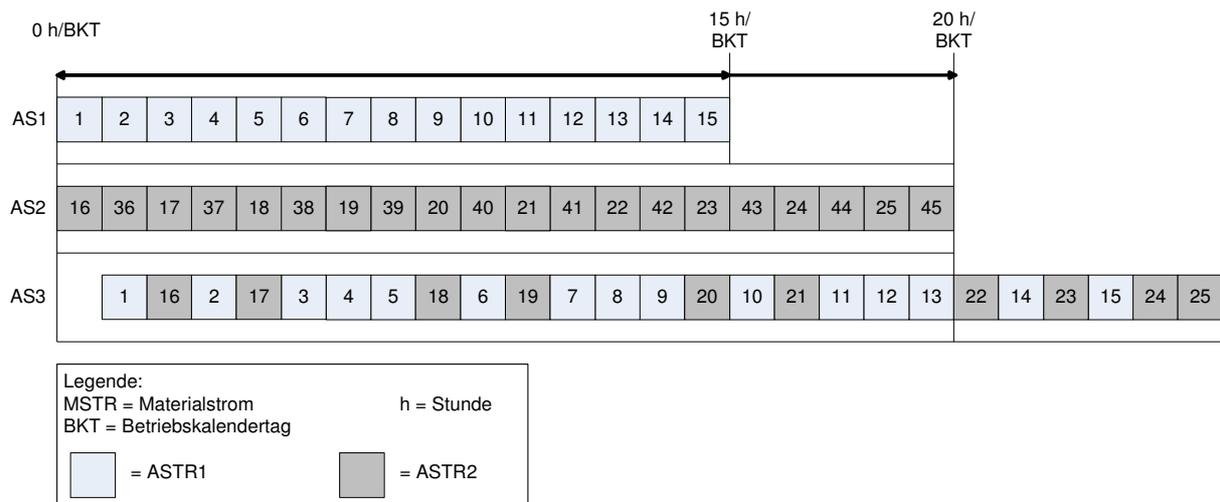


Abbildung 16: Auftragsabarbeitung durch die ersten drei Bearbeitungsstationen

Quelle: eigene Darstellung.

Anhand dieser Darstellung kann man sehen, dass auf AS1 nur ASTR2 läuft und auch vollkommen abgearbeitet werden kann, da hier die Kapazität größer ist als die Einlastung. Von ASTR1 kann hingegen auf AS2 nur die Hälfte durchgesetzt werden, da dort die Kapazität  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  beträgt und die Einlastung  $40 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Ohne Priorisierung werden von jedem Materialstrom 10 Aufträge abgearbeitet.

AS3 wird nun von ASTR1, in Form von MS2, und ASTR2 beansprucht. Hier kommt von ASTR2 ein Auftrag nach dem anderen an, von ASTR1 kommt jedoch nur jeder zweite Auftrag bei AS3 an. Dies führt dazu, dass sich abschnittsweise eine Warteschlange bildet, und Aufträge nicht sofort abgearbeitet werden. Da jedoch nicht immer in gleichen Maße Aufträge von ASTR1 und ASTR2 ankommen, sondern vermehrt Aufträge von ASTR2, werden in der Simulation auch mehr Aufträge von ASTR2 abgearbeitet. Im bekannten Berechnungsbeispiel wird der Durchsatz von ASTR2 auf AS3 mit  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$  angegeben.<sup>54</sup> Hier ergibt sich abgearbeitete Arbeit in Höhe von  $13 \frac{h}{\text{Periode}}$  und  $2 \frac{h}{\text{Periode}}$  verbleiben als Bestand vor AS3. Im Gegenzug reduziert sich jedoch der Durchsatz ASTR1 auf  $6 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Im berechneten Fallbeispiel waren es hier  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Die verbleibenden  $4 \frac{h}{\text{Periode}}$  bilden Bestand vor AS3. Außerdem wird die Kapazität von AS3 nicht in vollem Ausmaß ausgenutzt, da zu Periodenbeginn kein Bestand vorliegt und eine Stunde verstreicht, bis der erste Auftrag an AS3 ankommt. Dies hat allerdings mit dem Einschwingvorgang zu tun. Bei einer Flussbetrachtung wäre dies nicht der Fall. Die oben beschriebenen Verzögerungen aufgrund der fehlenden Priorisierung bleiben

<sup>54</sup> Vgl. Kapitel 2.1.2.

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

jedoch bestehen. Nun wird der komplette Durchlauf einer vollen Periode betrachtet, um den Gesamtdurchsatz zu ermitteln. Dieser Ablauf ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

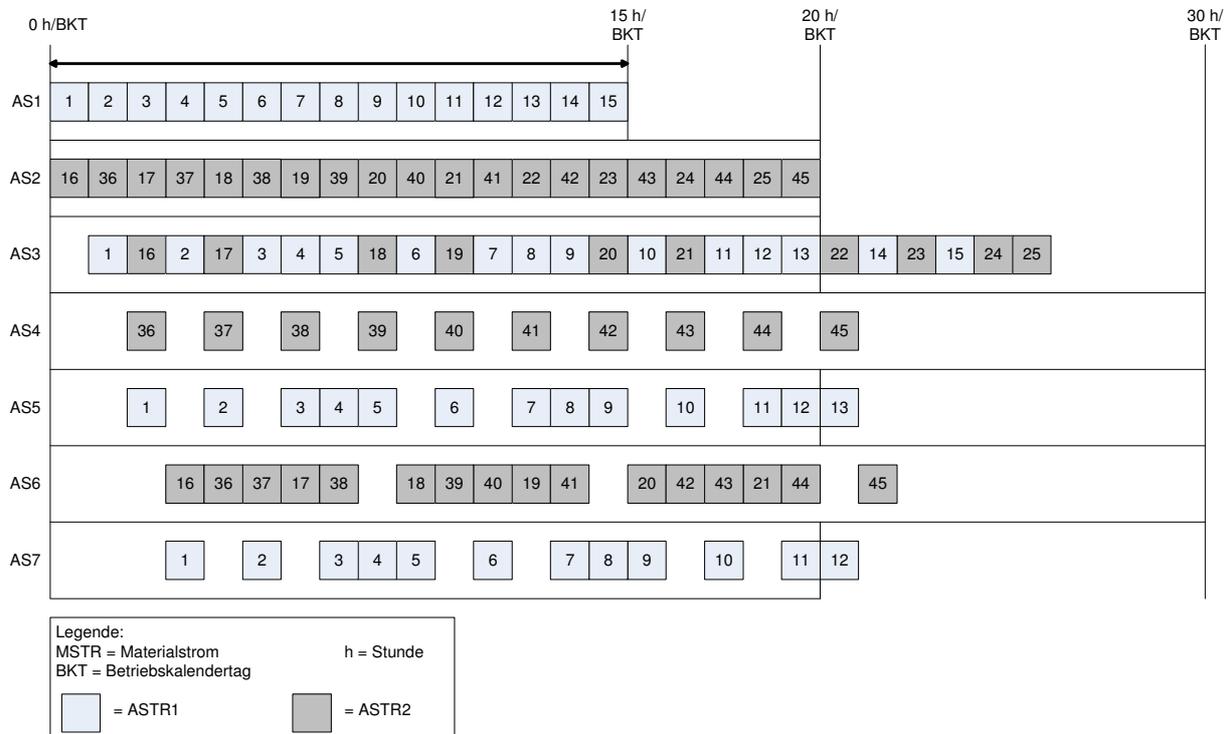


Abbildung 17: Auftragsabarbeitung des gesamten Systems in einer Periode

Quelle: eigene Darstellung.

Daran werden folgende Ergebnisse deutlich. ASTR2 besitzt eine Einlastung  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  vor AS1. Wie eben gezeigt, kann dort auch die gesamte Einlastung abgearbeitet werden. Erreicht ASTR2 jedoch AS3, so muss er sich die Bearbeitungsstation mit ASTR1 teilen. Dies führt dazu, dass nun nicht mehr alle Aufträge von ASTR1 abgearbeitet werden können und die Aufträge 14 und 15 bleiben als Bestand vor AS3 liegen. Jedoch werden mit  $13 \frac{h}{\text{Periode}}$  mehr Aufträge abgearbeitet als berechnet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Abfertigungsfaktor an dieser Bearbeitungsstation von der tatsächlichen Einlastung abhängig ist und nicht von den ursprünglich eingeplanten Aufträgen. Im weiteren Verlauf verliert ASTR2 an AS5 den Auftrag 13 und an AS7 den Auftrag 12. Dies ist auf die Ankunftszeitpunkte der einzelnen Aufträge zurückzuführen und nicht auf mangelnde Kapazitäten. Vielmehr treffen Auftrag 12 und 13 zu spät an den Bearbeitungsstationen ein, als das sie noch abgearbeitet werden könnten. Sie verbleiben also als Bestand vor der jeweiligen Arbeitsstation. Dies geht auch einher mit der Länge der Bearbeitungsreihenfolge. Je länger diese Bearbeitungsreihenfolge wird, desto später kommen die Aufträge auf den letzten Stationen an. Das bedeutet, je mehr Prozessschritte ein Auftrag durchlaufen muss, umso unwahrscheinlicher ist es, dass er das Ende der Prozesskette erreicht, da sich sein individueller Ankunftszeitpunkt zumindest

## Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

um die jeweilige Bearbeitungszeit pro Bearbeitungsstation nach hinten verschiebt. Am Ende ergibt sich ein Gesamtdurchsatz von  $44 \frac{h}{\text{Periode}}$ , wenn die Arbeitsinhalt aller abgearbeiteten Aufträge zusammengezählt werden. Im Vergleich zu den berechneten  $40 \frac{h}{\text{Periode}}$  ist dies eine relative Abweichung von 10 Prozent. Allerdings wurde in diesem Beispiel ein Einschwingvorgang mit betrachtet. Aufgrund der nun vorhandenen Bestände im System ist zu erwarten, dass die Abweichungen im nächsten Abschnitt geringer ausfallen.

Betrachtet man nun ASTR1 so stellen sich hier ebenfalls Abweichungen ein. Wie erwartet, können an AS2 nur  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  abgearbeitet werden, da die Kapazität von  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  um das Doppelte belastet wird. Ohne Auftragspriorisierung verbleiben von jedem Materialstrom  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$  als Restbestand vor AS2. Danach teilt sich ASTR1 auf AS3 und AS4 auf. Wie bereits bemerkt, wird AS3 auch von ASTR2 in Anspruch genommen. Deshalb können auch nicht alle verbleibenden Aufträge von ASTR1 auf AS3 abgearbeitet werden. Die Aufträge 22, 23, 24 und 25 müssen warten und bleiben als Restbestand für die nächste Periode. Auf AS6 fließen die beiden Teile von ASTR2 wieder zusammen. Da hier ausreichend Kapazität vorhanden ist, können auch alle ankommenden Aufträge abgearbeitet werden. Allerdings ist hier ebenfalls auffällig, dass zwischen der Ankunft verschiedener Aufträge immer wieder Lücken entstehen. Diese sind noch darauf zurückzuführen, dass ein Teil der Aufträge auf AS2 warten musste und später als geplant abgearbeitet werden kann. Im Vergleich ergibt sich schließlich ein Durchsatz von insgesamt  $48 \frac{h}{\text{Periode}}$  für ASTR1. Die Berechnung prognostizierte jedoch einen Durchsatz in Höhe von  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Dies ergibt eine relative Abweichung von 20 Prozent. Auch hier gilt jedoch, dass sich die Abweichung vermutlich aufgrund des Einschwingvorganges in späteren Perioden noch weiter reduzieren wird.

In der nachfolgenden Tabelle sind noch einmal der berechnete und der simulierte Durchsatz jedes Auftragsstromes auf jeder Arbeitsstation gegenübergestellt:

Bearbeitungsstation	Durchsatz ASTR1		Durchsatz ASTR2	
	berechnet	simuliert	berechnet	simuliert
AS1			10	15
AS2	20	20		
AS3			10	13
AS3	10	6		
AS4	10	10		
AS5			10	12
AS6	20	16		
AS7			10	11
Summe	60	48	40	44

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Durchsatzberechnung

Quelle: eigene Darstellung.

Dabei wird ersichtlich, dass AS3 die größte Auswirkung auf den Fehler der Durchsatzberechnung hat, denn dort werden die größten Abweichungen verursacht. Bei ASTR1 beträgt diese Abweichung an AS3  $4 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Anstatt eines relativen Durchsatzes von 50 Prozent wird hier also nur ein Durchsatz von 30 Prozent erzielt. Weiterhin weicht ASTR2 mit  $3 \frac{h}{\text{Periode}}$  von der Berechnung ab. Hier liegt der relative Durchsatz bei 87 Prozent der Einlastung. Dies legt die Vermutung nahe, dass der Durchsatz an dieser Arbeitsstation nicht alleine von der Engpassbelastung abhängt, sondern von der wirklichen Belastung der Bearbeitungsstation.

Außerdem wird sichtbar, dass die Länge der Bearbeitungsreihenfolge eine Rolle beim Durchsatz eine Rolle spielt. Ausschlaggebend ist dabei der individuelle Ankunftszeitpunkt der jeweiligen Aufträge. Je später diese in einer Periode ankommen, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit in dieser Periode noch fertiggestellt zu werden. Die sich bildenden Bestände in Form von Aufträgen vor den Bearbeitungsstationen sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Stand der Forschung zur Engpassplanung und –bewertung anhand von Durchsatzkennlinien

Bearbeitungsstation	ASTR1	ASTR2
AS1	0	0
AS2	0	20
AS3	4	2
AS4	0	0
AS5	0	1
AS6	0	0
AS7	0	1

Tabelle 8: Bestände in der Simulation vor den Bearbeitungsstationen

Quelle: eigene Darstellung.

Diese Beobachtungen lassen vermuten, dass der Durchsatz eines Auftragsstromes nicht nur von der Engpassbelastung abhängt. In den folgenden Kapiteln wird ein Lösungsvorschlag zur Berücksichtigung der gefundenen Gegebenheiten gemacht wird.

### 3 Einführung in die belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BOA)

Im nachfolgenden Kapitel wird kurz eine Einführung in die belastungsorientierte Auftragsfreigabe, im folgenden kurz BOA genannt, gegeben. Dies geschieht aus dem Grund, da im weiteren Verlauf ein Lösungsvorschlag für das Reihenfolgeproblem auf der Basis von BOA erarbeitet wird.

Die BOA ist ein Verfahren zur Produktionsplanung. Sie hat zum Ziel, nur so viel Arbeit freizugeben, wie in der Folgeperiode abgearbeitet werden kann. Dahinter steht der Gedanke, die Bestände im Produktionssystem zu reduzieren, um die Durchlaufzeit zu verringern und mehr Übersichtlichkeit zu schaffen. Sie geht dabei von folgenden Grundüberlegungen aus:<sup>55</sup>

1. Die Arbeitsinhalte der Aufträge sind diskret, nicht frei skalierbar und besitzen verschiedene Größen. Die Ankunftszeiten der Aufträge an den Bearbeitungsstationen sind diskontinuierlich und können streuen.
2. Die Bearbeitungsstationen in der Werkstatt sind im Prozessverlauf flexibel miteinander verknüpft. Je weiter ein Bearbeitungsschritt in der Zukunft liegt, desto schwieriger ist die Ankunftszeit zu berechnen.
3. Die Bearbeitungsreihenfolge spielt bei der Auftragsabarbeitung eine Rolle.

Die Basis für das Freigabeverfahren bildet das unten dargestellte Durchlaufdiagramm:

---

<sup>55</sup> Vgl. Wiendahl(1987), S.207f.

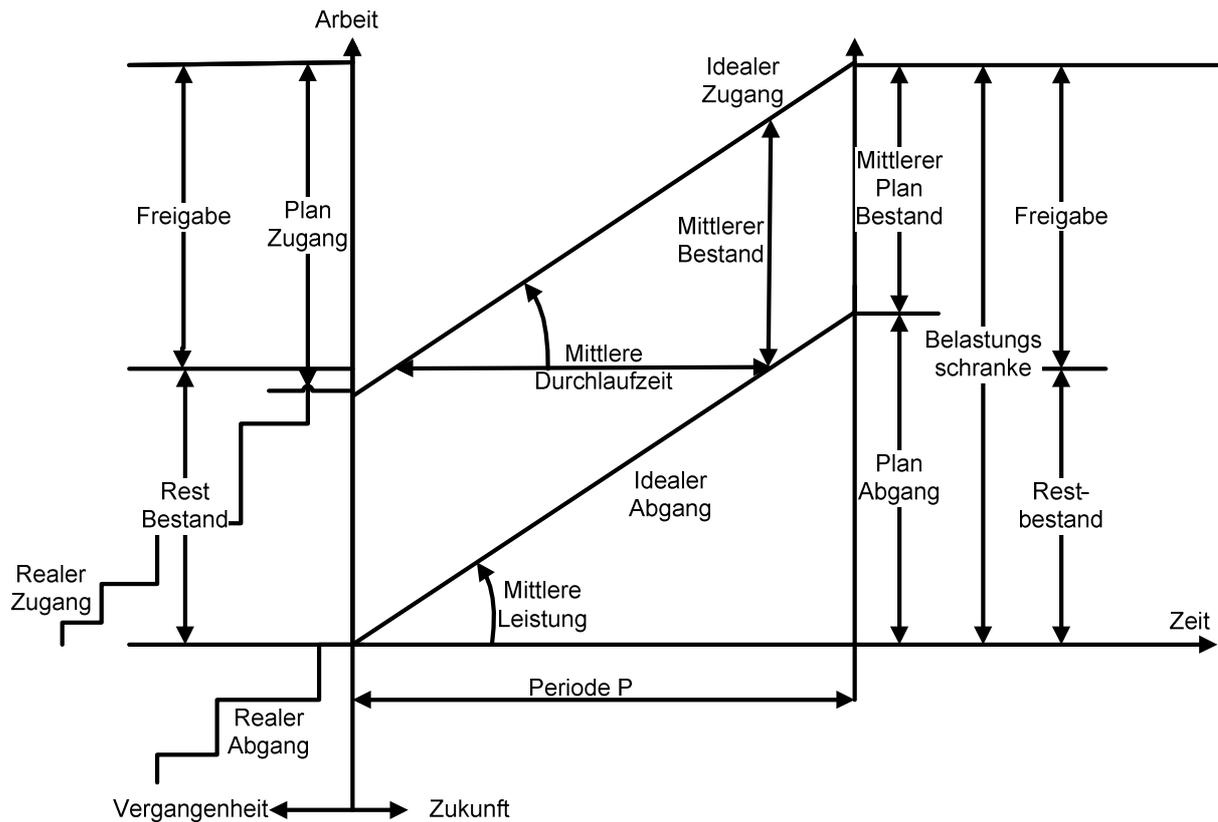


Abbildung 18: Durchlaufmodell für BOA an einem Arbeitssystem

Quelle: in Anlehnung an Wiendahl(1992), S.17.

Dabei wird die zugehende und die abgehende Arbeit an einem Produktionssystem oder einer Bearbeitungsstation über die Zeit aufgetragen. Außerdem lassen sich daraus die Parameter mittlere Durchlaufzeit, mittlerer Bestand, mittlere Leistung, Plan-Zugang und Plan-Abgang ablesen. Die sog. Trichterformel beschreibt dabei den Zusammenhang zwischen diesen Größen:<sup>56</sup>

$$\text{Mittlere Leistung} = \frac{\text{mittlerer Bestand}}{\text{mittlere Durchlaufzeit}} \quad [3.1]$$

Mittlere Leistung und mittlere Durchlaufzeit können als Funktion des Bestandes verstanden werden. Damit ist es also möglich einen optimalen Planbestand einzustellen, so dass Durchlaufzeit und Leistung im optimalen Verhältnis stehen.

Wird von der Prämisse ausgegangen, dass der mittlere Bestand am Anfang und am Ende der Periode gleich groß ist, so müssen sich auch Zugang und Abgang entsprechen. Dies muss allerdings nicht unbedingt der Fall sein. Weicht der Restbestand der Vorperiode vom

<sup>56</sup> Vgl. Wiendahl(1987), S.206f.

Planbestand ab, so wird dementsprechend der Zugang der Folgeperiode angepasst. Dies geschieht dadurch, dass je nachdem mehr oder weniger Aufträge freigegeben werden als geplant. Dann gilt:

$$\text{mittlerer Bestand} + \text{Abgang} = \text{Restbestand} + \text{Freigabe} \quad [3.2]$$

Wenn die Summe aus mittlerem Bestand und Abgang als Freigabegrenze verstanden werden, so errechnet sich die Freigabe der nächsten Periode aus:

$$\text{Belastungsschranke} - \text{Restbestand} = \text{Freigabe} \quad [3.3]$$

Nun müssen die Aufträge also nicht mehr einzeln eingeplant werden, sondern können wie in der Buchhaltung periodenweise auf ein Belastungskonto gebucht werden.<sup>57</sup>

Die belastungsorientierte Auftragsfreigabe gliedert sich in die Schritte Auftragswahl und Freigabeprüfung. Bei der Auftragswahl wird zuerst eine Rückwärtsterminierung der Aufträge vorgenommen. Liegen die Soll-Starttermine dabei innerhalb einer gewissen Zeitspanne, der sog. Terminschranke, so werden sie zu den dringlichen Aufträgen gerechnet. Ansonsten handelt es sich um nicht-dringliche Aufträge.<sup>58</sup> Lediglich die dringlichen Aufträge werden bei der Freigabeprüfung berücksichtigt.

Bei der Freigabeprüfung muss sichergestellt werden, dass die Aufträge bei der Ankunft an einer Bearbeitungsstation dort auf eine freie Kapazität treffen. Dazu werden die Aufträge nach Sollstarttermin aufsteigend geordnet und sequentiell auf allen betroffenen Bearbeitungsstationen eingelastet. Dabei wird der Auftrag mit der Wahrscheinlichkeit gewichtet, dass er in der betrachteten Periode auch die Bearbeitungsstation wirklich erreicht. Im Durchschnitt werden alle Bearbeitungsstationen dann mit der richtigen Einlastung belastet.

Ein Auftrag wird erst dann freigegeben, wenn sichergestellt ist, dass er in der betreffenden Periode bei jeder Bearbeitungsstation auf eine freie Kapazität trifft. Die freie Kapazität ist erschöpft, wenn die Belastungsschranke einer Bearbeitungsstation überschritten wird. Dann wird der letzte Auftrag noch eingelastet und kein weiterer Auftrag, der diese Bearbeitungsstation beansprucht wird noch freigegeben. Nachdem alle Bearbeitungsstationen bis zur Belastungsschranke ausgelastet sind, erhält man eine Liste mit dringlichen, freigegebenen Aufträ-

---

<sup>57</sup> Vgl. ebenda, S.208ff.

<sup>58</sup> Vgl. Wiendahl(1987), S.211f.

gen und dringlichen, nicht-freigegebenen Aufträgen. Letztere werden bis zur nächsten Periode zurückgestellt.

Die Belastungsschranke kann nun unabhängig von der Leistung ausgedrückt werden, indem sich auf den Abgang bezogen wird<sup>59</sup>:

$$\text{Einlastungsprozentsatz} = \frac{\text{Belastungsschranke}}{\text{Abgang}} = \frac{\text{mittlerer Bestand} + \text{Abgang}}{\text{Abgang}} \quad [3.4]$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Auftrag eine Bearbeitungsstation erreicht, ist gleich der Wahrscheinlichkeit, dass er an der vorherigen Bearbeitungsstation fertiggestellt wird. Diese Wahrscheinlichkeit lässt sich ebenfalls aus dem Durchlaufdiagramm ableiten:<sup>60</sup>

$$W_{\text{Abgang}} = W_{\text{Zugang}} \times \frac{\text{Abgang}}{\text{Freigabe} + \text{Restbestand}} \quad [3.5]$$

Dies kann nun umgeformt werden zu:

$$W_{\text{Abgang}} = W_{\text{Zugang}} \times \frac{100}{\text{Einlastungsprozentsatz}} \quad [3.5a]$$

Wird nun eine Reihe von Bearbeitungsstationen betrachtet, so werden alle Wahrscheinlichkeiten miteinander multipliziert, wie in der folgenden Abbildung dargestellt:

---

<sup>59</sup> Vgl. Ebenda, S.210f.

<sup>60</sup> Vgl. Ebenda, S.214ff.

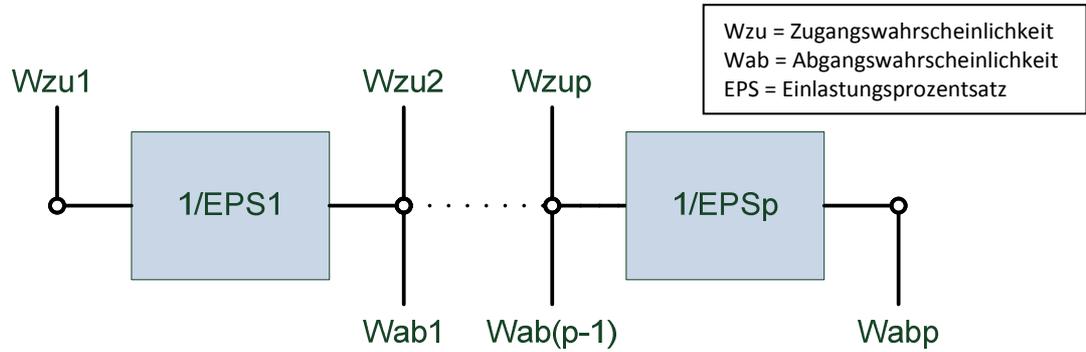


Abbildung 19: Abgangswahrscheinlichkeit eines Auftrages nach p Arbeitsstationen

Quelle: in Anlehnung an Wiendahl(1987), S.215.

Damit ergibt sich als Formel für die Abfertigungswahrscheinlichkeit  $ABFA_n$ , dass ein Auftrag innerhalb einer Periode bis einschließlich von der Station n abgearbeitet wird und vor der Station n+1 bereitsteht:

$$ABFA_n = \prod_{i=1}^n \frac{100}{\text{Einlastungsprozentsatz}_{i-1}} \quad [3.6]$$

Multipliziert mit dem Arbeitsinhalt des Auftrages ergibt sich die Einlastung des Auftrages auf dem Belastungskonto der Bearbeitungsstation:

$$\text{Belastung}_{\text{Arbeitsstation } p, \text{ Auftrag } n} = ABFA_p \times \text{Auftragszeit}_n \quad [3.7]$$

Diese, jeweils individuell berechnete, Belastung wird nun den jeweiligen Belastungskonto hinzuaddiert. Wenn bei keinem Belastungskonto die Belastungsschranke überschritten wird, so wird der Auftrag freigegeben.

#### 4 Erarbeitung eines Lösungsansatzes zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge

Nachdem die Probleme bei der Berücksichtigung der Bearbeitungsreihenfolge aufgezeigt wurden, wird zunächst in grundsätzlichen Überlegungen auf den Abfertigungsfaktor eingegangen. Dabei wird eine Modifikation vorgeschlagen, um die individuelle Belastung aller Arbeitsstationen in einem Auftragsstrom zu berücksichtigen. Danach wird ein Lösungsvorschlag auf Basis der belastungsorientierten Auftragsfreigabe erarbeitet. Dieses Freigabeverfahren berücksichtigt die Arbeitsgangreihenfolge in Form multiplizierter Abarbeitungswahrscheinlichkeiten, die geringer werden, je weiter der Arbeitsgang in der Zukunft liegt. Der Vorschlag wird anhand eines Fallbeispiels erläutert.

##### 4.1 Allgemeine Überlegungen zum Abfertigungsfaktor

In Kapitel 2.2 konnte erläutert und gezeigt werden, dass es Abweichungen bei der Durchsatzberechnung gibt. Wie oben gezeigt, berechnet sich der Durchsatz wie folgt:

$$\text{Durchsatz}_{ASTR i} = AF_{ASTR i} \times \text{Einlastung}_{ASTR i} \quad [2.3]$$

Da die Einlastung als fest angenommen werden kann, hängt der Durchsatz also lediglich vom Abfertigungsfaktor ab. Dies kann so interpretiert werden, dass die Fertigstellung eines Auftrages von der Abarbeitung an der Engpassstation abhängig ist.<sup>61</sup> Dies ist eine wichtige Aussage, die für kontinuierliche Auftragsströme gilt. Auch wenn man lediglich die Durchsatzschranke als Bearbeitungsstation betrachtet, erhält man so den korrekten Durchsatz. Es konnte jedoch in dem Fallbeispiel gezeigt werden, dass in der Praxis auch andere Gegebenheiten existieren, die Einfluss auf die Fertigstellung eines Auftrags nehmen. Sie treten besonders auf, da dann

- Aufträge, anders als angenommen, diskrete Arbeitsinhalte besitzen,
- zu verschiedenen Zeitpunkten an den Bearbeitungsstationen ankommen,
- Aufträge erst als durchgesetzt gelten, wenn sie auf der letzten eingelasteten Arbeitsstation komplett abgearbeitet wurden,
- bei der Durchsatzberechnung nicht die Länge der Bearbeitungsreihenfolge betrachtet wird.

Eine weitere Voraussetzung war, dass bei der Einlastung der Aufträge keine Priorisierung vorgenommen wird.<sup>62</sup> Betrachtet man aus dieser Perspektive den Abfertigungsfaktor genau-

---

<sup>61</sup> Vgl. Kreuzfeldt(1995), S.65.

<sup>62</sup> Vgl. ebenda, S.70.

er, so handelt es sich dabei lediglich um eine Wahrscheinlichkeit. Vereinfacht gesehen, stellt sich hier sogar eine Analogie zur belastungsorientierten Auftragsfreigabe dar. Denn die Wahrscheinlichkeit, dass ein Auftrag an der Durchsatzschranke abgearbeitet werden kann, berechnet sich aus dem Verhältnis von Kapazität zu Einlastung, wenn die Durchsatzschranke überlastet ist:

$$ABFE_{ASTR i} = \frac{\text{Kapazität}_{\text{Durchsatzschranke}}}{\text{Einlastung}_{\text{Durchsatzschranke}}} \quad [4.1a]$$

*für Einlastung > Kapazität*

Für eine nicht überlastete Durchsatzschranke gilt jedoch, dass die gesamte Einlastung durchgesetzt werden kann:

$$ABFE_{ASTR i} = 1 \quad [4.1b]$$

*für Einlastung ≤ Kapazität*

Diese Wahrscheinlichkeit gründet sich auf die stochastische Überlegung eines Laplace-Experiments<sup>63</sup>, dass sich die Wahrscheinlichkeit P eines Ereignisses A durch folgende Formel berechnen lässt:<sup>64</sup>

$$P(A) = \frac{g(A)}{m} \quad [4.2]$$

Dabei steht g(A) für die Anzahl der eingetretenen Fälle, dass das Ereignis A eintritt und m ist die Anzahl der insgesamt möglichen Fälle. Als Beispiel dafür ist eine Urne vorstellbar, in der sich zwei rote und drei blaue Kugeln befinden. Die Wahrscheinlichkeit eine rote Kugel zu ziehen, errechnet sich nun durch:

$$P(A) = \frac{2}{5} = 0,4 \quad [4.2a]$$

Daraus kann nun eine Analogie zum Abfertigungsfaktor gezogen werden. Denn betrachtet man die Durchsatzschranke näher, so entspricht die Einlastung den insgesamt möglichen Fällen, also dem maximalen Durchsatzbetrag. Die Kapazität wiederum kann als die maximale Anzahl an eingetretenen Fällen angesehen werden.

---

<sup>63</sup> Wird ein Zufallsexperiment mit einer endlichen Ergebnismenge (...) genügend oft wiederholt und zeigt sich dabei, dass alle Elementarereignisse mit nahezu gleicher Häufigkeit auftreten, so spricht man von einem Laplace-Experiment. Papula (1997), S.274.

<sup>64</sup> Vgl. Papula (1997), S.274ff.

Verglichen mit der belastungsorientierten Auftragsfreigabe, kann dies mit Formel 3.5 erklärt werden. Darin errechnet sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Auftrag an einer Bearbeitungsstation durchgesetzt wird, wie folgt:<sup>65</sup>

$$W_{Abgang} = W_{Zugang} \times \frac{Abgang}{Freigabe + Restbestand} \quad [3.5]$$

Die Abgangswahrscheinlichkeit errechnet sich aus dem Produkt der Zugangswahrscheinlichkeit und der Laplace-Wahrscheinlichkeit aus Formel 4.2, denn der Abgang an Arbeit steht für die eingetretenen Ereignisse und die Summe aus Freigabe und Restbestand für die maximal möglichen Ereignisse. Dabei wird die Annahme getroffen, dass es sich um eine genügend große Anzahl von Aufträgen handelt, die immer mit nahezu gleicher Häufigkeit auftreten.

Allerdings bricht die Durchsatzberechnung des DePlaVis-Algorithmus an dieser Stelle ab und geht davon aus, dass der Abfertigungsfaktor nun über alle Bearbeitungsstation des Auftragsstromes gleich groß bleibt. In diesem Fall wird nach Formel 2.3 die Einlastung des gesamten Auftragsstromes mit dem Abfertigungsfaktor multipliziert:<sup>66</sup>

$$Durchsatz_{ASTR\ i} = ABFE_{ASTR\ i} \times Einlastung_{ASTR\ i} \quad [2.3]$$

Die Annahme ist, dass die Durchsatzwahrscheinlichkeit alleine von der Belastung der Durchsatzschranke abhängig ist und es keine weiteren Durchsatzabschläge geben wird. Für kontinuierliche Auftragsströme ohne Berücksichtigung von Ankunftszeitpunkten und Bearbeitungsreihenfolge ist dies näherungsweise richtig. Wie in Kapitel 2.2 gezeigt werden konnte, entspricht dies dagegen nicht der Realität. Zwar erhält der Auftragsstrom mit dem größten Engpass den geringsten Abfertigungsfaktor und somit auch den größten Abschlag, aber es kann trotzdem weiterhin kein kausaler Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Belastung einer Bearbeitungsstation, unabhängig von der Durchsatzschranke, und dem dort erzielten Durchsatz hergestellt werden.

Im BOA-Konzept werden die Arbeitsgangreihenfolge und die verteilten Ankunftszeitpunkte anhand einer Kette von Wahrscheinlichkeiten berechnet. Dies geschieht nach Formel 3.6:<sup>67</sup>

$$ABFA_n = \prod_{i=1}^m \frac{100}{Einlastungsprozentsatz_{i-1}} \quad [3.6]$$

---

<sup>65</sup> Vgl. Wiendahl (1987), S.291ff.

<sup>66</sup> Vgl. Kapitel 2.1.

<sup>67</sup> Vgl. Kapitel 3.

Dabei wird jeder Bearbeitungsstation ein individueller Abfertigungsfaktor zugeordnet. Dieser wiederum ist abhängig von seinem Restbestand und der Freigabe in dieser Periode. Damit kann nun ein kausaler Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Einlastung einer Bearbeitungsstation und seinem Durchsatz hergestellt werden. Einerseits wird damit die individuelle Belastung berücksichtigt und andererseits wird der Länge der Bearbeitungsreihenfolge durch die Multiplikation aller Abfertigungsfaktoren in einer Reihe Rechnung getragen. Analog zur belastungsorientierten Auftragsfreigabe wird nun ein Konzept entwickelt, das den Abfertigungsfaktor eines Auftragsstromes als Multiplikation individueller, stationsspezifischer Abfertigungsfaktoren errechnet. Damit kann der Abfertigungsfaktor künftig als Funktion der Bearbeitungsstationsanzahl, der tatsächlichen Einlastung und der Bearbeitungsstationskapazität aufgefasst werden:

$$ABFE_{ASTR\ i} = f(\text{Anzahl}_{AS\ ASTR\ i}, \text{Einlastung}_{real}, \text{Kapazität}_{AS}) \quad [4.3]$$

Der veränderte Algorithmus wird nun im nächsten Kapitel in Korrespondenz mit einem Fallbeispiel erläutert.

### 4.2 Vorstellung eines Lösungsansatzes durch arbeitsstationsspezifische Abfertigungsfaktoren

In diesem Kapitel wird nun der geänderte Algorithmus vorgestellt und anhand des bereits eingeführten Fallbeispiels ausführlich demonstriert.<sup>68</sup> Dabei bleibt das Fallbeispiel unverändert, d.h. das Fertigungslayout, die Richtung und die Stärke der Materialströme, sowie Kapazitäten der Bearbeitungsstationen bleiben gleich.

Wie beim bereits bekannten DePlaVis-Algorithmus stützt sich auch der neue Algorithmus auf die These, dass der größte Engpass die stärkste Auswirkung auf einen Materialstrom besitzt. Allerdings ist der größte Engpass schwierig zu ermitteln, da die Einlastung an einer Arbeitsstation davon abhängt, wie viele Aufträge überhaupt an der Arbeitsstation ankommen. Wenn nicht alle Aufträge die Durchsatzschranke passieren können, stehen sie auch nicht in der betrachteten Periode vor den nachfolgenden Stationen zur Verfügung und eine Einlastung ist hier unrealistisch. Sie erzeugt an den Arbeitsstationen höhere, fiktive Auslastungen als wirklich vorhanden sind und lässt im Extremfall sogar Engpässe vermuten, die gar nicht vorhanden sind, sog. Pseudoengpässe<sup>69</sup>.

---

<sup>68</sup> Vgl. Kapitel 2.1.2.

<sup>69</sup> Vgl. Haberlandt(1998), S.18.

Das bedeutet, dass die Auslastung einer Arbeitsstation immer erst schrittweise berechnet werden kann. Dazu wird zunächst die Arbeitsstation ermittelt, die am Anfang eines Materialstromes liegt. Dort wird im ersten Schritt das Verhältnis von Einlastung zu Kapazität gebildet. Bei dem vorliegenden Beispiel handelt es sich um AS1 für MS1 und AS2 für MS2 und MS3. Die Auslastung wird in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Arbeitsstation	Kapazität [h/Periode]	Einlastung [h/Periode]	Auslastung [Prozent]
1	20	15	75
2	20	40	200

Tabelle 9: Auslastung von AS1 und AS2 im Fallbeispiel

Quelle: Schultheiß(2008), S.18.

Daraus lässt sich nun der Abfertigungsfaktor ermitteln. An AS2 besteht eine Auslastung von 200%, dies ergibt nach Formel 2.2 einen Abfertigungsfaktor von 0,5. Die Einlastung jedes Materialstromes auf AS2 wird nun mit dem spezifischen Abfertigungsfaktor multipliziert. Daraus folgt die Wertschöpfung<sup>70</sup> (im Folgenden kurz  $W$ ) jedes Materialstromes auf AS2. Die Summe der einzelnen Wertschöpfungsbeiträge ergibt wiederum die Wertschöpfung des gesamten Auftragsstromes auf der Arbeitsstation:

$$W_{AS\ k, ASTR\ i} = \sum_{j=1}^n W_{MS\ j} = \sum_{j=1}^n \text{Einlastung}_{MS\ j} \times ABFE_{AS\ k} \quad [4.4]$$

Da der Abfertigungsfaktor für alle Materialströme, aufgrund fehlender Priorisierung gleich konstant für die betrachtete Arbeitsstation ist, kann die Formel verkürzt werden auf:

$$W_{AS\ k, ASTR\ i} = ABFE_{AS\ k} \times \sum_{j=1}^n \text{Einlastung}_{MS\ j} \quad [4.5]$$

Es handelt sich jedoch um zwei Materialströme, die sich später aufteilen, so dass im weiteren Verlauf die Einzelwertschöpfungen benötigt werden. Sie berechnen sich aus  $W_{ASTR\ 1}$  nach Formel 4.4:

$$W_{AS\ 2, ASTR\ 1} = \sum_{j=1}^2 W_{MS\ j} = \sum_{j=1}^2 \text{Einlastung}_{MS\ j} \times ABFE_{AS\ 1} = 20 \frac{h}{\text{Periode}} \quad [4.4a]$$

Zur besseren Visualisierung wird nun für jede Arbeitsstation ein Belastungskonto eingeführt. Dieses Belastungskonto ist angelehnt an die Bestandskonten der doppelten Buchführung.

<sup>70</sup> Als arbeitsinhaltbezogene Wertschöpfung bezeichnet man die Summe der minimalen Arbeitsinhalte aller teilweise und vollständig durchgeführten Fertigungsaufträge innerhalb einer Periode. Vgl. Kreuzfeldt(1995), S.59f.

## Erarbeitung eines Lösungsvorschlages zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge

Wie dort müssen Buchungen auf der Sollseite und Buchungen auf der Habenseite den gleichen Betrag besitzen. Im vorliegenden Fall müssen sich dementsprechend Einlastung und Wertschöpfung, Durchsatzpotential und Reihenfolgeabschlag aufheben. Als Reihenfolgeabschlag soll dabei der Arbeitsinhalt bezeichnet werden, der die Bearbeitungsstation gar nicht mehr erreicht hat, da er bereits vor einer früheren Bearbeitungsstation aufgehalten wurde. Das bedeutet, dass es für eingeplante Aufträge drei Lösungen geben kann. Sie werden abgearbeitet und damit durchgesetzt, sie bleiben als Bestand vor der Bearbeitungsstation liegen und bilden Durchsatzpotential oder sie erreichen von vornherein die Bearbeitungsstation nicht, da sie durch andere, vorherige Engpässe behindert werden. Einlastung, Wertschöpfung, Durchsatzpotential und Reihenfolgeabschlag werden dabei immer materialstrombezogen gebucht. Das Belastungskonto von AS2 stellt sich wie folgt dar:

Materialstrom	Einlastung [h/Periode]	Wertschöpfung [h/Periode]	Durchsatzpotential [h/Periode]	Reihenfolge- abschlag [h/Periode]
2	20			
2		10	10	0
3	20			
3		10	10	0

Abbildung 20: Belastungskonto von AS2

Quelle: eigene Darstellung.

Das Belastungskonto kann nun wie ein T-Konto aus der Finanzbuchhaltung<sup>71</sup> interpretiert werden. Die Einlastung repräsentiert dementsprechend die SOLL-Seite in der Finanzbuchhaltung und die Summe aus Durchsatzpotential, Wertschöpfung und Reihenfolgeabschlag sind mit der HABEN-Seite vergleichbar. Für jeden Materialstrom bzw. Auftrag wird nun ein Buchungssatz gebildet, bei dem die Einlastung komplett auf die HABEN-Seite verteilt werden muss. Am Ende der Betrachtung muss das Konto ausgeglichen sein.

In diesem Fall kann die Einlastung von MS2 in Höhe von  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  nur zu 50 Prozent durchgesetzt werden. Dies ergibt dann eine Wertschöpfung von  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$  und Durchsatzpotential in Höhe von  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Damit ist dieser Buchungssatz ausgeglichen und kann abgeschlossen werden. Da es sich um die erste Arbeitsstation handelt, kann auch kein Reihenfolgeabschlag vorgenommen werden. Bei der Betrachtung von MS3 werden die gleichen Werte

<sup>71</sup> Ein T-Konto besteht aus einer Soll und einer Habenseite. Dabei müssen sich die beiden Seite bei jedem Buchungssatz ausgleichen.

Erarbeitung eines Lösungsvorschlages zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge

verwendet und er kann analog zur Buchung von MS2 vorgenommen werden. Nun ist die komplette Einlastung in Höhe von  $40 \frac{h}{\text{Periode}}$  berechnet und verteilt worden. Die Bearbeitungsstation kann somit für alle weiteren Berechnungen geschlossen werden.

MS1 beginnt auf AS1. Auch hier wird die Auslastung berechnet. Da bei AS1 ohnehin eine Unterdeckung herrscht, wird dort die komplette Einlastung abgearbeitet und der Abfertigungsfaktor beträgt 100 Prozent:

Materialstrom	Einlastung [h/Periode]	Wertschöpfung [h/Periode]	Durchsatzpotential [h/Periode]	Reihenfolgeabschlag [h/Periode]
1	15			
1		15	0	0

Abbildung 21: Belastungskonto von AS1

Quelle: eigene Darstellung.

Jetzt wird die Auslastung der nachfolgenden, betroffenen Arbeitsstationen korrigiert. Um die Einlastung an einer nachfolgenden Arbeitsstation zu berechnen, muss die ursprüngliche Einlastung um den Betrag korrigiert werden, der von der vorgelagerten Station aufgehalten wird, den Reihenfolgenabschlag. Dieser materialstrombezogene Reihenfolgenabschlag wird nun von der Einlastung der nachfolgenden Arbeitsstation abgezogen. Die neue Einlastung einer nachfolgenden, betroffenen Arbeitsstation lässt sich allgemein errechnen mit:

$$Einlastung_{AS\ i,neu\ gesamt} = Einlastung_{AS\ i,alt\ gesamt} - \sum_{j=1}^n Reihenfolgeabschlag_{MS\ j, AS\ i-1} \quad [4.6]$$

Da sich nun jedoch die Einlastung verändert hat, ändert sich auch die Auslastung der betroffenen Arbeitsstationen und muss neu berechnet werden. Im Fallbeispiel sind von der Korrektur an MS2 und MS3 AS3 und AS4 betroffen. Für MS1 muss keine Korrektur vorgenommen werden, da an AS1 alle Aufträge durchgesetzt werden können. Es ergeben sich nun folgende Werte:

Erarbeitung eines Lösungsvorschlages zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge

Arbeitsstation	Kapazität [h/Periode]	Einlastung [h/Periode]	Auslastung [Prozent]
3	20	25	125
4	30	10	33

Tabelle 10: Korrigierte Einlastung an AS3 und AS4

Quelle: eigene Darstellung.

Nun werden auch hier die Wertschöpfungen der einzelnen Materialströme nach Formel 4.4 bzw. 4.5 berechnet. Damit ergeben sich folgende Wertschöpfungen auf AS3 und AS4:

Arbeitsstation	Materialstrom	Wertschöpfung [h/Periode]
3	1	12
	2	8
4	3	10

Tabelle 11: Wertschöpfung an AS3 und AS4

Quelle: eigene Darstellung.

Für das Belastungskonto von AS3 können folgende Buchungssätze gebildet werden:

Materialstrom	Einlastung [h/Periode]	Wertschöpfung [h/Periode]	Durchsatzpotential [h/Periode]	Reihenfolge- abschlag [h/Periode]
1	15			
1		12	3	0
2	20			
2		8	2	10

Abbildung 22: Belastungskonto von AS3

Quelle: eigene Darstellung.

Hier ist zu sehen, dass es nicht möglich ist, an dieser Station alle ankommenden Aufträge durchzusetzen. Als Wertschöpfung können nur  $8 \frac{h}{\text{Periode}}$  abgearbeitet werden und  $2 \frac{h}{\text{Periode}}$  verbleiben als Durchsatzpotential pro Periode vor der Bearbeitungsstation. Weiterhin werden von der ursprünglichen Einlastung  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$  als Reihenfolgeabschlag abgezogen. Außerdem müssen von MS1 noch  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  gebucht werden. Aus dieser Einlastung entsteht eine

Erarbeitung eines Lösungsvorschlages zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge

Wertschöpfung von  $12 \frac{h}{\text{Periode}}$  und ein Durchsatzpotential in der Höhe von  $3 \frac{h}{\text{Periode}}$  bildet sich vor der Arbeitsstation. Für AS4 hingegen können bereits alle Buchungen durchgeführt werden, da diese Arbeitsstation nicht ausgelastet ist und somit einen Abfertigungsfaktor von 100% besitzt:

Materialstrom	Einlastung [h/Periode]	Wertschöpfung [h/Periode]	Durchsatzpotential [h/Periode]	Reihenfolgeabschlag [h/Periode]
3	20			
3		10	0	10

Abbildung 23: Belastungskonto von AS4

Quelle: eigene Darstellung.

Es können alle Aufträge durchgesetzt werden und die Einlastung in Höhe von  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  wird zu  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$  in Wertschöpfung umgewandelt und  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$  erreichen die Bearbeitungsstation nicht. Damit kann AS4 geschlossen werden.

Nun muss die Einlastung an den beiden nachfolgenden Bearbeitungsstationen AS5 und AS6 nach Formel 4.6 korrigiert werden. Dabei wird die Einlastung an AS5 von  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  auf  $12 \frac{h}{\text{Periode}}$  reduziert. Die Auslastung der Arbeitsstation verringert sich auf 60 Prozent. Da sie vorher nicht ausgelastet war und auch durch keine weiteren Materialströme beeinflusst wird, ist diese Korrektur unerheblich, da der Abfertigungsfaktor ohnehin bei 100 Prozent liegt. Lediglich das Durchsatzpotential von AS3 verwandelt sich auf AS5 in den Reihenfolgeabschlag:

Materialstrom	Einlastung [h/Periode]	Wertschöpfung [h/Periode]	Durchsatzpotential [h/Periode]	Reihenfolgeabschlag [h/Periode]
1	15			
1		12	0	3

Abbildung 24: Belastungskonto von AS5

Quelle: eigene Darstellung.

Auch an AS6 kommt wiederum weniger Arbeit an, als ursprünglich eingelastet wurde. Darum wird auch dort die Einlastung durch Formel 4.6 korrigiert. Damit beträgt die Einlastung an

Erarbeitung eines Lösungsvorschlages zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge

AS6 nur noch  $18 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Nun kann auch hier die Auslastung angepasst werden. Mit der neuen Einlastung beträgt sie 60 Prozent. Der Abfertigungsfaktor kann deshalb bei 1 belassen werden, da alle Aufträge durchsetzbar sind. Das Belastungskonto für AS6 kann dann dementsprechend dargestellt werden:

Materialstrom	Einlastung [h/Periode]	Wertschöpfung [h/Periode]	Durchsatzpotential [h/Periode]	Reihenfolge- abschlag [h/Periode]
2	20			
2		8	0	12
3	20			
3		10	0	10

Abbildung 25: Belastungskonto von AS6

Quelle: eigene Darstellung.

Da alle Aufträge durchgesetzt werden können, kann auch dieses Konto für die Berechnung geschlossen werden. Nun muss nur noch AS7 betrachtet werden. Wie bei AS5 betrug die erste Einlastung  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Diese wird jedoch durch AS3 auf  $12 \frac{h}{\text{Periode}}$  reduziert und vollkommen in Wertschöpfung umgewandelt. Die Auslastung liegt, wie vorher bereits auch, unter 100%. Sie beträgt 60%. Damit bleibt der Abfertigungsfaktor bei 1 und nur  $3 \frac{h}{\text{Periode}}$ , welche als Durchsatzpotential vor AS3 liegen, werden als Reihenfolgeabschlag gebucht:

Materialstrom	Einlastung [h/Periode]	Wertschöpfung [h/Periode]	Durchsatzpotential [h/Periode]	Reihenfolge- abschlag [h/Periode]
1	15			
1		12	0	3

Abbildung 26: Belastungskonto von AS7

Quelle: eigene Darstellung.

Zur Berechnung der Durchsatzkennlinien wird nun die Arbeitsstation mit dem größten Verhältnis von Einlastung zu Kapazität bestimmt. Dazu werden hier jedoch die korrigierten Einlastungen benutzt, d.h. die Differenz von ursprünglicher Einlastung und Reihenfolgeabschlag. Die sich ergebenden Auslastungen sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Arbeitsstation	Einlastung [h/Periode]	Kapazität [h/Periode]	Auslastung [Prozent]
----------------	---------------------------	--------------------------	-------------------------

1	15	20	75
2	40	20	200
3	25	20	125
4	10	30	33
5	12	20	60
6	18	30	60
7	12	20	60

Tabelle 12: Korrigierte Auslastung an den Arbeitsstationen

Quelle: eigene Darstellung.

Wie gewohnt können nun daraus die Auftragsströme entwickelt werden. Dabei gilt wiederum die Prämisse, dass alle Materialströme durch die größte Durchsatzschranke zu einem Auftragsstrom zusammengefasst werden. Also ergeben auch hier wieder MS2 und MS3 ASTR1. Danach wird die nächst höher ausgelastete Arbeitsstation betrachtet und alle dortigen, noch nicht zugeordneten, Materialströme werden zu einem Auftragsstrom zusammengefasst. In diesem Fall ist dies AS3 und so bildet MS1 ASTR2. Dies geschieht so lange, bis alle Materialströme einem Auftragsstrom zugeordnet sind.

Jetzt wird zuerst der Durchsatz von ASTR1 bestimmt. Hier müssen die Wertschöpfungsbeiträge aller Materialströme, die komplett durchgesetzt werden konnten, über alle relevanten Arbeitsstationen summiert werden. Allerdings ist es einfacher die Frage zu beantworten, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Auftrag vom Beginn einer Bearbeitungsreihenfolge bis zu ihrem Ende komplett abgearbeitet wird. Diese Wahrscheinlichkeit lässt sich bestimmen, indem man die einzelnen Abarbeitungswahrscheinlichkeiten aller Bearbeitungsstationen miteinander multipliziert, die ein Auftrag bzw. Materialstrom vom Anfang bis zum Ende durchläuft. Analog zur belastungsorientierten Auftragsfreigabe lässt sich dabei folgender, allgemeiner Zusammenhang ableiten:<sup>72</sup>

$$ABFE_{MSi, \text{gesamt}} = \prod_{j=1}^n ABFE_{ASj} \quad [4.7]$$

Für die MS2 und MS3 ergeben sich nun in diesem Fallbeispiel folgende Gesamtabfertigungsfaktoren:

---

<sup>72</sup> Vgl. Kapitel 3.

Materialstrom	$ABFE_{gesamt}$
2	0,4
3	0,5

Tabelle 13: Gesamtabfertigungsfaktoren MS2 und MS3

Quelle: eigene Darstellung.

Um jetzt den Durchsatz eines Materialstromes zu berechnen, wird die gesamte Einlastung des Materialstromes über alle Arbeitsstationen mit dem gesamten Abfertigungsfaktor multipliziert. Wenn nun die abgewerteten Arbeitsinhalte aller Materialströme summiert werden, erhält man den Durchsatz des Auftragsstromes:

$$Durchsatz_{ASTR i} = \sum_{j=1}^m (ABFE_{MS j, gesamt} \times \sum_{i=1}^n Einlastung_{MS j, AS i}) \quad [4.8]$$

Damit lässt sich nun der Durchsatz von ASTR1 berechnen:

$$Durchsatz_{ASTR 1} = \sum_{j=2}^3 ABFE_{MS j, gesamt} \times \sum_{i=2}^6 Einlastung_{MS j, alt AS i} = 54 \frac{h}{Periode} \quad [4.8a]$$

Als Durchsatz von ASTR1 wird  $54 \frac{h}{Periode}$  errechnet.

Dem wird nun die Einlastung gegenübergestellt. Es gibt nun zwei Möglichkeiten eine Einlastung anzugeben. Einerseits kann die vorher geplante Einlastung übernommen werden. Diese wird, wie bereits bekannt, nach Formel 2.3 berechnet:<sup>73</sup>

$$Einlastung_{ASTR i, geplant} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Einlastung_{MS i, AS j} \quad [2.3]$$

Im vorliegenden Fall ist dies also die Einlastungssumme von MS2 und MS3 über AS2, AS3, AS4 und AS6:

$$Einlastung_{ASTR 1} = \sum_{i=2}^3 \sum_{j=2}^6 Einlastung_{MS i, AS j} = 120 \frac{h}{Periode} \quad [2.3a]$$

Allerdings wurde im Verlauf des Algorithmus die Einlastung ausgehend von der ersten Arbeitsstation immer wieder korrigiert. Wenn Aufträge bei der vorherigen Bearbeitungsstation durchgesetzt werden konnten, so wurden sie auch auf den nachfolgenden Bearbeitungsstationen eingelastet. Dementsprechend kann die realistische Einlastung berechnet werden,

<sup>73</sup> Vgl. Kapitel 2.1.2.

## Erarbeitung eines Lösungsvorschlages zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge

indem die Summe der Differenzen der aktuellen Einlastungen und Reihenfolgenabschlägen in den Belastungskonten summiert wird:

$$\text{Einlastung}_{ASTR i, real} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \text{Einlastung}_{MS i, AS j, korrigiert} \quad [4.8]$$

Im vorliegenden Fallbeispiel ergibt sich damit folgender Wert:

$$\text{Einlastung}_{ASTR i, real} = \sum_{i=2}^3 \sum_{j=2}^6 \text{Einlastung}_{MS i, AS j, korrigiert} = 78 \frac{h}{\text{Periode}} \quad [4.8a]$$

Die gesamte, reale Einlastung von ASTR1 beträgt nun also  $78 \frac{h}{\text{Periode}}$ .

Im Anschluss daran werden der direkte und der indirekte Durchsatz berechnet. Der direkte Durchsatz berechnet sich aus der Arbeit, die an der Durchsatzschranke abgearbeitet und durchgesetzt werden kann. Dazu wird die Einlastung der einzelnen Materialströme an der Durchsatzschranke mit den jeweiligen Gesamtabfertigungsfaktoren multipliziert:

$$\text{Durchsatz}_{\text{direkt } ASTR i} = \sum_{j=1}^m ABFE_{MS j, gesamt} \times \text{Einlastung}_{MS j, Durchsatzschranke} \quad [4.9]$$

Im vorliegenden Fallbeispiel ergibt sich dann folgender Wert für den indirekten Durchsatz:

$$\begin{aligned} \text{Durchsatz}_{\text{direkt } ASTR i} &= \sum_{j=2}^3 ABFE_{MS j, gesamt} \times \text{Einlastung}_{MS j, Durchsatzschranke} = \\ &18 \frac{h}{\text{Periode}} \quad [4.9a] \end{aligned}$$

Der indirekte Durchsatz lässt sich, wie bereits bekannt, mit der Formel 2.6 ermitteln:

$$\text{Durchsatz}_{\text{indirekt } ASTR i} = \text{Durchsatz}_{ASTR i} - \text{Durchsatz}_{\text{direkt } ASTR i} \quad [2.6]$$

In diesem Fall ergibt sich dann als indirekter Durchsatz:

$$\text{Durchsatz}_{\text{indirekt } ASTR1} = \text{Durchsatz}_{ASTR1} - \text{Durchsatz}_{\text{direkt } ASTR1} = 36 \frac{h}{\text{Periode}} \quad [2.6b]$$

Auch das Durchsatzpotential kann weiterhin nach Formel 2.4 berechnet werden. Allerdings stellt sich die Frage, ob hier die ursprüngliche oder korrigierte Einlastung verwendet wird. Diese Frage kann dadurch beantwortet werden, dass im Falle eines gesamten Durchsatzes aller Aufträge auch die komplette, ursprüngliche Einlastung in Durchsatz verwandelt wurde.

## Erarbeitung eines Lösungsvorschlages zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge

Um dementsprechend das Potential zu ermitteln, dass im Falle einer Optimierung zu heben wäre, muss die ursprüngliche Einlastung verwendet werden:

$$\text{Durchsatzpotential}_{ASTR i} = \text{Einlastung}_{ASTR i, \text{ ursprünglich}} - \text{Durchsatz}_{ASTR i} \quad [2.4]$$

Hier ergibt sich dann ein Durchsatzpotential in folgender Höhe:

$$\text{Durchsatzpotential}_{ASTR1} = \text{Einlastung}_{ASTR1, \text{ ursprünglich}} - \text{Durchsatz}_{ASTR1} = 66 \frac{h}{\text{Periode}} \quad [2.4b]$$

Zum besseren Verständnis sind die Kennzahlen der eben errechneten Materialströme und Bearbeitungsstationen in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

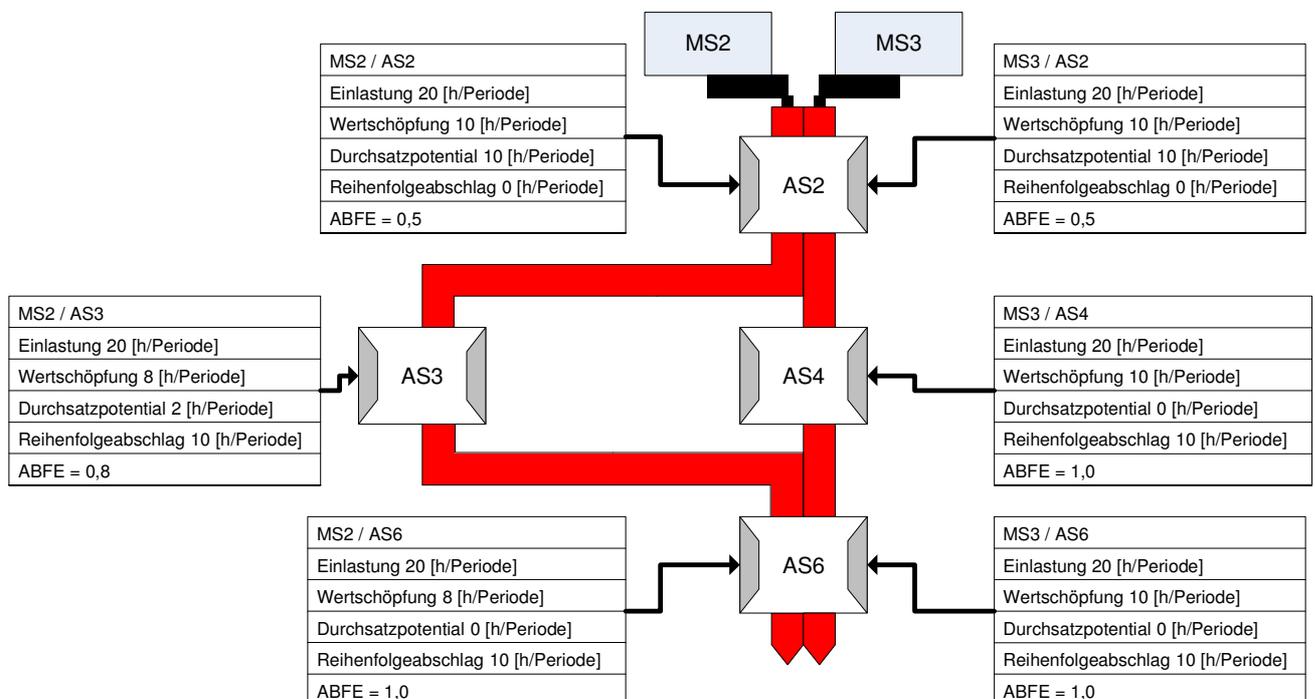


Abbildung 27: Zusammenfassung ASTR1 mit Reihenfolgeberücksichtigung

Quelle: eigene Darstellung.

Daraus lassen sich nun zur Probe alle Kennzahlen zur Berechnung des Durchsatzes ableiten. Die Einlastung kann über alle Arbeitsstationen und Materialströme summiert werden, dies ergibt  $120 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Der gesamte Abfertigungsfaktor eines Auftragsstromes lässt sich errechnen, indem alle arbeitsstationsspezifischen Abfertigungsfaktoren eines Materialstromes multipliziert werden. Dies ergibt bei MS2 einen Wert von 0,4 und bei MS3 einen Wert von 0,5. Multipliziert man nun die gesamte Einlastung eines Materialstromes mit dem jeweiligen,

gesamten Abfertigungsfaktor, so erhält man den Durchsatz. Der direkte Durchsatz errechnet sich aus dem Produkt der Einlastung jedes Materialstromes an der Durchsatzschranke mit dem jeweiligen, gesamten Abfertigungsfaktor. Der indirekte Durchsatz ergibt sich aus der Differenz von Gesamtdurchsatz zu direktem Durchsatz. Das Durchsatzpotential wiederum errechnet sich aus der Differenz von Einlastung und Gesamtdurchsatz.

Im Gegensatz zur ursprünglichen Durchsatzkennlinie lässt sich hier jedoch keine analytische Funktion aus den Kennwerten ableiten, damit eine Visualisierung dargestellt werden kann.<sup>74</sup> Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass sich der Abfertigungsfaktor eines Auftragsstromes nun nicht mehr alleine in Abhängigkeit der Belastung an der Durchsatzschranke verändert, sondern in Abhängigkeit der Belastung aller durchlaufenen Bearbeitungsstationen. Eine numerische Lösung ist allerdings problemlos möglich und wird hier auch demonstriert. Dabei wird jeweils die Einlastung von MS2 und MS3 von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  auf  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  in Schritten von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  hochgezählt, einmal der Algorithmus durchlaufen und der Durchsatz errechnet. MS1 ist konstant. Die Ergebnisse<sup>75</sup> dazu sind in der folgenden Tabelle darstellt:

---

<sup>74</sup> Vgl. Kreuzfeldt(1995), S.77ff.

<sup>75</sup> Die ausführlichen Berechnungstabellen für ASTR1 befinden sich in Anhang A.

Einlastung	Durchsatz
6	6.00
12	12.00
18	18.00
24	24.00
30	30.00
36	35.14
42	40.09
48	44.87
54	49.50
60	54.00
66	54.00
72	54.00
78	54.00
84	54.00
90	54.00
96	54.00
102	54.00
108	54.00
114	54.00
120	54.00

Tabelle 14: Numerische Berechnung des Durchsatzes von ASTR1

Quelle: eigene Darstellung.

Auf Grundlage dieser Daten kann nun die neue Durchsatzkennlinie gezeichnet werden. Zum Vergleich dazu wird ergänzend die Durchsatzkennlinie nach dem alten Algorithmus eingezeichnet:

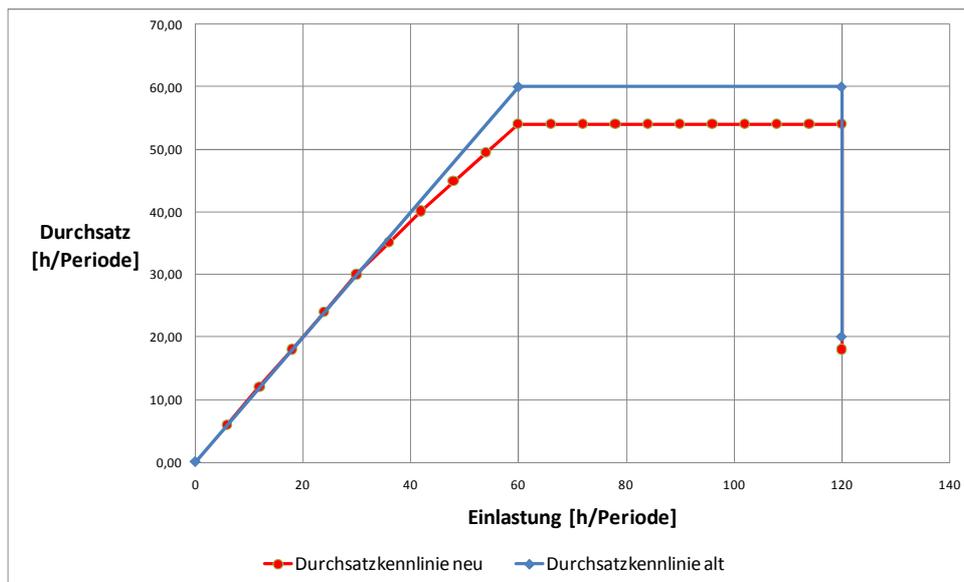


Abbildung 28: Vergleich der alten und neuen Durchsatzkennlinie von ASTR1

Quelle: eigene Darstellung.

## Erarbeitung eines Lösungsvorschlages zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge

Der Vergleich der beiden Kennlinien zeigt, dass ab einer Einlastung von etwa  $30 \frac{h}{\text{Periode}}$  auf MS2 und MS3 die Durchsatzkennlinie bereits den Bereich verlässt, in dem der Durchsatz im gleichen Verhältnis zur Einlastung ansteigt. Dies ist auch vollkommen nachvollziehbar, da ab dieser Belastung bereits AS3, die auch durch MS1 beansprucht wird, zum Engpass wird. Je mehr die Einlastung ansteigt, desto stärker werden auch diese Behinderungen und desto geringer wächst der Durchsatz bis das Wachstum schließlich vollkommen zum Erliegen kommt. Dies ist bei einer Einlastung von  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$  der Fall, da dort AS2 zum Engpass wird und damit die Belastung von AS3 auch nicht weiter ansteigt.

Im nächsten Schritt wird nun die Durchsatzkennlinie für ASTR2 berechnet. Dazu wird der gesamte Abfertigungsfaktor benötigt. Nach Formel 4.7 kann dieser bestimmt werden und beträgt für ASTR2 0,8. Die gesamte Einlastung hat einen Wert von  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$  und der Durchsatz beträgt nach Formel 4.8  $48 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Der direkte Durchsatz kann nach Formel 4.9 bestimmt werden und liegt bei  $12 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Der indirekte Durchsatz besitzt nach Formel 2.6 dementsprechend eine Höhe von  $36 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Zuletzt kann noch das Durchsatzpotential in Höhe von  $12 \frac{h}{\text{Periode}}$  mit Formel 2.4 bestimmt werden. Zum besseren Verständnis sind die Kennzahlen der eben errechneten Materialströme und Bearbeitungsstation in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

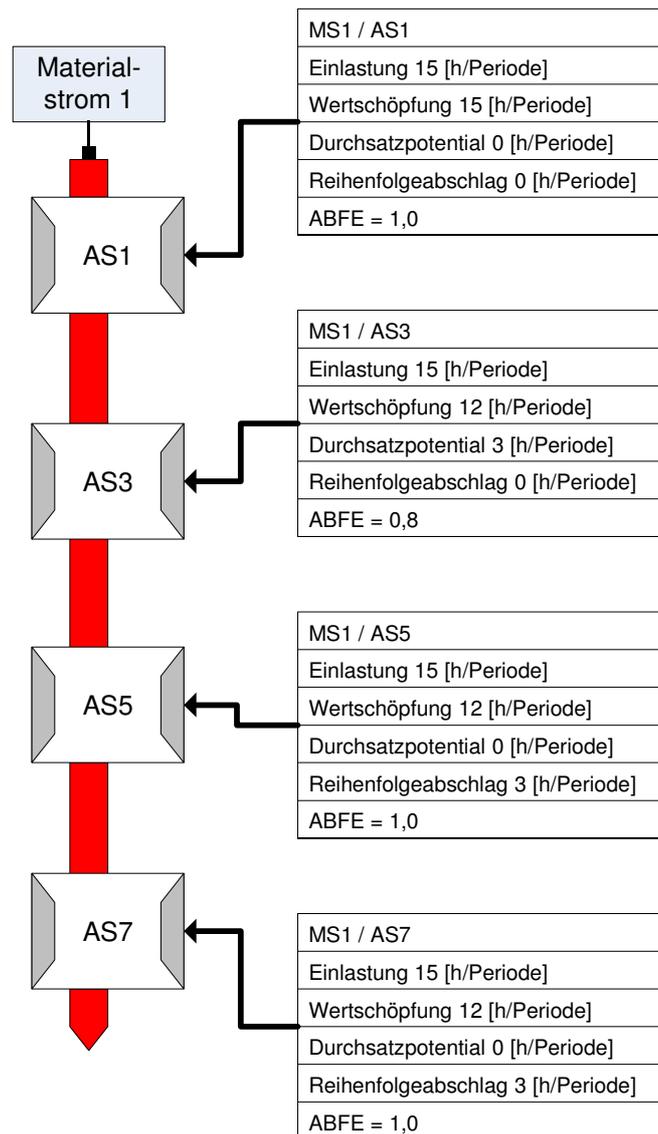


Abbildung 29: Zusammenfassung ASTR2 mit Reihenfolgeberücksichtigung

Quelle: eigene Darstellung.

Zur Probe können nun noch einmal die Einlastung und der Durchsatz ermittelt werden. Die Einlastung von MS1 bzw. ASTR2 wird dabei über alle Arbeitsstationen summiert und ergibt wie erwartet einen Wert von  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Um den Durchsatz zu erhalten, muss zunächst der gesamte Abfertigungsfaktor ermittelt werden. Dazu werden die Abfertigungsfaktoren aller Arbeitsstationen miteinander multipliziert und es ergibt sich 0,8. Dieser Faktor wird mit der Einlastung auf jeder Arbeitsstation multipliziert. Der entstehende Durchsatz beträgt  $48 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Als direkter Durchsatz wird der Durchsatzbeitrag der Durchsatzschränke bezeichnet. Hier ist dies AS3 mit einem Durchsatzbeitrag von  $12 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Der indirekte Durchsatz ergibt sich aus der Differenz von Gesamtdurchsatz und indirektem Durchsatz, hier  $36 \frac{h}{\text{Periode}}$ .

## Erarbeitung eines Lösungsvorschlages zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge

Auch hier kann nun die Durchsatzkennlinie nur numerisch bestimmt werden. Dazu wird die Einlastung an MS1 in Schritten von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  bis auf  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  pro Arbeitsstation gesteigert und die Belastung durch ASTR2 bleibt konstant. Anhand des Algorithmus wird der jeweilige Durchsatz berechnet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle noch einmal grafisch dargestellt:<sup>76</sup>

Einlastung	Durchsatz
4	4.00
8	8.00
12	12.00
16	16.00
20	20.00
24	24.00
28	28.00
32	32.00
36	36.00
40	40.00
44	41.90
48	43.64
52	45.22
56	46.67
60	48.00

Tabelle 15: Numerische Berechnung des Durchsatzes von ASTR2

Quelle: eigene Darstellung.

Die iterativ berechnete Durchsatzkennlinie wird nun der bereits bekannten Durchsatzkennlinie<sup>77</sup> grafisch gegenübergestellt:

---

<sup>76</sup> Die ausführlichen Berechnungstabellen für ASTR2 befinden sich in Anhang B.

<sup>77</sup> Vgl. Kapitel 2.2.2.

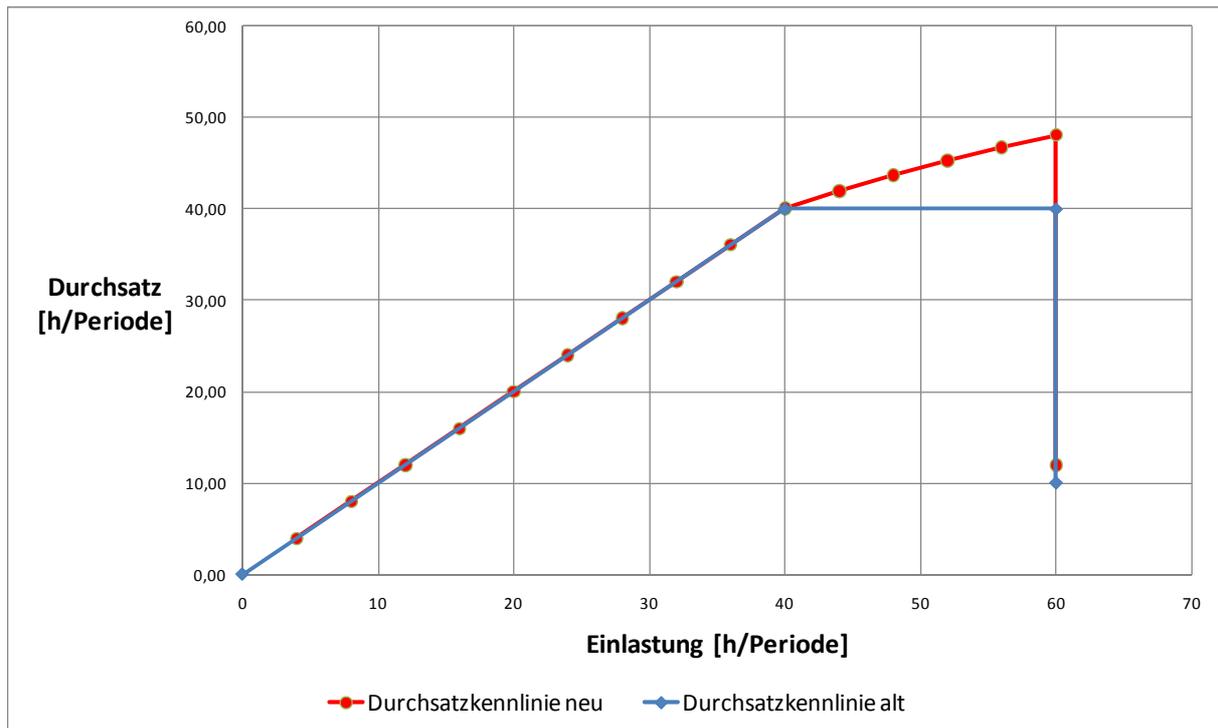


Abbildung 30: Vergleich der alten und neuen Durchsatzkennlinie von ASTR2

Quelle: eigene Darstellung.

Hierbei ist auffällig, dass die neue Kennlinie nach dem Knickpunkt bei einer Einlastung von  $40 \frac{h}{\text{Periode}}$  nicht zu einer waagrechte Linie wird, sondern dass der Durchsatz immer noch unterproportional ansteigt. Dies kann dadurch erklärt werden, dass ab diesem Zeitpunkt AS3 zwar überlastet, allerdings keine feste Kapazität für MS2 reserviert wird und so kann der Durchsatz von ASTR2 noch weiter unterproportional gesteigert werden. Der Grund dafür ist die fehlende Priorisierung. Alle ankommenden Aufträge besitzen vor AS3 die gleiche Priorität und damit auch die gleiche Wahrscheinlichkeit abgearbeitet zu werden. Die Wahrscheinlichkeit für den Durchsatz eines Auftrages steigt jedoch mit dem Arbeitsinhalt des Auftragsstromes relativ zur gesamten Einlastung an der Arbeitsstation. Der Grund hierfür liegt in der Nicht-Berücksichtigung von Prioritäten. Je mehr Aufträge eines Auftragsstromes vorhanden sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass er durchgesetzt wird.

Nun soll auch ein Vergleich zwischen der, nach dem bekannten Algorithmus berechneten Gesamtkennlinie und der numerisch berechneten Gesamtkennlinie, gezogen werden. Dabei wird die Einlastung jedes Materialstromes in insgesamt 20 Schritten von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  bis auf  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  bzw.  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  gesteigert. Das bedeutet, dass MS1 in Schritten von  $0,75 \frac{h}{\text{Periode}}$  angehoben wird und MS2 und MS3 in Schritten von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Damit wird die Einlastung als gleichverteilt angenommen. Bei jedem Schritt wird die Durchsatzkennlinie iterativ nach dem

neuen Algorithmus berechnet. Die folgende Tabelle stellt die errechneten Werte zusammengefasst dar:<sup>78</sup>

Einlastung	Durchsatz
9	9.00
18	18.00
27	27.00
36	36.00
45	45.00
54	54.00
63	63.00
72	72.00
81	81.00
90	90.00
99	93.00
108	96.00
117	99.00
126	100.24
135	100.59
144	100.91
153	101.21
162	101.49
171	101.75
180	102.00

Tabelle 16: Numerische Berechnung des der Gesamtdurchsatzkennlinie mit gleichverteilter Einlastung

Quelle: eigene Darstellung.

Wie zu sehen ist, steigt hier der Durchsatz über einen Wert von  $100 \frac{h}{\text{Periode}}$  hinaus. Der Grund dafür liegt an AS3. Dort treffen ASTR1 und ASTR2 aufeinander. Wie bereits bei der Durchsatzkennlinie von ASTR2 erläutert, lässt sich der Durchsatz auch dann noch steigern, wenn AS3 bereits seine volle Auslastung erreicht hat. Denn nun wird keine Kapazität mehr für einen Auftragsstrom reserviert. Der Durchsatz eines Auftragsstromes hängt nur noch von der Wahrscheinlichkeit ab, dass er an den Stationen auch wirklich durchgesetzt wird. Die Wahrscheinlichkeit ist jedoch nur von der Einlastung an einer Arbeitsstation abhängig, da von nicht priorisierten Aufträgen ausgegangen wird. Damit setzt ein Auftragsstrom desto mehr durch, je mehr Einlastung er besitzt. Im gleichen Maße verringert sich bei einer überlasteten Arbeitsstation aber der Durchsatz eines Auftragsstromes mit geringerer Einlastung. Dies geschieht hier an AS3. AS3 ist ausgelastet, sobald von MS1 und MS2 jeweils  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$

<sup>78</sup> Die ausführlichen Berechnungstabellen der Gesamtkennlinie mit gleichverteilter Einlastung befinden sich in Anhang C.

## Erarbeitung eines Lösungsvorschlages zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge

eingelastet werden. Die Einlastung von MS2 bleibt jedoch konstant bei  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$ , da hier AS2 bereits den Durchsatz auf diese Größe beschränkt. Die Einlastung von MS1 steigt jedoch noch an bis auf  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Dementsprechend steigt auch der Durchsatz von MS1 und der Durchsatz von MS2 wird reduziert. Da jedoch MS1 4 Arbeitsstationen durchläuft und MS2 nur 3 Arbeitsstationen, ist der Arbeitsinhalt eines Auftrages innerhalb von MS1 größer als der eines Auftrages innerhalb von MS2.

Wird beispielsweise davon ausgegangen, dass ein Auftrag auf jeder Arbeitsstation  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  an Kapazität benötigt, so enthält ein Auftrag innerhalb von MS1  $4 \frac{h}{\text{Periode}}$  und ein Auftrag innerhalb von MS2  $3 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Wird jetzt ein Auftrag von MS1 mehr durchgesetzt auf Kosten eines Auftrags von MS2, so ergibt sich eine positive Differenz von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Dies geschieht so lange bis die Einlastung von MS1 auf das Maximum von  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  angewachsen ist. Die Gesamtkennlinie ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

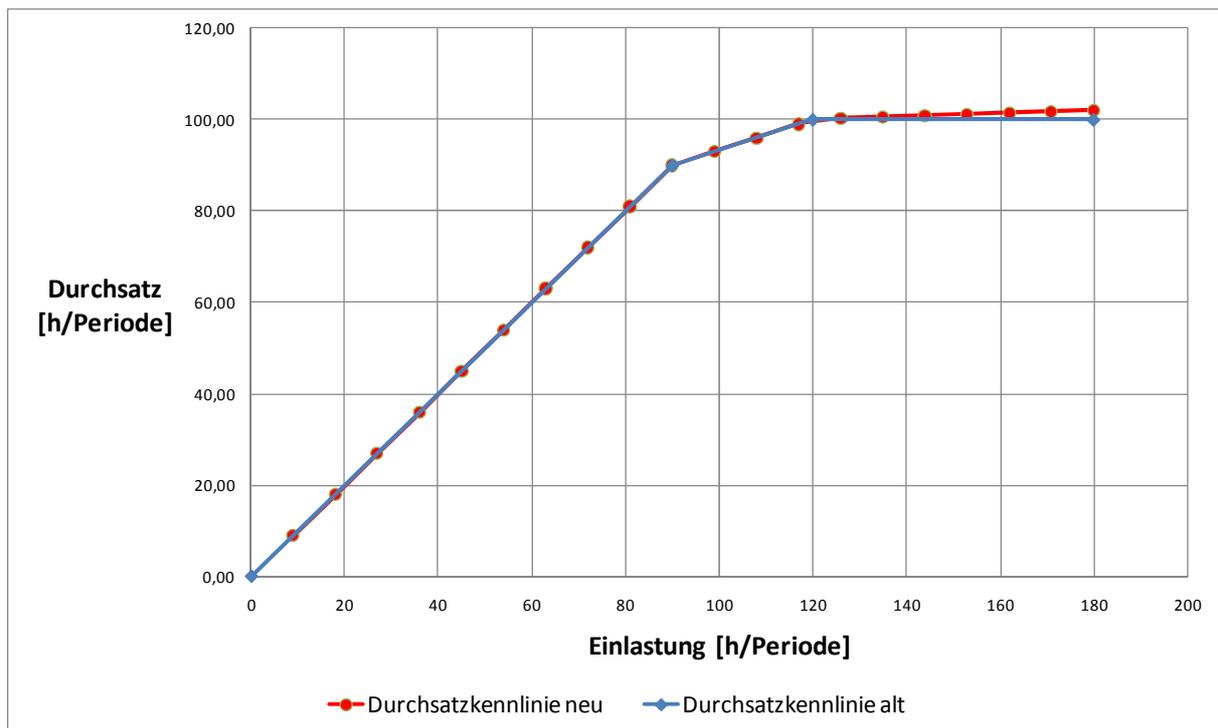


Abbildung 31: Vergleich der alten und neuen Gesamtdurchsatzkennlinie mit gleichverteilter Einlastung

Quelle: eigene Darstellung.

Es ist sichtbar, dass die beiden Kennlinie nahezu deckungsgleich sind. Nur durch den oben beschriebenen Effekt steigt die neu berechnete Kennlinie auch nach dem zweiten Knickpunkt noch weiter an.

Ein interessantes Phänomen ist bei der Berechnung der Durchsatzkennlinie die Verteilung der Einlastung. Bei dem vorliegenden Fallbeispiel wird von einer Gleichverteilung der Auftragsbelastung ausgegangen. Das bedeutet beispielsweise, bei der Berechnung der Gesamtdurchsatzkennlinie wird davon ausgegangen, dass die Einlastung aller drei Materialströme gleichmäßig in jedem Berechnungsschritt um 5 Prozent gesteigert wird. Wird nun die Einlastung anders verteilt, so entsteht eine andere Gesamtkennlinie.

Dies soll kurz an dem vorliegenden Fallbeispiel berechnet werden. Dabei wird angenommen, dass die Einlastung nicht mehr gleichverteilt in 20 Schritten von 5 Prozent gesteigert wird, sondern in Schritten von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Das bedeutet MS2 und MS3 wird in 20 Schritten von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  auf  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  gesteigert. MS1 wird zunächst in 15 Schritten von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  auf  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  gesteigert, in den letzten 5 Schritten wird die Einlastung bei  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  gehalten. Diese Annahme würde dann zutreffen, wenn in einem Produktionssystem nur Aufträge von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  eingelastet werden. Die folgende Tabelle stellt die errechneten Werte dar:<sup>79</sup>

---

<sup>79</sup> Die ausführlichen Berechnungstabellen der Gesamtkennlinie mit gleicher Einlastungssteigerung befinden sich in Anhang D.

Einlastung	Durchsatz
10	10.00
20	20.00
30	30.00
40	40.00
50	50.00
60	60.00
70	70.00
80	80.00
90	90.00
100	100.00
110	100.48
120	100.91
130	101.30
140	101.67
150	102.00
156	102.00
162	102.00
168	102.00
174	102.00
180	102.00

Tabelle 17: Numerische Berechnung des der Gesamtdurchsatzkennlinie mit gleicher Einlastungssteigerung

Quelle: eigene Darstellung.

Die iterativ berechnete Gesamtdurchsatzkennlinie wird nun der bereits bekannten Durchsatzkennlinie nach dem alten Algorithmus grafisch in Abbildung 28 gegenübergestellt. Dabei fällt auf, dass nun nur noch ein Knickpunkt entsteht. Dies geschieht, da alle Materialströme gleichzeitig eine Einlastung von  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$  erreichen. Da AS2 und AS3 jeweils eine Kapazität von  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  besitzen, erreichen beide gleichzeitig ihre Kapazitätsgrenze und werden zum Engpass. Deshalb fallen die beiden Knickpunkt bei einer gleichverteilten Einlastung hier zu einem einzigen Knickpunkt zusammen. Ab diesem Knickpunkt steigt der Durchsatz nur noch, wie bereits oben erläutert, unterproportional an. Wichtig ist zu beachten, dass hier die gesamte Einlastung nicht verändert wurde. Es wurde lediglich der Steigerungsintervall verändert. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Durchsatzkennlinie auch von der Verteilung der Einlastungsfunktion abhängig ist.

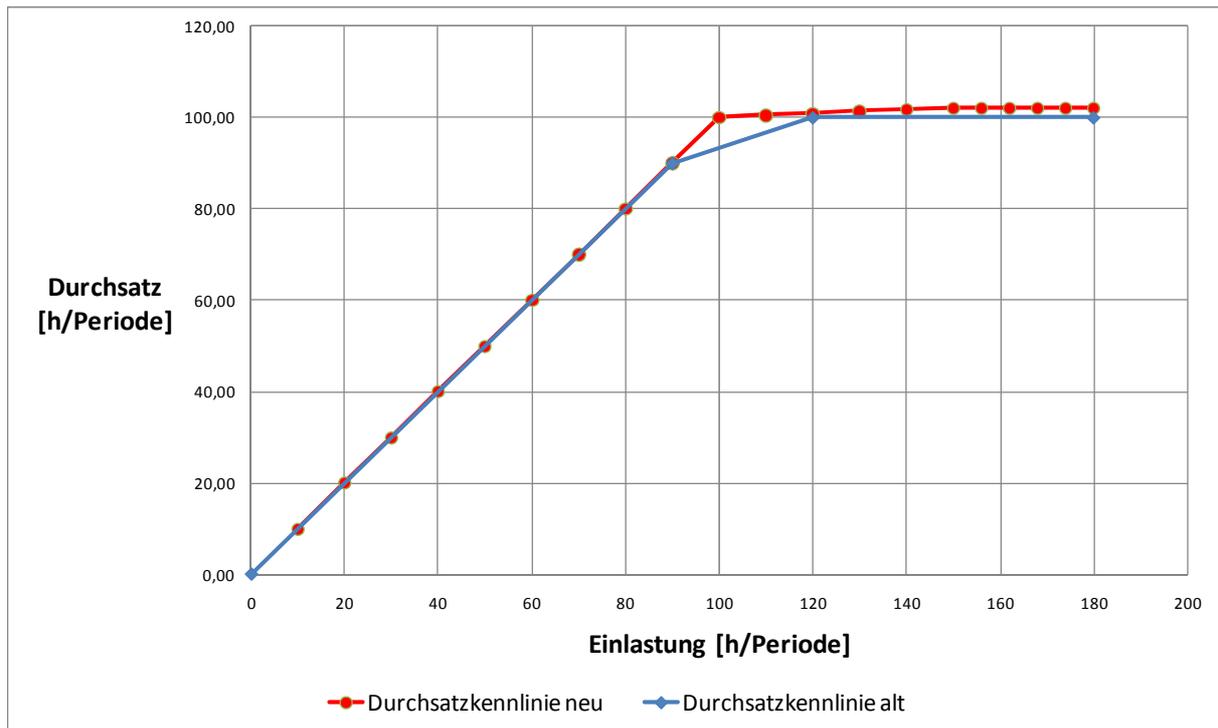


Abbildung 32: Vergleich der alten und neuen Gesamtdurchsatzkennlinie mit gleicher Einlastungssteigerung

Quelle: eigene Darstellung.

Wie aber im Vergleich von Abbildung 29 und 30 zu sehen ist, wird im neuen Algorithmus diese Verteilung bei der Berechnung teilweise berücksichtigt. Der neue Algorithmus ist in der Lage die Verteilung der Auftragsgröße zu berücksichtigen. Damit wird auch eine erste implizite Berücksichtigung von Auftragspriorisierungen getroffen. Denn mit der Reihenfolge der Einlastung ändert sich einerseits der Durchsatz eines Produktionssystems, andererseits steigt aber auch die Abarbeitungswahrscheinlichkeit eines Auftrages, je weiter vorne er sich in der Warteschlange befindet. Heute geht diese Wahrscheinlichkeit jedoch noch von einer Gleichverteilung vor der Arbeitsstation aus. Somit wird nur der durchschnittliche Durchsatz bei einer genau definierten Auftragsreihenfolge berücksichtigt. Für eine genaue Berechnung wäre die Entwicklung eines auftragspezifischen Abfertigungsfaktors notwendig. Dies ist jedoch nicht Gegenstand dieses Ansatzes und sollte in einer weiteren Arbeit gelöst werden.

Die Genauigkeit und Tauglichkeit des hier vorgestellten, neuen Algorithmus wird in den nachfolgenden Kapiteln anhand einer ereignisdiskreten Simulation verifiziert. Vorher wird aber noch eine weitere Verbesserung in der Berechnung des Durchsatzpotentials vorgestellt.

#### 4.3 Differenzierung des Durchsatzpotentials nach der Arbeitsstation

Durch die Anwendung des neuen Algorithmus ist eine weitere Information verfügbar geworden. Bisher wurden nicht durchsetzbare Aufträge als horizontaler Abschnitt der Durchsatzkennlinie visualisiert und als Durchsatzpotential bezeichnet.<sup>80</sup> Dieses Vorgehen lässt allerdings keinen Rückschluss darauf zu, wo sich dieses Durchsatzpotential befindet. Denn es ist nicht so, dass das gesamte Durchsatzpotential an der Durchsatzschranke eines Auftragsstromes als Bestand zum Liegen kommt. Beispielhaft kann dazu auf die Berechnung von ASTR1 verwiesen werden. Dort bildet sich ein Bestand in Höhe von  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  vor AS2 und weiterhin bleiben  $2 \frac{h}{\text{Periode}}$  vor AS3 zurück. Das Durchsatzpotential in Höhe von  $66 \frac{h}{\text{Periode}}$  suggeriert jedoch, dass die gesamte Arbeit vor der Durchsatzschranke AS2 liegt. Ein darauf abgestimmte Kapazitätserhöhung an der Durchsatzschranke um  $22 \frac{h}{\text{Periode}}$  würde jedoch nicht das gesamte Durchsatzpotential in Durchsatz verwandeln, da bereits vor AS3  $2 \frac{h}{\text{Periode}}$  als Durchsatzpotential liegen.

Der neue Algorithmus bietet nun anhand seiner arbeitsstationsbezogenen Belastungskonten die Möglichkeit zur Differenzierung, wie viel Durchsatzpotential an der Durchsatzschranke verbleibt und wie viel an vor- und nachgelagerten Stationen.<sup>81</sup> Die Überlegungen werden zunächst beispielhaft an ASTR1 demonstriert.

Dabei wird von der Überlegung einer optimalen Durchsatzkennlinie ausgegangen. Diese wäre für ASTR1 gegeben, wenn einer Einlastung von  $120 \frac{h}{\text{Periode}}$  ein Durchsatz von ebenfalls  $120 \frac{h}{\text{Periode}}$  gegenübersteht. Wird für diesen Fall die Durchsatzkennlinie aufgezeichnet, so ergibt sich eine Winkelhalbierende. Die Unterscheidung in direkten und indirekten Durchsatz ist für die weiteren Betrachtungen nicht notwendig, da hier die Darstellung des Durchsatzpotentials besprochen wird. Zusammen mit der Kennlinie von ASTR1 wird die optimale Durchsatzkennlinie in dem folgenden Diagramm dargestellt:

---

<sup>80</sup> Vgl. Kapitel 2.2.2.

<sup>81</sup> Vgl. Altfeld(2008), S.58f.

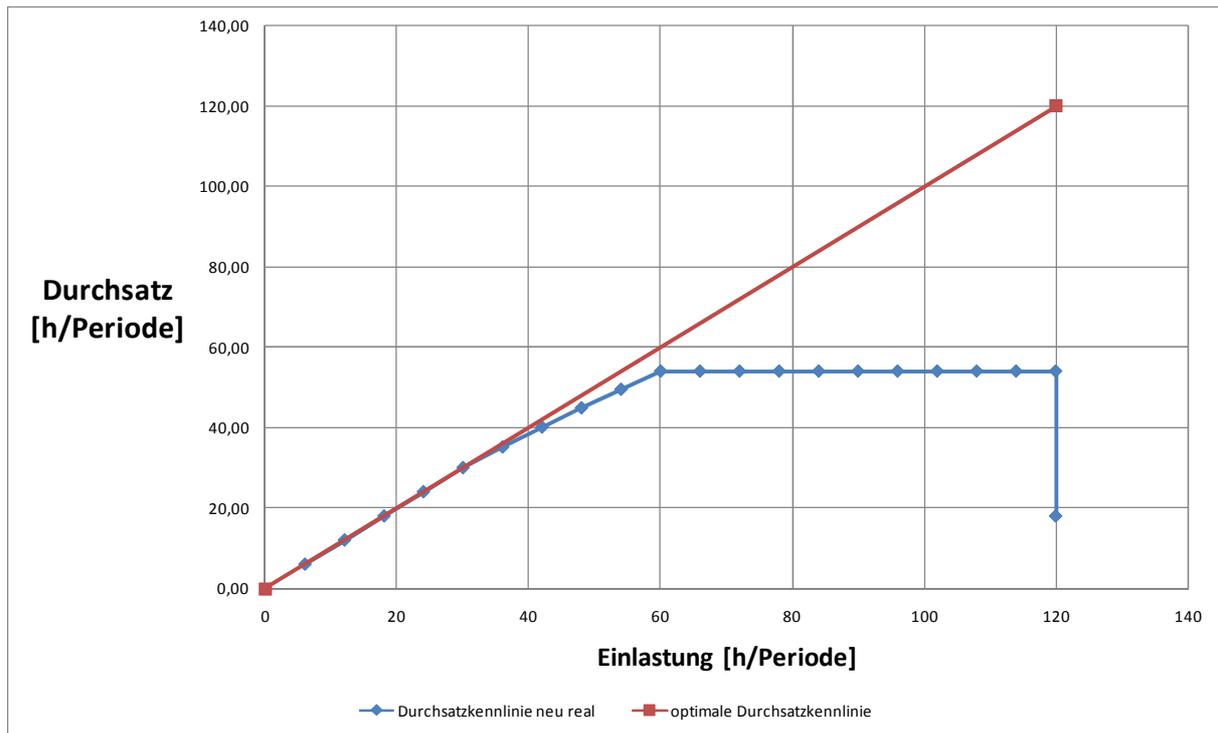


Abbildung 33: Optimale und berechnete Durchsatzkennlinie von ASTRI

Quelle: eigene Darstellung.

Das Diagramm kann nun wie folgt interpretiert werden. Die Strecke zwischen dem Endpunkt der berechneten Durchsatzkennlinie, hier bei einer Einlastung von  $120 \frac{h}{\text{Periode}}$ , und der Einlastungsachse stellt den Durchsatz dar.<sup>82</sup> Dabei kann differenziert werden nach direktem Durchsatz, also dem Durchsatzbeitrag der Durchsatzschranke, und indirektem Durchsatz, dem Durchsatzbeitrag vor- und nachgelagerter Arbeitsstationen. Damit kann die Auswirkung einer Kapazitätssteigerung an der Durchsatzschranke eingeschätzt werden.

Wird nun die Differenz zwischen dem Endpunkt der optimalen Durchsatzkennlinie und dem Endpunkt der berechneten Durchsatzkennlinie gebildet, so erhält man das Durchsatzpotential. Das Durchsatzpotential stellt die maximale, theoretische Durchsatzsteigerung des gesamten Auftragsstromes dar. Da ein Auftragsstrom innerhalb einer Periode nur so viel Arbeit durchsetzen kann wie eingelastet wurde, entspricht der maximale Durchsatz der gesamten Einlastung. Nun kann die Idee einer Differenzierung des Durchsatzes nach seinem Entstehungsort auch auf das Durchsatzpotential übertragen werden.

Im Verlauf des Algorithmus wurde das Durchsatzpotential einzelner Arbeitsstationen bestimmt und in den Belastungskonten eingetragen. Dies erlaubt nun eine Differenzierung zwi-

<sup>82</sup> Vgl. Kapitel 2.2.2.

## Erarbeitung eines Lösungsvorschlages zur Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge

schen direktem Durchsatzpotential (im Folgenden kurz:  $DP_{dir}$ ) und indirektem Durchsatzpotential (im Folgenden kurz:  $DP_{ind}$ ).

Dabei wird das direkte Durchsatzpotential als der Auftragsbestand bezeichnet, dessen Durchsatz von der Durchsatzschranke behindert wird. Das indirekte Durchsatzpotential hingegen ist der Auftragsbestand, dessen Durchsatz von anderen Stationen beschränkt wird. Allerdings muss beachtet werden, dass sich das Durchsatzpotential auf den gesamten Arbeitsinhalt über alle Arbeitsstationen des Auftragsstromes bezieht. Dementsprechend muss das Durchsatzpotential relativ zum direkten und indirekten Anteil verteilt werden.

Das direkte Durchsatzpotential berechnet sich dann nach:

$$DP_{dir, \text{gesamt } ASTRi} = \text{Einlastung}_{ASTRi} \times \frac{DP_{\text{Durchsatzschranke}}}{DP_{\text{Durchsatzschranke}} + DP_{\text{andere AS}}} \quad [4.10]$$

Im vorliegenden Fallbeispiel ergibt sich für ASTR1 folgendes direktes Durchsatzpotential

$$DP_{dir, \text{gesamt } ASTR1} = \text{Einlastung}_{ASTR1} \times \frac{DP_{AS2}}{DP_{AS2} + DP_{AS3}} = 60 \frac{h}{\text{Periode}} \quad [4.10a]$$

Das bedeutet, dass nur ein Durchsatzpotential von  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$  direkt durch Kapazitätssteigerungen an der Durchsatzschranke beeinflusst werden kann.

Das indirekte Durchsatzpotential errechnet sich analog dazu:

$$DP_{ind, \text{gesamt } ASTRi} = \text{Einlastung}_{ASTRi} \times \frac{DP_{\text{andere AS}}}{DP_{\text{Durchsatzschranke}} + DP_{\text{andere AS}}} \quad [4.11]$$

Für das indirekte Durchsatzpotential des hier genannten Fallbeispiels ergibt sich demnach:

$$DP_{ind, \text{gesamt } ASTR1} = \text{Einlastung}_{ASTR1} \times \frac{DP_{AS3}}{DP_{AS2} + DP_{AS3}} = 6 \frac{h}{\text{Periode}} \quad [4.11a]$$

$6 \frac{h}{\text{Periode}}$  können also nicht durch Kapazitätssteigerungen an der Durchsatzschranke beeinflusst werden.

Nun muss eine Möglichkeit zur Visualisierung des direkten und indirekten Durchsatzpotentials gefunden werden. Dazu kann auf die Überlegung des Belastungskonto zurückgegriffen

werden. Diese Überlegung geht davon aus, dass die gesamte Einlastung eines Auftragsstromes an einer Arbeitsstation abgearbeitet wird, Bestand bildet oder die Arbeitsstation erst gar nicht erreicht.

Überträgt man diese Überlegung auf einen Auftragsstrom, so muss die gesamte Einlastung des Auftragsstromes entweder in Durchsatz münden oder als Durchsatzpotential liegen bleiben. Wird alles durchgesetzt, kann noch danach differenziert werden, ob dieser Durchsatz an der Durchsatzschranke erzielt wird oder auf vor- bzw. nachgelagerten Arbeitsstationen. Wird die Einlastung nicht durchgesetzt, so besteht noch die Möglichkeit, dass die Einlastung Durchsatzpotential bildet. Dieses Durchsatzpotential kann sich nun ebenfalls an der Durchsatzschranke oder an vor- bzw. nachgelagerten Arbeitsstationen bilden. In beiden Fällen kann also nach direkten und indirekten Faktoren unterschieden werden.

Die optimale Durchsatzkennlinie stellt nun den Durchsatz dar, der maximal mit dieser Einlastung zu erzielen ist. Dabei wird jede Einheit Einlastung in Durchsatz umgewandelt werden. Es ergibt sich eine Winkelhalbierende. Diese Winkelhalbierende stellt die Grenze der realen Durchsatzkennlinie dar. Sie kann nur im Grenzfall auf dieser Winkelhalbierenden liegen. Nun kann die reale Durchsatzkennlinie zusätzlich in das Diagramm gezeichnet werden.

Wichtig ist die Betrachtung der Endpunkte der Durchsatzkennlinie. Wie bereits gezeigt, stellt die Differenz zwischen Endpunkt der realen Durchsatzkennlinie und der Einlastungsachse den Durchsatz eines Auftragsstromes dar. Die Differenz zwischen Endpunkt der realen und der optimalen Durchsatzkennlinie wiederum visualisiert das vorhandene Durchsatzpotential, das bisher noch nicht in Durchsatz umgewandelt werden konnte.

Das direkte Durchsatzpotential wird als Strecke nach oben symbolisiert und stellt das Durchsatzpotential der vor- bzw. nachgelagerten Arbeitsstationen dar. Die freie Strecke zwischen dem indirekten Durchsatzpotential und dem Endpunkt der optimalen Durchsatzkennlinie visualisiert das direkte Durchsatzpotential vor der Durchsatzschranke.

Für ASTR1 wird dies in der nachfolgenden Abbildung beispielhaft dargestellt:

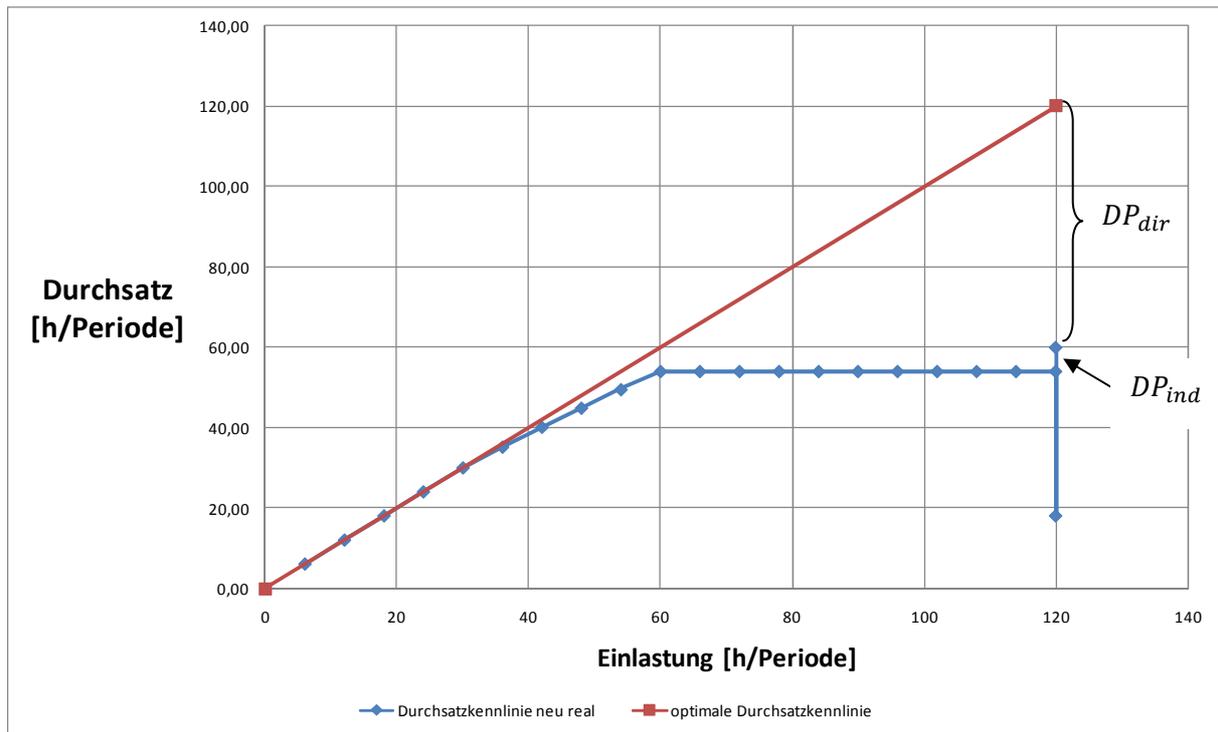


Abbildung 34: Durchsatzkennlinie von ASTR1 mit Durchsatzpotentialdifferenzierung

Quelle: eigene Darstellung.

Hier kann ein indirektes Durchsatzpotential in Höhe von  $6 \frac{h}{\text{Periode}}$  abgelesen werden und ein direktes Durchsatzpotential von  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Im Gegensatz zum Durchsatz ist beim Durchsatzpotential ein sehr geringes Verhältnis von indirektem zu direktem Durchsatzpotential vorteilhaft. Denn dies bedeutet, dass durch eine Kapazitätserhöhung am Engpass sehr viel Durchsatzpotential beeinflusst werden kann. Als Maßgröße dafür wird der Durchsatzpotentialquotient, im Folgenden kurz DPQ, definiert:

$$DPQ_{ASTR i} = \frac{DP_{ind, ASTR i}}{DP_{dir, ASTR i}} \quad [4.12]$$

Im Falle von ASTR1 ergibt sich ein Durchsatzpotentialquotient von:

$$DPQ_{ASTR 1} = \frac{DP_{ind, ASTR 1}}{DP_{dir, ASTR 1}} = 0,1 \quad [4.12]$$

Das bedeutet, hier kann durch die Erhöhung der Kapazität an der Durchsatzschranke sehr viel mehr Durchsatzpotential beeinflusst werden, als an anderen Arbeitsstationen.

Problematisch dabei ist allerdings, dass der Pfeil nach oben bisher eine freie Kapazität symbolisiert. Dies ist allerdings nur scheinbar ein Problem. Denn freie Kapazität besteht nur, wenn die Durchsatzschranke nicht voll ausgelastet ist. Das bedeutet, dass die Arbeitsstation mit dem höchsten Verhältnis von Belastung zu Kapazität noch freie Kapazitäten besitzt. Dementsprechend kann sich vor dieser Arbeitsstation auch kein Durchsatzpotential bilden, denn falls die gesamte Einlastung an der Durchsatzschranke abgearbeitet werden kann, so kann sie auch an allen Arbeitsstationen durchgesetzt werden. Daraus ergibt sich im Umkehrschluss, dass sich nur dann Durchsatzpotential bildet, wenn auch wirklich ein Engpass vorhanden ist und es somit keine freie Kapazität gibt.

Zur Hilfe kann in jedes Diagramm die optimale Durchsatzkennlinie gezeichnet werden. Befindet sich die reale Durchsatzkennlinie auf der optimalen und zeigt ein Pfeil nach oben, so wird dadurch eine freie Kapazität an der Durchsatzschranke symbolisiert. Weicht jedoch die reale von der idealen Durchsatzkennlinie ab, so weist der Pfeil nach oben indirektes Durchsatzpotential auf.

Bisher wurde das Durchsatzpotential eines Auftragsstromes immer mit dem horizontalen Anteil an der Durchsatzschranke dargestellt. Dies ist nach dem neuen Algorithmus nicht mehr möglich. So kann es sein, dass bereits die Durchsatzkennlinie eines Auftragsstromes mehr als einen Knickpunkt besitzt. Bei ASTR1 ist dies der Fall. Dort gibt es bereits zwei Knickpunkte. Dies führt dazu, dass die Durchsatzkennlinie die Steigung von 1 verlässt und damit ist auch der horizontale Anteil nicht mehr proportional zum Durchsatzpotential. Im vorliegenden Beispiel würde unter dieser Annahme das Durchsatzpotential  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$  sein.

Nun wird noch das Durchsatzpotential für ASTR2 ermittelt und visualisiert. Dazu wird nach Formel 4.10 zuerst das direkte Durchsatzpotential aus den Werten der Belastungskonten ermittelt:

$$DP_{dir, \text{gesamt ASTR2}} = \text{Einlastung}_{ASTR2} \times \frac{DP_{AS3}}{DP_{AS3}} = 12 \frac{h}{\text{Periode}} \quad [4.10b]$$

Da sich nur vor AS3 Durchsatzpotential in Höhe von  $3 \frac{h}{\text{Periode}}$  aufbaut, ergibt sich auch nur direktes Durchsatzpotential. Zur Probe kann noch einmal das indirekte Durchsatzpotential nach Formel 4.11 ermittelt werden:

$$DP_{ind, \text{gesamt ASTR2}} = \text{Einlastung}_{ASTR2} \times \frac{0}{DP_{AS3}} = 0 \frac{h}{\text{Periode}} \quad [4.11a]$$

Da sich vor keiner anderen Arbeitsstation Durchsatzpotential aufbaut, ergibt sich somit auch kein indirektes Durchsatzpotential. Damit kann nun zur Vollständigkeit der Durchsatzpotentialquotient nach Formel 4.12 errechnet werden:

$$DPQ_{ASTR2} = \frac{DP_{ind, ASTR2}}{DP_{dir, ASTR2}} = 0 \quad [4.12]$$

Diese Kenngröße ergibt den optimalen Wert von 0. Somit kann das gesamte Durchsatzpotential des Auftragsstromes durch eine Kapazitätserhöhung an der Durchsatzschranke beeinflusst werden. Werden nun die reale und optimale Durchsatzkennlinie in ein Diagramm gezeichnet, so entsteht folgendes Bild:

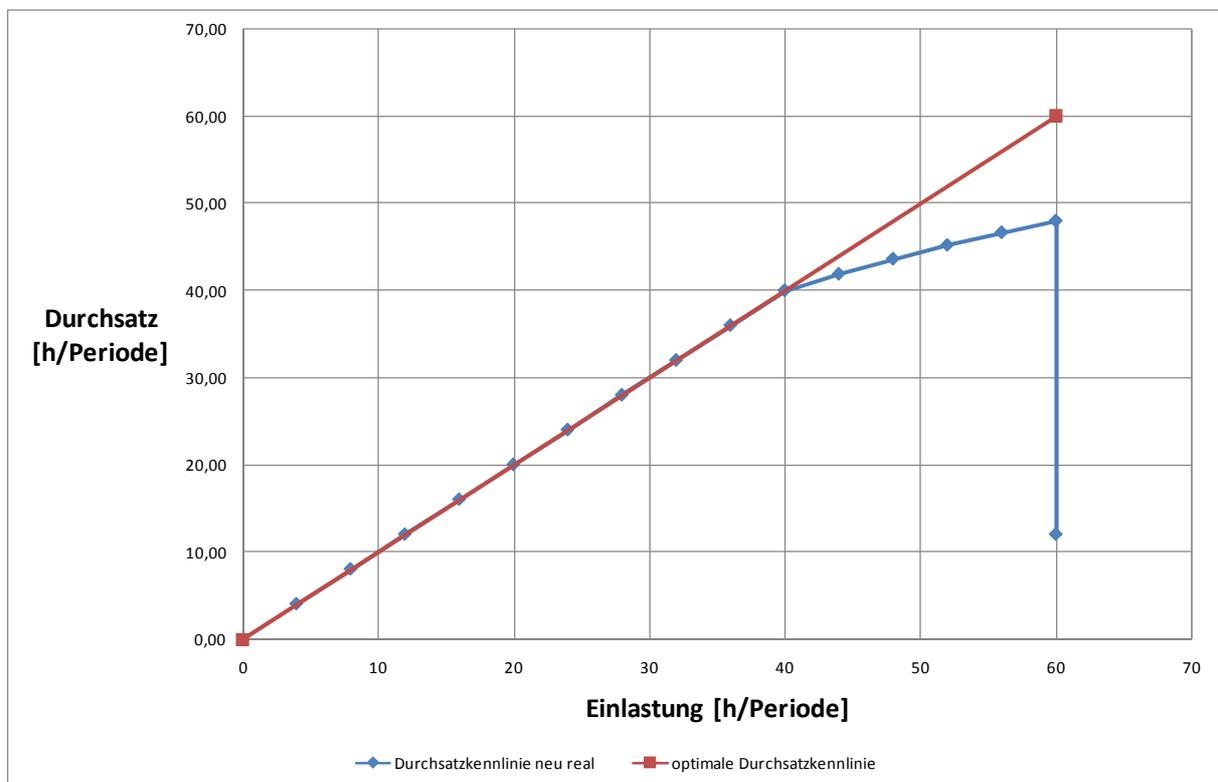


Abbildung 35: Durchsatzkennlinie von ASTR2 mit Durchsatzpotentialdifferenzierung

Quelle: eigene Darstellung.

Da kein indirektes Durchsatzpotential vorhanden ist, ergibt sich an der Durchsatzkennlinie auch kein Pfeil nach oben. Somit wurde nun ein neuer Algorithmus zur Berechnung der Durchsatzkennlinie entwickelt, der die Reihenfolge der Arbeitsgänge berücksichtigt. Im Folgenden wird allerdings nur der neue Algorithmus durch eine ereignisgesteuerte Simulation verifiziert. Die Differenzierung des Durchsatzpotentials sollte durch weitere Arbeiten betrachtet werden.

### 5 Verifikation und Bewertung des Lösungsvorschlages

Nach der Entwicklung eines neuen Algorithmus wird nun die Durchsatzberechnung von Auftragsströmen verifiziert. Dazu wird eine passende Simulationssoftware vorgestellt. Auf deren Basis wird anschließend das bekannte Fallbeispiel implementiert und eine Auswertefunktion programmiert. Es werden vier verschiedene Simulationsfälle ausgearbeitet und nacheinander simuliert und ausgewertet. Anschließend wird eine Bewertung der Simulation durchgeführt, ob der neue Algorithmus eine Verbesserung herbeiführt.

#### 5.1 Erstellung eines Fallbeispiels in plant Simulation

Unter einer Simulation versteht man die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Experimenten an einem Simulationsmodell<sup>83</sup>. Dabei kann eine Simulation definiert werden als:

*„Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“<sup>84</sup>*

Simulationsmodelle werden immer dann eingesetzt, wenn kein kausales Modell aus dem Problem abgeleitet werden kann oder Experimente mit dem realen System nicht möglich sind, wie z.B. einer Wettervorhersage.<sup>85</sup> Besonders vorteilhaft ist dabei, dass auch komplexe Systeme modelliert werden können. Denn ein Simulationsmodell kann auch spezifische Parameter besonders berücksichtigen, obwohl manchmal nicht alle Informationen zur Verfügung stehen oder die Wirtschaftlichkeit der Datenerhebung zu schlecht ist.

Weiterhin wird bei jedem Simulationsmodell eine Validierung notwendig.<sup>86</sup> Diese kann beispielsweise anhand von praktischen Experimenten, analytischen Berechnungen oder einem weiteren Simulationsmodell geschehen. Für jede Änderung innerhalb des Simulationsmodells muss eine weitere Validierung stattfinden. Dementsprechend ist die Gültigkeit eines Simulationsmodells immer nur auf einen bestimmten Fall reduziert.

Um die Arbeitsgangreihenfolge abbilden zu können, müssen in diesem Modell einzelne Produktionsaufträge berücksichtigt werden, die über einen diskreten Arbeitsinhalt und einen genau definierten Starttermin verfügen. Dies legt die Verwendung einer ereignisdiskreten

---

<sup>83</sup> Vgl. Bangsow(2008), S.10.

<sup>84</sup> VDI-Norm 3633.

<sup>85</sup> Vgl. Nyhuis(2005), S.418ff.

<sup>86</sup> Vgl. Ebenda, S.419.

Simulation nahe.<sup>87</sup> Im Gegensatz zur kontinuierlichen Simulation berücksichtigt diese eine endliche Anzahl von Zustandsänderungen innerhalb des simulierten Zeitabschnittes. Diese Zustandsänderungen werden von Ereignissen ausgelöst, die statistisch verteilt sein können. In einem ereignisdiskreten Simulationsmodell entsprechen diese Ereignisse beispielsweise der Ankunft eines Produktionsauftrages an einer Arbeitsstation oder der Fertigstellung eines Auftrages an einer Arbeitsstation.

Da Simulationsmodelle oftmals sehr komplex sind, wird die Modellierung von Softwareprogrammen unterstützt. Eine Möglichkeit zur Simulation bietet das Programm Plant Simulation von Siemens PLM Software.<sup>88</sup> Diese Software greift auf die objektorientierte Simulation zurück, um Produktions- und Logistikprozesse zu simulieren und visualisieren. Somit ist dieses Programm geeignet zum Aufbau eines Simulationsmodells, anhand dessen eine Verifikation des neuen Algorithmus durchgeführt werden kann.

Nun wird für die Verifikation das Produktionssystem des bekannten Fallbeispiels modelliert.<sup>89</sup> Dazu werden zunächst kurz die verwendeten Materialflussbausteine mit ihren Eigenschaften vorgestellt:

- Die **Quelle** erzeugt bewegliche Elemente (im Folgenden kurz BE) nach den vorher getroffenen Grundeinstellungen und Annahmen.<sup>90</sup> Mit diesen Elementen können beispielsweise Produkte oder Teile simuliert werden, die in das Simulationsmodell eintreten. Die Quelle stellt also eine Systemgrenze dar. Von der Quelle können nun verschiedene BEs ausgegeben werden. Dabei können folgende Eigenschaften der BEs variiert werden:
  - o Der Erzeugungszeitpunkt, an dem eine BE erscheint und der Abstand bis zur nächsten BE.
  - o Die Reihenfolge, in welcher verschiedene Arten von BEs erzeugt werden.
  - o Die Anzahl, die von einer bestimmten BE-Art generiert wird.

Die Quelle wird dabei durch folgendes Symbol dargestellt:

---

<sup>87</sup> Vgl. Bosse(2009): „Kontinuierliche Simulation“, [http://isg.cs.uni-magdeburg.de/sim/fsm/presentations/contSim\\_Bosse.pdf](http://isg.cs.uni-magdeburg.de/sim/fsm/presentations/contSim_Bosse.pdf), Stand: 03.02.2009.

<sup>88</sup> Vgl. <http://www.emplant.de/>, Stand: 03.02.2009.

<sup>89</sup> Vgl. Kapitel 2.2.2.

<sup>90</sup> Vgl. Bangsow(2008), S.33ff.



Abbildung 36: Symbol einer Quelle in plant simulation

Quelle: in Anlehnung an Bangsow(2008), S.34.

- Eine **Bearbeitungsstation** nimmt BE auf und reicht diese nach einer gewissen Zeit an den nachfolgenden Baustein weiter.<sup>91</sup> Damit können beispielsweise Maschinen oder Arbeitsplätze simuliert werden. Die Verweildauer einer BE setzt sich aus Bearbeitungs-, Rüst- und Erholzeit zusammen. Die Bearbeitungsstation wird durch folgendes Symbol dargestellt:



Abbildung 37: Symbol einer Bearbeitungsstation in plant simulation

Quelle: Bangsow(2008), S.37.

- Eine **Senke** ist ein Materialbaustein, der BEs aufnimmt und vernichtet.<sup>92</sup> Genau wie andere Bearbeitungsstationen können hier auch Bearbeitungs- und Rüstzeit zur Vernichtung anfallen. Die Senke wird durch folgendes Symbol dargestellt:



Abbildung 38: Symbol einer Senke in plant simulation

Quelle: in Anlehnung an Bangsow(2008), S.35.

- Der **Puffer** speichert BEs bis sie den Materialbaustein wieder verlassen können.<sup>93</sup> Der Zeitpunkt dafür kann entweder von einer definierten Bearbeitungszeit abhängen oder von der Verfügbarkeit einer darauffolgenden Bearbeitungsstation. Die Entnahme

---

<sup>91</sup> Vgl. Bangsow(2008), S. 37.

<sup>92</sup> Vgl. Ebenda, S.36.

<sup>93</sup> Vgl. Ebenda, S.41f.

kann entweder nach dem FIFO<sup>94</sup> oder LIFO<sup>95</sup>-Prinzip geschehen. Der Puffer wird durch folgendes Symbol dargestellt:



Abbildung 39: Symbol eines Puffer in plant simulation

Quelle: Bangsow(2008), S.41.

- Die **Flusssteuerung** kann keine BEs speichern oder bearbeiten.<sup>96</sup> Sie steuert und kombiniert das Materialflussverhalten nach definierten Regeln. Dabei durchläuft jede BE die Flusssteuerung, allerdings ohne Verzögerung durch Bearbeitungszeiten. Das Verhalten dieses Bausteins kann über das Eingangs- und Ausgangsverhalten der Flusssteuerung definiert werden. So können beispielsweise bestimmte BEs nur an vorher definierte Bearbeitungsstationen weitergeleitet werden. Das Symbol für die Flusssteuerung ist in der nachfolgenden Abbildung zu sehen:



Abbildung 40: Symbol einer Flusssteuerung in plant simulation

Quelle: Bangsow(2008), S.57.

- Eine **Kante** verbindet Materialflussbausteine und bzw. oder Netzwerke miteinander.<sup>97</sup> Das Symbol für die Kante ist in der nächsten Abbildung zu sehen:



Abbildung 41: Symbol einer Kante in plant simulation

Quelle: Bangsow(2008), S.71.

---

<sup>94</sup> FIFO bedeutet First In First Out und beschreibt die Abarbeitungsreihenfolge innerhalb einer Warteschlange. Es wird zuerst das Element mit der längsten Wartezeit bearbeitet.

<sup>95</sup> LIFO bedeutet Last In First Out und beschreibt die Abarbeitungsreihenfolge innerhalb einer Warteschlange. Es wird zuerst das Element mit der kürzesten Wartezeit bearbeitet.

<sup>96</sup> Vgl. Bangsow(2008), S.57ff.

<sup>97</sup> Vgl. Ebenda, S.71.

- Der **Ereignisverwalter** steuert das gesamte Simulationsmodell.<sup>98</sup> Er berechnet die Zeitpunkte der einzelnen Ereignisse und stellt sie visuell dar. Der Ereignisverwalter dient zum Starten, Stoppen und Zurücksetzen der Simulation. Weiterhin kann am Ereignisverwalter die Gesamtdauer der Simulationszeit eingestellt werden. In der nachfolgenden Abbildung ist das Symbol für den Ereignisverwalter dargestellt:



Abbildung 42: Symbol des Ereignisverwalters in plant simulation

Quelle: Bangsow(2008), S.70.

- Der **Plotter** ist ein Baustein, der Daten grafisch darstellen kann.<sup>99</sup> Entweder liegen diese Daten in Form einer Tabelle vor oder sie werden über zu definierende Eingangskanäle zugeführt. Um das dynamische Verhalten bestimmter Daten darzustellen, wird der Plotter im Watch-Modus betrieben. Dabei wird jede Änderung der Daten innerhalb eines Zeitraumes sofort dokumentiert und dargestellt. Der Plotter wird anhand dieses Symbols abgebildet:



Abbildung 43: Symbol des Plotters in plant simulation

Quelle: Bangsow(2008), S219.

Mit Hilfe dieser Materialflussbausteine kann nun das bekannte Fallbeispiel als Simulationsmodell abgebildet werden.<sup>100</sup> Dazu wird für jeden Materialstrom eine Quelle definiert. Diese Quelle wird mit dem Namen „QuelleMFx“ bezeichnet, wobei „x“ für die Nummer des Materialstromes steht. Dabei wird von einer Quelle immer nur eine bestimmte Sorte BEs ausgegeben, z.B. werden von QuelleMF1 auch nur Aufträge ausgegeben, die zu MF1 gehören. Da es sich um ein Instrument für den taktischen bzw. strategischen Einsatz handelt, wird zunächst vereinfachend eine Verfügbarkeit von 100 Prozent für die Quelle angenommen. Die Ausgabe einer neuen BE wird zunächst terminlich in konstanten Abständen vorgenommen und im

---

<sup>98</sup> Vgl. Ebenda, S.72ff.

<sup>99</sup> Vgl. Bangsow(2008), S.219ff.

<sup>100</sup> Vgl. Kapitel 2.2.2.

Laufe der Simulation jedoch variiert. Dies geschieht aufgrund der oben getroffenen Vermutung, dass die Durchsatzkennlinie von der sukzessiven Einlastungssteigerung abhängig ist<sup>101</sup>.

Weiterhin wird vor jeder Arbeitsstation ein Puffer für Aufträge angelegt, die nicht abgearbeitet werden können. Diese Puffer werden mit dem Namen „PufferASx“ bezeichnet, wobei „x“ hier für die Nummer der Arbeitsstation steht. Als Ausgangsprinzip wird die Wartschlange gewählt, welche der FIFO-Reihenfolge entspricht. Die Kapazität des Puffers wird mit 1000 festgelegt, um genug BEs aufnehmen zu können. Damit wird die Annahme getroffen, dass Lagerplatz im gewählten Modell keine Rolle spielt. Weiterhin soll der Puffer nur zur Aufnahme der BEs dienen. Darum werden keine weiteren Bearbeitungs-, Erhol- oder Zykluszeiten innerhalb des Puffers berücksichtigt. Wie bei der Quelle wird von störungsfreiem Verhalten ausgegangen.

Jede Arbeitsstation wird für sich getrennt simuliert. Der Name einer Arbeitsstation wird durch „ASx“ ausgedrückt, wobei „x“ für die Nummer der Arbeitsstation steht. Die Bearbeitungszeit wird dabei zunächst als konstant über alle Aufträge und Bearbeitungsstationen angenommen. Im Laufe der Simulation wird diese Bearbeitungszeit jedoch immer weiter variiert. Es finden Rüst-, Erhol- und Zykluszeiten keine Anwendung, da es sich bei der Durchsatzkennlinie um ein taktisch-strategisches Instrument handelt, das nur bei langen Zeiträumen und großen Auftragszahlen zum Einsatz kommt. In der ersten Simulation werden auch nur lineare Prozesse ohne Schleifen und Wiederholungen abgebildet. Bei den Arbeitsstationen wird ebenfalls von störungsfreiem Verhalten ausgegangen. Da die Durchsatzkennlinie momentan keine mehrstufigen Prozesse abbilden kann, wird hier auch auf die Modellierung von Montageprozessen verzichtet. Die Abarbeitung an der Arbeitsstation erfolgt nach dem FIFO-Prinzip. Weiterhin werden keine Bearbeitungsalternativen berücksichtigt, so dass ein Auftrag nur von genau einer definierten Arbeitsstation abgearbeitet werden kann.

Die Materialströme fließen entlang der Kanten, welche die verschiedenen Materialflusselemente miteinander verbinden. Laufen zwei Materialströme entlang einer Kante und teilen sich später auf, so wird die richtige Verteilung der Aufträge durch Materialflusssteuerungen vorgenommen. Diese Blöcke werden als „SteuerungASx“ benannt, wobei hier „x“ für die Arbeitsstation steht, hinter der sich die Steuerung befindet. Abgesehen von den Steuersignalen werden von diesen Materialflusselementen keine Aktionen durchgeführt.

---

<sup>101</sup> Vgl. Kapitel 4.2.

Damit die BE das betrachtete System wieder verlassen kann, wird für jeden Materialstrom eine Senke definiert. Diese Senke trägt den Namen „SenkeMFx“, wobei „x“ hier für die Nummer des Materialstromes steht. In der Senke finden keine weiteren Bearbeitungs- oder Rüstvorgänge statt. Auch hier wird wieder Störungsfreiheit vereinfacht angenommen.

Zur Auswertung wird für jeden Materialstrom ein Plotter eingeführt. Dieser Plotter trägt den Namen „WerteMFx“, wobei „x“ für die Nummer des Materialstromes steht. Als Eingangssignale für den Plotter wird die kumulierte Anzahl ausgegebener BEs an der Quelle und die kumulierte Anzahl aufgenommener BEs an der Senke über die Zeit protokolliert. Damit lassen sich Durchsatz und Einlastung über eine Periode ermitteln. Der Aufbau des Simulationsmodells ist visuell in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

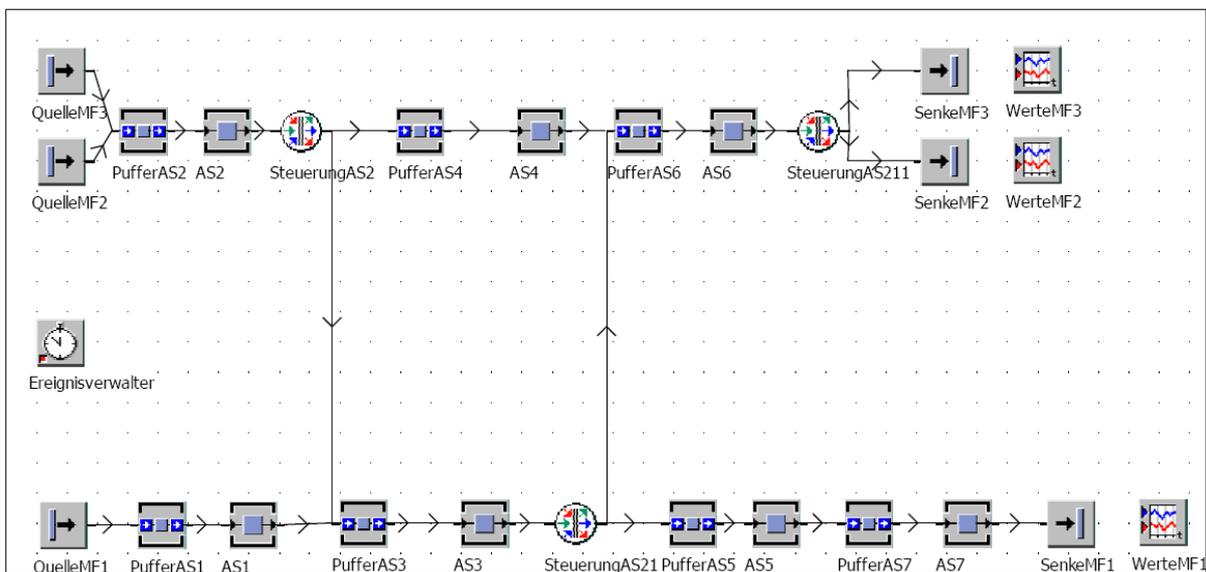


Abbildung 44: Aufbau des Fallbeispiels als Simulationsmodell

Quelle: eigene Darstellung.

Bei der Verifikation des neuen Algorithmus soll die Tauglichkeit hinsichtlich zweier Kriterien geprüft werden:

1. Die vorherigen Berechnungen mit dem neuen Algorithmus lassen vermuten, dass die Gestalt der Durchsatzkennlinie abhängig ist von dem Inhalt der einzelnen Aufträge bzw. von dem Betrag, um den die Einlastung eines Auftragsstromes gesteigert werden kann.<sup>102</sup> Deshalb wird ein Vergleich durchgeführt, wie sich die Durchsatzkennlinie bei konstanten und bei verteilten Arbeitsinhalten der Aufträge verhält.

<sup>102</sup> Vgl. Kapitel 4.2.

- Ein weiteres Kriterium ist die Dynamik von Engpässen. Im Gegensatz zu statischen Engpässen besitzen dynamische Engpässe die Eigenschaft nur temporär aufzutreten. Dabei sind der Ankunftszeitpunkt eines Auftrages und die momentane Verfügbarkeit von Kapazität zu berücksichtigen. Deshalb wird hier ein Vergleich zwischen konstantem und verteiltem Abstand, in dem der nächste Auftrag eingelastet wird, durchgeführt.

Dadurch ergeben sich vier grundsätzliche Simulationsfälle, die noch einmal in der nachfolgenden Matrix dargestellt sind:

Auftragsinhalt		
Auftragsabstand	Konstant	variabel
konstant	Fall 1: Kontinuierlicher Zugang von Aufträgen mit gleichem Arbeitsinhalt	Fall 2: Kontinuierlicher Zugang von Aufträgen mit unterschiedlichem Arbeitsinhalt
variabel	Fall 3: Diskontinuierlicher Zugang von Aufträgen mit gleichem Arbeitsinhalt	Fall 4: Diskontinuierlicher Zugang von Aufträgen mit unterschiedlichem Arbeitsinhalt

Abbildung 45: Vier grundsätzliche Simulationsmodelle der Durchsatzkennlinie

Quelle: eigene Darstellung.

Simulationsfall 1 lässt sich analog zu einer Fließfertigung mit Großserien verstehen. Das andere Ende des Spektrums stellen variable Auftragsabstände in Verbindung mit variablen Arbeitsinhalten dar, diese können verglichen werden mit einer Einzel- oder Kleinserienfertigung. Um den einzelnen Einfluss von Auftragsabstand und Auftragsinhalt separat zu ermitteln, werden die Simulationsfälle 2 und 3 betrachtet.

Bei der Betrachtung von Auftragsinhalt und Auftragsabstand müssen die Grundannahmen eines kontinuierlichen Auftragsstromes und nicht vorhandener Terminierung der Arbeitsauf-

träge aufgehoben werden. Dies erfordert jedoch die Annahme von Aufträgen mit diskreten Arbeitsinhalten und diskreten Auftragsabständen. Die getroffenen, stochastischen Voraussetzungen für den Abfertigungsfaktor<sup>103</sup> entsprechen einem Laplace-Experiment und setzen dementsprechend eine genügend große Anzahl an Aufträgen voraus<sup>104</sup>.

Dabei stellt sich die Frage, ab welcher Auftragszahl dies bei den verschiedenen Simulationsfällen gegeben ist. Bei einer Einlastung von  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  für MS2 und MS3 bzw.  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  für MS1 wird mit einer Auftragsgröße von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  begonnen. Dies entspricht einer relativen Auftragseinlastung zu Gesamteinlastung von 5 Prozent bzw.  $6\frac{2}{3}$  Prozent. Diese Kennzahl wird für jeden Simulationsfall in vier Schritten jeweils halbiert bis auf einen Auftragsinhalt von  $0,125 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Dies entspricht dann einer relativen Auftragseinlastung von 0,625 Prozent bzw. 0,83 Prozent. Die Variation der Auftragsgröße ist in der folgenden Tabelle noch einmal dargestellt:

Schritt	Auftragsinhalt		
	absolut [h / Periode]	relativ MS1 [Prozent]	relativ MS2 / MS3 [Prozent]
1	1	6.67%	5.00%
2	0.5	3.33%	2.50%
3	0.25	1.67%	1.25%
4	0.125	0.83%	0.63%

Tabelle 18: Variation der Auftragsgröße in den vier Simulationsfällen

Quelle: eigene Darstellung.

Zur besseren Auswertung der Simulation werden verschiedene, selbstprogrammierte Makros verwendet. Es wird ein Makro zur Initialisierung vor jedem Lauf<sup>105</sup>, zur ersten Parametersierung<sup>106</sup> und zur automatischen Auswertung<sup>107</sup> verwendet. Bei der automatischen Auswertung werden in jedem Simulationsschritt folgende Werte protokolliert:

- Einlastung pro Materialstrom, Auftragsstrom und insgesamt
- Durchsatz pro Materialstrom, Auftragsstrom und insgesamt

---

<sup>103</sup> Vgl. Kapitel 4.2.

<sup>104</sup> Vgl. Papula(1997), S.274ff.

<sup>105</sup> Der Quellcode des Initialisierungsmakros befindet sich in Anhang E.

<sup>106</sup> Der Quellcode des Parametrisierungsmakros befindet sich in Anhang F.

<sup>107</sup> Der Quellcode des Auswertemakros befindet sich in Anhang G.

- Durchsatzpotential differenziert nach Materialströmen und Arbeitsstationen
- Durchsatzpotential pro Auftragsstrom und insgesamt

Zur späteren Verwendung werden die Ergebnisse in eine Exceldatei exportiert. Die jeweiligen Exceldateien sind zusammen mit den Simulationsmodellen auf der beiliegenden CD dokumentiert.

### 5.2 Verifikation des neuen Algorithmus durch eine Simulation

#### 5.2.1 Simulation mit konstanten Auftragsinhalten und Abständen

Im ersten Schritt wird das Szenario betrachtet, in dem der Auftragsinhalt und die Abstände zwischen den Aufträgen konstant gehalten werden. Dies würde zutreffen bei einer getakteten Großserienfertigung. Für die Berechnung einer Durchsatzkennlinie wird immer ein bestimmter Fall angenommen:

- Für Berechnung des ASTR1 wird davon ausgegangen, dass ASTR2 bereits in voller Höhe eingelastet wurde. Die Einlastung von ASTR1 wird dann in genau definierten Schritten von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  auf  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  gesteigert. Damit wird allerdings die Bedingung der Beachtung der Engpassreihenfolge verletzt. Dies geschieht hier jedoch bewusst, da die Simulation dazu eingesetzt werden soll, wie gut der neue Algorithmus die Durchsatzkennlinie vorhersagt. Eine Engpassidentifikation wird so nicht vorgenommen.
- Eine ähnliche Annahme gilt für ASTR2, nur dass hier ASTR1 bereits voll eingelastet ist und ASTR2 in genau definierten Schritten von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  auf  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  gesteigert wird.
- Für die Berechnung der Gesamtkennlinie wird die Einlastung beider Auftragsströme gleichzeitig in jedem Simulationsschritt von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  auf  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  bzw.  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  erhöht.

Nun wird zunächst ASTR1 betrachtet. Dabei werden die simulierte Kennlinie, die neue berechnete Kennlinie und die bereits bekannte berechnete Kennlinie gegenübergestellt. Die folgende Abbildung stellt das Szenario mit einem Auftragsinhalt von konstant  $1 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  dar:

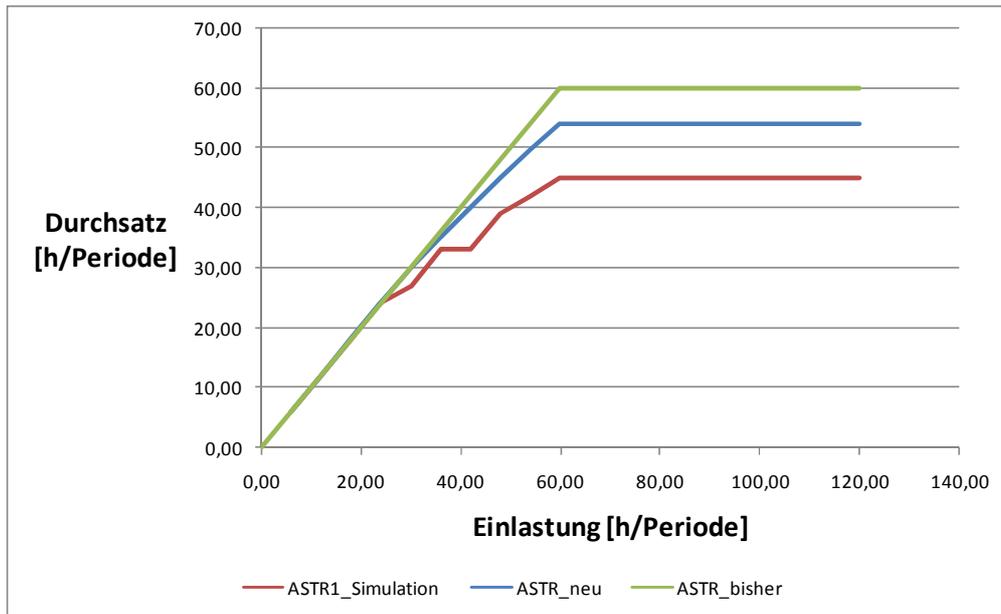


Abbildung 46: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit Auftragsinhalt  $1 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  im Fall 1

Quelle: eigene Darstellung.

Der bisherige Algorithmus wird als ASTR\_bisher in grün dargestellt. Diese wird verglichen mit dem neuen Algorithmus (ASTR\_neu in blau) und der simulierten Durchsatzkennlinie (ASTR1\_Simulation in rot). Bis zu einer Einlastung von  $24 \frac{h}{\text{Periode}}$  ist kein Unterschied zwischen den drei Kennlinien zu erkennen. Danach verschieben sich die Kennlinien gegeneinander. Gerade die simulierte Kennlinie knickt relativ stark ab, da sie aufgrund des hohen relativen Arbeitsinhalts bereits bei der Abweichung um einen Auftrag Durchsatz in Höhe von  $3 \frac{h}{\text{Periode}}$  verloren hat. Dieser große Einfluss schlägt sich im weiteren Verlauf der Kennlinie durch mehrere Knickstellen nieder. Der Grund für die Abweichung ist in der Ursache zu finden, dass Aufträge aufgrund ihres späten Startes in der betrachteten Periode nicht mehr durchgesetzt werden können.

Die neue Kennlinie verlässt die bisherige Kennlinie ab einer Einlastung  $30 \frac{h}{\text{Periode}}$ , da sich ab dieser Einlastung AS3 zum Engpass entwickelt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bereits ASTR1 in voller Stärke von  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  eingelastet wurde. Da in diesem Fall ASTR1 und ASTR2 an AS3 um knappe Ressourcen konkurrieren, reduziert sich der Durchsatz der beiden Auftragsströme.

Im weiteren Verlauf entwickelt sich ein konstanter Abstand zwischen den drei Kennlinien. Dabei weicht die bisherige Kennlinie um  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  von der simulierten Kennlinie ab. Dies entspricht einer relativen Abweichung von 33%, bezogen auf den simulierten Durchsatz. Die neue Kennlinie weicht um  $9 \frac{h}{\text{Periode}}$  bzw. 20% von der simulierten Kennlinie ab. Die Abweichungen zwischen den berechneten und den simulierten Kennlinien sind in der nachfolgenden Darstellung zu sehen:

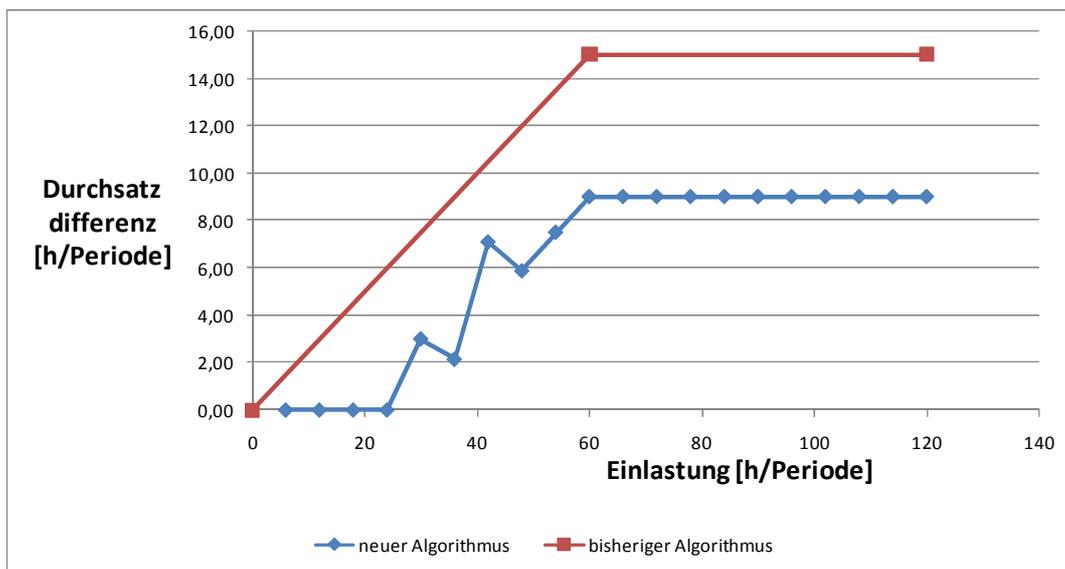


Abbildung 47: Durchsatzdifferenzen ASTR1 bei Auftragsgröße 1h im Fall 1

Quelle: eigene Darstellung.

Dabei sagt der bisherige Algorithmus bei der Maximaleinlastung ein Durchsatzpotential von  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$  voraus, der neue Algorithmus  $66 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Bei der Simulation wurde ein Durchsatzpotential in der Höhe von  $75 \frac{h}{\text{Periode}}$  festgestellt. Es entfallen  $66 \frac{h}{\text{Periode}}$  auf die Engpassstation AS3 und  $9 \frac{h}{\text{Periode}}$  auf andere Arbeitsstationen. Der neue Algorithmus berechnet ein Durchsatzpotential von  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$  an AS2 und  $6 \frac{h}{\text{Periode}}$  an anderen Arbeitsstationen.

Zur Untersuchung, ob die Auftragsgröße Einfluss auf die Vorhersagegenauigkeit besitzt, wird nun der Arbeitsinhalt reduziert<sup>108</sup>. Damit verdoppelt sich mit jeder Reduktion des Arbeitsinhal-

<sup>108</sup> Eine Darstellung der weiteren Durchsatzkennlinien befindet sich in Anhang H.

tes die Anzahl der Aufträge pro Auftragsstrom. Es fällt auf, dass die Knickstellen der simulierten Kennlinie sich mit jeder Reduktion abschwächen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass nun der Nicht-Durchsatz eines Auftrages kein so starkes Gewicht mehr besitzt. Weiterhin nähert sich mit jeder Verringerung des Arbeitsinhaltes, die simulierte Kennlinie der neuen Kennlinie an.

In einem letzten Simulationsschritt wird die Auftragsgröße noch einmal auf  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  reduziert. Dies entspricht einer relativen Einlastung von 0,625% und kommt einem kontinuierlichen Verlauf nahe. Für ASTR1 wurde hier also eine Auftragsanzahl von 160 Aufträgen bei einer gesamten Einlastung von  $20 \frac{h}{\text{Periode} \times \text{Arbeitsstation}}$  angenommen.

Man kann erkennen, dass hier die simulierte und die neu berechnete Durchsatzkennlinie annähernd übereinstimmen. Die Abweichung zwischen den beiden Kennlinien beträgt  $1,13 \frac{h}{\text{Periode}}$ , relativ 2,1%. Die verbleibende Differenz kann mit der diskreten Auftragsgröße erklärt werden. Die Aufträge in dem letzten Simulationsschritt sind zwar klein, besitzen jedoch immer noch einen genau festgelegten Inhalt. Dies führt zu Abrundungsfehlern bei der Berechnung der Durchsatzkennlinie. Allerdings konnte über alle vier Simulationsschritte eine Annäherung von simulierter und neu berechneter Kennlinie festgestellt werden. Die Erklärung dafür ist darin zu finden, dass mit jedem Szenario die vorher getroffene Annahme Laplace'scher Wahrscheinlichkeiten besser zutrifft<sup>109</sup>. Es ist anzunehmen, dass für eine infinitesimal kleine Auftragsgröße die Vermutung erfüllt ist und simulierte und neu berechnete Kennlinie miteinander verschmelzen. Das Ergebnis ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

---

<sup>109</sup> Vgl. Kapitel 4.1.

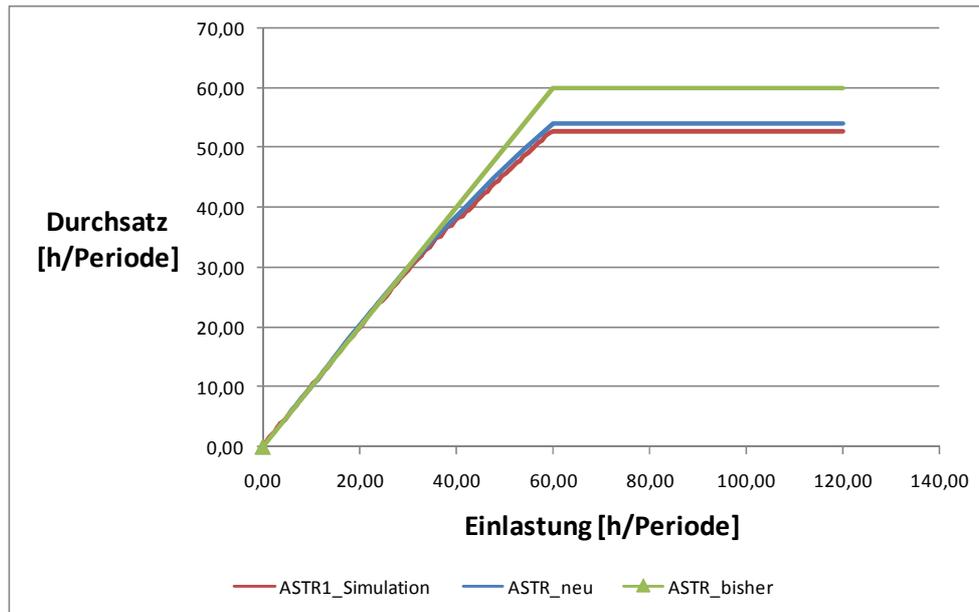


Abbildung 48: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit Auftragsinhalt  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  im Fall 1

Quelle: eigene Darstellung.

Eine analoge Entwicklung ist auch bei den Differenzen zwischen den einzelnen Kennlinien zu beobachten<sup>110</sup>. Zwischen der bisherigen Kennlinie und der Simulation verbleibt ein Abstand von  $7,12 \frac{h}{\text{Periode}}$  bzw. relativ 13,5%. Die Differenz zwischen der neu berechneten und der simulierten Kennlinie reduziert sich auf einen Abstand von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Bei Eintritt der Voraussetzungen Laplace'scher Wahrscheinlichkeiten ist damit zu rechnen, dass auch hier diese Restabweichung zurückbleibt. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass bei der Berechnung nach dem alten Algorithmus die Belastung an AS3 nicht berücksichtigt wird, obwohl diese Arbeitsstation auch einen Engpass darstellt. In dem nachfolgenden Diagramm sind die Abweichungen zwischen den einzelnen Kennlinien zu sehen:

<sup>110</sup> Die Darstellungen der Durchsatzdifferenzen befinden sich in Anhang H.

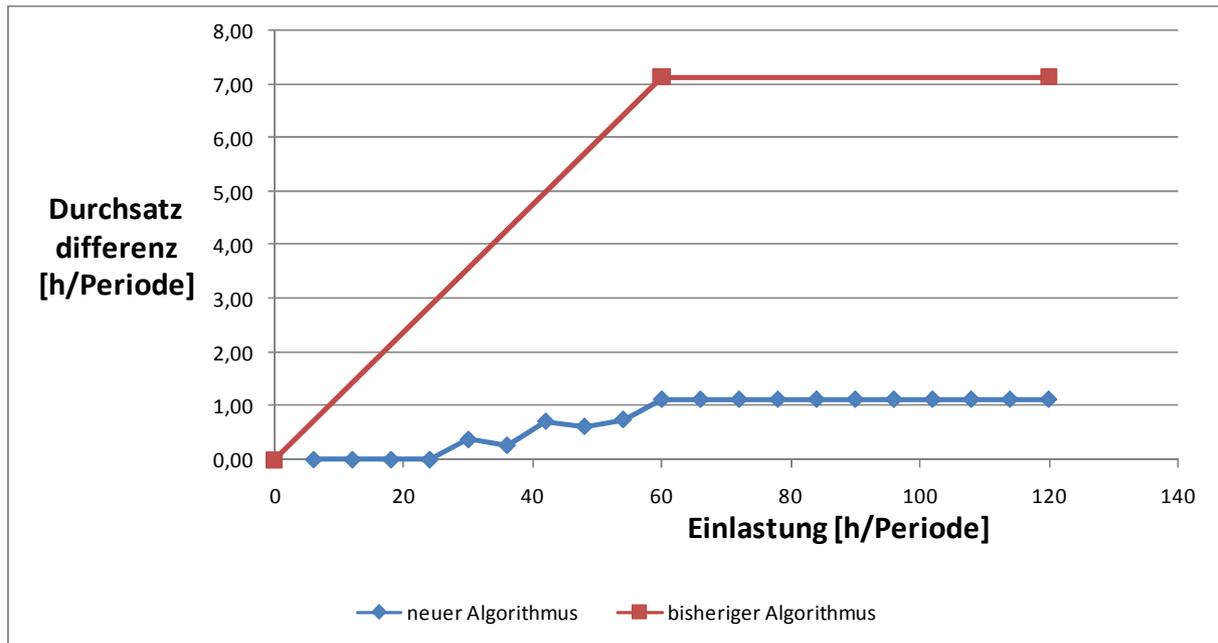


Abbildung 49: Durchsatzdifferenzen ASTR1 bei Auftragsgröße  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  im Fall 1

Quelle: eigene Darstellung.

Das Durchsatzpotential in diesem Simulationsschritt beträgt  $67,13 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Diese verteilen sich zu  $60,38 \frac{h}{\text{Periode}}$  auf die Engpassressource AS2 und zu  $6,75 \frac{h}{\text{Periode}}$  auf andere Bearbeitungsstationen. Dies stimmt auch sehr gut mit dem Durchsatzpotential des neuen Algorithmus in Höhe von  $66 \frac{h}{\text{Periode}}$  überein.

Um die Vermutungen aus dem ersten Simulationslauf noch weiter zu untermauern, wird die Simulation von ASTR2 ausgewertet. Im Gegensatz zu ASTR1 wird hier davon ausgegangen, dass bereits ASTR1 von Beginn an vollkommen eingelastet wurde. Die Einlastung von ASTR2 wird zuerst in genau definierten Schritten von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  auf  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  gesteigert.

Wie bei ASTR1 sind auch bei ASTR2, mit einer Einlastung von  $1 \frac{h}{\text{Auftrag}}$ , sehr starke Sprünge zu verzeichnen, die auf das große Verhältnis von Auftragsinhalt zu Gesamteinlastung zurückzuführen sind. Die Durchsatzkennlinien sind in der folgenden Darstellung abgebildet:

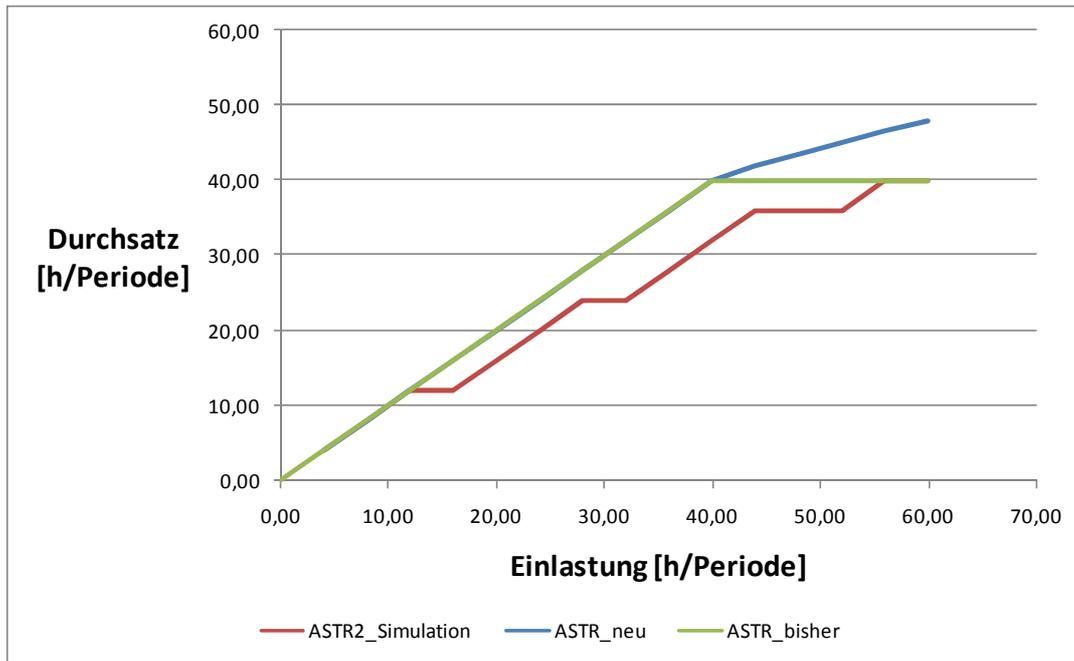


Abbildung 50: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit Auftragsinhalt  $1 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  im Fall 1

Quelle: eigene Darstellung.

Dementsprechend stimmt auch das Durchsatzpotential von bisherigem Algorithmus und Simulation mit  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  vollkommen überein. Der neue Algorithmus weicht bei der maximalen Einlastung um  $12 \frac{h}{\text{Periode}}$  ab. Dies entspricht einer Differenz in Höhe von 30% vom simulierten Durchsatz.

In dieser Simulation wird bei der maximalen Einlastung ein Durchsatz von  $40 \frac{h}{\text{Periode}}$  erreicht. Dies entspricht genau dem Wert, der auch nach dem alten Algorithmus errechnet wird. Allerdings weicht die bisherige Durchsatzkennlinie im gesamten Verlauf bis zu  $8 \frac{h}{\text{Periode}}$  von der simulierten Kennlinie ab. Ab einer Einlastung von  $12 \frac{h}{\text{Periode}}$  gibt es bereits einen ersten Unterschied zwischen Simulation und Berechnung. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass ein Auftrag aufgrund der Länge des Prozesses das Systemende nicht mehr rechtzeitig erreicht und als Bestand vor einer der Bearbeitungsstationen liegen bleibt. Erst ab einer Einlastung von  $40 \frac{h}{\text{Periode}}$  tritt an AS3 eine Überlast auf und der Durchsatz kann nur noch geringfügig gesteigert werden. Die Durchsatzdifferenzen sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

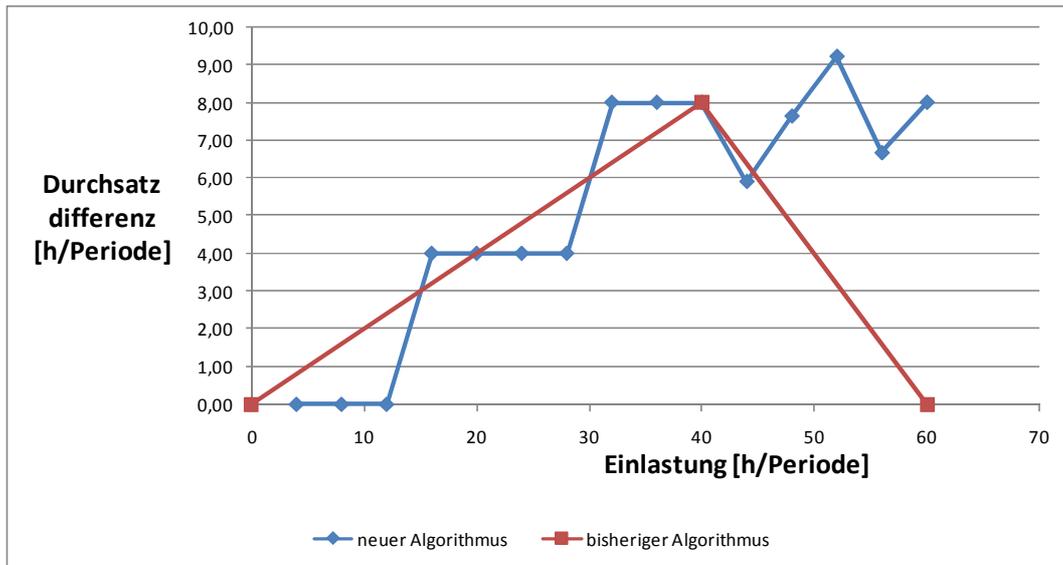


Abbildung 51: Durchsatzdifferenzen ASTR2 bei Auftragsgröße  $1 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  im Fall 1

Quelle: eigene Darstellung.

Nach dieser Simulation dürfte der bisherige Algorithmus besser zur Simulation passen als der neue. Wird aber der Arbeitsinhalt verringert, so ist zu erkennen, dass sich nun bei der Simulation ein anderer Trend ergibt<sup>111</sup>. Nachdem das Gewicht einzelner Aufträge nicht mehr so groß ist, verglichen mit der gesamten Einlastung, vermindern sich auch die Sprünge der simulierten Kennlinie. Es ist auffällig, dass sowohl die neu berechnete als auch die simulierte Kennlinie kein Plateau erreichen, auf dem der Durchsatz konstant bleibt. Dies unterscheidet sie von der bisherigen Berechnung. Dieses Phänomen kann jedoch mit der fehlenden Priorisierung erklärt werden. Für ASTR2 stellt AS3 den Engpass dar. Dort sind jedoch von ASTR1 bereits  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  eingelastet, von denen auch  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$  an dieser Arbeitsstation ankommen. Kommen nun gleichzeitig  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$  von ASTR1 an AS3 an, so besteht ein Gleichgewicht und beide Auftragsströme werden vollkommen durchgesetzt. Steigt die Einlastung von ASTR2 an AS3 jedoch über diesen Wert von  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$ , erhält dieser Auftragsstrom ein Übergewicht gegenüber dem Anteil von ASTR1. Je mehr Arbeit von ASTR1 an AS3 ankommt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit einen Auftrag aus dem Auftragsstrom durchzusetzen. Da die Arbeitsstation dann jedoch bereits überlastet ist, reduziert sich der Durchsatz von ASTR1 um den gleichen Betrag.

<sup>111</sup> Eine Darstellung der weiteren Durchsatzkennlinien befindet sich in Anhang I.

Dies führt zu einem Knickpunkt an ASTR2 bei einer Einlastung von  $40 \frac{h}{\text{Periode}}$ , da dies eine Einlastung von  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$  an AS3 bedeutet. Danach steigt der Durchsatz des Auftragsstromes zwar noch weiter an, jedoch nur in einem unterproportionalen Ausmaß.

Bei einer Reduzierung des Auftragsinhalts auf  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  entspricht der Auftragsstrom sehr gut der Annahme kontinuierlicher Ströme. Dies bedeutet, dass für ASTR2 nun 120 Aufträge im Maximum simuliert werden. Die sich ergebenden Kennlinien sind in der nachfolgenden Darstellung abgebildet:

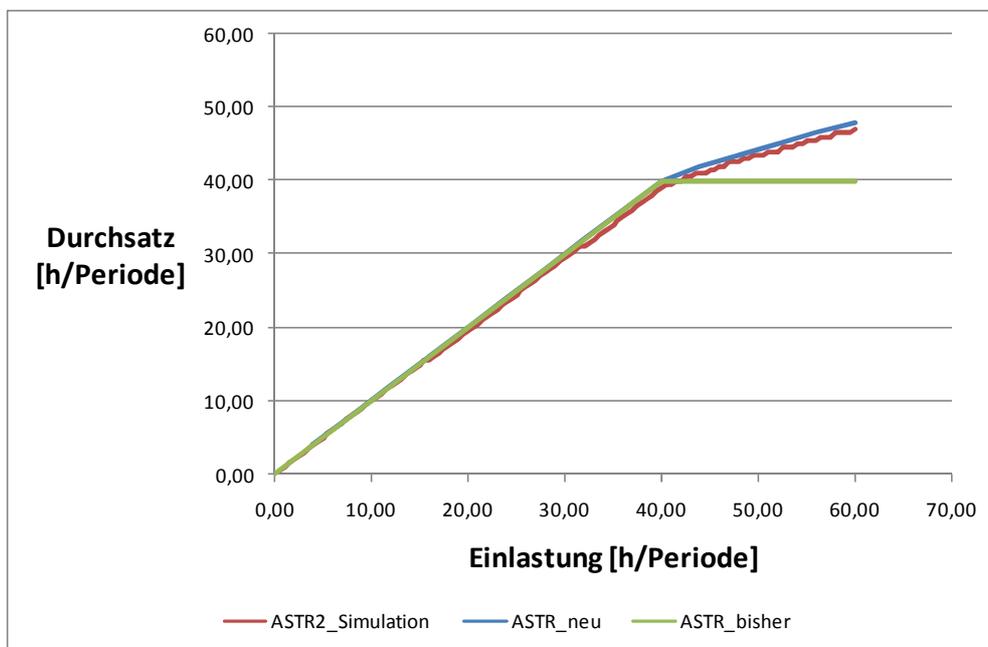


Abbildung 52: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit Auftragsinhalt  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  im Fall 1

Quelle: eigene Darstellung.

Hier ist eine annähernde Übereinstimmung zwischen simulierter und neu berechneter Kennlinie festzustellen. Die Differenz zwischen den beiden Maximalwerten sinkt auf  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$ , also relativ 2,1%<sup>112</sup>. Der Unterschied zwischen der bisherigen Kennlinie und der simulierten Kennlinie ist hier  $13 \frac{h}{\text{Periode}}$ , also 27,7%. Das bedeutet, dass die Abweichung zwischen simulierter

<sup>112</sup> Die Darstellungen der Durchsatzdifferenzen befinden sich in Anhang I.

und bisheriger Kennlinie im Verlauf der Werte angewachsen ist. Die Abweichungen sind in dem nachfolgenden Diagramm zu sehen:

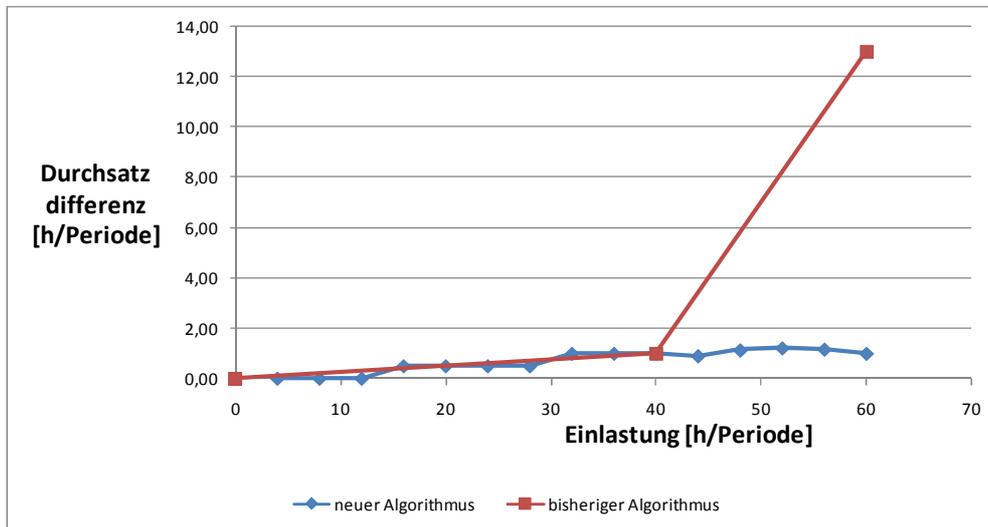


Abbildung 53: Durchsatzdifferenzen ASTR2 bei Auftragsgröße  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  im Fall 1

Quelle: eigene Darstellung.

Als Durchsatzpotential bildet sich bei der Simulation an AS3 ein Wert von  $12,5 \frac{h}{\text{Periode}}$  und  $0,5 \frac{h}{\text{Periode}}$  an nachfolgenden Arbeitsstationen aufgrund der Länge des Prozesses. Dies trifft den Wert von  $12 \frac{h}{\text{Periode}}$  an AS3 nach der neuen Berechnung relativ gut.

Allgemein lässt sich nach der Simulation von ASTR2 die Aussage bestätigen, dass der neue Algorithmus bei der Durchsatzberechnung bessere Werte liefert, wenn die Größe einzelner Aufträge klein ist, verglichen mit der gesamten Einlastung. Die relative Durchsatzabweichung des neuen Algorithmus sinkt bei Maximaleinlastung von 30% mit jeder Reduzierung der Auftragsgröße auf 2,1%. Beim alten Algorithmus steigt die Abweichung sogar von anfangs 0% auf am Ende 27,7%. Ein Problem dabei stellt weiterhin die Berücksichtigung diskreter Aufträge dar. Sind diese Aufträge in ihrem Inhalt groß, verglichen mit der Gesamteinlastung, so kommt es zu Sprüngen im Durchsatzverlauf und die Vorhersagegenauigkeit nimmt ab.

Auch die Vorhersage des Durchsatzpotentials nimmt mit der Reduzierung der Auftragsgröße an Genauigkeit zu. So beträgt die Abweichung zwischen simulierter und neu berechneter Kennlinie bei einer Auftragsgröße von  $1 \frac{h}{\text{Auftrag}}$   $8 \frac{h}{\text{Periode}}$  und sinkt anschließend bis auf  $0,5 \frac{h}{\text{Periode}}$ .

Nun wird noch eine Verifikation der Gesamtkennlinie vorgenommen. Da diese nach dem bisherigen Verfahren über eine Vektoraddition gelöst wird, soll nun auch hier ein Vergleich zur simulierten und neu berechneten Kennlinie gezogen werden. Dazu wird davon ausgegangen, dass die Einlastung an beiden Auftragsströmen von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  in konstanten, genau definierten Schritten auf  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  bzw.  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  erhöht wird. Dabei erfolgt die Einlastungserhöhung immer in Schritten von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Nachdem bei ASTR2 bereits eine Höhe von  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$  erreicht wurde, wird bei ASTR1 also noch weiter bis auf  $20 \frac{h}{\text{Periode}}$  erhöht, während die Einlastung bei ASTR2 konstant bleibt. Dieses Szenario entspricht einer Teilefertigung bei der jeder Auftrag den gleichen Arbeitsinhalt besitzt.

Zur Ermittlung der Gesamtkennlinie werden ebenfalls die vier Simulationsschritte mit  $1 \frac{h}{\text{Auftrag}}$ ,  $0,5 \frac{h}{\text{Auftrag}}$ ,  $0,25 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  und  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  durchgeführt. Damit soll die Auswirkung der Auftragsgröße auf die Gesamtkennlinie untersucht werden. Das Resultat von Simulation und Berechnung ist in der nachfolgenden Darstellung abgebildet:

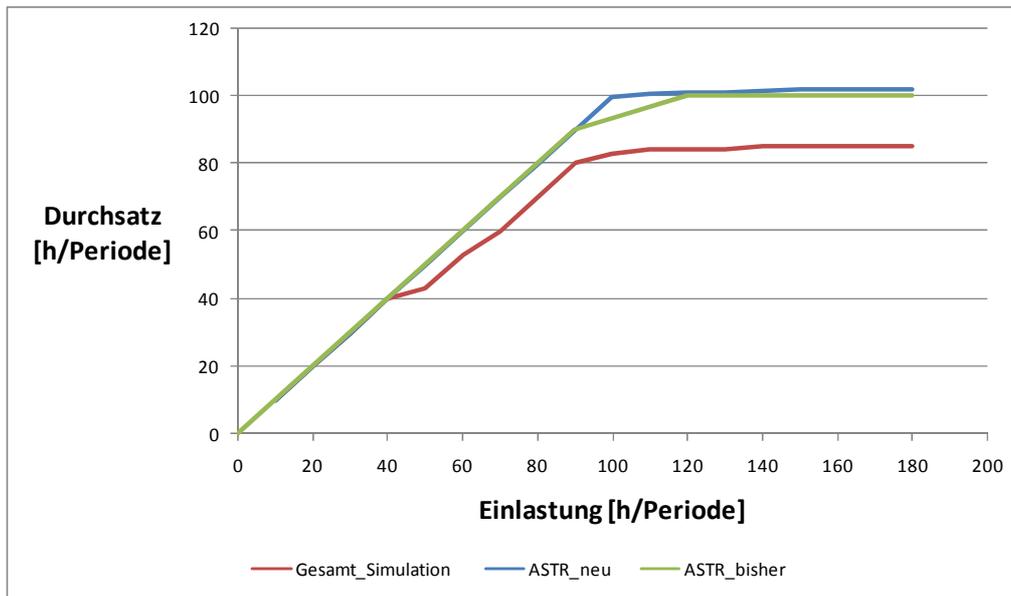


Abbildung 54: Gesamtdurchsatzkennlinie mit Auftragsinhalt  $1 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  im Fall 1

Quelle: eigene Darstellung.

Auch bei der Simulation der gesamten Kennlinie lässt sich wiederum das Phänomen der Sprunghaftigkeit beobachten. Dieses kann wieder auf die relative Größe von Auftragsinhalt zu Gesamteinlastung zurückgeführt werden. Ab einer Einlastung von  $40 \frac{h}{\text{Periode}}$  ergibt sich die erste Abweichung von simulierter und berechneter Kennlinie. Aufgrund der Prozesslänge bleiben spät freigegebene Aufträge innerhalb des Systems liegen, da die Zeit nicht mehr ausreicht, um die Senke zu erreichen.

Ab einer Einlastung zwischen  $90 \frac{h}{\text{Periode}}$  und  $100 \frac{h}{\text{Periode}}$  nimmt das Durchsatzwachstum stark ab. Dies liegt daran, dass ab einer Einlastung von  $100 \frac{h}{\text{Periode}}$  die Kapazität von AS2 und AS3 ausgelastet wird und zwei Engpässe gleichzeitig entstehen. Beide Arbeitsstationen sind zu diesem Zeitpunkt zu 100% ausgelastet. Das danach überhaupt noch eine Durchsatzsteigerung erfolgt liegt daran, dass sich das Gewicht von ASTR2 an AS2 zu Ungunsten von ASTR1 verschiebt. Jedoch besitzt ASTR2 mit 4 einen größeren Grenzdurchsatz als ASTR1 mit 3. Jeder Auftrag, der also von ASTR2 durchgesetzt wird und für den ein Auftrag von ASTR1 zurückbleibt erzeugt eine positive Durchsatzdifferenz von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$ .

Die Abweichungen bei der Maximaleinlastung betragen zwischen der simulierten und der neu berechneten Kennlinie  $17 \frac{h}{\text{Periode}}$ , dies entspricht einer relativen Abweichung von 20%. Zwischen der bisherigen Berechnung und der Simulation ergibt sich eine Differenz von  $15 \frac{h}{\text{Periode}}$ , also eine relative Abweichung von 17%. Der Differenzenverlauf ist in der nachfolgenden Darstellung zu sehen:

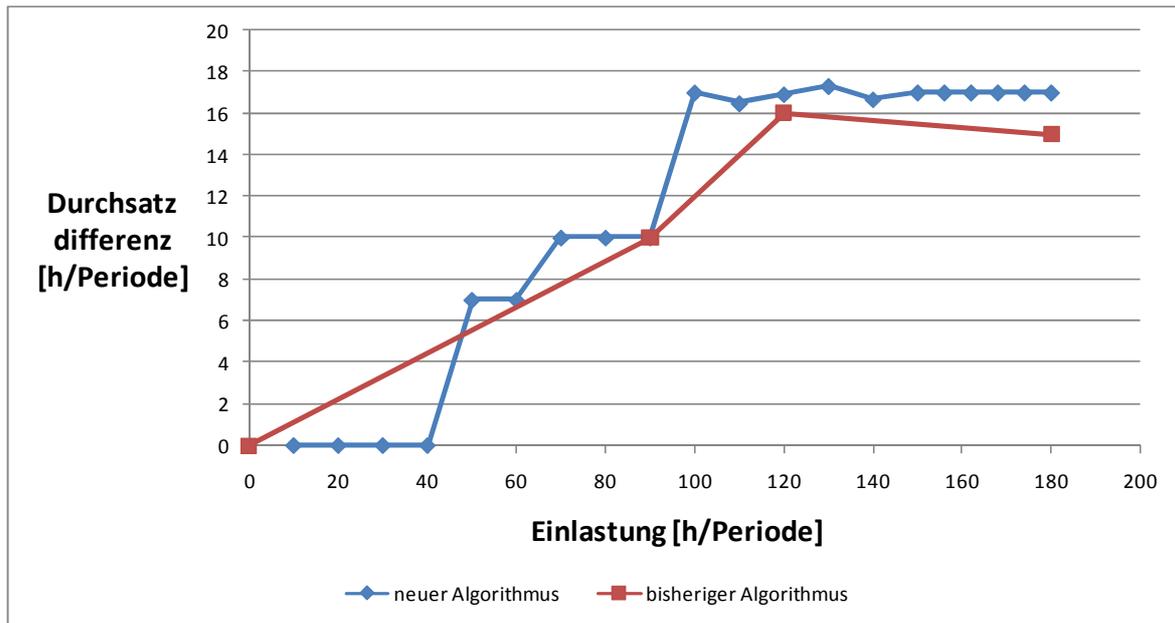


Abbildung 55: Gesamtdurchsatzdifferenzen bei Auftragsgröße  $1 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  im Fall 1

Quelle: eigene Darstellung.

Das simulierte Durchsatzpotential beträgt  $95 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Nach dem neu berechneten Algorithmus ergibt sich jedoch ein Durchsatzpotential von insgesamt  $78 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Der bisherige Ansatz prognostiziert ein ähnlich hohes Durchsatzpotential von  $80 \frac{h}{\text{Periode}}$ .

Wird nun der Arbeitsinhalt eines Auftrages verringert, so zeigt sich hier ein ähnliches Bild wie bei den einzelnen Kennlinien<sup>113</sup>. Nachdem der Arbeitsinhalt bis auf einen Wert von  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  reduziert wurde, kommt der Auftragsstrom der Annahme nach einem kontinuierlichen,

<sup>113</sup> Eine Darstellung der weiteren Durchsatzkennlinien befindet sich in Anhang J.

beliebig skalierbaren Materialfluss bereits recht nahe. Die sich ergebende Gesamtkennlinie ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

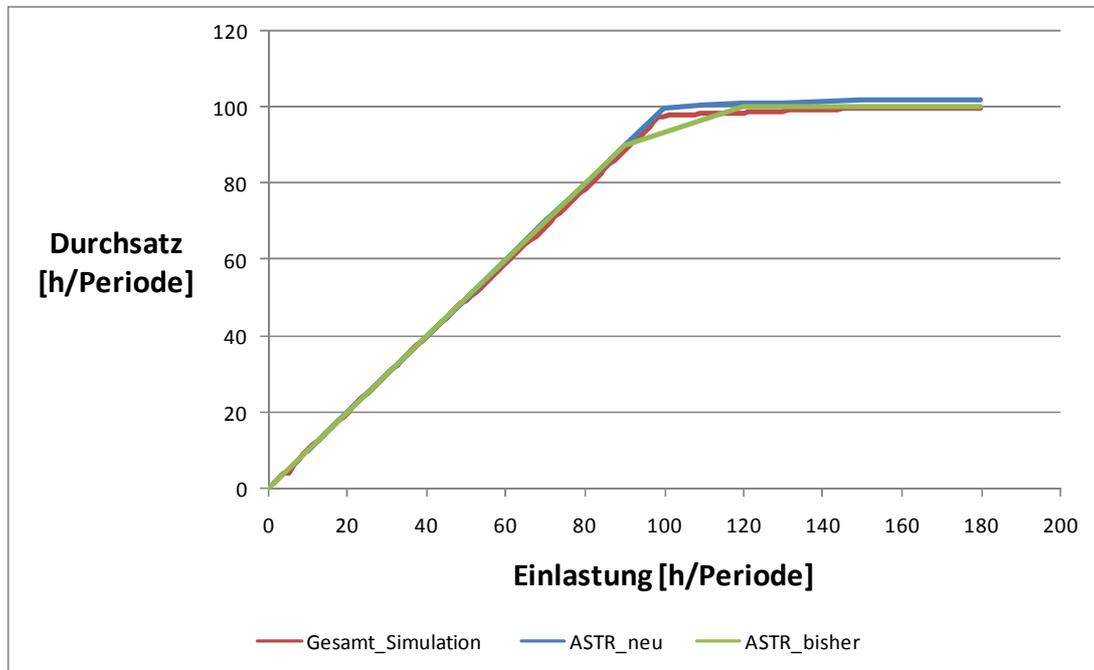


Abbildung 56: Gesamtdurchsatzkennlinie mit Auftragsinhalt  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  im Fall 1

Quelle: eigene Darstellung.

Es ist auffallend, dass die simulierte Kennlinie im Gegensatz zur bisherigen Kennlinie, nur einen Knickpunkt zu besitzen scheint. Dies hängt mit der Reihenfolge der Auftragseinlastung zusammen. Da die Einlastung an allen Arbeitsstationen pro Schritt jeweils um  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  gesteigert wird, werden AS2 und AS3 gleichzeitig zum Engpass. Aus diesem Grund kann es auch nur einen Knickpunkt und damit auch nur eine Einlastung geben, bei der die Leistung des Systems abfällt. In der bisherigen Kennlinie werden zwei Knickpunkte simuliert. Diese Knickpunkte würden beispielsweise auftreten, wenn die Einlastung immer im gleichen Verhältnis gesteigert würde, z.B. jeweils um 5%. Dann ergäbe sich erst AS2 als Engpass und im weiteren Verlauf AS3 als Engpass. Die Berücksichtigung, wie viel Arbeit pro Schritt eingelastet wird, bietet der bisherige Algorithmus nicht.

Die Abweichung zwischen der Simulation und der neu berechneten Gesamtkennlinie beträgt  $2,13 \frac{h}{\text{Periode}}$ , also relativ 2,1%.<sup>114</sup> Zwischen der bisherigen Berechnung und der Simulation gibt es einen Unterschied von  $1 \frac{h}{\text{Periode}}$  und somit 1%:

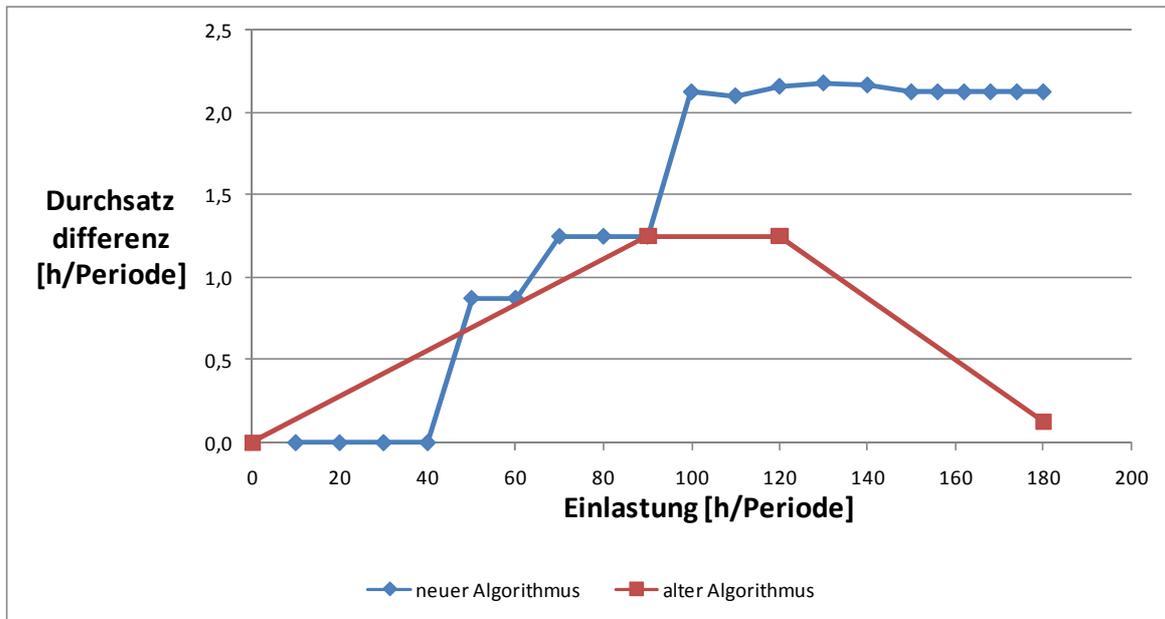


Abbildung 57: Gesamtdurchsatzdifferenzen bei Auftragsgröße  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  im Fall 1

Quelle: eigene Darstellung.

Das Durchsatzpotential der Simulation hat zudem eine Abweichung von  $0,25 \frac{h}{\text{Periode}}$  von der bisherigen Berechnung und  $2,25 \frac{h}{\text{Periode}}$  von dem Durchsatzpotential nach dem neuen Algorithmus.

Es bleibt festzuhalten, dass die bisherige Gesamtkennlinie bei der maximalen Einlastung eine geringere Abweichung von der Simulation besitzt, im Vergleich mit dem neuen Algorithmus. Dies steht zunächst im Widerspruch zur Entwicklung der einzelnen Durchsatzkennlinien. Dort war die Abweichung des neuen Algorithmus immer geringer als die des bisherigen. Allerdings entsteht die geringe Differenz im bisherigen Algorithmus dadurch, dass bei den Einzelkennlinien, wie oben demonstriert, jeweils eine positive und eine negative Abweichung vorkommen. Werden diese beiden Abweichungen nun bei der Berechnung der ge-

<sup>114</sup> Die Darstellungen der Durchsatzdifferenzen befinden sich in Anhang J.

samten Kennlinie addiert, so ergibt sich eine geringere Gesamtdifferenz. Allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, dass dies bei jedem berechneten Szenario der Fall ist. Eine explizite Berücksichtigung der Einlastungsreihenfolge erlaubt nur der neue Algorithmus.

Die Annäherung der simulierten Kennlinie an die neue berechnete Kennlinie in Werten und Verlauf bei Verringerung der Auftragsgröße kann als Bestätigung der Annahme interpretiert werden, dass Auftragsströme bei der Berechnung der Durchsatzkennlinie als kontinuierlich und skalierbar angesehen werden müssen. Durch die Reduzierung der Auftragsinhalte wurde ein nahezu beliebig skalierbarer Auftragsfluss geschaffen. So beträgt bei einem Auftragsinhalt von  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  die Abweichung von neuer Berechnung zu Simulation lediglich 2%. Dies bedeutet, dass ein Auftrag 0,625% der Einlastung eines Materialstromes an einer Arbeitsstation ausmacht. Daraus ergibt sich ein langer Zeithorizont, der betrachtet werden müsste, um realistische Ergebnisse erreichen.

Damit konnte der Beweis angetreten werden, dass der neue Algorithmus bei konstantem Auftragsinhalt und konstantem Abstand zwischen Aufträgen gute Ergebnisse liefern kann, wenn die Anzahl der Aufträge ausreichend klein im Vergleich zur gesamten Einlastung gewählt wird. Je besser die Annahme vom kontinuierlichen, frei skalierbaren Auftragsstrom zutrifft, desto genauere Ergebnisse lassen sich erzielen.

### 5.2.2 Simulation mit konstanten Auftragsinhalten und variablen Abständen

Im nächsten Simulationsschritt wird nun geprüft, wie sich die Variation der Einlastungszeitpunkte auf die Berechnung des Durchsatzes auswirkt. Dabei wird untersucht, wie sich Terminunsicherheiten auf die Berechnung der neuen und bisherigen Durchsatzkennlinie auswirken. Im vorherigen Szenario wurde davon ausgegangen, dass Aufträge immer im gleichen Takt für die Fertigung freigegeben werden. Dies entspricht der Organisation der getakteten Fließfertigung. Werden die Abstände zwischen zwei Aufträgen nun variiert, so kann dies mit der diskontinuierlichen Freigabe von Aufträgen gleichgesetzt werden.

Es wird dennoch die Annahme getroffen, dass es einen durchschnittlichen Abstand gibt, der zwischen den freigegebenen Aufträgen liegt. Allerdings streuen die Freigabeabstände verschieden stark um diesen Mittelwert. Damit kann angenommen werden, dass dieser Abstand durch eine Normalverteilung beschrieben werden kann:

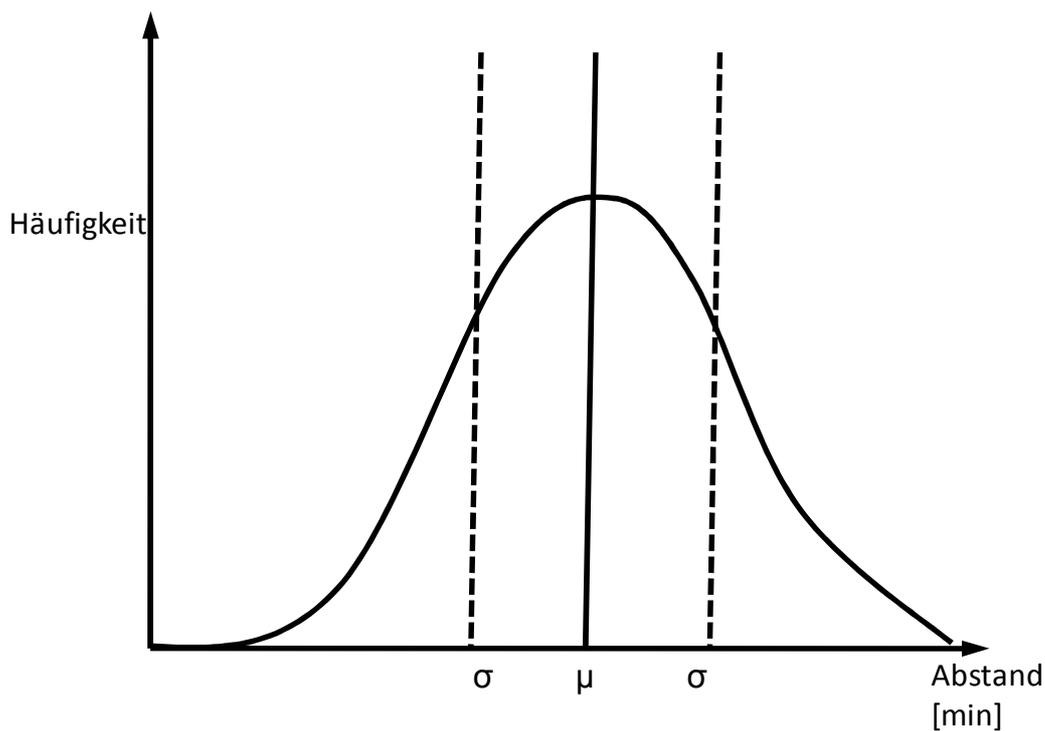


Abbildung 58: Normalverteilung der Freigabeabstände

Quelle: eigene Darstellung.

Die Normalverteilung kann dabei als folgende Funktion beschrieben werden:<sup>115</sup>

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad [5.1]$$

Dabei wird der Mittelwert mit  $\mu$  ausgedrückt. Da die Abweichungen unter Annahme von freiskalierbaren Auftragsströmen am geringsten waren, wird hier das Szenario mit der Auftragsgröße von  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  gewählt. Im Rückschluss ergibt daher also ein Mittelwert von  $7,5 \frac{\text{Minute}}{\text{Freigabeabstand}}$  bzw.  $450 \frac{\text{Sekunden}}{\text{Freigabeabstand}}$ . Die Streuung um diesen Mittelwert wird durch die Standardabweichung  $\sigma$  in die Berechnung mit einbezogen. Innerhalb des Bereiches von einer Standardabweichung ober- und unterhalb des Mittelwertes liegen 66,7% der Freigabeabstände. Es soll untersucht werden, inwiefern das Ausmaß der Streuung eine Auswirkung

<sup>115</sup> Vgl. Papula (2001), S.367ff.

auf die Berechnung des Durchsatzes hat. Aus diesem Grund werden vier verschiedene Standardabweichungen gewählt, die in der nachfolgenden Tabelle dargestellt werden:

Szenario	relatives $\sigma$ [% von $\mu$ ]	absolutes $\sigma$ [Sekunden]
1	10	45
2	25	113
3	50	225
4	75	338

Tabelle 19: Variation der Standardabweichung des Freigabeabstandes

Quelle: eigene Darstellung.

Das Szenario bleibt in allen anderen Werten gleich mit dem Szenario  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  aus Kapitel 5.2.<sup>116</sup> Es werden jeweils die Durchsatzkennlinien von ASTR1, ASTR2 und die Gesamtkennlinie mit den vier verschiedenen streuenden Freigabeabständen simuliert. In der folgenden Abbildung werden die bisherige und die neue Durchsatzkennlinie der simulierten Durchsatzkennlinie mit einer Standardabweichung von 10% des Mittelwertes gegenübergestellt:

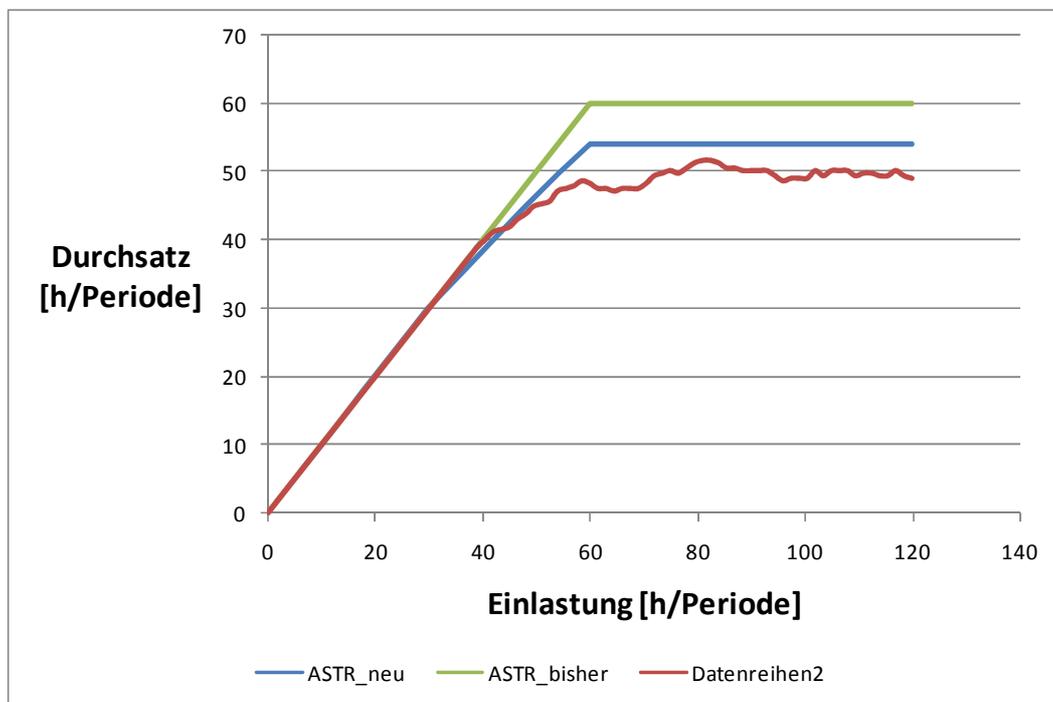


Abbildung 59: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 3

<sup>116</sup> Die Simulationsmodelle und Auswertungen sind auf der beiliegenden CD zur Verfügung gestellt.

Quelle: eigene Darstellung.

Es fällt auf, dass die simulierte Durchsatzkennlinie erhebliche Unregelmäßigkeiten enthält. Diese entstehen ab einer Einlastung von  $39 \frac{h}{\text{Periode}}$  bei ASTR1. Ab diesem Wert werden auf jeder Arbeitsstation, die ASTR1 passiert,  $6,5 \frac{h}{\text{Periode}}$  eingelastet. Da in diesem Szenario davon ausgegangen wird, dass ASTR2 bereits von Anfang an in voller Höhe eingelastet wird, entsteht an AS2 ab diesem Zeitpunkt ein Engpass und der Durchsatz von ASTR1 geht zurück. Damit soll die Durchsatzvorhersage durch den neuen Algorithmus geprüft werden.

Die fortgeführten Unregelmäßigkeiten der simulierten Kennlinie lassen sich auf die Schwankungen des Freigabeabstandes zurückführen. Da die Aufträge in unregelmäßigen Abständen freigegeben werden, entstehen immer wieder Warteschlangen und Leerläufe im Produktionssystem. Dies führt dazu, dass Aufträge Wartezeiten in Kauf nehmen müssen und innerhalb der Periode nicht mehr fertiggestellt werden können. Wird die Abweichung von bisheriger bzw. neuer Kennlinie in Bezug auf die simulierte Durchsatzkennlinie dargestellt, so ergibt sich folgendes Bild:

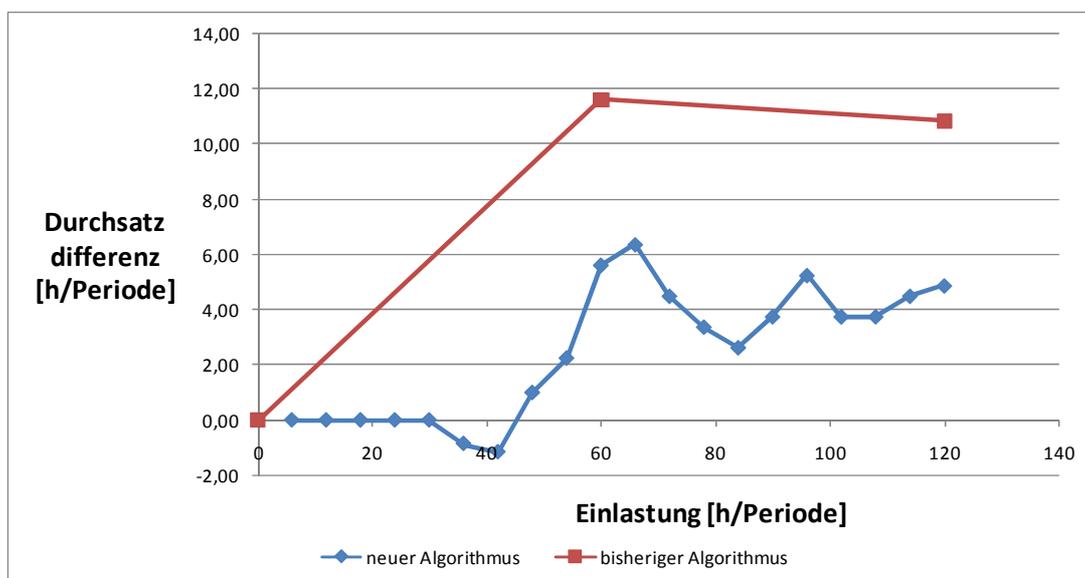


Abbildung 60: Durchsatzdifferenzen bei ASTR1 mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 3

Quelle: eigene Darstellung.

Dabei ist zu erkennen, dass der Abstand zwischen der bisherigen Kennlinie und der Simulation bis auf fast  $12 \frac{h}{\text{Periode}}$  anwächst. Die Differenz zwischen neuem Algorithmus und der simulierten Kennlinie bewegt sich hauptsächlich zwischen  $2 \frac{h}{\text{Periode}}$  und  $6 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Weiterhin fällt auf, dass die simulierte Kennlinie immer unterhalb der neuen Kennlinie bleibt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die neue Kennlinie in diesem Szenario eine Obergrenze darstellt. Da es sich bei ihr um eine ideale Annahme handelt, bei der die Aufträge immer zu gleichen Zeitpunkten freigegeben werden, können keine Warteschlangen aufgrund schlecht abgestimmter Termine entstehen. Die auftretenden Warteschlangen sind hier nur auf mangelnde Kapazitäten zurückzuführen.

Wird die Standardabweichung nun allerdings weiterhin vergrößert, so ändert sich die Abweichung der Kennlinien nicht. Die Abstände zwischen den verschiedenen Durchsatzkennlinien bleiben annähernd gleich<sup>117</sup>. Als Beispiel sind hier die Durchsatzkennlinien für eine Standardabweichung in Höhe von 75 % dargestellt:

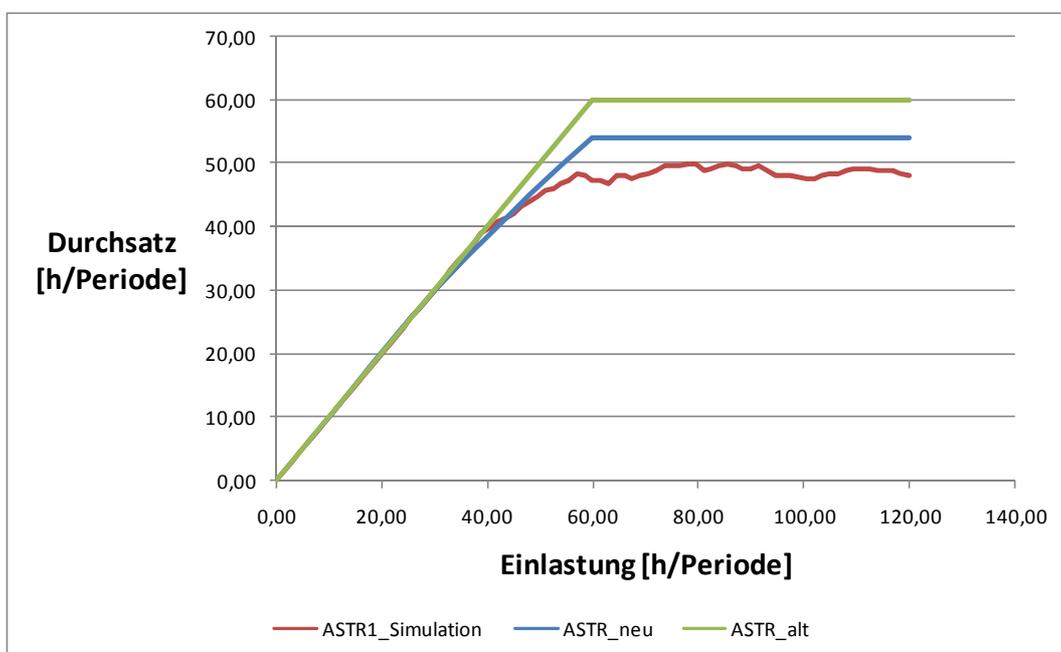


Abbildung 61: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit  $\sigma = 338$  Sekunden im Fall 3

Quelle: eigene Darstellung.

<sup>117</sup>Die Darstellungen der weiteren Durchsatzkennlinien befinden sich in Anhang K.

Dies lässt sich über den gesamten Abstandsverlauf hinweg erkennen. Auch hier bleibt der Abstand zwischen bisheriger Kennlinie und Simulation zwischen  $10 \frac{h}{\text{Periode}}$  und  $12 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Dies entspricht einer relativen Abweichung von bis zu 22%. Die neue und die simulierte Kennlinie haben dagegen nur eine Differenzen innerhalb einer Bandbreite zwischen  $2 \frac{h}{\text{Periode}}$  und  $6 \frac{h}{\text{Periode}}$ , also einer Abweichung von bis zu 12%. Der Sachverhalt ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

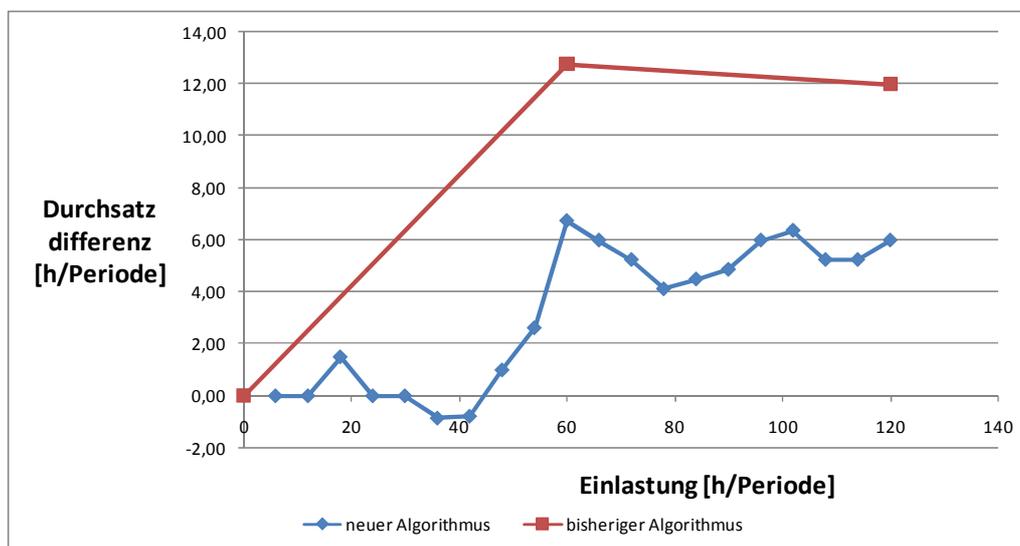


Abbildung 62: Durchsatzdifferenzen ASTR1 bei  $\sigma = 338$  Sekunden im Fall 3

Quelle: eigene Darstellung.

Allerdings sind in diesen Betrachtungen noch Abweichungen aufgrund der diskreten Arbeitsinhalte enthalten. Diese betragen bei der bisherigen Kennlinie 13,2% und bei der neuen Kennlinie 2,1%. Werden nun die relative, maximale Abweichung von 22% bzw. 12% um den jeweiligen Störeinfluss aufgrund der Diskretion bereinigt, so ergibt sich ein Wert von 10%. Diese relative Abweichung entspricht der Differenz, welche durch die Streuung der Freigabeabstände hervorgerufen wird. Bei ASTR1 konnte allerdings keine Abhängigkeit von der Größe der Streuung erkannt werden.

Im nächsten Szenario wird überprüft, ob diese Annahme auch bei der Durchsatzkennlinie von ASTR2 zutrifft. Wie bei dem vorherigen Szenario in Kapitel 5.2.1 wird davon ausgegan-

gen, dass ASTR1 bereits in vollem Ausmaß von Anfang an eingelastet wird. Anschließend wird die Einlastung von ASTR2 schrittweise um Beträge von  $0,125 \frac{h}{\text{Periode}}$  gesteigert. Dabei werden auch hier vier Möglichkeiten mit Varianzen von 10%, 25%, 50% und 75% Standardabweichung simuliert. Das Ergebnis wird in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

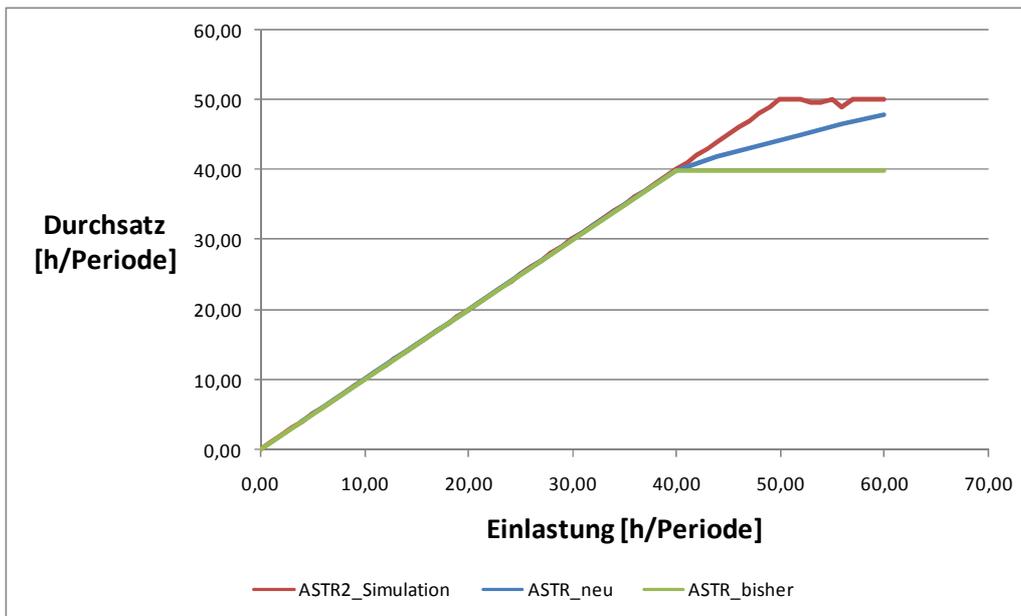


Abbildung 63: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 3

Quelle: eigene Darstellung.

Es fällt sofort auf, dass die simulierte Kennlinie auch über den Knickpunkt der beiden anderen Kennlinien hinweg anwächst. Im Gegensatz zu ASTR1 bleibt also hier der simulierte Durchsatz über dem berechneten Durchsatz. Die Erklärung dafür ist in der Streuung der Auftragsfreigabepunkte zu finden. Da bei ASTR1 die Aufträge nach ihrer Freigabe zunächst gemeinsam auf AS2 bearbeitet werden, bildet sich aufgrund der verschiedenen Freigabeabstände hier eine Warteschlange, die größer ist als im kontinuierlichen Fall. Dies führt zu Durchsatzverlusten. Ein Teil von ASTR2 nimmt jedoch den Weg über AS3 und so tritt dort eine Auftragsunterversorgung auf. Daraus ergibt sich ein Vorteil für ASTR1. Dort gibt es zwar auch Schwankungen in der Auftragsfreigabe, aber die Aufträge werden nicht noch zusätzlich durch andere Aufträge eines weiteren Materialflusses behindert. Da an AS3 ASTR1 und ASTR2 zusammenlaufen, kann die frei werdende Kapazität so leichter von ASTR2 besetzt werden und der Durchsatz des Auftragsstromes steigt. Dies ist aber auch nur bis zu einer Einlastung von  $50 \frac{h}{\text{Periode}}$  möglich. Danach sind auch diese frei werdenden Kapazitäten er-

schöpft und es entsteht kein weiterer Durchsatzzuwachs. Die Abweichungen der Kennlinien untereinander sind auch hier wieder in der nachfolgenden Darstellung abgebildet:

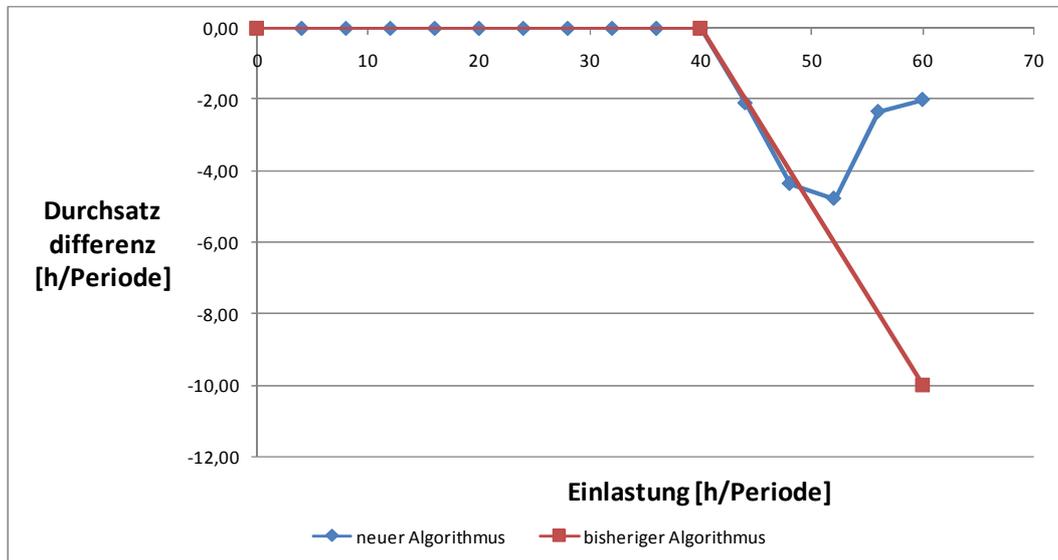


Abbildung 64: Abweichung bei ASTR2 mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 3

Quelle: eigene Darstellung.

Da die simulierte Kennlinie über den berechneten liegt, ergibt sich hier eine negative Differenz. Auch hier ist die Abweichung der neuen Berechnung geringer als die bisher benutzte Kennlinie. Auffällig ist, dass die Beträge der Abweichungen voneinander vergleichbar sind mit den Abweichungen, die bei ASTR1 auftreten. Nur das Vorzeichen hat sich verändert.

Bei der Simulation von ASTR1 veränderte sich der Durchsatz nicht in Abhängigkeit der Streubreite des Freigabetermins. Bei ASTR2 ist dies ebenfalls der Fall. Auch dort ist keine Abhängigkeit zu erkennen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die simulierten und berechneten Durchsatzkennlinien von ASTR2 bei einer Standardabweichung von 75 %:<sup>118</sup>

<sup>118</sup> Die Abbildungen der weiteren Durchsatzkennlinien befinden sich in Anhang K.

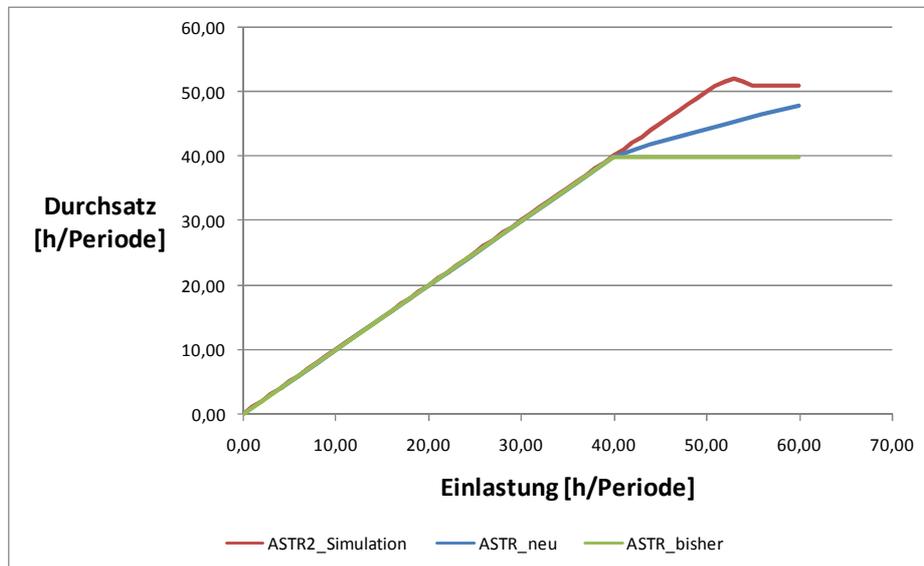


Abbildung 65: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit  $\sigma = 338$  Sekunden im Fall 3

Quelle: eigene Darstellung.

Auch hier steigt der Durchsatz wieder über die berechneten Werte. Die berechnete Kennlinie stellt hier also eher eine untere Grenze der Durchsatzkennlinie dar. Dementsprechend lassen sich auch die Durchsatzdifferenzen darstellen<sup>119</sup>:

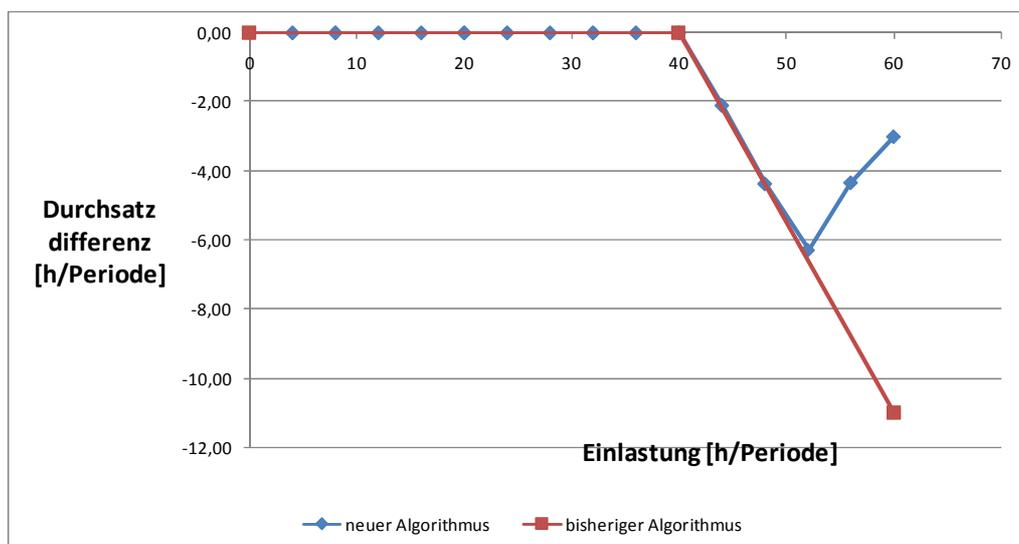


Abbildung 66: Durchsatzdifferenzen ASTR2 bei  $\sigma = 338$  Sekunden im Fall 3

<sup>119</sup> Die Darstellungen der Durchsatzdifferenzen befinden sich in Anhang L

Quelle: eigene Darstellung.

Bei ASTR2 liegt die Differenz zwischen neuem Algorithmus und Simulation mit 9% unter der Differenz zwischen bisherigem Algorithmus und Simulation mit 20%. Diese Entwicklung lässt sich auch bei der Vergrößerung der Standardabweichung beobachten. Es kann also die Aussage getroffen werden, dass zwar durch unregelmäßige Freigabetermine Unterschiede in den Auftragsstromkennlinien entstehen, diese jedoch unabhängig sind von der Verteilung der Freigabetermine. Die Begründung dafür liegt nahe. Denn obwohl es nun eine Verteilung von Freigabeterminen gibt, so existiert doch weiterhin ein Mittelwert. Da es sich um eine relativ große Anzahl von freigegebenen Aufträgen handelt, ist damit zu rechnen, dass dieser Mittelwert relativ gut erreicht wird. Damit ist es nebensächlich, wie stark die Streuung ausfällt. Die statistischen Annahmen für eine Laplace'sche Wahrscheinlichkeitsberechnung sind auch hier erfüllt, so dass der Algorithmus auch weiterhin funktionsfähig bleibt.

Nun stellt sich die Frage, ob sich die Abweichungen der beiden Durchsatzkennlinien in der gesamten Kennlinie ausgleichen. Es konnte gezeigt werden, dass der Abweichungsbetrag gleich war und es gab nur Unterschiede im Vorzeichen. Würden beide Kennlinien nun addiert, so ergäbe sich in der Summe wieder die berechnete Kennlinie. Dazu ist die Simulation für die Durchsatzkennlinie mit einer Standardabweichung von 10% in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

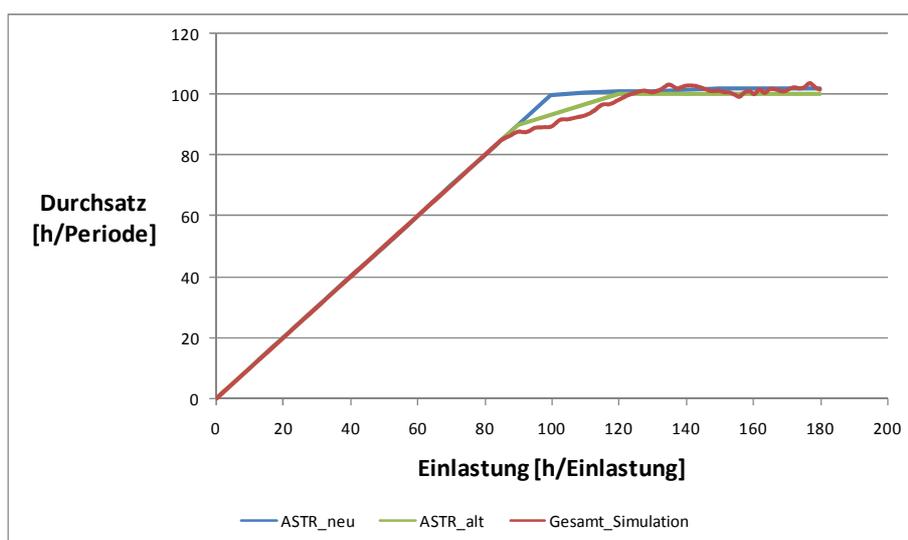


Abbildung 67: Gesamtdurchsatzkennlinie mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 3

Quelle: eigene Darstellung.

Es fällt dabei sofort auf, dass die Simulation sich der bisherigen Durchsatzkennlinie annähert. Diese Kennlinie ging allerdings von einer proportionalen Einlastungssteigerung aus.<sup>120</sup> Dabei ergibt sich eine Kennlinie mit zwei Knickstellen anstatt einer. Auch hier ist die Erklärung in der Verteilung der Freigabezeitpunkte zu finden. Im Gegensatz zu dem vorherigen Simulationsfall, bei dem zu genau definierten Zeitpunkten eingelastet wurde, wird hier eine gewisse Verschiebung wahrgenommen. Diese Verschiebung führt dazu, dass zuerst bei AS2 ein Engpass entsteht, bevor bei AS3 ein Engpass auftaucht. Dies konnte auch bereits bei den einzelnen Durchsatzkennlinien beobachtet werden. Dort war der Durchsatz von ASTR2 größer und der Durchsatz von ASTR1 kleiner als berechnet. Die logische Konsequenz sind zwei Engpässe, die in der Einlastungsreihenfolge verschoben sind. Aus diesem Grund ähnelt die simulierte Kennlinie eher der Kennlinie mit proportionaler Einlastungsreihenfolge. Vergleicht man nun die Durchsatzdifferenzen miteinander, so erhält man ein ähnliches Bild:

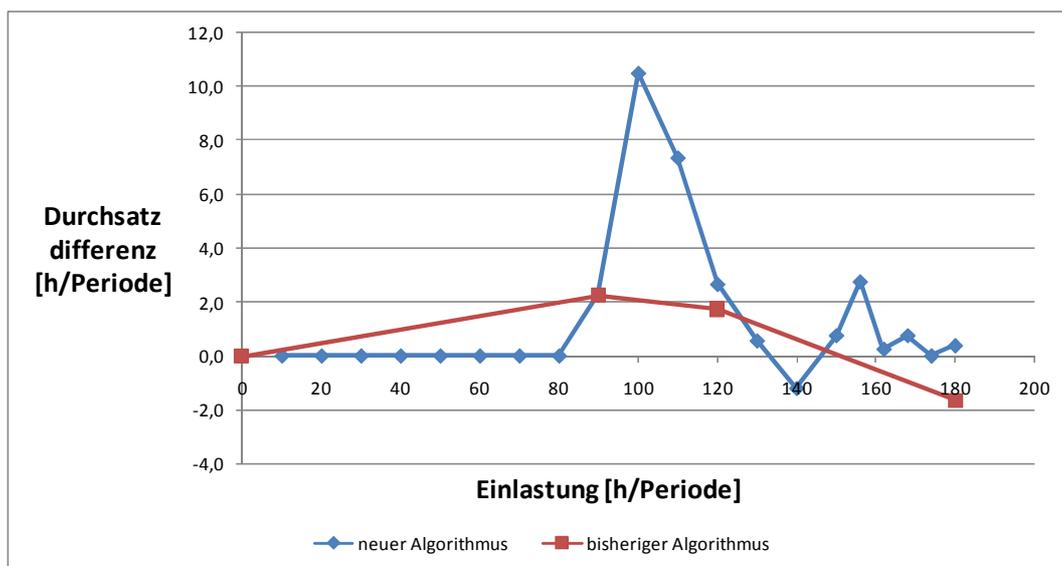


Abbildung 68: Durchsatzdifferenzen Gesamtkennlinie mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 3  
Quelle: eigene Darstellung.

Es ist eindeutig zu erkennen, dass in der Mitte des Einlastungsbereichs bei ca.  $100 \frac{h}{\text{Periode}}$  die Differenz zwischen Simulation und neuem Algorithmus am größten ist. Abgesehen von dieser Anomalie treffen die Algorithmen den simulierten Durchsatz gut. Die Differenz besitzt im Höchstfall einen Betrag von  $2 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Nun können die simulierten Ergebnisse einer Berechnung mit proportionaler Einlastungserhöhung gegenübergestellt werden. Dabei wurde in

<sup>120</sup> Vgl. Kapitel 5.2.1.

jedem Berechnungsschritt die Einlastung um 5% der Gesamteinlastung erhöht. Es ergeben sich folgende Kennlinien:

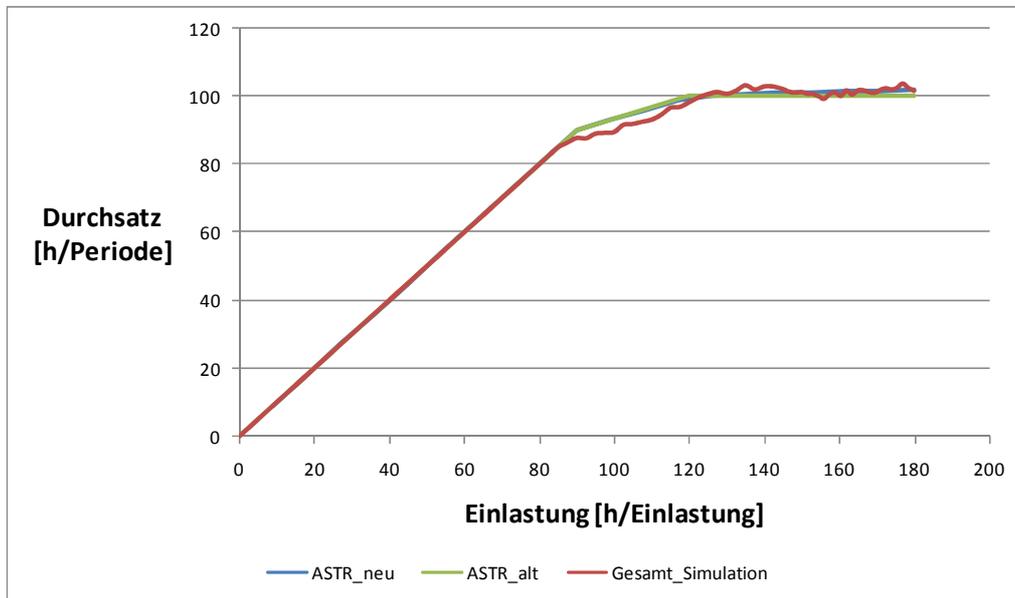


Abbildung 69: Gesamtdurchsatzkennlinie mit proportionaler Einlastung bei  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 3

Quelle: eigene Darstellung.

Es ist zu erkennen, dass die neue und die bisherige Kennlinie in diesem Szenario deckungsgleich sind. Die Anomalie bei einer Einlastung von  $100 \frac{h}{\text{Periode}}$  ist hier nicht mehr vorhanden. Dementsprechend reduzieren sich die Abweichungen. Werden die Abweichungen abgebildet, so entsteht folgende Darstellung:

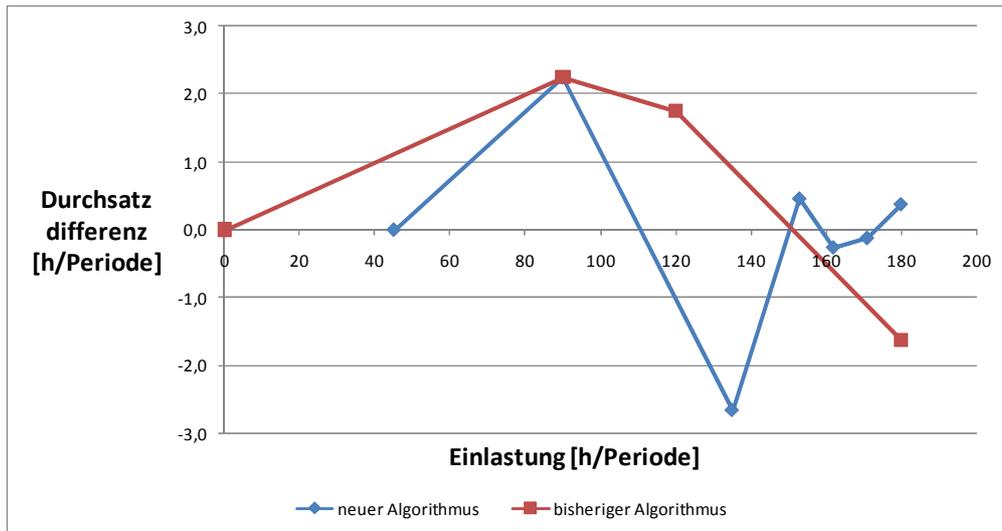


Abbildung 70: Durchsatzdifferenzen Gesamtkennlinie mit proportionaler Einlastung bei  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 3

Quelle: eigene Darstellung.

Hier besitzen die Abweichungen wieder den bekannten Betrag von ca.  $2 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Dies beweist wiederum, dass die Einlastungsreihenfolge eine sehr große Rolle bei der Berechnung der Durchsatzkennlinie spielt. Diese Berücksichtigung wird mit dem neuen Algorithmus möglich, der bisherige Algorithmus bietet nur eine Betrachtungsweise der Einlastungsreihenfolge, die Einlastung proportionaler Auftragsgrößen.

Für den Beweis, ob die Durchsatzkennlinie von der Streubreite der Freigabezeitpunkte abhängt, ist diese Betrachtung jedoch nicht relevant. Auch die simulierte Kennlinie zeigt keine Veränderung in Abhängigkeit von der wachsenden Standardabweichung.<sup>121</sup> Auch die Durchsatzdifferenzen bleiben in der gleichen Gestalt.<sup>122</sup> Vielmehr reduziert sich die absolute Abweichung bei der Gesamtkennlinie noch im Vergleich zu den einzelnen Kennlinien. Bei den einzelnen Kennlinien wurden Abweichungen von bis  $6 \frac{h}{\text{Periode}}$  zwischen simulierter und neu berechneter Kennlinie festgestellt. Bei der Gesamtkennlinie waren die höchsten Abweichungen, abgesehen von der vorher angesprochenen Anomalie, im Bereich von  $2 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Die Begründung dafür liegt in der Addition der Durchsatzdifferenzen. Während bei ASTR1 die Abweichung stets negativ war, so ergab sich bei ASTR1 immer eine positive Differenz. Bei Addition dieser beiden Zahlen berechnet sich im Durchschnitt immer ein geringerer Unter-

<sup>121</sup> Die Abbildungen der weiteren Durchsatzkennlinien sind in Anhang M zu finden.

<sup>122</sup> Die Darstellungen der Durchsatzdifferenzen befinden sich in Anhang M.

schied, da die beiden Differenzen einen ähnlich hohen Betrag besitzen. Je größer die betrachtete Anzahl an Aufträgen ist, desto besser stimmt auch die Laplace'sche Wahrscheinlichkeit mit der Simulation überein und dementsprechend besser können auch Durchschnittswerte benutzt werden.

Weiterhin entstehen zwar Leistungsverluste bzw. -gewinne bei den einzelnen Auftragsströmen durch die Variation der Freigabezeitpunkte. Eine Abhängigkeit von der Breite der Streuung konnte jedoch nicht nachgewiesen werden, solange die Werte um einen definierten Mittelwert streuten. In Summe konnte aber keine nennenswerten Einbußen bei der Betrachtung des Gesamtsystems festgestellt werden.

### 5.2.3 Simulation mit variablen Auftragsinhalten und konstanten Abständen

Bisher wurde die Auftragsgröße immer bei einem konstanten Wert gehalten. Dies entspricht einer Massen- oder Großserienfertigung. Bei der Kleinserien- oder Einzelfertigung variieren die Auftragsgrößen meist. Da dort oftmals kundenspezifische Produkte hergestellt werden, müssen auch dementsprechend die Einzelteile an die Kundenanforderungen angepasst werden. Im nächsten Simulationsfall wird deshalb eine schwankende Auftragsgröße betrachtet. Dazu muss zunächst die Frage beantwortet werden, welche Verteilungsfunktion der Auftragsgröße zugrunde gelegt werden sollte.

Als Orientierung werden dazu Beispieldaten der Firma Harburg Freudenberg herangezogen.<sup>123</sup> Diese wurden im Rahmen vorheriger Arbeiten bereits hinsichtlich Auftragsgröße analysiert. Dabei fällt auf, dass sehr viele Arbeitsgänge eine relativ geringe Auftragsgröße besitzen. Die meisten Aufträge besitzen einen Arbeitsinhalt von einer Stunde oder weniger. Der Mittelwert liegt bei einem Auftragsinhalt von 4,3 Stunden. Es gibt Aufträge bis zu einer Größe von 112,5 Stunden Arbeitsinhalt. Die nachfolgende Darstellung zeigt die absolute Häufigkeit der verschiedenen Auftragsgrößen:

---

<sup>123</sup> Vgl. Altfeld(2008), S.19ff.

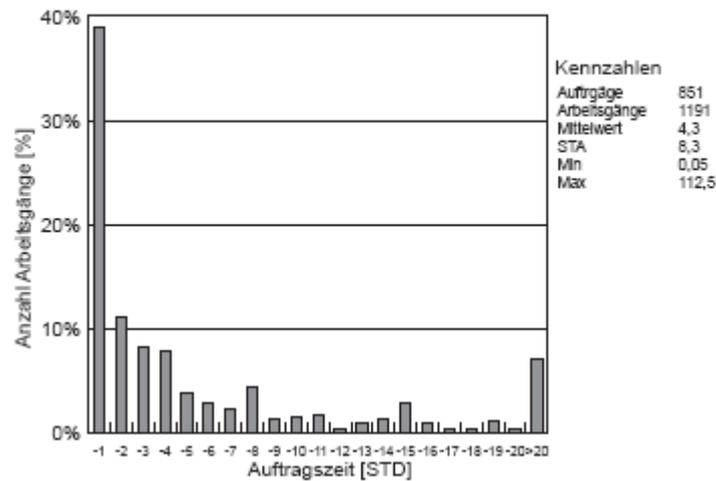


Abbildung 71: Verteilung der Arbeitsinhalte bei Harburg Freudenberg

Quelle: Altfeld (2008), S.19.

Diese Verteilung kann sehr gut mit der Chi-Quadrat Verteilung modelliert werden.<sup>124</sup> Diese ist in der folgenden Abbildung beispielhaft zu sehen:

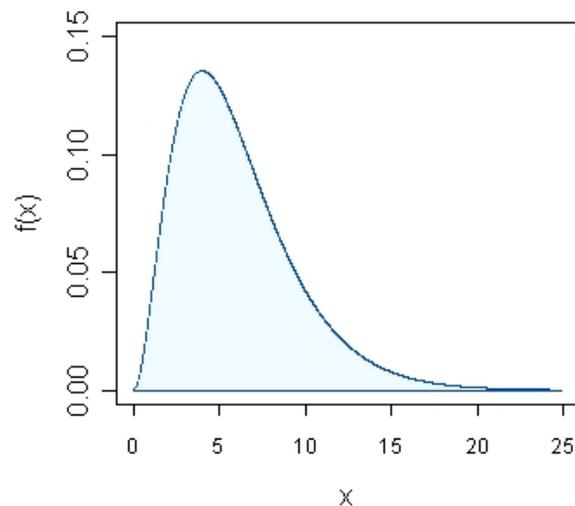


Abbildung 72: Beispielhafte Darstellung einer Chi-Quadrat Verteilung

Quelle: Vgl. [http://www.bb-sbl.de/assets/images/tutorial/Dichte\\_chi2\\_6df.jpg](http://www.bb-sbl.de/assets/images/tutorial/Dichte_chi2_6df.jpg), Stand: 30.04.2009.

<sup>124</sup> Vgl. Papula(2001), S.435ff.

Da die Auftragsgröße nicht geringer als 0 Stunden werden kann, lässt sich die Verteilungsfunktion durch folgende Gleichung beschreiben:<sup>125</sup>

$$f(x) = \begin{cases} A_n \cdot x^{\left(\frac{n-2}{2}\right)} \cdot e^{-\frac{x}{2}} & \text{für } x > 0 \\ 0 & \text{für } x \leq 0 \end{cases} \quad [5.2]$$

Dabei entspricht  $x$  der Auftragsgröße,  $n$  beschreibt den Mittelwert der Funktion und  $A_n$  stellt eine Normierungskonstante dar, damit das Integral der Dichtefunktion einen Wert von 1 besitzt. Mit Hilfe dieser Funktion lassen sich sehr gut zufallsverteilte Werte beschreiben, die immer positiv sind, einen relativ geringen Mittelwert eine große Streuweite nach oben besitzen.

Für die Simulation wird weiterhin von einem Arbeitsinhaltsmittelwert von  $0,125 \frac{h}{\text{Auftrag}}$  ausgegangen. Mit diesem Wert werden bei der vorherigen Simulation die besten Resultate erzielt, da sie relativ gut der Annahme von kontinuierlichen, frei skalierbaren Materialflüssen entspricht. Bei den Daten von Harburg Freudenbergler konnte ein Mittelwert von 4,3 Stunden bei einer Standardabweichung von 8,3 Stunden festgestellt werden. Dies entspricht einer relativen Standardabweichung von 93 %.<sup>126</sup> Die Standardabweichung und die Varianz der Chi-Quadrat Verteilung berechnet sich nach folgenden Formeln:<sup>127</sup>

$$\text{Mittelwert } \mu = n \quad [5.3]$$

$$\text{Varianz: } \sigma^2 = 2n \quad [5.4]$$

$$\text{Standardabweichung: } \sigma = \sqrt{2n} \quad [5.5]$$

Durch Umstellen von Formel 5.5 kann nun die Streuung der Verteilungsfunktion verändert werden:

---

<sup>125</sup> Vgl. Papula(2001), S.438.

<sup>126</sup> Vgl. Altfeld(2008), S.19.

<sup>127</sup> Vgl. Papula(2001), S.438.

$$n = \frac{\sigma^2}{2} \quad [5.5a]$$

Nun kann anhand einer Variation der Standardabweichung eine Streuung der Verteilungsfunktion verändert werden. Damit wird der Einfluss zunehmender Streubreite bei variablen Arbeitsinhalten untersucht. Die Standardabweichung wird von 10 % bis auf 75 % des Mittelwertes erhöht. Die Zeiten können dabei folgende Werte annehmen:

Szenario	relatives $\sigma$ [% von $\mu$ ]	absolutes $\sigma$ [Sekunden]
1	10	45
2	25	113
3	50	225
4	75	338

Tabelle 20: Variation der Standardabweichung des Arbeitsinhaltes

Quelle: eigene Darstellung.

Für jede Standardabweichung werden nun Einlastung und Durchsatz jedes Auftragsstromes und des gesamten Produktionssystems simuliert und mit den beiden Berechnungen verglichen. Da die Arbeitsinhalte jedoch einer Wahrscheinlichkeitsverteilung folgen, müssen eingeladete und durchgesetzte Arbeit nachträglich für jeden Materialfluss berechnet werden. Dazu muss die Auswertefunktion modifiziert werden.<sup>128</sup> Es wird zunächst der durchschnittliche Wertschöpfungsbeitrag, in Form der Produktionszeit, pro Auftrag eines Materialstromes ermittelt. Anschließend wird die Anzahl der eingeladenen und durchgesetzten Aufträge mit diesem Wert multipliziert und die geforderten Werte ermittelt.

Der Vergleich beginnt bei der Betrachtung von ASTR1. Bei einer Standardabweichung von 45 Sekunden bei einem Mittelwert von 450 Sekunden ergeben nur sehr geringe Abweichungen vom Szenario mit konstanten Arbeitsinhalten:

---

<sup>128</sup> Die Auswertefunktion befindet sich in Anhang N.

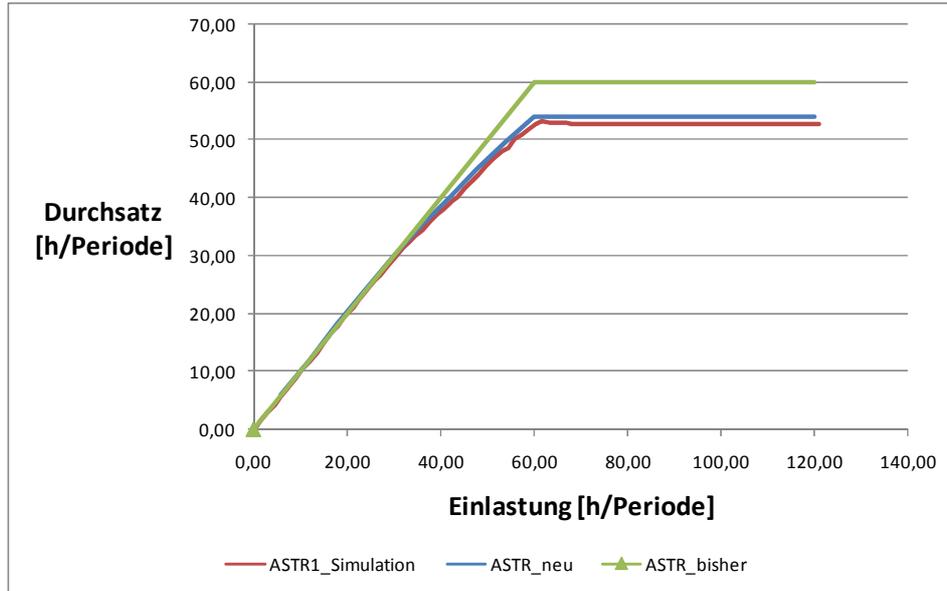


Abbildung 73: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 2

Quelle: eigene Darstellung.

Wie schon in Kapitel 5.2.1 gezeigt, erzielt der neue Algorithmus bessere Ergebnisse als der bisherige Algorithmus. Es sind lediglich kleinere Abweichungen durch den schwankenden Arbeitsinhalt der Aufträge zu sehen. In der nachfolgenden Darstellung ist die Abweichung abgebildet:

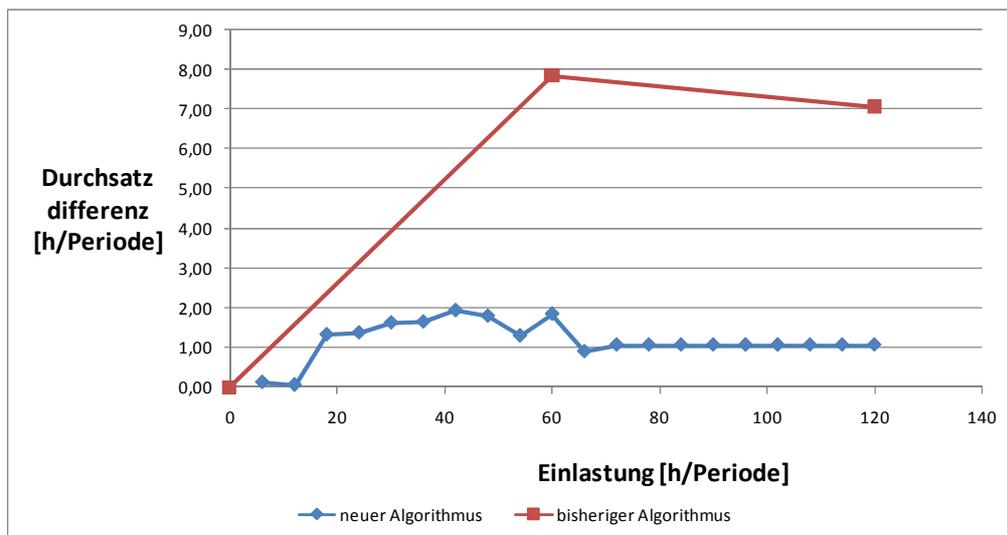


Abbildung 74: Durchsatzdifferenzen ASTR1 mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 2

Quelle: eigene Darstellung.

Auffällig ist jedoch, dass größere Abweichungen von neuem Algorithmus und Simulation nur in einem Einlastungsbereich bis  $60 \frac{h}{\text{Periode}}$  feststellbar sind. Ab diesem Einlastungsbetrag bildet sich vor dem Engpass AS2 eine Warteschlange, da die dortige Kapazität ausgeschöpft wurde. Ab diesem Wert bleibt die Abweichung konstant. Die Streubreite ist allerdings noch zu gering, um weitere Verzögerungen im Ablauf zu verursachen.

Wird die Streuung über die Standardabweichung allerdings noch weiter gesteigert, so werden die Schwankungen im Einlastungsverlauf immer stärker.<sup>129</sup> Dies kann in der nachfolgenden Abbildung abgeleitet werden, die die drei Durchsatzkennlinien bei einer Standardabweichung von 338 Sekunden darstellt:

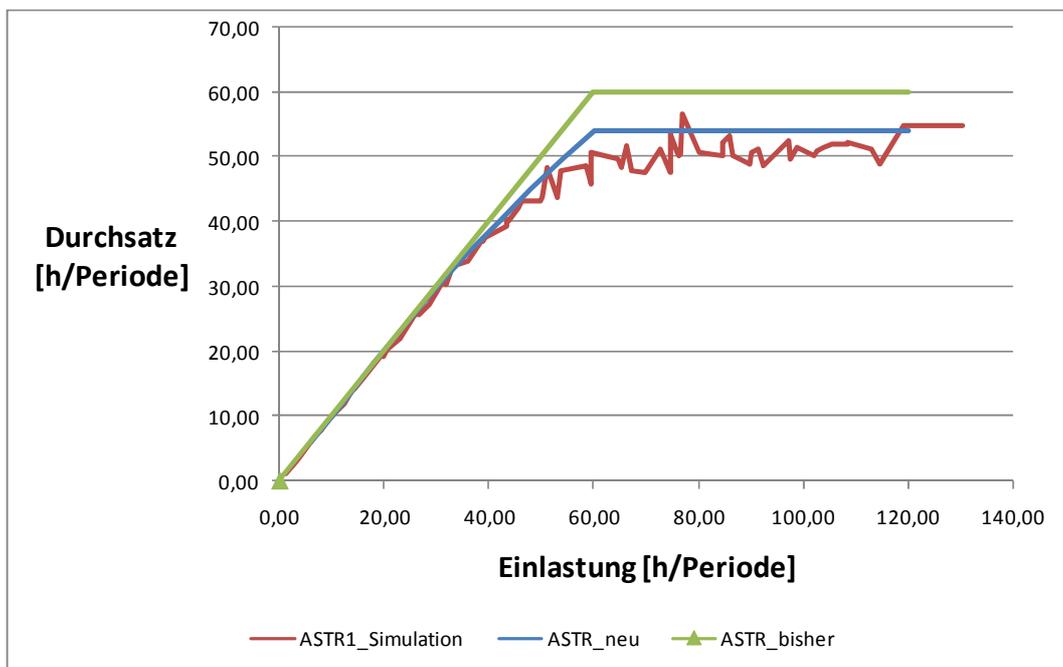


Abbildung 75: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit  $\sigma = 338$  Sekunden im Fall 2

Quelle: eigene Darstellung.

Hier können bereits sehr starke Schwankungen in der Durchsatzkennlinie erkannt werden, die durch die streuende Auftragsgrößen erklärt werden. Dementsprechend steigen auch die

<sup>129</sup> Die weiteren Durchsatzkennlinien befinden sich in Anhang O.

Abweichungen von den berechneten Kennlinien, wie in dem nachfolgenden Diagramm zu sehen ist<sup>130</sup>:

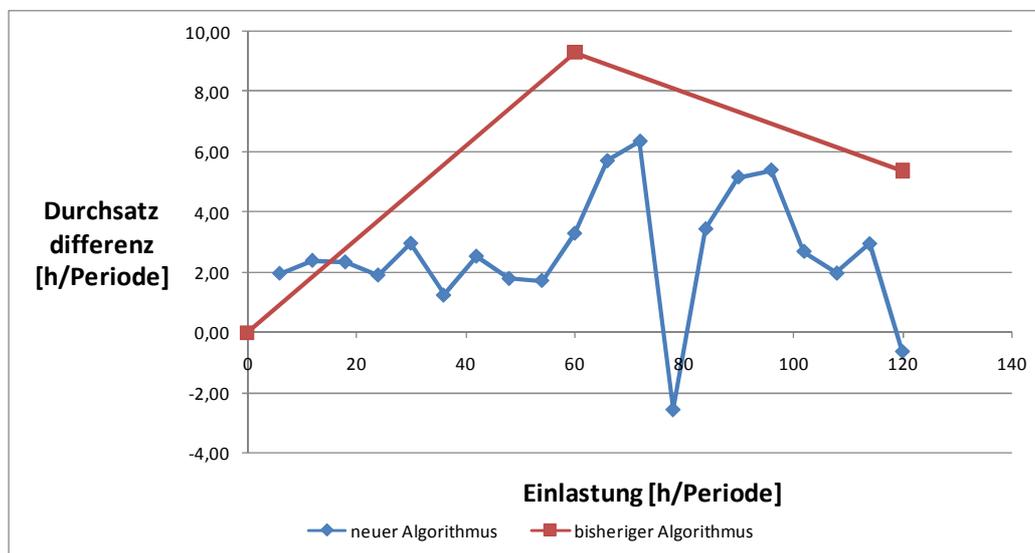


Abbildung 76: Durchsatzdifferenzen ASTR1 mit  $\sigma = 338$  Sekunden im Fall 2

Quelle: eigene Darstellung.

Aber auch hier ist zu erkennen, dass die Differenz des neuen Algorithmus meist geringer bleibt als die des bisherigen Algorithmus zur Simulation. Es fällt auf, dass die Differenz zwischen neuem Algorithmus und Simulation zumindest in einem Fall negativ wird. Dies lässt sich jedoch mit einer großen Abweichung der Auftragsgröße erklären. Trotzdem werden mit dem neuen Algorithmus bessere Werte erzielt als im Vergleich mit dem bisherigen Algorithmus.

Da die Differenzen mit der Größe der Schwankung zunehmen, wird die These aufgestellt, dass der Durchsatz von der Größe der Arbeitsinhalte und der Verteilung der Auftragsgrößen abhängig ist. Dies soll nun im weiteren Verlauf anhand von ASTR2 und Gesamtkennlinie noch weiter konkretisiert werden.

<sup>130</sup> Die Darstellungen der weiteren Durchsatzdifferenzen befinden sich in Anhang O.

Bei der Auswertung der Durchsatzkennlinie an ASTR2 ergibt sich ein ähnliches Bild. Auch dort ist die Abweichung bei einer Standardabweichung von 45 Sekunden relativ gering. Dies ist in der nachfolgenden Darstellung zu erkennen:

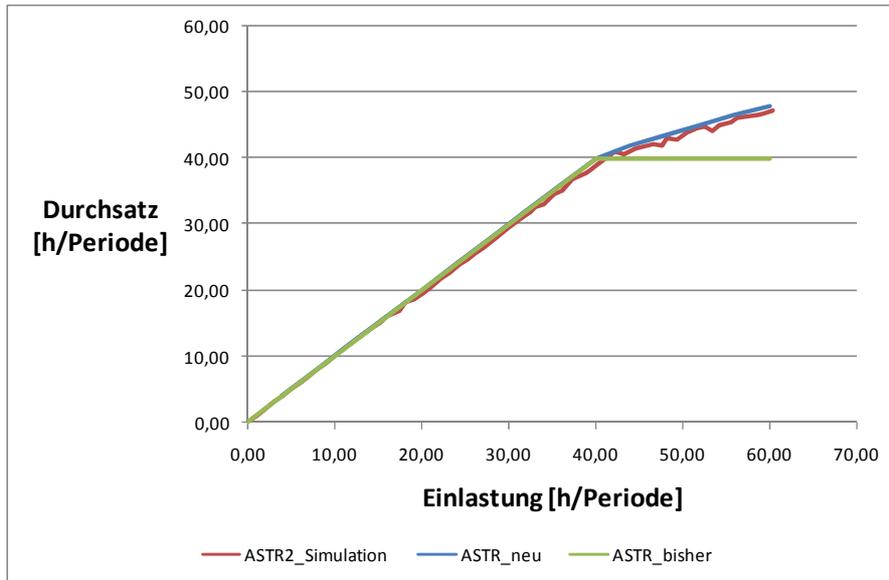


Abbildung 77: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 2

Quelle: eigene Darstellung.

Die Simulation folgt hier dem Verlauf des neuen Algorithmus<sup>131</sup>. Auch hier ist im Verlauf zu erkennen, dass die Durchsatzkennlinie ab einer Einlastung von  $40 \frac{h}{\text{Periode}}$  einen Knickpunkt erleidet. Bei einer geringen Schwankung der Auftragsgröße sind die Abweichungen von simulierter und neuer Kennlinie gering. Die Differenzen zwischen bisheriger und simulierter Kennlinie jedoch steigen mit wachsender Einlastung immer weiter an. Dies ist im nachfolgenden Diagramm abgebildet:

<sup>131</sup> Vgl. Kapitel 5.2.1.

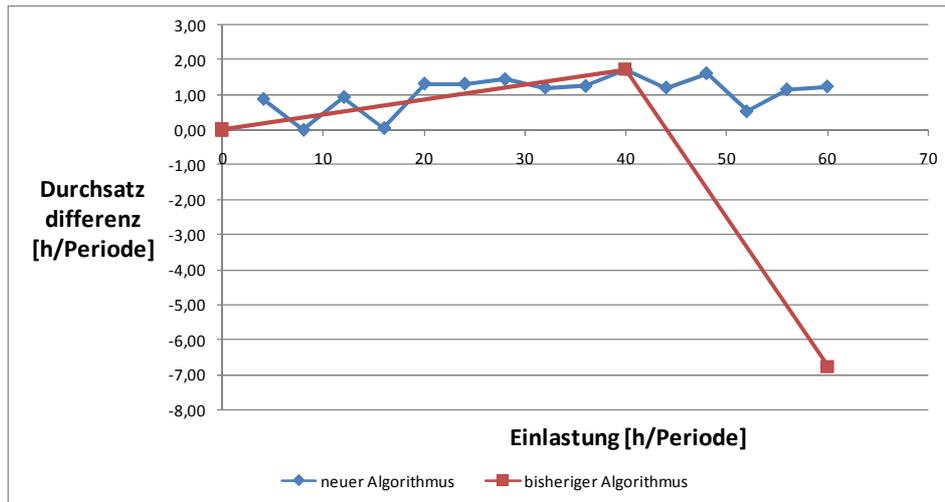


Abbildung 78: Durchsatzdifferenzen ASTR2 mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 2

Quelle: eigene Darstellung.

Die Abweichungen bleiben bis zum Knickpunkt bei  $40 \frac{h}{\text{Periode}}$  in einem geringen Maß bis ca.  $1,5 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Danach steigt die Abweichung zur bisherigen Kennlinie bis auf einen Wert von  $7 \frac{h}{\text{Periode}}$  an, die Abweichung zur neuen Kennlinie bleibt annähernd konstant.

Wie bei ASTR1 schwankt bei ASTR2 der Verlauf der Durchsatzkennlinie mit der Streubreite der Arbeitsinhalte immer stärker.<sup>132</sup> Da mit den Arbeitsinhalten auch die Bearbeitungszeiten schwanken, entstehen entlang des Verlaufs von ASTR2 immer wieder Warteschlangen und Leerläufe. Dies führt zu Leistungsschwankungen des Auftragsstromes. Müssen Aufträge auf eine frei werdende Arbeitsstation warten, so entstehen Leistungsverluste. Jedoch schwanken die Arbeitsinhalte von ASTR1, so dass hier auch Lücken in der Versorgung mit nachfolgenden Aufträgen entstehen. Dadurch werden Ressourcen auf AS3 frei, die wiederum von ASTR2 genutzt werden können. Dies hat Leistungssteigerungen zur Folge. In der nachfolgenden Abbildung sind die Durchsatzkennlinien für eine Standardabweichung von 338 Sekunden zu sehen:

<sup>132</sup> Die weiteren Durchsatzkennlinien befinden sich in Anhang P.

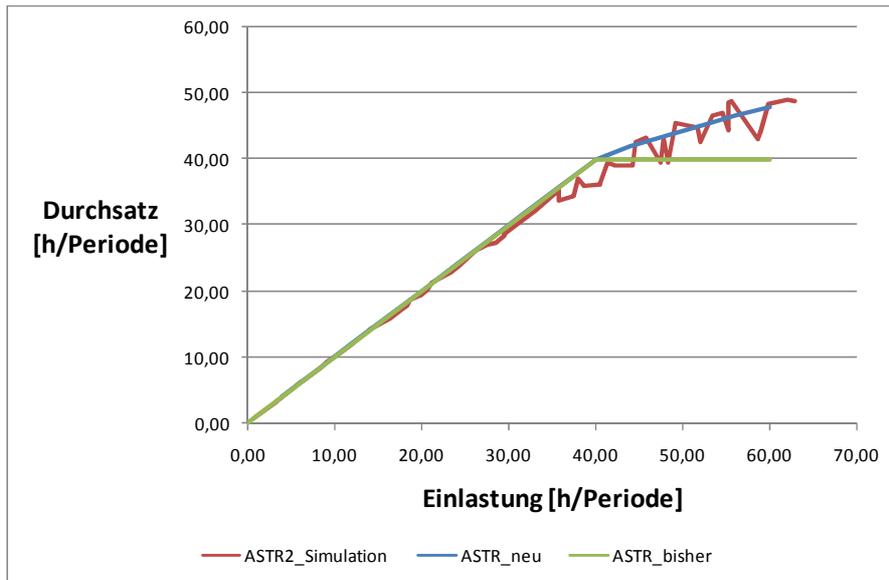


Abbildung 79: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit  $\sigma = 338$  Sekunden im Fall 2

Quelle: eigene Darstellung.

Analog zu ASTR1 nehmen auch die Abweichungen zwischen den Durchsatzkennlinien mit dem schwankenden Arbeitsinhalt zu<sup>133</sup>. Die Differenzen für eine Standardabweichung sind in dem nachfolgenden Diagramm dargestellt:

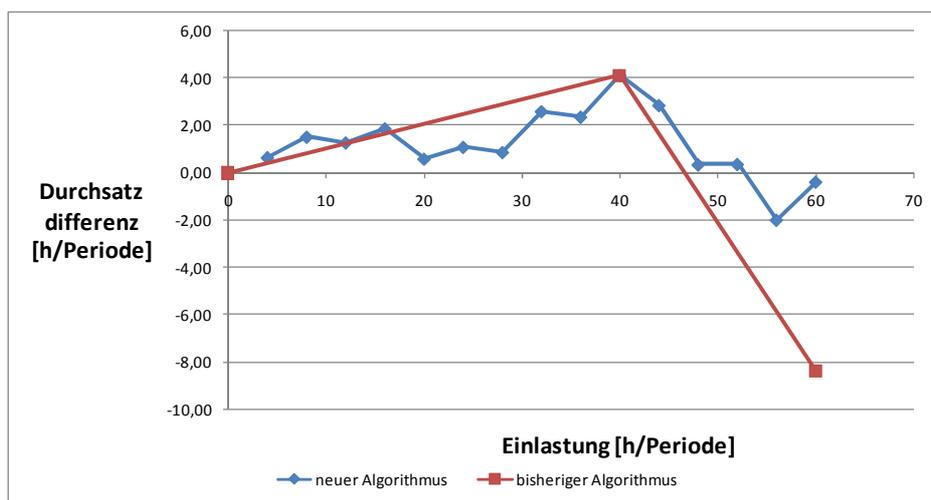


Abbildung 80: Durchsatzdifferenzen ASTR2 mit  $\sigma = 338$  Sekunden im Fall 2

Quelle: eigene Darstellung.

<sup>133</sup> Die Darstellungen der weiteren Durchsatzdifferenzen befinden sich in Anhang P.

Weiterhin sind die Abweichungen des neuen Algorithmus zur simulierten Kennlinien mit einer maximalen relativen Abweichung von 8% geringer als die Differenzen zum bisherigen Algorithmus mit einer relativen Abweichung von 16%. Daraus können zwei Schlüsse gezogen werden:

- Mit ansteigender Schwankungsbreite der Arbeitsinhalte einzelner Aufträge steigt auch die Ungenauigkeit der berechneten Durchsatzkennlinie für einen einzelnen Auftragsstrom.
- Bei den Durchsatzkennlinien einzelner Auftragsströme erzielt der neue Algorithmus bessere Werte als der bisherige Algorithmus.

Im nächsten Schritt wird untersucht, ob dieses Phänomen auch bei der durchschnittlichen Gesamtkennlinie des Produktionssystems zu finden ist. Auch dort ist bei einer geringen Schwankungsbreite des Arbeitsinhaltes eine gute Annäherung zwischen dem neuen Algorithmus und der simulierten Kennlinie zu erkennen:

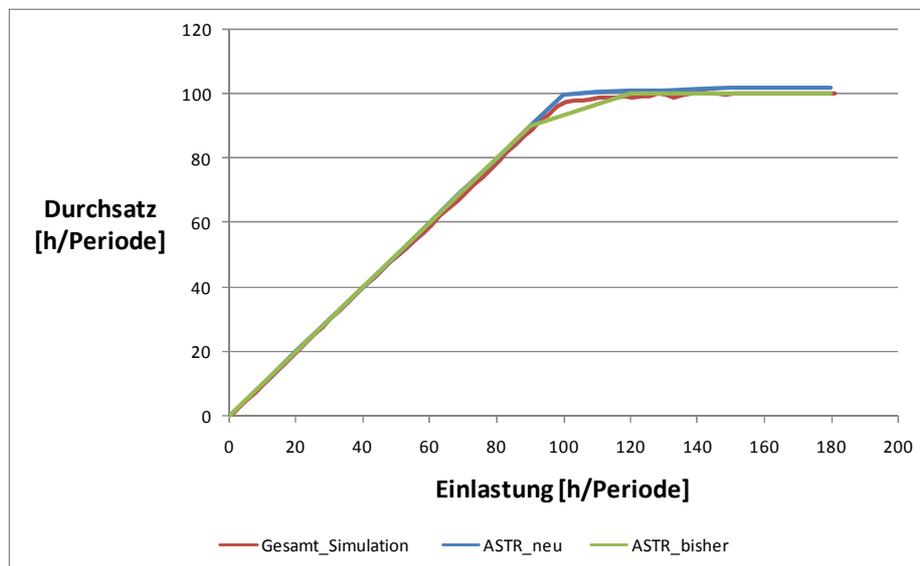


Abbildung 81: Gesamtdurchsatzkennlinie mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 2

Quelle: eigene Darstellung.

Dementsprechend fallen die Differenzen zwischen den Kennlinien auch gering aus. Eine Ausnahme stellt jedoch der Knickpunkt der simulierten bzw. neuen Kennlinie dar. Wie in den

vorherigen Untersuchungen gezeigt<sup>134</sup>, kann der bisherige Algorithmus nur eine konstante Einlastungserhöhung um einen relativen Betrag als Durchschnittsbetrachtung nachvollziehen. Eine konstante Durchsatzerhöhung um einen absoluten Betrag kann nur von dem neuen Algorithmus berücksichtigt werden. Es entsteht also bei einer Einlastung von  $100 \frac{h}{\text{Periode}}$  eine Differenz zwischen der Simulation und der bisherigen Kennlinie.

Wie bei den Einzelkennlinien nehmen auch bei der Gesamtkennlinie mit schwankender Auftragsgröße die Unregelmäßigkeiten im Durchsatzverhalten zu<sup>135</sup>. Dementsprechend steigen auch die Abweichungen zu den berechneten Kennlinien<sup>136</sup>. Bei der maximalen Standardabweichung von 338 Sekunden ergibt sich folgende Kennlinie:

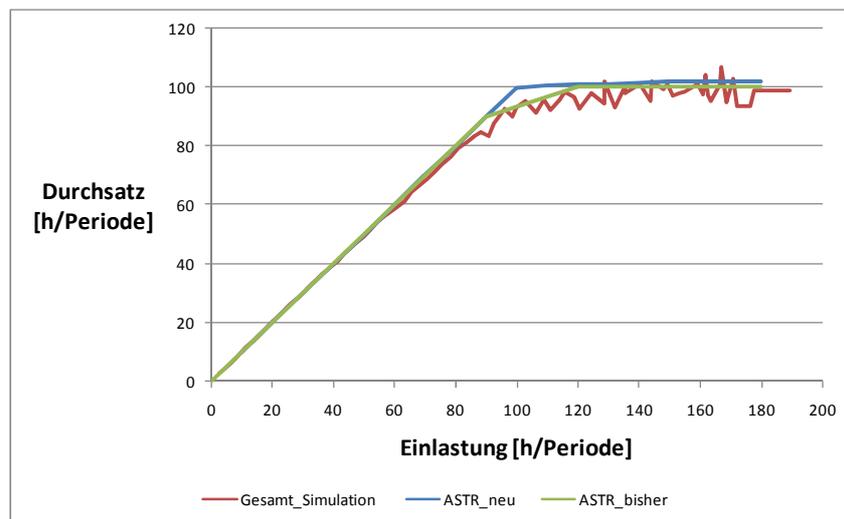


Abbildung 82: Gesamtdurchsatzkennlinie mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 2

Quelle: eigene Darstellung.

Es ist jedoch erkennbar, dass sich die simulierte Kennlinie im Bereich zwischen  $80 \frac{h}{\text{Periode}}$  und  $120 \frac{h}{\text{Periode}}$  eher an die bisherige Kennlinie als an die neue Kennlinie annähert. Wie bei schwankenden Auftragsfreigabezeitpunkten ergibt sich hier das Phänomen, dass die Einlastung eher einer Steigerung um einen gleichen relativen Betrag, als einer Steigerung mit ei-

<sup>134</sup> Vgl. Kapitel 5.2.1. und 5.2.2.

<sup>135</sup> Die weiteren Durchsatzkennlinien befinden sich in Anhang Q.

<sup>136</sup> Die Darstellungen der weiteren Durchsatzdifferenzen befinden sich in Anhang Q.

nem gleichen absoluten Betrag entspricht<sup>137</sup>. Wird auch hier eine gleiche, relative Steigerung angenommen, so ergibt sich folgendes Ergebnis:

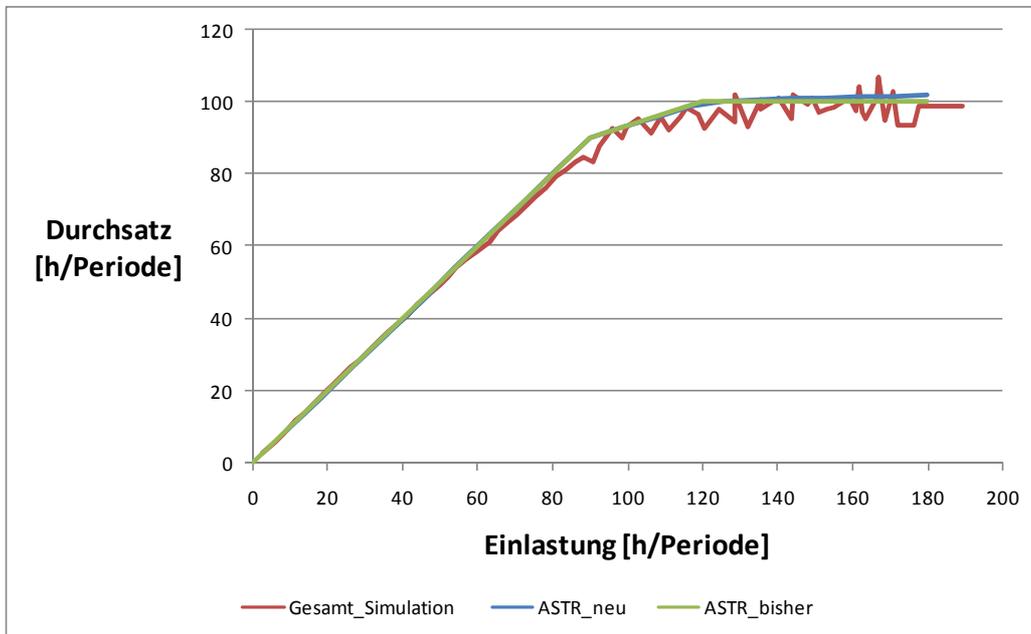


Abbildung 83: Gesamtdurchsatzkennlinie mit  $\sigma = 338$  Sekunden mit proportionaler Steigerung im Fall 2

Quelle: eigene Darstellung.

Auch weiterhin bleibt die relative Abweichung, aber mit einem Betrag von 8 % zwischen neuem Algorithmus und Simulation in einem geringen Ausmaß. Die Abweichung zwischen bisheriger und simulierter Kennlinie ist mit 6 % nur unwesentlich geringer. Damit kann aber erneut gezeigt werden, dass die Einlastungsreihenfolge eine erhebliche Rolle spielt. Diese kann nur mit dem neuen Algorithmus berücksichtigt werden.

Zusammenfassend kann auch hier die Aussage getroffen werden, dass die Abweichung mit steigender Schwankungsbreite zunimmt. Diese Eigenschaft ist bei der gesamten, wie bei der einzelnen Kennlinie gleich. Die relativen Abweichungen bleiben dabei unter 10 % und damit in einem noch vertretbaren Rahmen.

<sup>137</sup> Vgl. Kapitel 5.2.2.

#### 5.2.4 Simulation mit variablen Auftragsinhalt und variablen Auftragsabständen

Im letzten Simulationsfall schwanken sowohl der Freigabezeitpunkt, als auch der Arbeitsinhalt eines Auftrages. Dabei werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der vorherigen Simulationsfälle als Ausgangsbasis zugrunde gelegt. Das bedeutet, dass die Abstände zwischen den Freigabezeitpunkten verschiedener Aufträge als normal verteilt angenommen werden<sup>138</sup>. Dem Arbeitsinhalt eines Auftrages hingegen wird eine Chi-Quadrat-Verteilung zugrunde gelegt<sup>139</sup>. Die Standardabweichung  $\sigma$  dient dabei als Steuerung der Streuung. Der Wert wird in vier Simulationsschritten jeweils um den gleichen Wert gesteigert. Es ergeben sich vier zu betrachtende Szenarien:

Szenario	relatives $\sigma$ Freigabeabstand [% von $\mu$ ]	relatives $\sigma$ Arbeitsinhalt [% von $\mu$ ]	absolutes $\sigma$ [Sekunden]
1	10	10	45
2	25	25	113
3	50	50	225
4	75	75	338

Tabelle 21: Variation der Standardabweichung von Freigabeabstand und Arbeitsinhalt

Quelle: eigene Darstellung.

Bei jedem Schritt wird die Standardabweichung beider Parameter um den gleichen absoluten und relativen Betrag erhöht. Dabei soll geklärt werden, ob die zufällige Verteilung beider Parameter eine verstärkende oder vermindernde Wirkung auf den Durchsatz ausübt.

Die Simulation beginnt mit der Betrachtung der Durchsatzkennlinien von ASTR1. Bei einer Standardabweichung von 10 % treten hier bereits die bekannten Leistungsverluste auf, die durch dynamisch auftretende Warteschlangen und Leerläufe hervorgerufen werden. Die Kennlinien sind in der nachfolgenden Darstellung abgebildet:

---

<sup>138</sup> Vgl. Kapitel 5.2.2.

<sup>139</sup> Vgl. Kapitel 5.2.3.

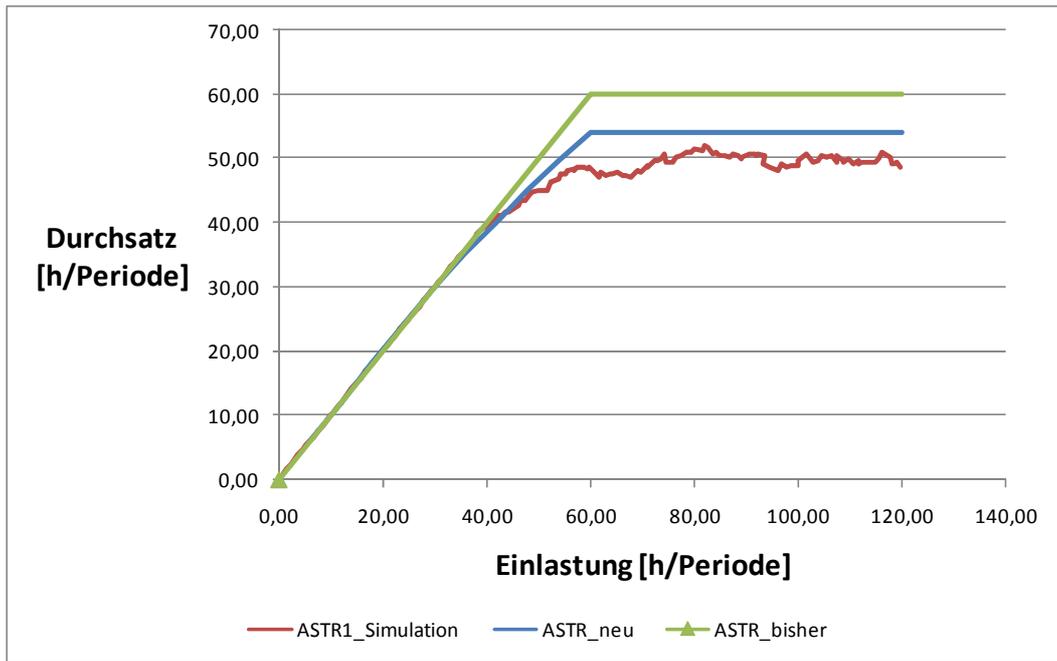


Abbildung 84: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 4

Quelle: eigene Darstellung.

Der Verlauf entspricht den vorher bereits gezeigten Kennlinien. Die Abweichungen sind in der nachfolgende Abbildung zu sehen:

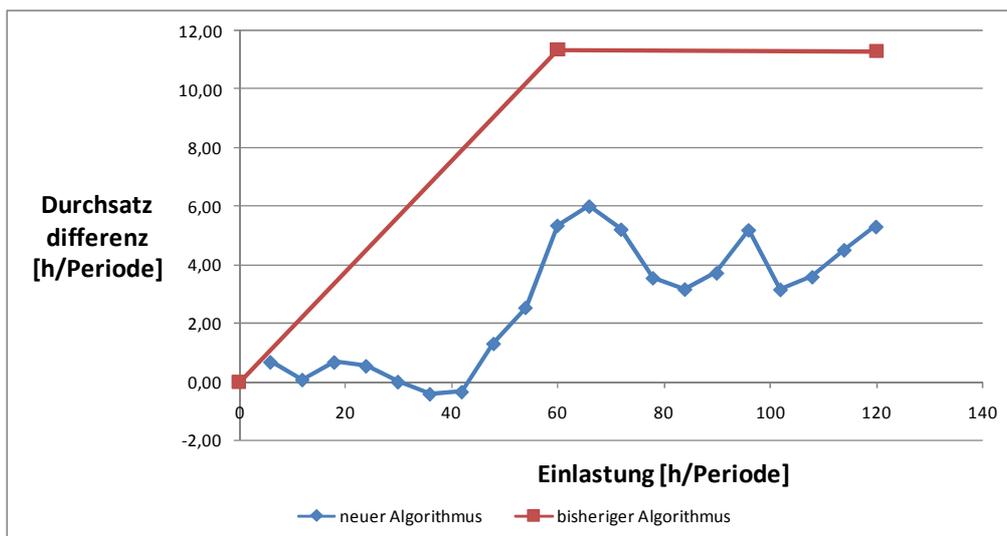


Abbildung 85: Durchsatzdifferenzen ASTR1 mit  $\sigma = 45$  Sekunden bei Fall 4

Quelle: eigene Darstellung.

Es ist zu sehen, dass die Abweichungen sehr gut den Differenzen entsprechen, die durch schwankende Freigabezeitpunkte hervorgerufen werden<sup>140</sup>. Auch hier ist die neue Kennlinie, mit einem maximalen Unterschied von  $6 \frac{h}{\text{Periode}}$ , genauer als die vorherige Kennlinie, mit einem maximalen Abstand von  $11 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Wird jedoch die Streuung der Parameter gesteigert, so wirkt sich dies nur unterproportional auf die Ungenauigkeit der Durchsatzkennlinien aus. Zwar steigert sich die Abweichung einzelner Punkte auf der Durchsatzkennlinie, aber der Mittelwert der Kennlinie und somit der Verlauf bleibt relativ gleich<sup>141</sup>. Beispielhaft wird hier noch die Durchsatzkennlinie bei einer Standardabweichung von 75% dargestellt:

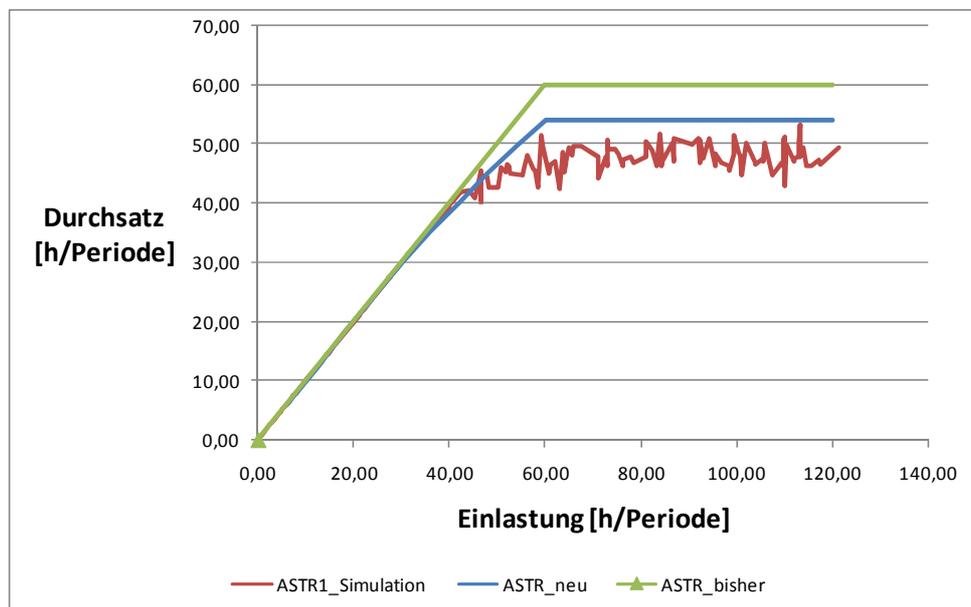


Abbildung 86: Durchsatzkennlinie ASTR1 mit  $\sigma = 338$  Sekunden im Fall 4

Quelle: eigene Darstellung.

Das gleiche Bild ergibt sich bei der Darstellung der Differenzen zwischen den berechneten und den simulierten Kennlinien. Auch dort wachsen die Abstände nur unterproportional<sup>142</sup>. So steigt bei einer Standardabweichung von 75% die Differenz zwischen neuer Berechnung und simulierter Durchsatzkennlinie auf maximal  $9,6 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Der Unterschied zwischen bisherigem Algorithmus und der Simulation steigt auf  $13,4 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Die Unterschiede bei einer Standardabweichung von 75% sind in dem nachfolgenden Diagramm abgebildet:

<sup>140</sup> Vgl. Kapitel 5.2.2.

<sup>141</sup> Die weiteren Durchsatzkennlinien befinden sich im Anhang R.

<sup>142</sup> Die Darstellungen der weiteren Durchsatzdifferenzen befinden sich in Anhang R.

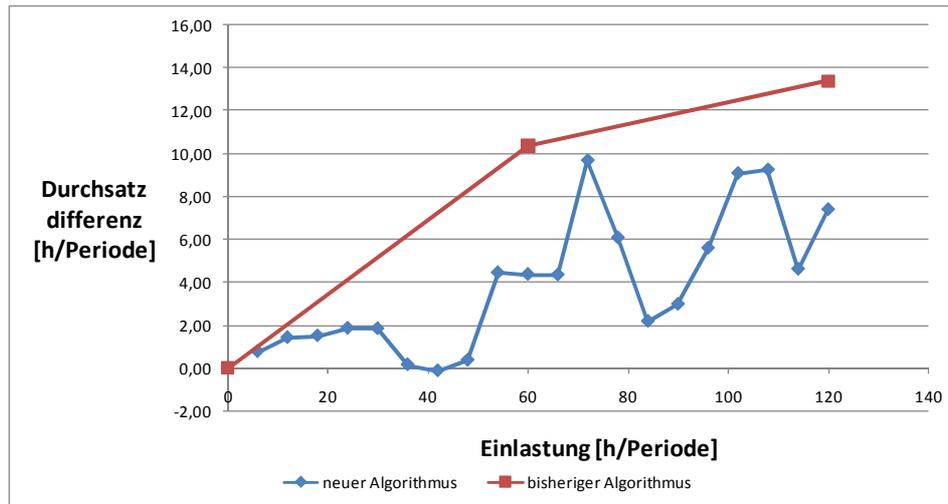


Abbildung 87: Durchsatzdifferenzen ASTR1 mit  $\sigma = 338$  Sekunden im Fall 4

Quelle: eigene Darstellung.

Im nächsten Schritt wird geprüft, ob diese Beobachtungen auch für ASTR2 zutreffen und auch dort der Durchsatz nur in einem unterproportionalen Ausmaß in Abhängigkeit der Streuung verändert. Dies würde darauf hindeuten, dass sich die Effekte von streuenden Arbeitsinhalten und Freigabeabständen zumindest teilweise ausgleichen könnten.

Wird zunächst die geringste Standardabweichung in Höhe von 10% betrachtet, so ergibt sich ein Bild, dass bereits aus den anderen Simulationen bekannt ist. Der Durchsatz von ASTR2 wächst weiter an, bis er ab einem Wert von ca.  $48 \frac{h}{\text{Periode}}$  konstant bleibt und nicht mehr weiter steigt. Grund hierfür ist, dass sich ab diesem Wert eine Warteschlange vor AS3 bildet und keine zusätzliche Durchsatzsteigerung eintritt. Dieser Wert liegt oberhalb des Wertes der kontinuierlichen Simulation, da die Aufträge von ASTR1 bereits teilweise vor AS2 warten müssen und somit freie Kapazitäten auf AS3 entstehen. Diese können von ASTR2 genutzt werden. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Darstellung zu sehen:

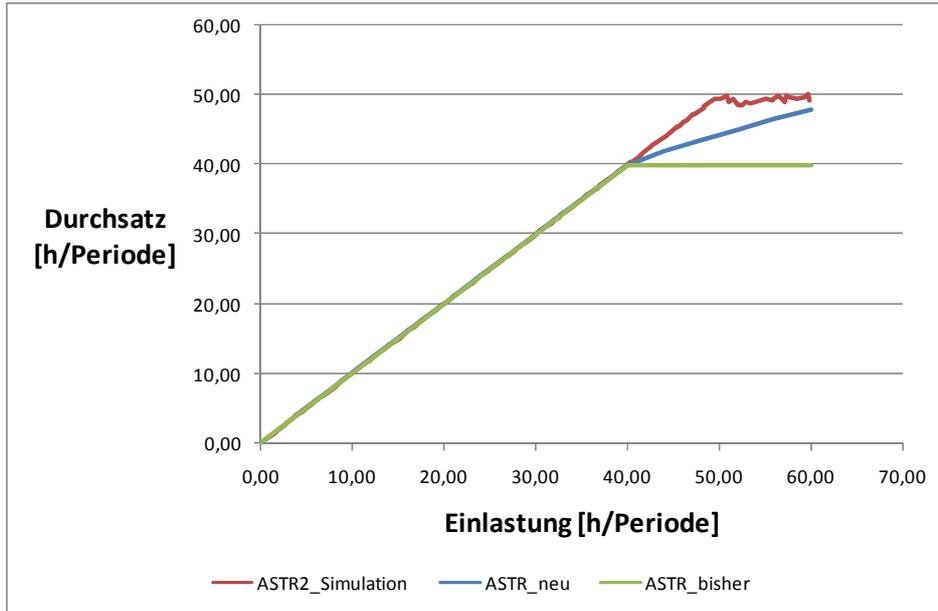


Abbildung 88: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 4

Quelle: eigene Darstellung.

Dementsprechend verhalten sich auch die Differenzen zwischen den einzelnen Kennlinien:

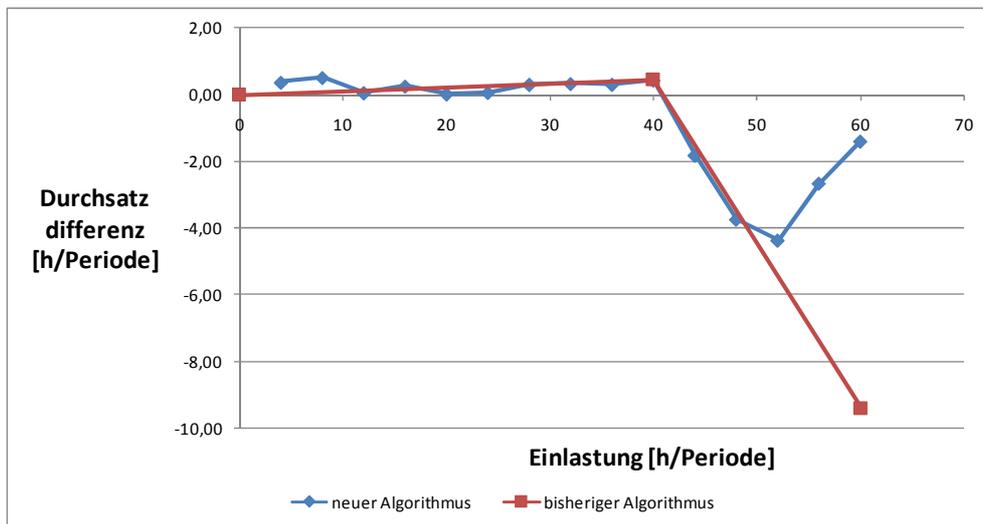


Abbildung 89: Durchsatzdifferenzen ASTR2 mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 4

Quelle: eigene Darstellung.

Der maximale Abstand zwischen der neuen Kennlinie und der Simulation liegt bei ca.  $4 \frac{h}{\text{Periode}}$ , während hingegen die Differenz zwischen der bisherigen Kennlinie und der Simulati-

on auf über  $9 \frac{h}{\text{Periode}}$  anwächst. Hier werden also von dem neuen Algorithmus ebenfalls bessere Ergebnisse erzielt. Durch die Steigerung der Streubreite über die Standardabweichung auf bis zu 75% verändert sich auch hier der Durchsatz nur unterproportional<sup>143</sup>. Zwar streuen die Durchsatzwerte bei einer Standardabweichung von 75% stärker als bei einer geringen Streubreite, der Mittelwert des Durchsatzes und dessen Verlauf bleiben aber annähernd konstant. Die Kennlinien für eine Standardabweichung von 75% sind in dem nachfolgenden Diagramm abgebildet:

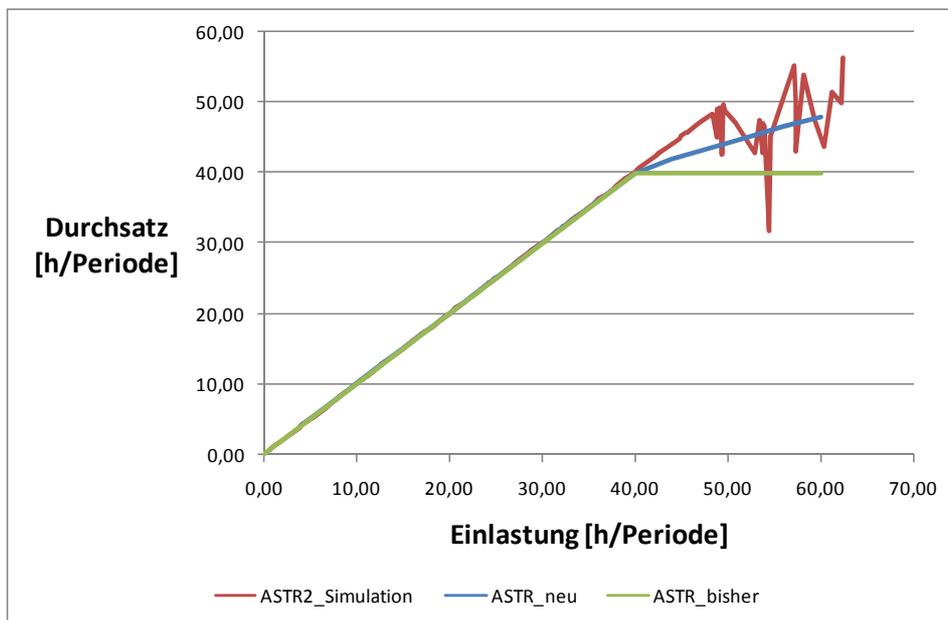


Abbildung 90: Durchsatzkennlinie ASTR2 mit  $\sigma = 338$  Sekunden im Fall 4  
 Quelle: eigene Darstellung.

Ähnlich verhält es sich bei den Differenzen zwischen den einzelnen Kennlinien<sup>144</sup>. Die Abstände zwischen der neuen und der simulierten Kennlinie reduzieren sich, abgesehen von einem extremen Ausreißer, bis auf ca.  $3,7 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Auch die Unterschiede zwischen der bisherigen Berechnung und der Simulation reduzieren sich maximal bis auf  $7,4 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Auch hier liefert der neue Algorithmus zwar bessere Werte, jedoch streuen die einzelnen Durchsatzwerte sehr stark und eine genaue Vorhersage eines gewissen Einlastungspunktes wird dadurch schwierig. Beispielhaft sind die Differenzen bei einer Standardabweichung von 75 % abgebildet:

<sup>143</sup> Die weiteren Durchsatzkennlinien befinden sich in Anhang S.

<sup>144</sup> Die Darstellungen der weiteren Durchsatzdifferenzen befinden sich in Anhang S.

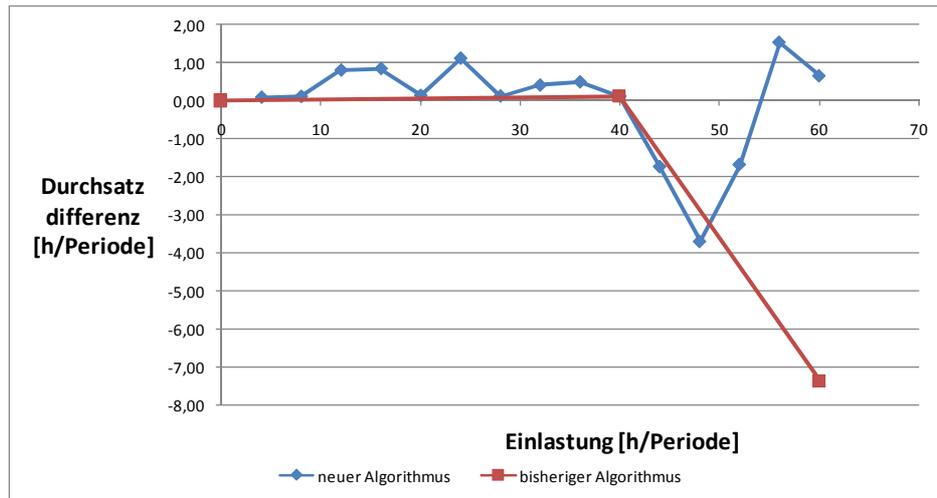


Abbildung 91: Durchsatzdifferenzen ASTR2 mit  $\sigma = 338$  Sekunden im Fall 4

Quelle: eigene Darstellung.

Zum Abschluss wird noch die Gesamtkennlinie betrachtet. Sie bildet den durchschnittlichen Durchsatz über das gesamte Produktionssystem. Es ist zu erkennen, dass die simulierte Kennlinie sich hier wieder sehr gut den berechneten Werten annähert, bei denen im neuen Algorithmus die Einlastung jeweils um den gleichen relativen Betrag erhöht wurde. Dadurch ergeben sich zwei Knickpunkte auf der Kennlinie. Die Abweichungen der beiden Einzelkennlinien werden addiert. Somit ergeben sich sehr gute Durchschnittswerte für die bisherige Kennlinie. Die Abweichungen liegen bei höchstens  $2,7 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Die Differenzen zum neuen Algorithmus sind etwas größer und liegen bei maximal  $7 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Auch hier trifft also der bisherige Algorithmus besser zu als der neue. Die Kennlinien für eine Durchsatzkennlinie mit einer Standardabweichung von 10 % sind im nachfolgenden Diagramm dargestellt:

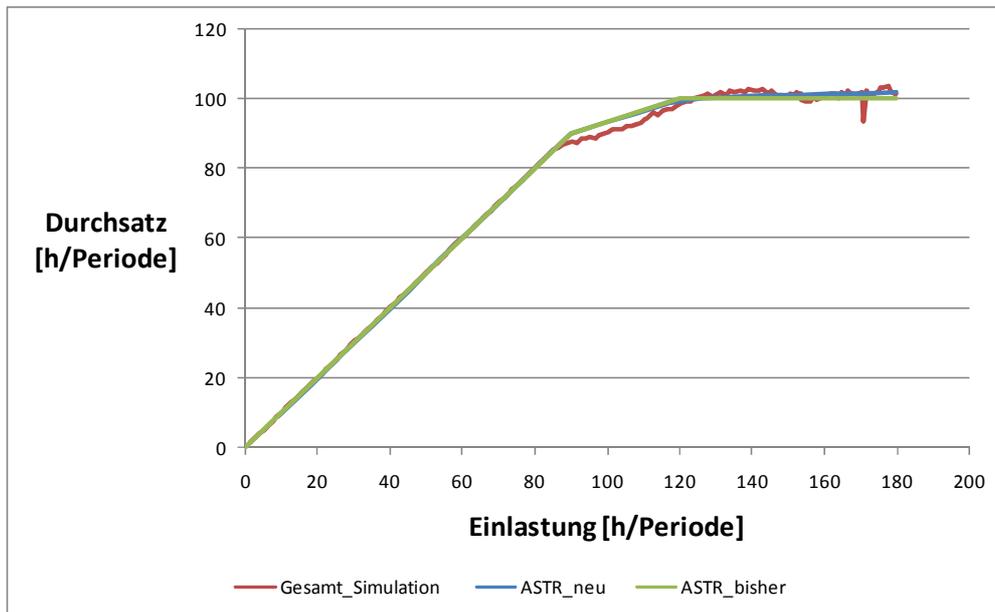


Abbildung 92: Gesamtkennlinie mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 4

Quelle: eigene Darstellung.

Weiterhin sind in der nächsten Darstellung die Durchsatzdifferenzen abgebildet:

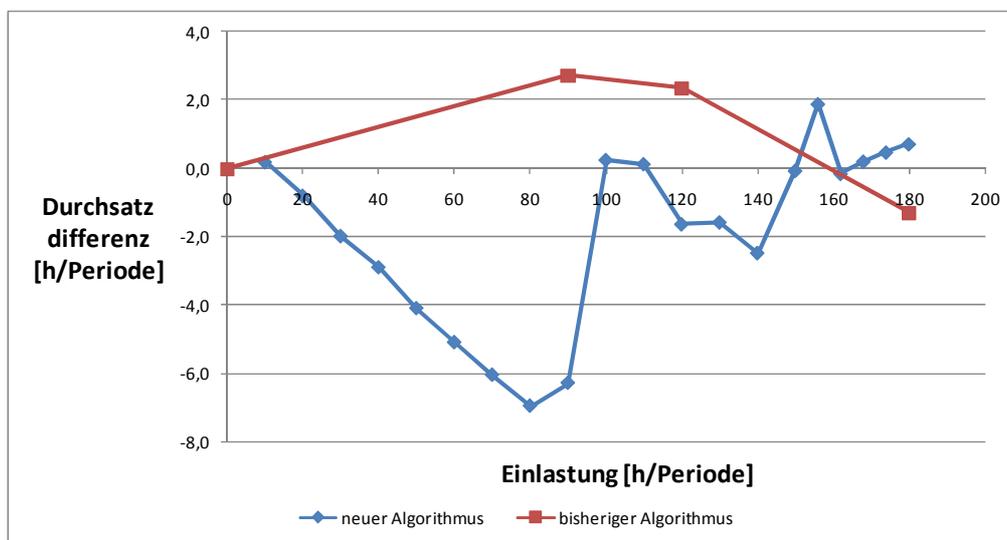


Abbildung 93: Durchsatzdifferenzen Gesamtkennlinie mit  $\sigma = 45$  Sekunden im Fall 4

Quelle: eigene Darstellung.

Auch bei der Gesamtdurchsatzkennlinie steigen die Abweichungen im Durchsatz mit einer Erhöhung der Streubreite zwar an<sup>145</sup>. Diese Anstiege sind unterproportional und ändern nichts am grundsätzlichen Verlauf und am Mittelwert des Durchsatzes. So beträgt die maximale Abweichung von neuer Kennlinie und Simulation  $11,4 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Die bisherige Kennlinie kann auch hier besser rechnen und weicht nur um  $9 \frac{h}{\text{Periode}}$  ab. Nachfolgend werden die Gesamtdurchsatzkennlinien für eine Standardabweichung von 75 % abgebildet:

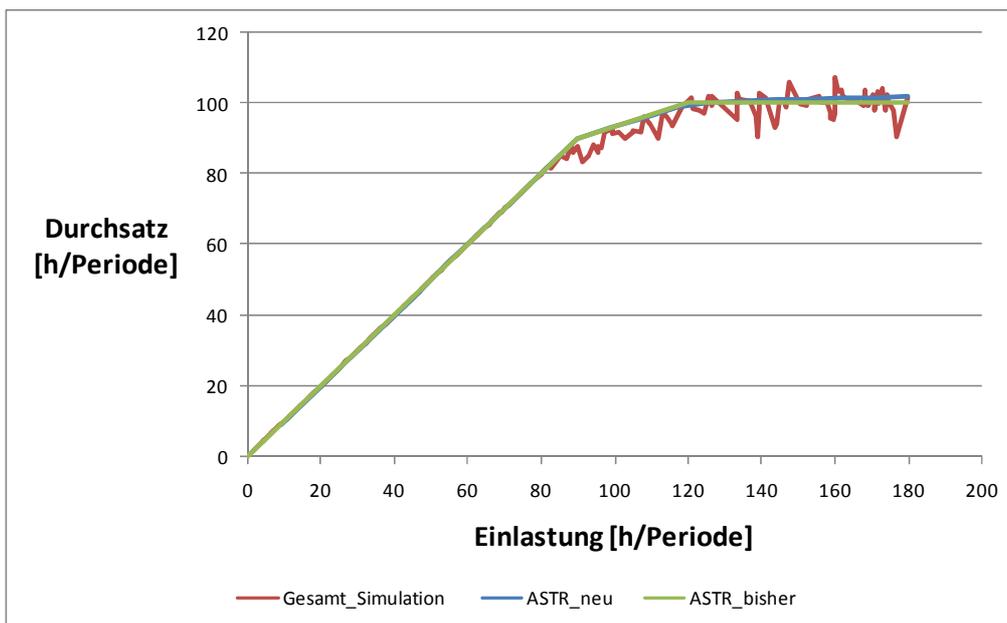


Abbildung 94: Gesamtkennlinie mit  $\sigma = 338$  Sekunden

Quelle: eigene Darstellung.

Die beiden berechneten Kennlinien geben dabei, wie zu sehen ist, sehr gut den Mittelwert der berechneten Punkte wieder. Diese Beobachtung ist auch schlüssig, wenn man zugrunde legt, dass sowohl die Verteilung der Arbeitsinhalte, als auch der Freigabeabstände einen Mittelwert besitzen. Wird nun der Durchschnitt über alle Auftragsströme gebildet und damit die Gesamtkennlinie errechnet, so ist klar, dass eine Durchschnittskennlinie den Mittelwert sehr gut treffen muss. Die oben dargestellte Kennlinie kann als Beweis angeführt werden.

<sup>145</sup> Die weiteren Durchsatzkennlinien befinden sich in Anhang T.

Zur Vollständigkeit werden im nächsten Diagramm auch noch die Differenzen zwischen den verschiedenen Kennlinien bei einer Standardabweichung von 75% aufgezeichnet<sup>146</sup>:

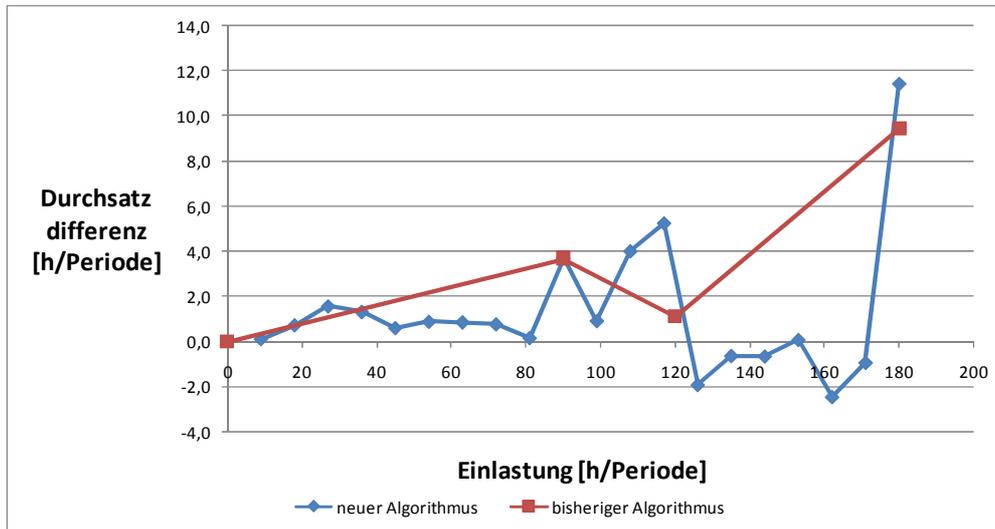


Abbildung 95: Durchsatzdifferenzen Gesamtkennlinie mit  $\sigma = 338$  Sekunden im Fall 4  
Quelle: eigene Darstellung.

Zusammenfassend kann die Aussage getroffen werden, dass eine ansteigende Streubreite von Arbeitsinhalt und Freigabezeitpunkt sich auf die Genauigkeit der Durchsatzergebnisse auswirkt. Diese Auswirkungen sind jedoch nicht gravierend. Dabei arbeiten die beiden Algorithmen jedoch verschieden genau.

Bei den einzelnen Kennlinien erzielt der neue Algorithmus bessere Ergebnisse, die maximale Abweichung bei Berechnung einzelner Kennlinien lag beim neuen Algorithmus in Höhe von  $9,2 \frac{h}{\text{Periode}}$ , beim alten Algorithmus bei  $13,4 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Diese sind allerdings nur geringfügig besser. Bezogen auf den berechneten Durchsatz betragen diese Abweichungen 17% bzw. 22%.

Bei der gesamten Kennlinie entsteht ein anderes Bild. Dort trifft der bisherige Algorithmus den simulierten Wert besser. Die maximale Abweichung zwischen bisherigem Algorithmus

<sup>146</sup> Die Darstellungen der weiteren Durchsatzdifferenzen befinden sich in Anhang T.

und der Simulation beträgt dort  $11,4 \frac{h}{\text{Periode}}$ , zwischen der simulierten und der neuen Kennlinie  $9,4 \frac{h}{\text{Periode}}$ . Bezogen auf den berechneten Durchsatz sind dies also Abweichungen von 9,4% bzw. 11,2%. Also sind auch hier die Unterschiede relativ gering. Im nachfolgenden Kapitel werden die gesammelten Erkenntnisse noch einmal zusammengefasst und die beiden Algorithmen hinsichtlich ihrer Genauigkeit miteinander verglichen.

### 5.3 Bewertung der Simulation und der Berechnungsalgorithmen

Bei kontinuierlichen Auftragsgrößen und Freigabezeitpunkten arbeitet der neue Algorithmus besser als der bisherige Algorithmus. Dabei hängt die Genauigkeit jedoch sehr stark von der Periodenlänge bzw. dem Verhältnis des Arbeitsinhaltes eines Auftrages zur Gesamteinlastung ab. Je geringer ein einzelner Auftrag ins Gewicht fällt, desto höher ist die Genauigkeit. Das bedeutet, je besser die Ausgangsvoraussetzungen mit kontinuierlichen, beliebig skalierbaren Auftragsströmen erfüllt sind, desto genauer arbeiten die Algorithmen.

Es ist allerdings zu bemerken, dass die Genauigkeit des bisherigen Algorithmus nur bis auf eine Durchsatzabweichung von 13,5 % sinkt. Bessere Werte können hier leider nicht erzielt werden, da bereits im Grundalgorithmus die Annahme der Nichtpriorisierung verletzt wird, indem Auftragsströme, die größere Engpässe beanspruchen, bevorzugt werden. Diese Einschränkung wird im neuen Algorithmus überwunden, so dass dort die Abweichungen bis auf 2,1 % sinken. Der verbleibende Rest ist Rundungsfehlern, aufgrund von diskreten Auftragsgrößen, zuzuschreiben.

Daraus ergibt sich die Folgerung, dass der neue Algorithmus zur Berechnung des Durchsatzes bei möglichst langfristigen Betrachtungen mit vielen, möglichst gleichartigen, getakteten Aufträgen eingesetzt werden sollte. Dann liefert er auch genauere Ergebnisse als der bisherige Algorithmus.

Streut der Zugangs- bzw. Freigabezeitpunkt der Aufträge, so entsteht ein Fehler von ca. 10% bei der Durchsatzberechnung. Gründe dafür sind dynamische Engpässe, die durch Warteschlangen entstehen und eventuell Leerlaufzeiten aufgrund der Unterversorgung mit Arbeit. Die Größe der Streuung ist dabei unwichtig. Allerdings liefert auch hier der neue Algorithmus mit einem Fehler von maximal ca. 12 % bessere Ergebnisse als der bisherige Algorithmus

mit ca. 22 % Abweichung. Daraus lässt sich die Folgerung ziehen, dass außerhalb einer getakteten Fließfertigung der neue Algorithmus besser eingesetzt werden sollte.

Durch eine Variation der Arbeitsinhalte einzelner Aufträge ergeben sich ebenfalls Unregelmäßigkeiten in der Durchsatzberechnung. Diese sind auch auf dynamische Engpassphänomene zurückzuführen, da beide Algorithmen mit Laplace'schen Wahrscheinlichkeiten und Durchschnittswerten rechnen. Je größer die Streubreite der Auftragsgröße wird, desto stärker werden die Unregelmäßigkeiten. Bei geringen Arbeitsinhaltsvariationen sind die Fehler der Algorithmen relativ gering. Gerade bei den einzelnen Durchsatzkennlinien erreicht man mit dem neuen Algorithmus eine Genauigkeit von ca. 8 %, im Gegensatz zu der bisherigen Kennlinie mit einer Abweichung von ca. 16 %.

Bei der Betrachtung der Gesamtkennlinie ermitteln beide Algorithmen mit einer Genauigkeit den Durchsatz von 6% bis 8% im Grund gleich genau. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Durchschnitt über alle Aufträge und Arbeitsstationen gebildet wird. Da diese Verteilungen jedoch auch über Mittelwerte verfügen, treffen die Algorithmen die Simulation recht gut.

Es kann dennoch die Folgerung gezogen werden, dass die Berechnungen umso besser funktionieren, wenn die Streuung der Arbeitsinhalte gering ist. Dies spricht dafür den Algorithmus bevorzugt in kontinuierlichen und statischen Fertigungsumgebungen zur Durchsatzberechnung einzusetzen.

Werden beide Streuungen miteinander kombiniert, so entstehen ebenfalls Fehler in der Durchsatzberechnung. Diese steigen zwar auch mit der Streubreite an, jedoch nur unterproportional, da sich auf globaler Ebene die Unterschiede im Durchschnitt auch wieder ausgleichen können. Die Ungenauigkeiten steigen bis auf ca. 20 %.

Ein weiteres Phänomen ist die unterschiedliche Genauigkeit der beiden Algorithmen bei einzelnen und der gesamten Durchsatzkennlinie. Bei den einzelnen Durchsatzkennlinien erzielt der neue Algorithmus fast durchgängig bessere Ergebnisse. Diese Ergebnisse sind umso genauer, je besser das Szenario einem kontinuierlichen und stetigen Fließprozess genügt. In diesen Fällen ist die Genauigkeit signifikant besser, meistens um bis zu 10%. Treten aller-

dings Schwankungen auf, so schrumpft der Genauigkeitsvorsprung des neuen Algorithmus bis auf 4%.

Bei den Gesamtkennlinien erzielt der bisherige Algorithmus meist geringfügig bessere Ergebnisse. Allerdings beträgt der Genauigkeitsunterschied oftmals lediglich 2%. Der Grund dafür liegt darin, dass in der bisherigen Gesamtkennlinie ebenfalls bereits mit Durchschnittswerten gerechnet wurde. Insgesamt lassen sich damit bereits sehr gute Ergebnisse erzielen. Diese sind auch relativ unsensibel gegenüber Schwankungen und Streuungen.

Die Folgerung daraus ist, dass zur Durchsatzberechnung einzelner Auftragsströme der neue Algorithmus besser geeignet ist, besonders wenn kontinuierliche und stetige Prozesse berechnet werden. Bei der Berechnung des gesamten Systemdurchsatzes kann sowohl der bisherige als auch der neue Algorithmus eingesetzt werden, da die Unterschiede marginal sind.

Es stellt sich allerdings die Frage, welche Auswirkungen dies auf die Engpassberechnung hat. Denn zur Bestimmung und Bewertung eines Engpasses wird eine möglichst genaue Bestimmung des Durchsatzes nicht notwendig sein. Besonders im Maschinen- und Anlagenbau, wo es sich um sehr stark schwankende und streuende Fertigungsprozesse handelt, wäre der Genauigkeitsvorsprung des neuen Algorithmus mit ca. 4% relativ gering. Außerdem werden weder vom bisherigen noch vom neuen Algorithmus bestimmte Störungen berücksichtigt. So werden die Materialverfügbarkeit, die Rüstzeiten, die Rüstreihenfolgen, mögliche Maschinenausfälle und sonstige, dynamisch auftretende Störungen vernachlässigt. Der dadurch entstehende Fehler ist auch in der Simulation bisher nicht berücksichtigt worden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich damit der Genauigkeitsvorsprung von 4% bereits erübrigt.

Es liegt also der Schluss nahe, dass für die erste Bestimmung und Bewertung von Engpässen der bisherige Algorithmus bereits ausreicht. Denn die Annahmen der Laplace'schen Wahrscheinlichkeit und der kontinuierlichen, frei skalierbaren Auftragsströme treffen bei diskreten Aufträgen mit diskreten Arbeitsinhalten mit schwankenden Fertigungsparametern im-

mer weniger zu. Eine alleinige Berücksichtigung der Arbeitsgangreihenfolge reicht für eine signifikante Genauigkeitsverbesserung nicht aus.

Es werden zwar Genauigkeitsverbesserungen erzielt, diese gehen aber zuletzt auch auf Kosten der Komplexität und der Verständlichkeit. So kann das Durchsatzpotential nicht mehr so einfach visualisiert werden und auch eine analytische Berechnung ist nicht möglich. Dies könnte sich problematisch auf die Verständlichkeit und Implementierung in der Praxis auswirken. Es wird daher empfohlen, zur Engpassbestimmung im Maschinen- und Anlagenbau weiterhin den bisherigen Algorithmus zu benutzen.

### 6 Implementierungsvorschlag des neuen Lösungsalgorithmus

Allerdings kann der neue Berechnungsalgorithmus zur Leistungsberechnung in gewissen Fertigungsorganisationen eingesetzt werden. Deshalb wird hier noch ein Implementierungsvorschlag skizziert, um eine mögliche Umsetzung in der Praxis zu erleichtern. Das Flussdiagramm gibt einen ersten Ablauf über die Implementierung des neuen Algorithmus im DePla-Vis-Demonstrator. Dabei wird die Berechnung der Durchsatzkennlinie in zwei Teilabschnitte aufgeteilt. Zuerst werden die Abfertigungsfaktoren pro Arbeitsstation bestimmt. Anschließend werden die Berechnung und Visualisierung der Durchsatzschranke durchgeführt. Ein Flussdiagramm des Programmablaufs ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

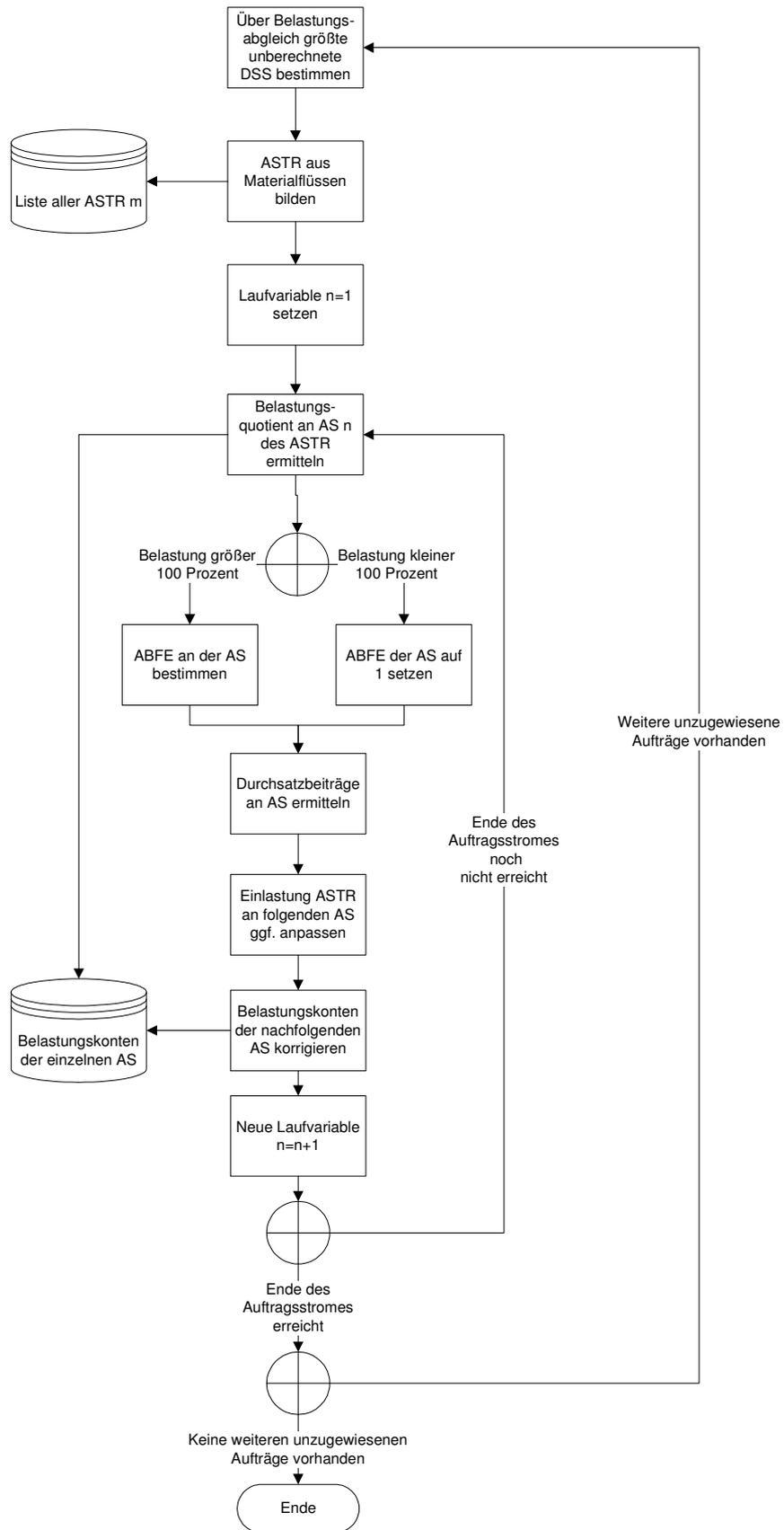


Abbildung 96: Implementierungsvorschlag zur Berechnung der Abfertigungsfaktoren

Quelle: eigene Darstellung.

Wie beim bisherigen Algorithmus beginnt auch dieser Algorithmus mit der Bestimmung des größten Engpasses über einen Belastungsabgleich. Alle Aufträge, die über diese Arbeitsstation laufen, werden zu einem Auftragsstrom zusammengefasst. Alle Auftragsströme werden in einer gesonderten Tabelle gespeichert. Die Laufvariable  $n$  dient dazu, die Arbeitsstationen innerhalb dieses Auftragsstromes von Anfang bis zum Ende zu durchlaufen. Sie wird deshalb zu Beginn auf 1 gesetzt.

Anschließend werden alle Arbeitsstationen des Auftragsstromes durchlaufen. Für jede Arbeitsstation wird ein Belastungsquotient bestimmt. Daraus lässt sich der Durchsatz an jeder einzelnen Arbeitsstation bestimmen und damit auch die Einlastung an den nachfolgenden Arbeitsstationen. Diese Informationen werden auf die Belastungskonten der einzelnen Arbeitsstationen gebucht und gespeichert. Anschließend wird die Laufvariable um eine Einheit erhöht. Dieser Vorgang wird bis zum Ende des Auftragsstromes durchgeführt.

Ist das Ende des Auftragsstromes erreicht, so wird geprüft ob es noch Aufträge gibt, die nicht einem Auftragsstrom zugeordnet wurden. Ist dies der Fall, so wird eine erneute Suche nach dem größten Engpass begonnen und der Algorithmus wird erneut durchlaufen. Sind alle Aufträge zugeordnet, so endet dieser Teilprozess.

Im nächsten Schritt werden nun die Durchsatzkennlinien gezeichnet. Dazu wird auf die vorher ermittelten Kennwerte zurückgegriffen. Der Implementierungsvorschlag zur Berechnung und Zeichnung der Durchsatzkennlinien wird in dem nachfolgenden Flussdiagramm vorgestellt:

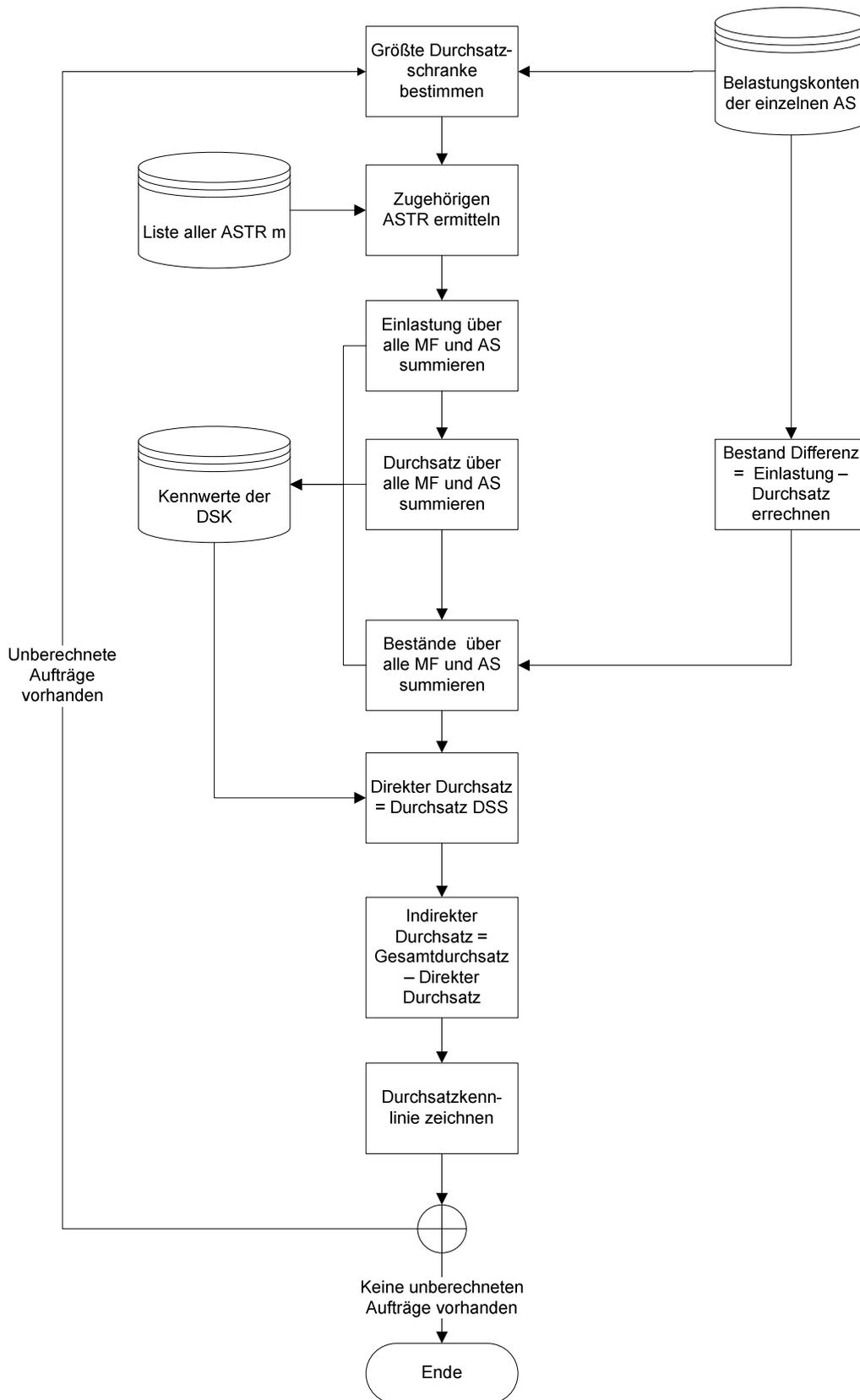


Abbildung 97: Implementierungsvorschlag zur Berechnung der Durchsatzkennlinie  
 Quelle: eigene Darstellung.

Aus den Belastungskonten der einzelnen Arbeitsstationen wird der größte Engpass ermittelt. Dies wiederum ermöglicht die Identifikation des zugehörigen Auftragsstromes. Mit Hilfe dieser Daten kann nun die Einlastung bestimmt werden. Weiterhin wird der Abfertigungsfaktor bestimmt, indem die verschiedenen Abfertigungsfaktoren der Arbeitsstationen des Auftragsstromes miteinander multipliziert werden. Daraus kann der Durchsatz berechnet werden. Alle diese Werte werden in einer Tabelle abgelegt. Schließlich können daraus noch der indirekte und der direkte Durchsatz abgeleitet werden. Anschließend wird die Durchsatzkennlinie gezeichnet. Der Algorithmus wird so lange durchlaufen, bis keine ungerechneten Aufträge mehr vorhanden sind.

### 7 Zusammenfassung und Ausblick

Bisher wird bei der Berechnung der Durchsatzkennlinie die Arbeitsgangreihenfolge nicht berücksichtigt. So wird auf Arbeitsstationen, die zwar überlastet sind, aber nicht den größten Engpass in einem Auftragsstrom darstellen, lediglich Kapazität für diesen Auftragsstrom reserviert. Dies verletzt aber die Voraussetzung der gleich priorisierten Aufträge. Außerdem wird bisher nicht die Länge des Prozesses berücksichtigt. Der Durchsatz eines Auftrages hängt lediglich vom Durchsatz am Engpass ab.

Um dieses Problem zu beheben, wird ein Ansatz entwickelt, der auf das Prinzip der belastungsorientierten Auftragsfreigabe zurückgreift. Für jede Arbeitsstation eines Prozesses wird eine Durchsatzwahrscheinlichkeit auf der Basis eines Laplace'schen Experiments errechnet. Die Durchsatzwahrscheinlichkeit eines einzelnen Auftrages wird durch eine Kette aus Abfertigungsfaktoren der Arbeitsstationen gebildet, die der Auftrag durchläuft.

Der Algorithmus wurde anhand von vier Simulationsfällen verifiziert. Der neue Algorithmus liefert sehr genaue Durchsatzergebnisse bei kontinuierlichen, stabilen, langfristigen Produktionsprozessen. Bei schwankenden und streuenden Prozessen sinkt die Genauigkeit, obwohl die Genauigkeit immer noch besser ausfällt als bei dem bisherigen Algorithmus. Dieses Ergebnis gilt allerdings nur für die einzelnen Durchsatzkennlinien. Bei der Gesamtkennlinie liefert der bisherige Algorithmus annähernd gleiche Ergebnisse.

Für eine Engpassbestimmung im Maschinen- und Anlagenbau kann also der bisherige Algorithmus ebenfalls bereits problemlos verwendet werden, da dort streuende und schwankende Prozesse der Regelfall sind. Für eine passende Engpassbestimmung in dieser Branche müsste zudem ein umfassenderer Ansatz entwickelt werden, der auch die vorgelagerten Bereiche, wie Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Beschaffung mitberücksichtigt. Weiterhin sollte der Ansatz in der Lage sein, die dynamischen Gegebenheiten eines Engpasses zu berücksichtigen.

Aus der vorliegenden Arbeit ergeben sich zudem weitere Aufgaben zur Verbesserung des Algorithmus. So kann der neue Ansatz sehr gut zur Leistungsberechnung kontinuierlicher und statischer Prozesse eingesetzt werden. Ein erster Implementierungsansatz wurde in der

Arbeit skizziert. Dieser sollte nun in den DePlaVis-Demonstrator als zusätzlicher Service integriert werden.

Weiterhin wurde eine Lösung zur Visualisierung des Durchsatzpotentials nach der räumlichen Lage vor oder nach dem Engpass aufgezeigt. Damit lässt sich das wirkliche Optimierungspotenzial eines Engpasses besser bestimmen. Dieser Ansatz sollte weiter ausgearbeitet und verifiziert werden.

Zum besseren Verständnis von Engpasswirkungen sollte eine Bestandskennlinie erarbeitet werden. Dabei wird das Durchsatzpotential eines Auftragsstromes als Funktion der Einlastung formuliert. Diese könnte eine Alternative zur Visualisierung des Durchsatzpotentials sein und verbessert das Verständnis hinsichtlich der bestandsaufbauenden Wirkung von Engpässen. Außerdem könnte es Lösung zur Parametrisierung von Engpassressourcen darstellen, da diese immer durch einen gewissen Bestand geschützt werden sollten um keinen Leerlauf zu erzeugen. Zur ersten Untersuchung können die erhobenen Simulationsdaten verwendet werden, in denen bereits eine Protokollierung des Bestandes vorhanden ist.

Als weitere Verbesserung müsste eine Mehrperiodenbetrachtung eingesetzt werden. Gerade Engpassanalyse über mehrere Perioden hinweg bietet die Möglichkeit wichtige Verbesserungspotentiale zu erkennen. Weiterhin wird für die Durchführung von Simulationen oder in der Praxis ein eingeschwungener Zustand benötigt. Dazu müssen bereits Aufträge im System vorhanden sein. Eine Möglichkeit wäre die Verknüpfung des DePlaVis-Algorithmus mit dem shifting bottlenecks Methode<sup>147</sup>. Darin wird ein Bewertungsvorschlag zur dynamischen Untersuchung von Engpässen ausgearbeitet, der sich ausdrücklich auch mit dem sprunghaften Verhalten von Engpässen auseinandersetzt.

---

<sup>147</sup> Vgl. Roser et al.(2002), S.1079ff.

8 Literaturverzeichnis

Literatur:

Altfeld, Nils (2008): „Erweiterung des DePlaVis Ansatzes durch die Integration von Optimierungsmethoden“, Diplomarbeit HAW Hamburg, Hamburg.

Bangsow, Steffen (2008): „Fertigungssimulationen mit Plant Simulation und SimTalk“, 1. Auflage, München.

Gutenberg, Erich (1976): „Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Die Produktion“, 22.Auflage, Berlin.

Goldratt, Eliyahu (1990): „Theory of Constraints, What is this thing called theory of constraints and how should it be implemented?“, 1.Auflage, Great Barrington.

Haberlandt, Karlheinz (1999): „Engpassorientierte Werkstattfertigung“ in: PPS-Management Nr.4, 1999, S.17 – S.22.

Haberlandt, Karlheinz (1999): „PPS-Anforderungen bei Werkstattfertigung“ in: PPS Management 4 (1999), S.47 – S.52.

Hering, Ekbert; Martin, Rolf; Stohrer, Martin (2002): „Physik für Ingenieure“, 8.Auflage, Berlin.

Kreutzfeldt, Jochen (1995): „Planen mit Bearbeitungsalternativen in der Teilefertigung“, VDI-Verlag, Düsseldorf.

Kreutzfeldt, Jochen (2007): „BMBF-Antrag im Programm „IngenieurNachwuchs 2007“, DEPLAVIS Durchsatzsteigerung im Anlagenbau und –betrieb durch engpassorientierte Planung und Visualisierung“, HAW Hamburg, Hamburg.

Nebf, Theodor (2007): „Organisationsformen der Teilefertigung“, ZWF (2007)11, S.717 – S.722.

Nyhuis, Peter (2003): „Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen“, 2.Auflage, Berlin.

Nyhuis, Peter (2004): „Logistische Terminkennlinie - Ein Werkzeug zur Beherrschung der Terminsituation von Produktionssystemen,“ in: PPS Management 9, S.38 – S.40.

Nyhuis, Peter (2005): „Applying Simulation and Analytical Models for Logistic Performance Prediction“ in: CIRP Annals, Oxford.

Papula, Lothar (1997): „Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3“, 2.Auflage, Wiesbaden.

Papula, Lothar (2001): „Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3“, 4.Auflage, Wiesbaden.

Roser, Christoph; Nakano, Masaru; Tanaka, Minoru (2002): “shifting bottleneck detection” in: Proceedings of 2002 Winter Simulation Conference, S.1079 – 1086.

Schultheiss, Johannes (2008): „Darstellung und Bewertung des Potenzials und der Grenzen des DePlaVis-Ansatzes anhand von Fallbeispielen“, Masterprojekt HAW Hamburg, Hamburg.

Verband deutscher Ingenieure (Hrsg.)(2000): VDI Richtlinie 3633, Blatt 1.

Wiendahl, Hans-Peter (1987): “Belastungsorientierte Fertigungsregelung: Grundlagen, Verfahrensaufbau, Realisierung“, München.

Wiendahl, Hans-Peter (1992): „Anwendung der belastungsorientierten Auftragsfreigabe“, München.

Wiendahl, Hans-Peter (2002): „Erfolgsfaktor Logistikqualität“, 2.Auflage, Berlin.

Internetquellen:

[http://www.bb-sbl.de/assets/images/tutorial/Dichte\\_chi2\\_6df.jpg](http://www.bb-sbl.de/assets/images/tutorial/Dichte_chi2_6df.jpg), Stand: 30.04.2009.

Bosse(2009): „Kontinuierliche Simulation“,  
[http://isg.cs.uni-magdeburg.de/sim/fsm/presentations/contSim\\_Bosse.pdf](http://isg.cs.uni-magdeburg.de/sim/fsm/presentations/contSim_Bosse.pdf),  
Stand: 03.02.2009.

<http://www.emplant.de/>, Stand: 03.02.2009.

Anhang A

Numerische Berechnung des Durchsatzes von ASTR1

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung	
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS2	MS3
1	15	0	0	15	0	0	1	20	1	1
2	0	1	1	0	1	1	1	20		
3	15	1	0	15	1	0	1	20		
4	0	0	1	0	0	1	1	30		
5	15	0	0	15	0	0	1	20		
6	0	1	1	0	1	1	1	30		
7	15	0	0	15	0	0	1	20		
Summe	60	3	3	60	3	3				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag	
3	3

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung	
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS2	MS3
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	2	2	0	2	2	1	20	2	2
3	15	2	0	15	2	0	1	20		
4	0	0	2	0	0	2	1	30		
5	15	0	0	15	0	0	1	20		
6	0	2	2	0	2	2	1	30		
7	15	0	0	15	0	0	1	20		
Summe	60	6	6	60	6	6				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag	
6	6

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung	
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS2	MS3
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	3	3	0	3	3	1	20	3	3
3	15	3	0	15	3	0	1	20		
4	0	0	3	0	0	3	1	30		
5	15	0	0	15	0	0	1	20		
6	0	3	3	0	3	3	1	30		
7	15	0	0	15	0	0	1	20		
Summe	60	9	9	60	9	9				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag	
9	9

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung	
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS2	MS3
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	4	4	0	4	4	1	20	4	4
3	15	4	0	15	4	0	1	20		
4	0	0	4	0	0	4	1	30		
5	15	0	0	15	0	0	1	20		
6	0	4	4	0	4	4	1	30		
7	15	0	0	15	0	0	1	20		
Summe	60	12	12	60	12	12				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag	
12	12

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung	
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS2	MS3
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	5	5	0	5	5	1	20	5	5
3	15	5	0	15	5	0	1	20		
4	0	0	5	0	0	5	1	30		
5	15	0	0	15	0	0	1	20		
6	0	5	5	0	5	5	1	30		
7	15	0	0	15	0	0	1	20		
Summe	60	15	15	60	15	15				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag	
15	15

# Anhang

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	15	0	0	15	0	0	1	20
2	0	6	6	0	6	6	1	20
3	15	6	0	14.28571	5.714286	0	0.952381	20
4	0	0	6	0	0	6	1	30
5	14.28571	0	0	14.28571	0	0	1	20
6	0	5.714286	6	0	5.714286	6	1	30
7	14.28571	0	0	14.28571	0	0	1	20
Summe	58.57143	17.71429	18	57.85714	17.42857	18		

6	6
ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.9524	1.0000
Durchsatzbeitrag	
17.14286	18

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	15	0	0	15	0	0	1	20
2	0	7	7	0	7	7	1	20
3	15	7	0	13.63636	6.363636	0	0.909091	20
4	0	0	7	0	0	7	1	30
5	13.63636	0	0	13.63636	0	0	1	20
6	0	6.363636	7	0	6.363636	7	1	30
7	13.63636	0	0	13.63636	0	0	1	20
Summe	57.27273	20.36364	21	55.90909	19.72727	21		

7	7
ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.9091	1.0000
Durchsatzbeitrag	
19.09091	21

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	15	0	0	15	0	0	1	20
2	0	8	8	0	8	8	1	20
3	15	8	0	13.04348	6.956522	0	0.869565	20
4	0	0	8	0	0	8	1	30
5	13.04348	0	0	13.04348	0	0	1	20
6	0	6.956522	8	0	6.956522	8	1	30
7	13.04348	0	0	13.04348	0	0	1	20
Summe	56.08696	22.95652	24	54.13043	21.91304	24		

8	8
ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.8696	1.0000
Durchsatzbeitrag	
20.86957	24

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	15	0	0	15	0	0	1	20
2	0	9	9	0	9	9	1	20
3	15	9	0	12.5	7.5	0	0.833333	20
4	0	0	9	0	0	9	1	30
5	12.5	0	0	12.5	0	0	1	20
6	0	7.5	9	0	7.5	9	1	30
7	12.5	0	0	12.5	0	0	1	20
Summe	55	25.5	27	52.5	24	27		

9	9
ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.8333	1.0000
Durchsatzbeitrag	
22.5	27

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	15	0	0	15	0	0	1	20
2	0	10	10	0	10	10	1	20
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	12	0	0	12	0	0	1	20
6	0	8	10	0	8	10	1	30
7	12	0	0	12	0	0	1	20
Summe	54	28	30	51	26	30		

10	10
ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.8000	1.0000
Durchsatzbeitrag	
24	30

# Anhang

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3				
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	11	11	0	10	10	0.909091	20	11	11
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20		
4	0	0	10	0	0	10	1	30		
5	12	0	0	12	0	0	1	20		
6	0	8	10	0	8	10	1	30		
7	12	0	0	12	0	0	1	20		
Summe	54	29	31	51	26	30				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.7273	0.9091
Durchsatzbeitrag	
24	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3				
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	12	12	0	10	10	0.833333	20	12	12
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20		
4	0	0	10	0	0	10	1	30		
5	12	0	0	12	0	0	1	20		
6	0	8	10	0	8	10	1	30		
7	12	0	0	12	0	0	1	20		
Summe	54	30	32	51	26	30				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.6667	0.8333
Durchsatzbeitrag	
24	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3				
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	13	13	0	10	10	0.769231	20	13	13
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20		
4	0	0	10	0	0	10	1	30		
5	12	0	0	12	0	0	1	20		
6	0	8	10	0	8	10	1	30		
7	12	0	0	12	0	0	1	20		
Summe	54	31	33	51	26	30				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.6154	0.7692
Durchsatzbeitrag	
24	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3				
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	14	14	0	10	10	0.714286	20	14	14
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20		
4	0	0	10	0	0	10	1	30		
5	12	0	0	12	0	0	1	20		
6	0	8	10	0	8	10	1	30		
7	12	0	0	12	0	0	1	20		
Summe	54	32	34	51	26	30				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.5714	0.7143
Durchsatzbeitrag	
24	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3				
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	15	15	0	10	10	0.666667	20	15	15
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20		
4	0	0	10	0	0	10	1	30		
5	12	0	0	12	0	0	1	20		
6	0	8	10	0	8	10	1	30		
7	12	0	0	12	0	0	1	20		
Summe	54	33	35	51	26	30				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.5333	0.6667
Durchsatzbeitrag	
24	30

# Anhang

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3				
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	16	16	0	10	10	0.625	20	16	16
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20		
4	0	0	10	0	0	10	1	30		
5	12	0	0	12	0	0	1	20		
6	0	8	10	0	8	10	1	30		
7	12	0	0	12	0	0	1	20		
Summe	54	34	36	51	26	30				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.5000	0.6250
Durchsatzbeitrag	
24	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3				
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	17	17	0	10	10	0.588235	20	17	17
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20		
4	0	0	10	0	0	10	1	30		
5	12	0	0	12	0	0	1	20		
6	0	8	10	0	8	10	1	30		
7	12	0	0	12	0	0	1	20		
Summe	54	35	37	51	26	30				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.4706	0.5882
Durchsatzbeitrag	
24	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3				
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	18	18	0	10	10	0.555556	20	18	18
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20		
4	0	0	10	0	0	10	1	30		
5	12	0	0	12	0	0	1	20		
6	0	8	10	0	8	10	1	30		
7	12	0	0	12	0	0	1	20		
Summe	54	36	38	51	26	30				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.4444	0.5556
Durchsatzbeitrag	
24	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3				
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	19	19	0	10	10	0.526316	20	19	19
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20		
4	0	0	10	0	0	10	1	30		
5	12	0	0	12	0	0	1	20		
6	0	8	10	0	8	10	1	30		
7	12	0	0	12	0	0	1	20		
Summe	54	37	39	51	26	30				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.4211	0.5263
Durchsatzbeitrag	
24	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3				
1	15	0	0	15	0	0	1	20		
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20	20	20
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20		
4	0	0	10	0	0	10	1	30		
5	12	0	0	12	0	0	1	20		
6	0	8	10	0	8	10	1	30		
7	12	0	0	12	0	0	1	20		
Summe	54	38	40	51	26	30				

ABFE(gesamt)	
MS2	MS3
0.4000	0.5000
Durchsatzbeitrag	
24	30

Anhang B

Numerische Berechnung des Durchsatzes von ASTR2

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	MS1	MS2	MS3
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3					
1	1	0	0	1	0	0	1	20	1	20	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20			
3	1	10	0	1	10	0	1	20			
4	0	0	10	0	0	10	1	30			
5	1	0	0	1	0	0	1	20			
6	0	10	10	0	10	10	1	30			
7	1	0	0	1	0	0	1	20			
Summe	4	40	40	4	30	30					

ABFE(gesamt)
MS1
1.0000
Durchsatzbeitrag
4

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	MS1	MS2	MS3
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3					
1	2	0	0	2	0	0	1	20	2	20	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20			
3	2	10	0	2	10	0	1	20			
4	0	0	10	0	0	10	1	30			
5	2	0	0	2	0	0	1	20			
6	0	10	10	0	10	10	1	30			
7	2	0	0	2	0	0	1	20			
Summe	8	40	40	8	30	30					

ABFE(gesamt)
MS1
1.0000
Durchsatzbeitrag
8

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	MS1	MS2	MS3
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3					
1	3	0	0	3	0	0	1	20	3	20	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20			
3	3	10	0	3	10	0	1	20			
4	0	0	10	0	0	10	1	30			
5	3	0	0	3	0	0	1	20			
6	0	10	10	0	10	10	1	30			
7	3	0	0	3	0	0	1	20			
Summe	12	40	40	12	30	30					

ABFE(gesamt)
MS1
1.0000
Durchsatzbeitrag
12

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	MS1	MS2	MS3
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3					
1	4	0	0	4	0	0	1	20	4	20	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20			
3	4	10	0	4	10	0	1	20			
4	0	0	10	0	0	10	1	30			
5	4	0	0	4	0	0	1	20			
6	0	10	10	0	10	10	1	30			
7	4	0	0	4	0	0	1	20			
Summe	16	40	40	16	30	30					

ABFE(gesamt)
MS1
1.0000
Durchsatzbeitrag
16

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	MS1	MS2	MS3
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3					
1	5	0	0	5	0	0	1	20	5	20	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20			
3	5	10	0	5	10	0	1	20			
4	0	0	10	0	0	10	1	30			
5	5	0	0	5	0	0	1	20			
6	0	10	10	0	10	10	1	30			
7	5	0	0	5	0	0	1	20			
Summe	20	40	40	20	30	30					

ABFE(gesamt)
MS1
1.0000
Durchsatzbeitrag
20

# Anhang

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	6	0	0	6	0	0	1	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20
3	6	10	0	6	10	0	1	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	6	0	0	6	0	0	1	20
6	0	10	10	0	10	10	1	30
7	6	0	0	6	0	0	1	20
Summe	24	40	40	24	30	30		

6	20	20
---	----	----

ABFE(gesamt)	
MS1	
1.0000	
Durchsatzbeitrag	
24	

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	7	0	0	7	0	0	1	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20
3	7	10	0	7	10	0	1	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	7	0	0	7	0	0	1	20
6	0	10	10	0	10	10	1	30
7	7	0	0	7	0	0	1	20
Summe	28	40	40	28	30	30		

7	20	20
---	----	----

ABFE(gesamt)	
MS1	
1.0000	
Durchsatzbeitrag	
28	0

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	8	0	0	8	0	0	1	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20
3	8	10	0	8	10	0	1	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	8	0	0	8	0	0	1	20
6	0	10	10	0	10	10	1	30
7	8	0	0	8	0	0	1	20
Summe	32	40	40	32	30	30		

8	20	20
---	----	----

ABFE(gesamt)	
MS1	
1.0000	
Durchsatzbeitrag	
32	

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	9	0	0	9	0	0	1	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20
3	9	10	0	9	10	0	1	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	9	0	0	9	0	0	1	20
6	0	10	10	0	10	10	1	30
7	9	0	0	9	0	0	1	20
Summe	36	40	40	36	30	30		

9	20	20
---	----	----

ABFE(gesamt)	
MS1	
1.0000	
Durchsatzbeitrag	
36	

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	10	0	0	10	0	0	1	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20
3	10	10	0	10	10	0	1	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	10	0	0	10	0	0	1	20
6	0	10	10	0	10	10	1	30
7	10	0	0	10	0	0	1	20
Summe	40	40	40	40	30	30		

10	20	20
----	----	----

ABFE(gesamt)	
MS1	
1.0000	
Durchsatzbeitrag	
40	

# Anhang

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	11	0	0	11	0	0	1	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20
3	11	10	0	10.47619	9.52381	0	0.952381	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	10.47619	0	0	10.47619	0	0	1	20
6	0	9.52381	10	0	9.52381	10	1	30
7	10.47619	0	0	10.47619	0	0	1	20
Summe	42.95238	39.52381	40	42.42857	29.04762	30		

11	20	20
----	----	----

ABFE(gesamt)	
MS1	
0.9524	
Durchsatzbeitrag	
41.90476	

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	12	0	0	12	0	0	1	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20
3	12	10	0	10.90909	9.090909	0	0.909091	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	10.90909	0	0	10.90909	0	0	1	20
6	0	9.090909	10	0	9.090909	10	1	30
7	10.90909	0	0	10.90909	0	0	1	20
Summe	45.81818	39.09091	40	44.72727	28.18182	30		

12	20	20
----	----	----

ABFE(gesamt)	
MS1	
0.9091	
Durchsatzbeitrag	
43.63636	

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	13	0	0	13	0	0	1	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20
3	13	10	0	11.30435	8.695652	0	0.869565	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	11.30435	0	0	11.30435	0	0	1	20
6	0	8.695652	10	0	8.695652	10	1	30
7	11.30435	0	0	11.30435	0	0	1	20
Summe	48.6087	38.69565	40	46.91304	27.3913	30		

13	20	20
----	----	----

ABFE(gesamt)	
MS1	
0.8696	
Durchsatzbeitrag	
45.21739	

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	14	0	0	14	0	0	1	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20
3	14	10	0	11.66667	8.333333	0	0.833333	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	11.66667	0	0	11.66667	0	0	1	20
6	0	8.333333	10	0	8.333333	10	1	30
7	11.66667	0	0	11.66667	0	0	1	20
Summe	51.33333	38.33333	40	49	26.66667	30		

14	20	20
----	----	----

ABFE(gesamt)	
MS1	
0.8333	
Durchsatzbeitrag	
46.66667	

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	15	0	0	15	0	0	1	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	12	0	0	12	0	0	1	20
6	0	8	10	0	8	10	1	30
7	12	0	0	12	0	0	1	20
Summe	54	38	40	51	26	30		

15	20	20
----	----	----

ABFE(gesamt)	
MS1	
0.8000	
Durchsatzbeitrag	
48	

Anhang C

Numerische Berechnung des Gesamtdurchsatzes mit gleichverteilter Einlastung

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS1	MS2	MS3
1	0.75	0	0	0.75	0	0	1	20	0.75	1	1
2	0	1	1	0	1	1	1	20			
3	0.75	1	0	0.75	1	0	1	20			
4	0	0	1	0	0	1	1	30			
5	0.75	0	0	0.75	0	0	1	20			
6	0	1	1	0	1	1	1	30			
7	0.75	0	0	0.75	0	0	0	20			
Summe	3	3	3	3	3	3					

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
3	3	3

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS1	MS2	MS3
1	1.5	0	0	1.5	0	0	1	20	1.5	2	2
2	0	2	2	0	2	2	2	20			
3	1.5	2	0	1.5	2	0	1	20			
4	0	0	2	0	0	2	1	30			
5	1.5	0	0	1.5	0	0	1	20			
6	0	2	2	0	2	2	1	30			
7	1.5	0	0	1.5	0	0	1	20			
Summe	6	6	6	6	6	6					

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
6	6	6

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS1	MS2	MS3
1	2.25	0	0	2.25	0	0	1	20	2.25	3	3
2	0	3	3	0	3	3	1	20			
3	2.25	3	0	2.25	3	0	1	20			
4	0	0	3	0	0	3	1	30			
5	2.25	0	0	2.25	0	0	1	20			
6	0	3	3	0	3	3	1	30			
7	2.25	0	0	2.25	0	0	1	20			
Summe	9	9	9	9	9	9					

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
9	9	9

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS1	MS2	MS3
1	3	0	0	3	0	0	1	20	3	4	4
2	0	4	4	0	4	4	1	20			
3	3	4	0	3	4	0	1	20			
4	0	0	4	0	0	4	1	30			
5	3	0	0	3	0	0	1	20			
6	0	4	4	0	4	4	1	30			
7	3	0	0	3	0	0	1	20			
Summe	12	12	12	12	12	12					

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
12	12	12

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS1	MS2	MS3
1	3.75	0	0	3.75	0	0	1	20	3.75	5	5
2	0	5	5	0	5	5	1	20			
3	3.75	5	0	3.75	5	0	1	20			
4	0	0	5	0	0	5	1	30			
5	3.75	0	0	3.75	0	0	1	20			
6	0	5	5	0	5	5	1	30			
7	3.75	0	0	3.75	0	0	1	20			
Summe	15	15	15	15	15	15					

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
15	15	15

# Anhang

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	3.75	0	0	3.75	0	0	1	20
2	0	5	5	0	5	5	1	20
3	3.75	5	0	3.75	5	0	1	20
4	0	0	5	0	0	5	1	30
5	3.75	0	0	3.75	0	0	1	20
6	0	5	5	0	5	5	1	30
7	3.75	0	0	3.75	0	0	1	20
Summe	15	15	15	15	15	15		

3.75	5	5
------	---	---

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
15	15	15

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	4.5	0	0	4.5	0	0	1	20
2	0	6	6	0	6	6	1	20
3	4.5	6	0	4.5	6	0	1	20
4	0	0	6	0	0	6	1	30
5	4.5	0	0	4.5	0	0	1	20
6	0	6	6	0	6	6	1	30
7	4.5	0	0	4.5	0	0	1	20
Summe	18	18	18	18	18	18		

4.5	6	6
-----	---	---

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
18	18	18

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	5.25	0	0	5.25	0	0	1	20
2	0	7	7	0	7	7	1	20
3	5.25	7	0	5.25	7	0	1	20
4	0	0	7	0	0	7	1	30
5	5.25	0	0	5.25	0	0	1	20
6	0	7	7	0	7	7	1	30
7	5.25	0	0	5.25	0	0	1	20
Summe	21	21	21	21	21	21		

5.25	7	7
------	---	---

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
21	21	21

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	6	0	0	6	0	0	1	20
2	0	8	8	0	8	8	1	20
3	6	8	0	6	8	0	1	20
4	0	0	8	0	0	8	1	30
5	6	0	0	6	0	0	1	20
6	0	8	8	0	8	8	1	30
7	6	0	0	6	0	0	1	20
Summe	24	24	24	24	24	24		

6	8	8
---	---	---

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
24	24	24

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	6.75	0	0	6.75	0	0	1	20
2	0	9	9	0	9	9	1	20
3	6.75	9	0	6.75	9	0	1	20
4	0	0	9	0	0	9	1	30
5	6.75	0	0	6.75	0	0	1	20
6	0	9	9	0	9	9	1	30
7	6.75	0	0	6.75	0	0	1	20
Summe	27	27	27	27	27	27		

6.75	9	9
------	---	---

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
27	27	27

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	7.5	0	0	7.5	0	0	1	20
2	0	10	10	0	10	10	1	20
3	7.5	10	0	7.5	10	0	1	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	7.5	0	0	7.5	0	0	1	20
6	0	10	10	0	10	10	1	30

7.5	10	10
-----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000

Anhang

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	8.25	0	0	8.25	0	0	1	20
2	0	11	11	0	10	10	0.909091	20
3	8.25	10	0	8.25	10	0	1	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	8.25	0	0	8.25	0	0	1	20
6	0	10	10	0	10	10	1	30
7	8.25	0	0	8.25	0	0	1	20
Summe	33	31	31	33	30	30		

8.25	11	11
------	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	0.9091	0.9091
Durchsatzbeitrag		
33	30	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	9	0	0	9	0	0	1	20
2	0	12	12	0	10	10	0.833333	20
3	9	10	0	9	10	0	1	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	9	0	0	9	0	0	1	20
6	0	10	10	0	10	10	1	30
7	9	0	0	9	0	0	1	20
Summe	36	32	32	36	30	30		

9	12	12
---	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	0.8333	0.8333
Durchsatzbeitrag		
36	30	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	9.75	0	0	9.75	0	0	1	20
2	0	13	13	0	10	10	0.769231	20
3	9.75	10	0	9.75	10	0	1	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	9.75	0	0	9.75	0	0	1	20
6	0	10	10	0	10	10	1	30
7	9.75	0	0	9.75	0	0	1	20
Summe	39	33	33	39	30	30		

9.75	13	13
------	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	0.7692	0.7692
Durchsatzbeitrag		
39	30	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	10.5	0	0	10.5	0	0	1	20
2	0	14	14	0	10	10	0.714286	20
3	10.5	10	0	10.2439	9.756098	0	0.97561	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	10.2439	0	0	10.2439	0	0	1	20
6	0	9.756098	10	0	9.756098	10	1	30
7	10.2439	0	0	10.2439	0	0	1	20
Summe	41.4878	33.7561	34	41.23171	29.5122	30		

10.5	14	14
------	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.9756	0.6969	0.7143
Durchsatzbeitrag		
40.97561	29.26829	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	11.25	0	0	11.25	0	0	1	20
2	0	15	15	0	10	10	0.666667	20
3	11.25	10	0	10.58824	9.411765	0	0.941176	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	10.58824	0	0	10.58824	0	0	1	20
6	0	9.411765	10	0	9.411765	10	1	30
7	10.58824	0	0	10.58824	0	0	1	20
Summe	43.67647	34.41176	35	43.01471	28.82353	30		

11.25	15	15
-------	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.9412	0.6275	0.6667
Durchsatzbeitrag		
42.35294	28.23529	30

# Anhang

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	12	0	0	12	0	0	1	20
2	0	16	16	0	10	10	0.625	20
3	12	10	0	10.90909	9.090909	0	0.909091	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	10.90909	0	0	10.90909	0	0	1	20
6	0	9.090909	10	0	9.090909	10	1	30
7	10.90909	0	0	10.90909	0	0	1	20
Summe	45.81818	35.09091	36	44.72727	28.18182	30		

12	16	16
----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.9091	0.5682	0.6250
Durchsatzbeitrag		
43.63636	27.27273	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	12.75	0	0	12.75	0	0	1	20
2	0	17	17	0	10	10	0.588235	20
3	12.75	10	0	11.20879	8.791209	0	0.879121	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	11.20879	0	0	11.20879	0	0	1	20
6	0	8.791209	10	0	8.791209	10	1	30
7	11.20879	0	0	11.20879	0	0	1	20
Summe	47.91758	35.79121	37	46.37637	27.58242	30		

12.75	17	17
-------	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.8791	0.5171	0.5882
Durchsatzbeitrag		
44.83516	26.37363	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	13.5	0	0	13.5	0	0	1	20
2	0	18	18	0	10	10	0.555556	20
3	13.5	10	0	11.48936	8.510638	0	0.851064	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	11.48936	0	0	11.48936	0	0	1	20
6	0	8.510638	10	0	8.510638	10	1	30
7	11.48936	0	0	11.48936	0	0	1	20
Summe	49.97872	36.51064	38	47.96809	27.02128	30		

13.5	18	18
------	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.8511	0.4728	0.5556
Durchsatzbeitrag		
45.95745	25.53191	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	14.25	0	0	14.25	0	0	1	20
2	0	19	19	0	10	10	0.526316	20
3	14.25	10	0	11.75258	8.247423	0	0.824742	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	11.75258	0	0	11.75258	0	0	1	20
6	0	8.247423	10	0	8.247423	10	1	30
7	11.75258	0	0	11.75258	0	0	1	20
Summe	52.00515	37.24742	39	49.50773	26.49485	30		

14.25	19	19
-------	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.8247	0.4341	0.5263
Durchsatzbeitrag		
47.01031	24.74227	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	15	0	0	15	0	0	1	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	12	0	0	12	0	0	1	20
6	0	8	10	0	8	10	1	30
7	12	0	0	12	0	0	1	20
Summe	54	38	40	51	26	30		

15	20	20
----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.8000	0.4000	0.5000
Durchsatzbeitrag		
48	24	30

Anhang D

Numerische Berechnung des Gesamtdurchsatzes mit gleich relativer Einlastungssteigerung

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS1	MS2	MS3
1	1	0	0	1	0	0	1	20	1	1	1
2	0	1	1	0	1	1	1	20			
3	1	1	0	1	1	0	1	20			
4	0	0	1	0	0	1	1	30			
5	1	0	0	1	0	0	1	20			
6	0	1	1	0	1	1	1	30			
7	1	0	0	1	0	0	1	20			
Summe	4	3	3	4	3	3					

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
4	3	3

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS1	MS2	MS3
1	2	0	0	2	0	0	1	20	2	2	2
2	0	2	2	0	2	2	2	20			
3	2	2	0	2	2	0	1	20			
4	0	0	2	0	0	2	1	30			
5	2	0	0	2	0	0	1	20			
6	0	2	2	0	2	2	1	30			
7	2	0	0	2	0	0	1	20			
Summe	8	6	6	8	6	6					

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
8	6	6

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS1	MS2	MS3
1	3	0	0	3	0	0	1	20	3	3	3
2	0	3	3	0	3	3	1	20			
3	3	3	0	3	3	0	1	20			
4	0	0	3	0	0	3	1	30			
5	3	0	0	3	0	0	1	20			
6	0	3	3	0	3	3	1	30			
7	3	0	0	3	0	0	1	20			
Summe	12	9	9	12	9	9					

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
12	9	9

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS1	MS2	MS3
1	4	0	0	4	0	0	1	20	4	4	4
2	0	4	4	0	4	4	1	20			
3	4	4	0	4	4	0	1	20			
4	0	0	4	0	0	4	1	30			
5	4	0	0	4	0	0	1	20			
6	0	4	4	0	4	4	1	30			
7	4	0	0	4	0	0	1	20			
Summe	16	12	12	16	12	12					

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
16	12	12

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität	Einlastung		
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3			MS1	MS2	MS3
1	5	0	0	5	0	0	1	20	5	5	5
2	0	5	5	0	5	5	1	20			
3	5	5	0	5	5	0	1	20			
4	0	0	5	0	0	5	1	30			
5	5	0	0	5	0	0	1	20			
6	0	5	5	0	5	5	1	30			
7	5	0	0	5	0	0	1	20			
Summe	20	15	15	20	15	15					

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
20	15	15

# Anhang

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	6	0	0	6	0	0	1	20
2	0	6	6	0	6	6	1	20
3	6	6	0	6	6	0	1	20
4	0	0	6	0	0	6	1	30
5	6	0	0	6	0	0	1	20
6	0	6	6	0	6	6	1	30
7	6	0	0	6	0	0	1	20
Summe	24	18	18	24	18	18		

6	6	6
---	---	---

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
24	18	18

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	7	0	0	7	0	0	1	20
2	0	7	7	0	7	7	1	20
3	7	7	0	7	7	0	1	20
4	0	0	7	0	0	7	1	30
5	7	0	0	7	0	0	1	20
6	0	7	7	0	7	7	1	30
7	7	0	0	7	0	0	1	20
Summe	28	21	21	28	21	21		

7	7	7
---	---	---

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
28	21	21

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	8	0	0	8	0	0	1	20
2	0	8	8	0	8	8	1	20
3	8	8	0	8	8	0	1	20
4	0	0	8	0	0	8	1	30
5	8	0	0	8	0	0	1	20
6	0	8	8	0	8	8	1	30
7	8	0	0	8	0	0	1	20
Summe	32	24	24	32	24	24		

8	8	8
---	---	---

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
32	24	24

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	9	0	0	9	0	0	1	20
2	0	9	9	0	9	9	1	20
3	9	9	0	9	9	0	1	20
4	0	0	9	0	0	9	1	30
5	9	0	0	9	0	0	1	20
6	0	9	9	0	9	9	1	30
7	9	0	0	9	0	0	1	20
Summe	36	27	27	36	27	27		

9	9	9
---	---	---

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
36	27	27

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	10	0	0	10	0	0	1	20
2	0	10	10	0	10	10	1	20
3	10	10	0	10	10	0	1	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	10	0	0	10	0	0	1	20
6	0	10	10	0	10	10	1	30
7	10	0	0	10	0	0	1	20
Summe	40	30	30	40	30	30		

10	10	10
----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
1.0000	1.0000	1.0000
Durchsatzbeitrag		
40	30	30

Anhang

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	11	0	0	11	0	0	1	20
2	0	11	11	0	10	10	0.909091	20
3	11	10	0	10.47619	9.52381	0	0.952381	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	10.47619	0	0	10.47619	0	0	1	20
6	0	9.52381	10	0	9.52381	10	1	30
7	10.47619	0	0	10.47619	0	0	1	20
Summe	42.95238	30.52381	31	42.42857	29.04762	30		

11	11	11
----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.9524	0.8658	0.9091
Durchsatzbeitrag		
41.90476	28.57143	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	12	0	0	12	0	0	1	20
2	0	12	12	0	10	10	0.833333	20
3	12	10	0	10.90909	9.090909	0	0.909091	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	10.90909	0	0	10.90909	0	0	1	20
6	0	9.090909	10	0	9.090909	10	1	30
7	10.90909	0	0	10.90909	0	0	1	20
Summe	45.81818	31.09091	32	44.72727	28.18182	30		

12	12	12
----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.9091	0.7576	0.8333
Durchsatzbeitrag		
43.63636	27.27273	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	13	0	0	13	0	0	1	20
2	0	13	13	0	10	10	0.769231	20
3	13	10	0	11.30435	8.695652	0	0.869565	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	11.30435	0	0	11.30435	0	0	1	20
6	0	8.695652	10	0	8.695652	10	1	30
7	11.30435	0	0	11.30435	0	0	1	20
Summe	48.6087	31.69565	33	46.91304	27.3913	30		

13	13	13
----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.8696	0.6689	0.7692
Durchsatzbeitrag		
45.21739	26.08696	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	14	0	0	14	0	0	1	20
2	0	14	14	0	10	10	0.714286	20
3	14	10	0	11.66667	8.333333	0	0.833333	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	11.66667	0	0	11.66667	0	0	1	20
6	0	8.333333	10	0	8.333333	10	1	30
7	11.66667	0	0	11.66667	0	0	1	20
Summe	51.33333	32.33333	34	49	26.66667	30		

14	14	14
----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.8333	0.5952	0.7143
Durchsatzbeitrag		
46.66667	25	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	15	0	0	15	0	0	1	20
2	0	15	15	0	10	10	0.666667	20
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	12	0	0	12	0	0	1	20
6	0	8	10	0	8	10	1	30
7	12	0	0	12	0	0	1	20
Summe	54	33	35	51	26	30		

15	15	15
----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.8000	0.5333	0.6667
Durchsatzbeitrag		
48	24	30

# Anhang

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	15	0	0	15	0	0	1	20
2	0	16	16	0	10	10	0.625	20
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	12	0	0	12	0	0	1	20
6	0	8	10	0	8	10	1	30
7	12	0	0	12	0	0	1	20
Summe	54	34	36	51	26	30		

15	16	16
----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.8000	0.5000	0.6250
Durchsatzbeitrag		
48	24	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	15	0	0	15	0	0	1	20
2	0	17	17	0	10	10	0.588235	20
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	12	0	0	12	0	0	1	20
6	0	8	10	0	8	10	1	30
7	12	0	0	12	0	0	1	20
Summe	54	35	37	51	26	30		

15	17	17
----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.8000	0.4706	0.5882
Durchsatzbeitrag		
48	24	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	15	0	0	15	0	0	1	20
2	0	18	18	0	10	10	0.555556	20
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	12	0	0	12	0	0	1	20
6	0	8	10	0	8	10	1	30
7	12	0	0	12	0	0	1	20
Summe	54	36	38	51	26	30		

15	18	18
----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.8000	0.4444	0.5556
Durchsatzbeitrag		
48	24	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	15	0	0	15	0	0	1	20
2	0	19	19	0	10	10	0.526316	20
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	12	0	0	12	0	0	1	20
6	0	8	10	0	8	10	1	30
7	12	0	0	12	0	0	1	20
Summe	54	37	39	51	26	30		

15	19	19
----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.8000	0.4211	0.5263
Durchsatzbeitrag		
48	24	30

AS	Einlastung			Wertschöpfung			ABFE	Kapazität
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3		
1	15	0	0	15	0	0	1	20
2	0	20	20	0	10	10	0.5	20
3	15	10	0	12	8	0	0.8	20
4	0	0	10	0	0	10	1	30
5	12	0	0	12	0	0	1	20
6	0	8	10	0	8	10	1	30
7	12	0	0	12	0	0	1	20
Summe	54	38	40	51	26	30		

15	20	20
----	----	----

ABFE(gesamt)		
MS1	MS2	MS3
0.8000	0.4000	0.5000
Durchsatzbeitrag		
48	24	30

Anhang E

Makro zur Initialisierung vor jedem Simulationslauf

is

-- Variablen definieren

-- Abstand zwischen zwei Aufträgen als Time-Wert zum Rechnen

AbstandMF2MF3:time;

AbstandMF1:time;

-- Abstand zwischen zwei Aufträgen als String zum Ausgeben

Abstand\_ZeitMF1:string;

Abstand\_ZeitMF2MF3:string;

do

-- Abstand für MF2 und MF ausrechnen

AbstandMF2MF3:=Ereignisverwalter.Ende / AnzahlMF2MF3;

-- Abstand für MF2 und MF3 in Text konvertieren

Abstand\_ZeitMF2MF3:= time\_to\_str(AbstandMF2MF3, true);

-- Abstand für MF2 und MF3 in Konsole ausgeben

print "Abstand MF2 und MF3 ", Abstand\_ZeitMF2MF3;

-- neuen Abstand für MF2 und MF3 in Quelle einlesen

.Modelle.netzwerk.quellemf2.abstand:=AbstandMF2MF3;

.Modelle.netzwerk.quellemf3.abstand:=AbstandMF2MF3;

```
-- Abstand für MF2 und MF3 ausrechnen

AbstandMF1:=Ereignisverwalter.Ende / AnzahlMF1;

-- Abstand für MF2 und MF3 in Text konvertieren

Abstand_ZeitMF1:= time_to_str(AbstandMF1, true);

-- Abstand für MF2 und MF3 in Konsole ausgeben

print "Abstand MF1 ", Abstand_ZeitMF1;

-- neuen Abstand für MF2 und MF3 in Quelle einlesen

.Modelle.netzwerk.quellemf1.abstand:=AbstandMF1;

-- Speicher Puffer BEs leeren

AS1_BEMF1:=0;

AS2_BEMF2:=0;

AS2_BEMF3:=0;

AS3_BEMF1:=0;

AS3_BEMF2:=0;

AS4_BEMF3:=0;

AS5_BEMF1:=0;

AS6_BEMF2:=0;

AS6_BEMF3:=0;

AS7_BEMF1:=0;

end;
```

Anhang F

Makro zur ersten Parametrisierung einer Simulation

is

do

-- vor dem Start einer neuen Simulation werden die

-- Anzahl der Aufträge auf 1 zurücksetzen

AnzahIMF1:=1;

AnzahIMF2MF3:=1;

Zählwert:=1;

-- Bearbeitungszeit festlegen

AS1.Bearbeitungszeit:=ZBE;

AS2.Bearbeitungszeit:=ZBE;

AS3.Bearbeitungszeit:=ZBE;

AS4.Bearbeitungszeit:=ZBE;

AS5.Bearbeitungszeit:=ZBE;

AS6.Bearbeitungszeit:=ZBE;

AS7.Bearbeitungszeit:=ZBE;

end;

Anhang G

Makro zur automatischen Auswertung einer Simulation

is

do

-- Auftragsanzahl in Tabelle schreiben

Auswertung[1,Zählwert]:=AnzahlMF1;

Auswertung[2,Zählwert]:=AnzahlMF2MF3;

Auswertung[3,Zählwert]:=AnzahlMF2MF3;

-- Einlastung pro Materialstrom berechnen

Auswertung[4,Zählwert]:=AnzahlMF1\*MF1\_Auftrag;

Auswertung[5,Zählwert]:=AnzahlMF2MF3\*MF2\_MF3\_Auftrag;

Auswertung[6,Zählwert]:=AnzahlMF2MF3\*MF2\_MF3\_Auftrag;

-- Einlastung pro Auftragsstrom berechnen

Auswertung[7,Zählwert]:=Auswertung[5,Zählwert] + Auswertung[6,Zählwert];

Auswertung[8,Zählwert]:=Auswertung[4,Zählwert];

-- Einlastung gesamt berechnen

Auswertung[9,Zählwert]:=Auswertung[7,Zählwert] + Auswertung[8,Zählwert];

-- Durchsatz pro Materialstrom berechnen

Auswertung[10,Zählwert]:=SenkeMF1.statAnzahlAus\*MF1\_Auftrag;

Auswertung[11,Zählwert]:=SenkeMF2.statAnzahlAus\*MF2\_MF3\_Auftrag;

Auswertung[12,Zählwert]:=SenkeMF3.statAnzahlAus\*MF2\_MF3\_Auftrag;

-- Durchsatz pro Auftragsstrom berechnen

Auswertung[13,Zählwert]:=Auswertung[11,Zählwert]+Auswertung[12,Zählwert];

Auswertung[14,Zählwert]:=Auswertung[10,Zählwert];

-- Durchsatz gesamt berechnen

Auswertung[15,Zählwert]:=Auswertung[13,Zählwert]+Auswertung[14,Zählwert];

-- Bestand AS1 berechnen

Auswertung[16,Zählwert]:= AS1\_BEMF1\*MF1\_Auftrag;

-- Bestand AS2 berechnen

Auswertung[17,zählwert]:= AS2\_BEMF2\*MF2\_MF3\_Auftrag;

Auswertung[18,Zählwert]:= AS2\_BEMF3\*MF2\_MF3\_Auftrag;

Auswertung[19,Zählwert]:= (AS2\_BEMF2 + AS2\_BEMF3)\*MF2\_MF3\_Auftrag;

--Bestand AS3 berechnen

Auswertung[20,Zählwert]:= AS3\_BEMF1\*MF1\_Auftrag;

Auswertung[21,Zählwert]:= AS3\_BEMF2\*MF2\_MF3\_Auftrag;

Auswertung[22,Zählwert]:= AS3\_BEMF1\*MF1\_Auftrag +  
AS3\_BEMF2\*MF2\_MF3\_Auftrag;

-- Bestand AS4 berechnen

Auswertung[23,Zählwert]:= AS4\_BEMF3\*MF2\_MF3\_Auftrag;

-- Bestand AS5 berechnen

Auswertung[24,Zählwert]:= AS5\_BEMF1\*MF1\_Auftrag;

-- Bestand AS6 berechnen

Auswertung[25,Zählwert]:= AS6\_BEMF2\*MF2\_MF3\_Auftrag;

Auswertung[26,Zählwert]:= AS6\_BEMF3\*MF2\_MF3\_Auftrag;

Auswertung[27,Zählwert]:= (AS6\_BEMF2 + AS6\_BEMF3)\*MF2\_MF3\_Auftrag;

-- Bestand AS7 berechnen

Auswertung[28,Zählwert]:= AS7\_BEMF1\*MF1\_Auftrag;

-- Bestand ASTR1 errechnen

Auswertung[29,Zählwert]:= (AS2\_BEMF2 + AS2\_BEMF3 + AS3\_BEMF2 +  
AS4\_BEMF3 + AS6\_BEMF2 + AS6\_BEMF3)\*MF2\_MF3\_Auftrag;

-- Bestand ASTR2 errechnen

Auswertung[30,Zählwert]:= (AS1\_BEMF1 + AS3\_BEMF1 + AS5\_BEMF1 +  
AS7\_BEMF1)\*MF1\_Auftrag;

-- Bestand gesamt errechnen

Auswertung[31,Zählwert]:= Auswertung[29,Zählwert] + Auswertung[30,Zählwert];

-- Simulationsparameter erhöhen

Zählwert:=Zählwert+1;

-- Auftragsanzahl MF1 von 1 auf 15 erhöhen

if AnzahlMF1<15

    then AnzahlMF1:= AnzahlMF1 + 1;

    else AnzahlMF1:= AnzahlMF1;

end;

-- Auftragsanzahl MF2 und MF3 von 1 auf 20 erhöhen

if AnzahlMF2MF3<20

    then AnzahlMF2MF3:= AnzahlMF2MF3 + 1 ;

    else AnzahlMF2MF3:= AnzahlMF2MF3;

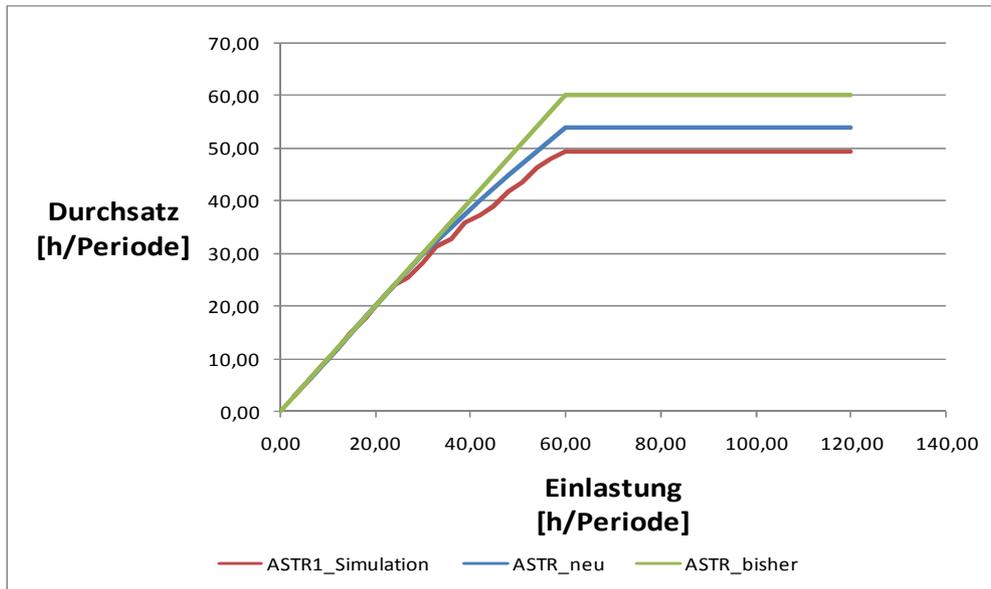
end;

end;

Anhang H

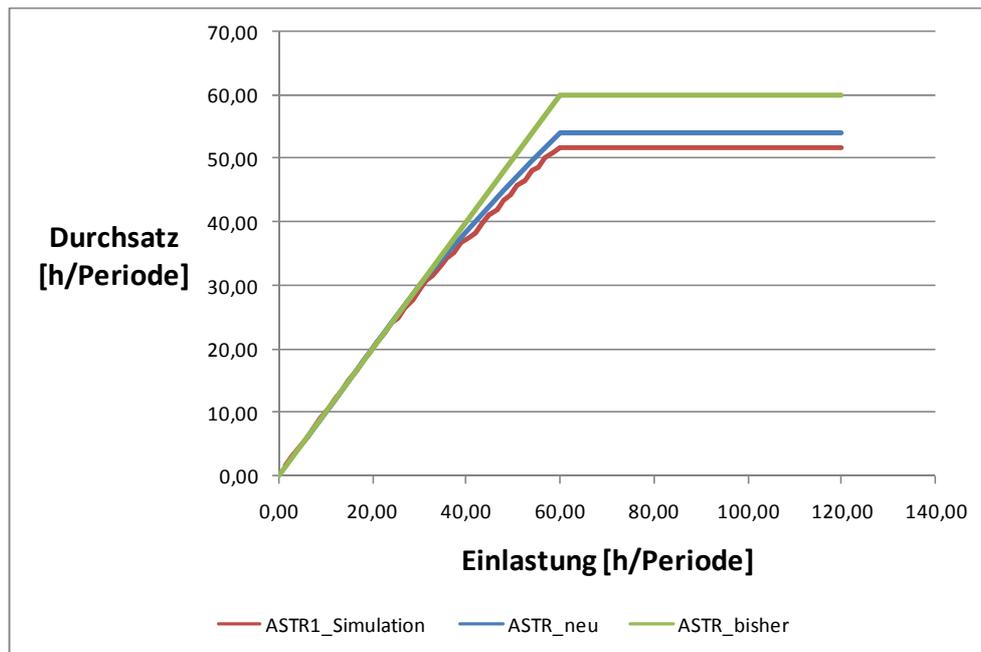
Durchsatzkennlinien zu Simulation bei ASTR1

Durchsatzkennlinien ASTR1 bei Auftragsgröße 0,5h



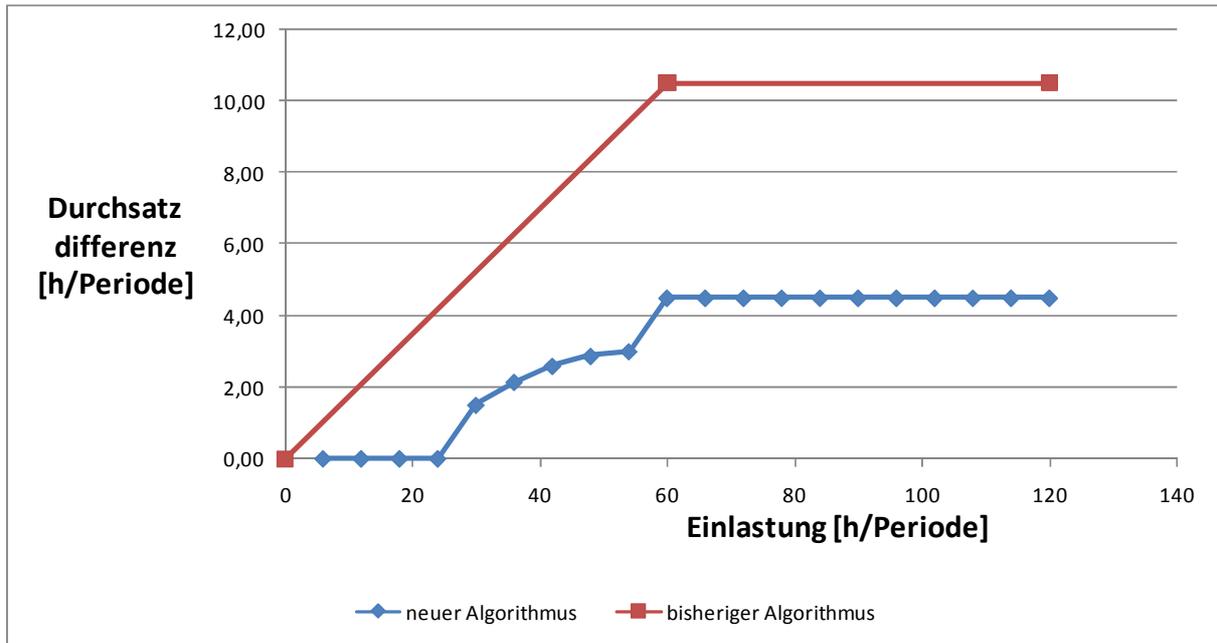
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzkennlinie ASTR1 mit Auftragsinhalt 0,25h



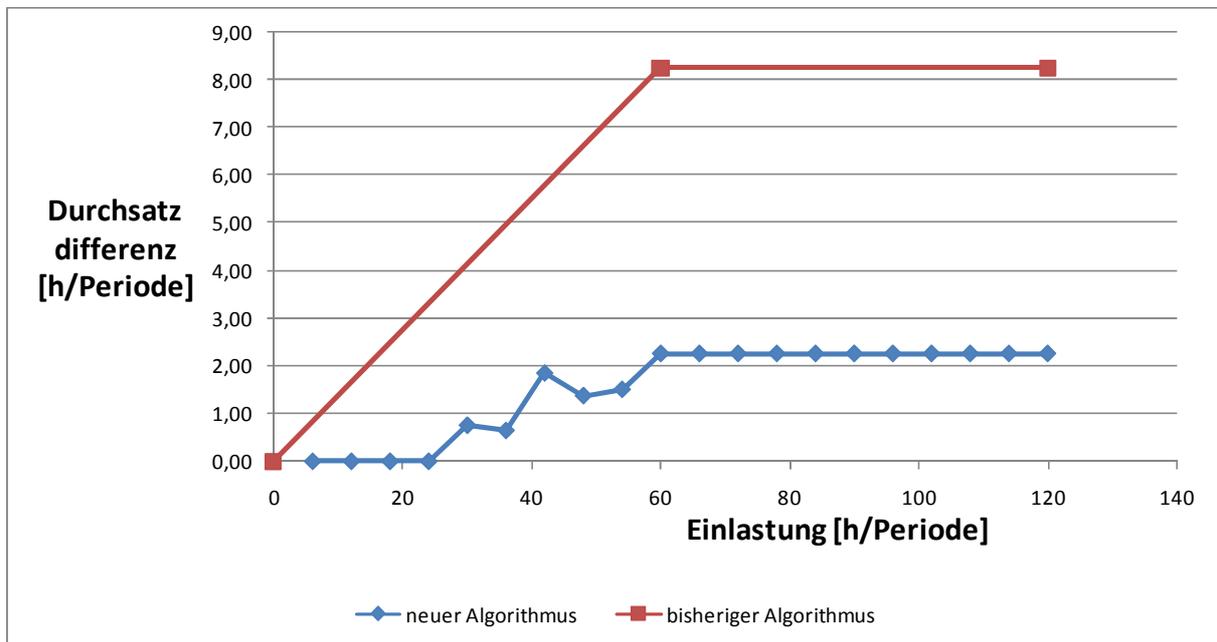
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen ASTR1 bei Auftragsgröße 0,5h



Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen ASTR1 bei Auftragsgröße 0,25h

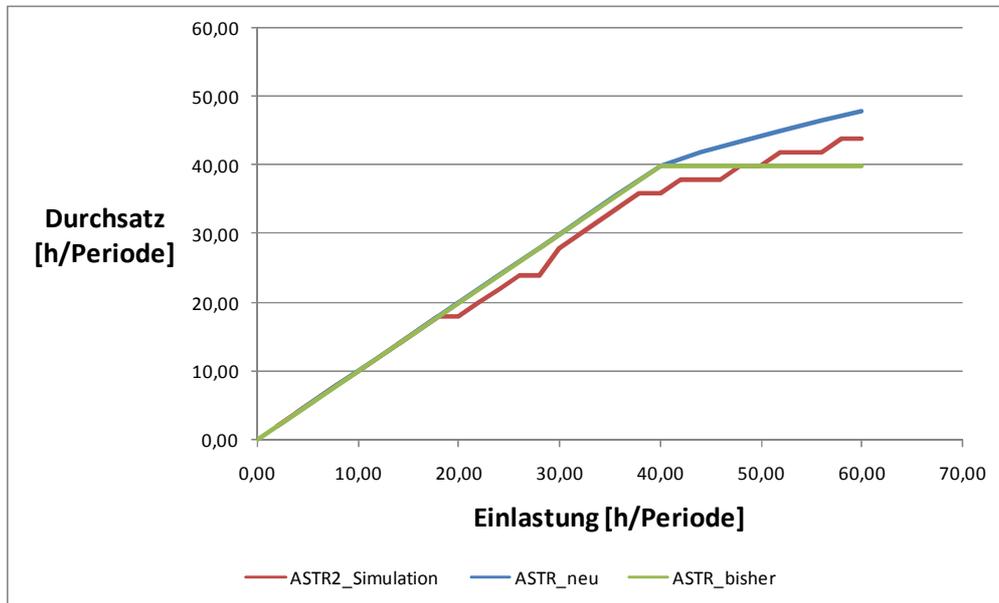


Quelle: eigene Darstellung

Anhang I

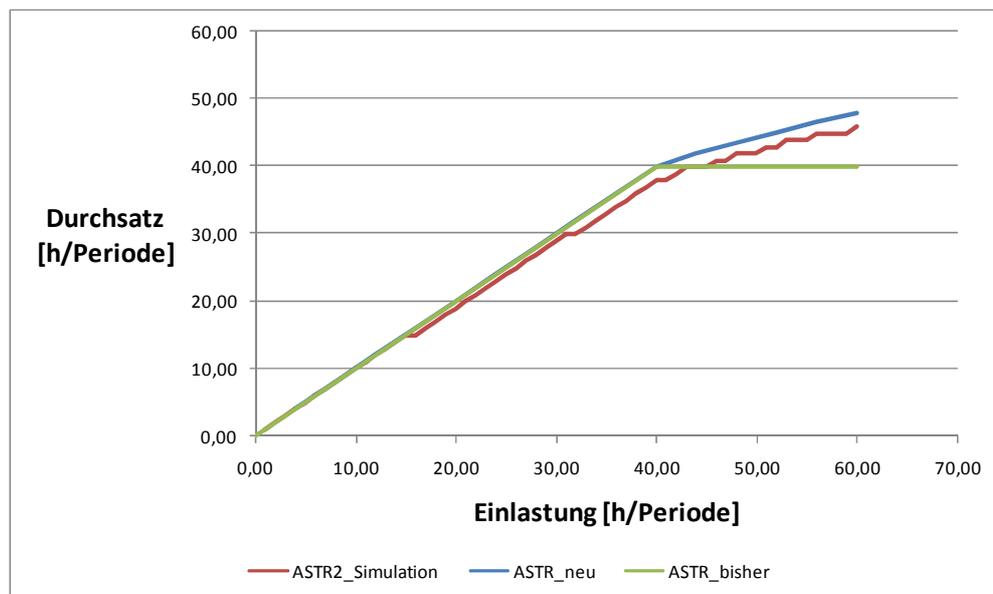
Durchsatzkennlinien zu Simulation bei ASTR2

Durchsatzkennlinie ASTR2 mit Auftragsinhalt  $0,5 \frac{h}{\text{Auftrag}}$



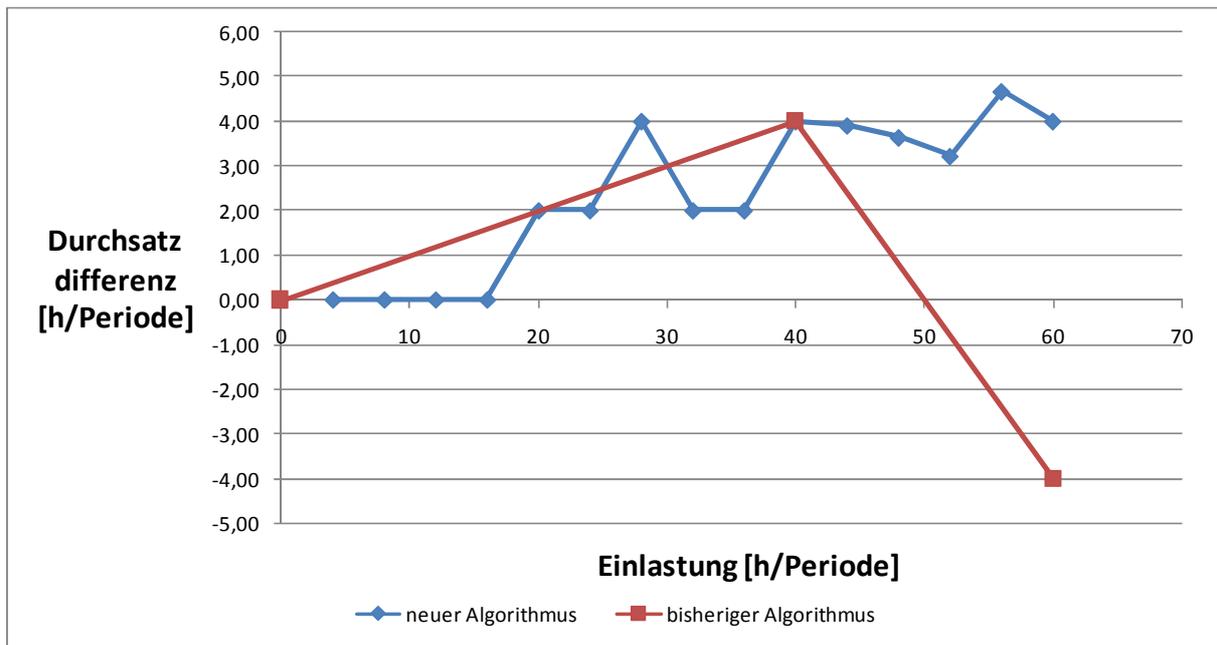
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzkennlinie ASTR2 mit Auftragsinhalt  $0,25 \frac{h}{\text{Auftrag}}$



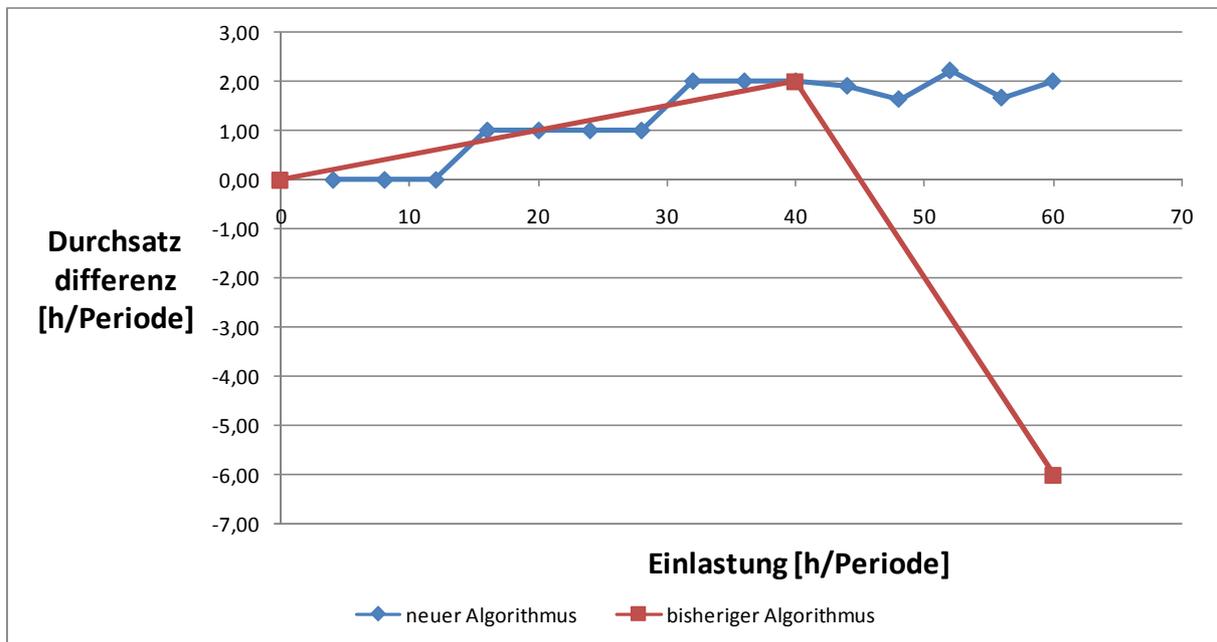
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen ASTR2 bei Auftragsgröße 0,5h



Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen ASTR2 bei Auftragsgröße 0,25h

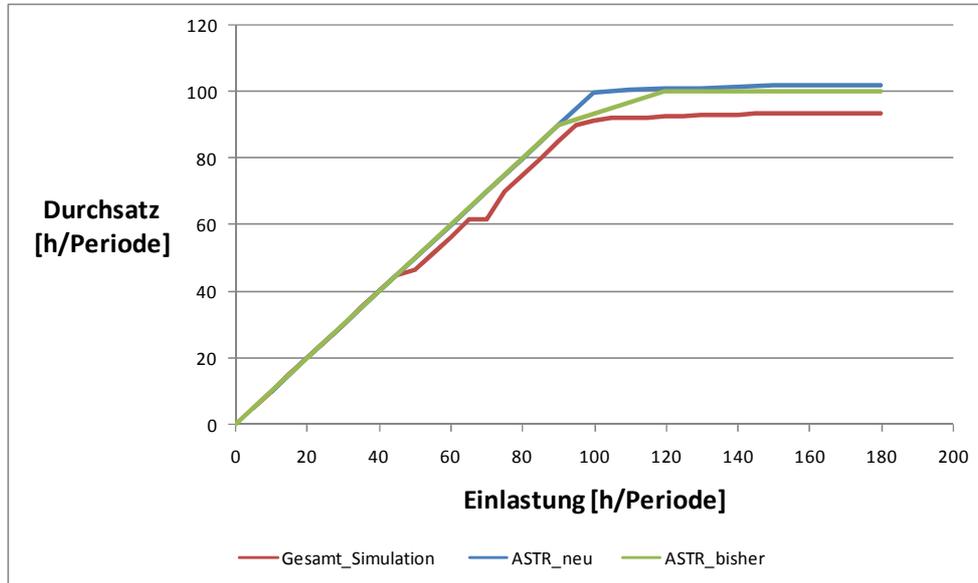


Quelle: eigene Darstellung

Anhang J

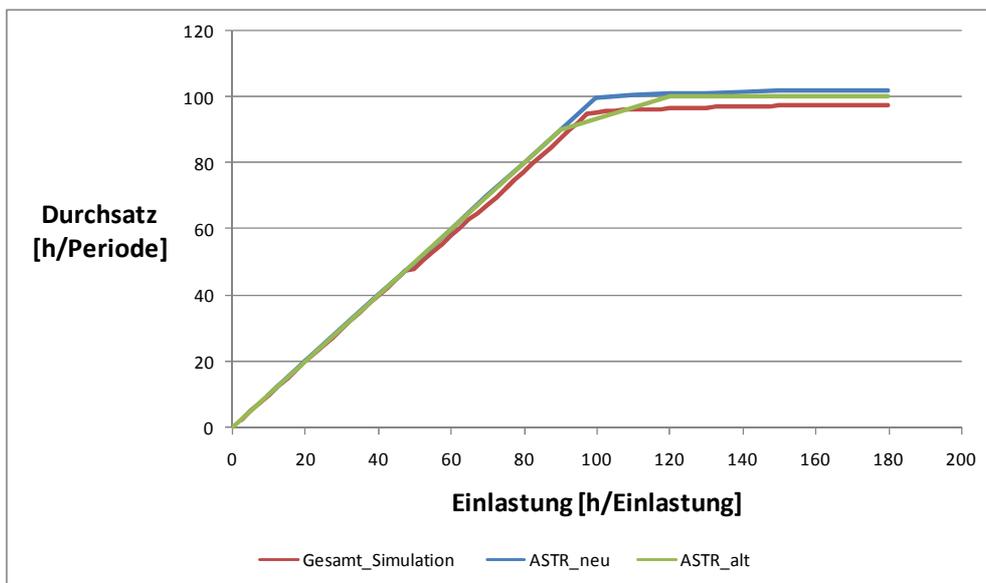
Simulation der Gesamtkennlinie

Gesamtdurchsatzkennlinie mit Auftragsinhalt  $0,5 \frac{h}{\text{Auftrag}}$



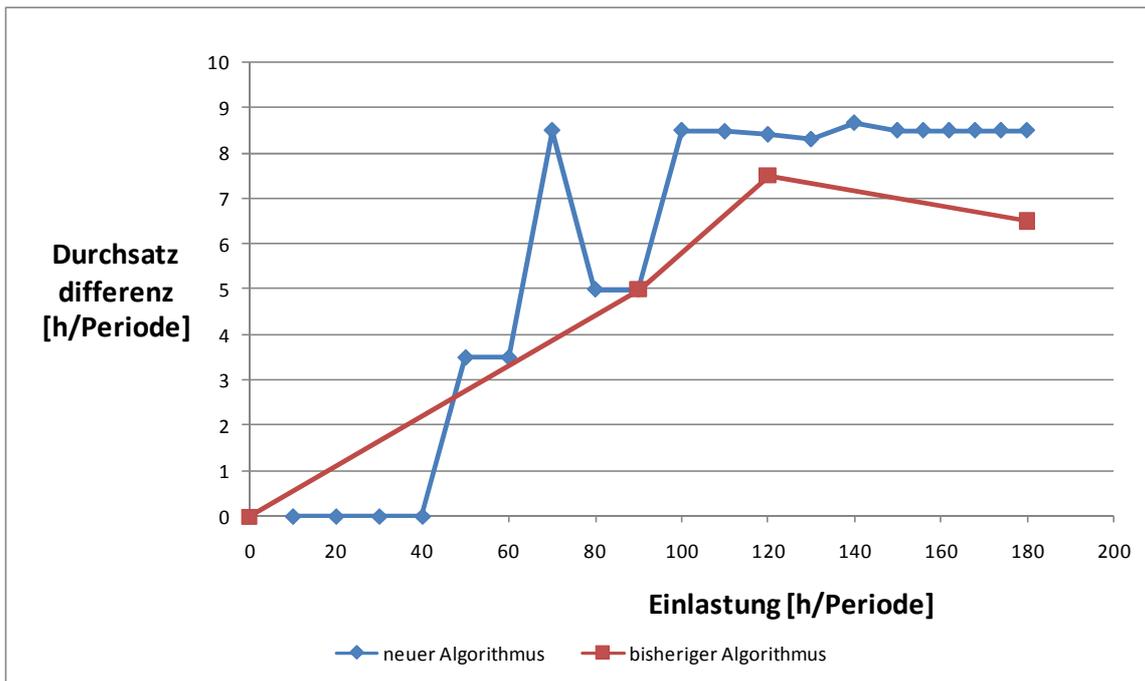
Quelle: eigene Darstellung

Gesamtdurchsatzkennlinie mit Auftragsinhalt  $0,25 \frac{h}{\text{Auftrag}}$



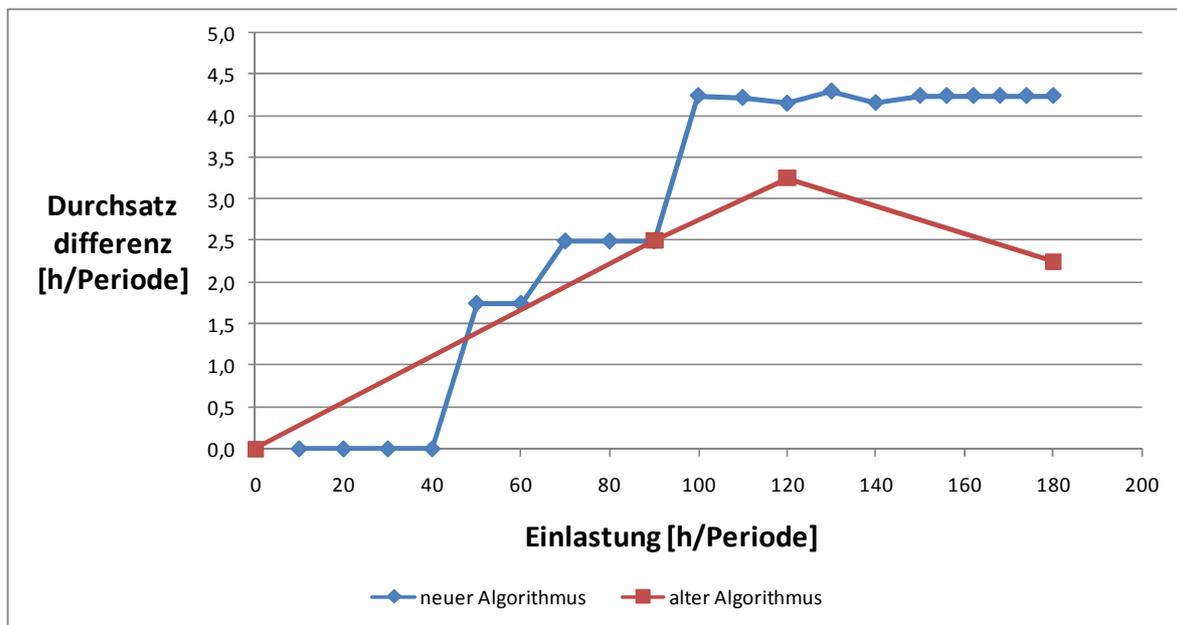
Quelle: eigene Darstellung

Gesamtdurchsatzdifferenzen bei Auftragsgröße 0,5h



Quelle: eigene Darstellung

Gesamtdurchsatzdifferenzen bei Auftragsgröße 0,25h

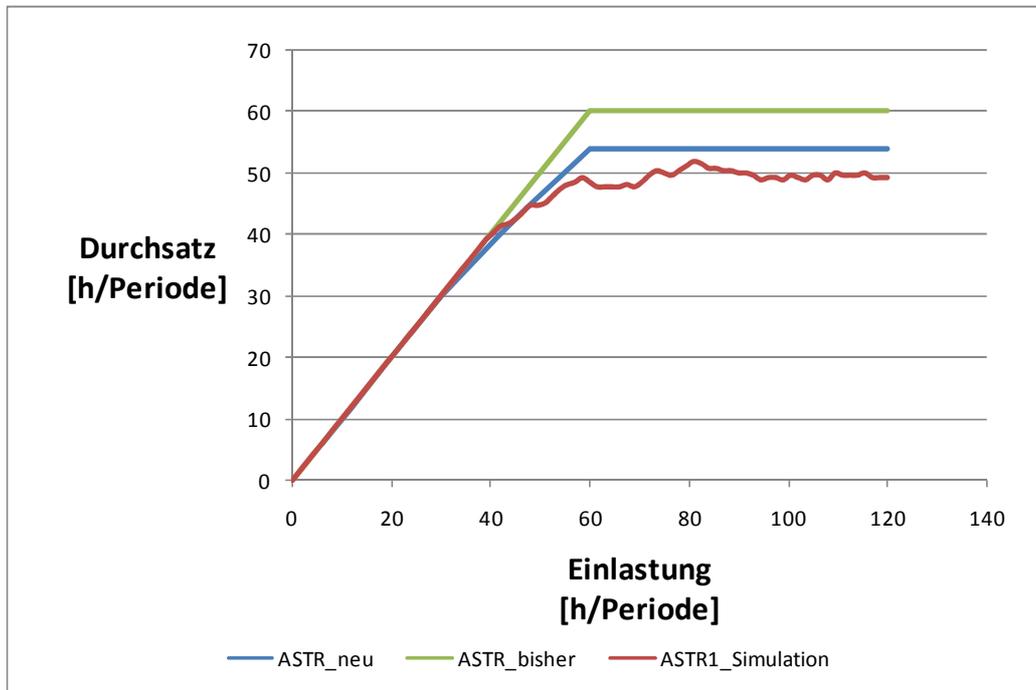


Quelle: eigene Darstellung

Anhang K

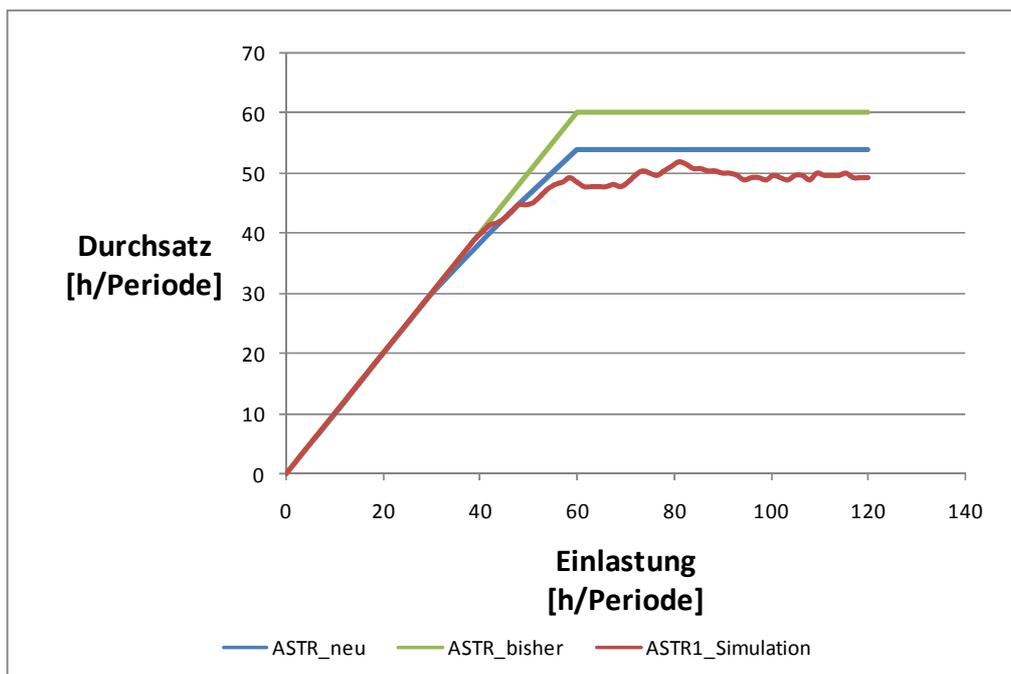
Durchsatzkennlinie ASTR1 bei streuendem Freigabeabstand

Durchsatzkennlinie ASTR1 mit  $\sigma = 113$  Sekunden



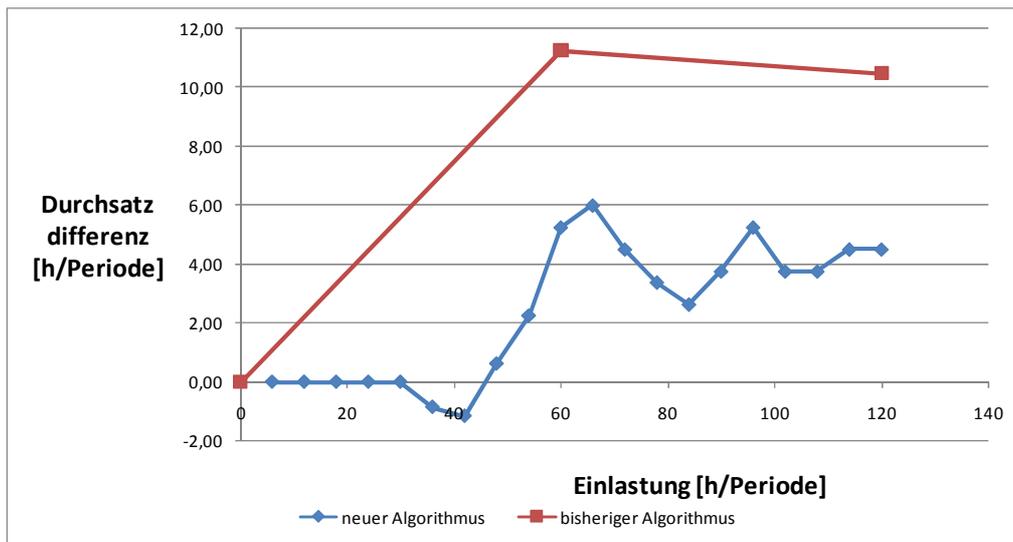
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzkennlinie ASTR1 mit  $\sigma = 225$  Sekunden



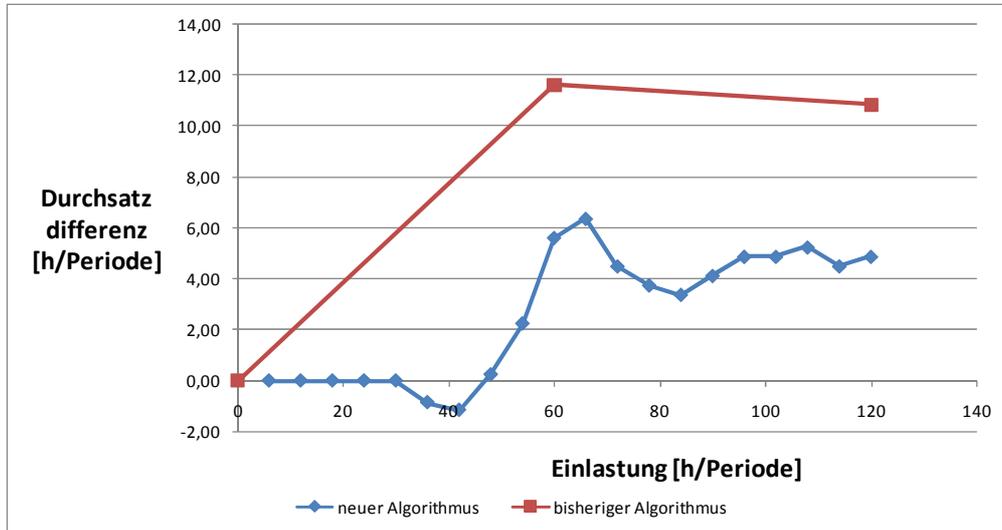
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen bei ASTR1 mit  $\sigma = 113$  Sekunden



Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen ASTR1 bei  $\sigma = 225$  Sekunden

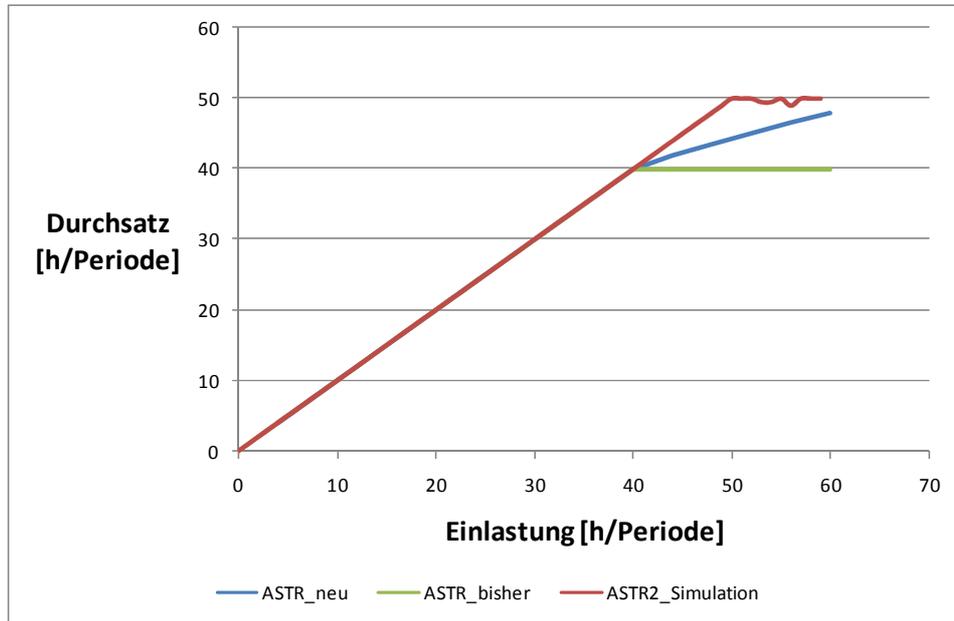


Quelle: eigene Darstellung

Anhang L

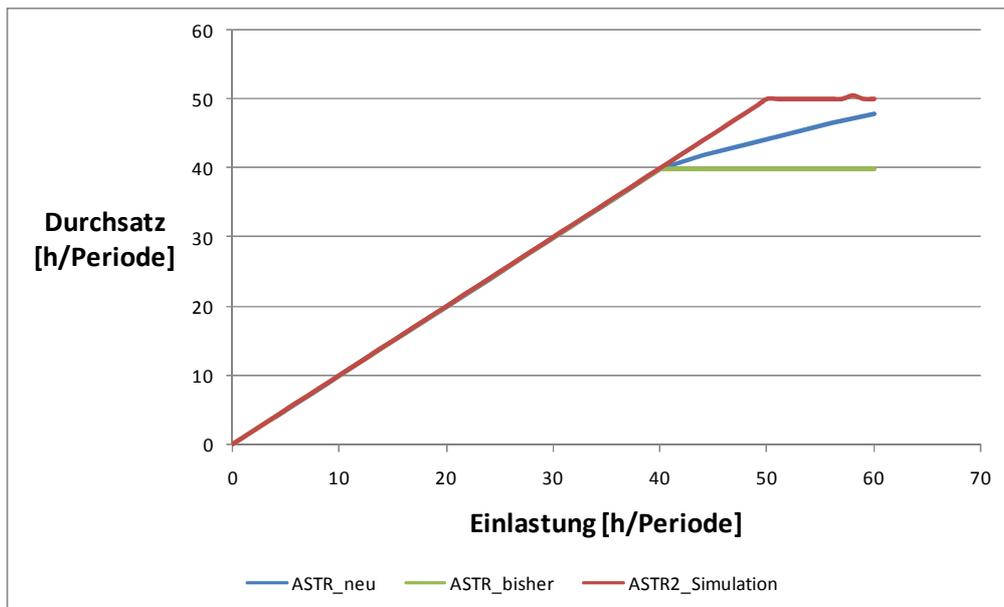
Durchsatzkennlinie ASTR2 bei streuendem Freigabeabstand

Durchsatzkennlinie ASTR2 mit  $\sigma = 113$  Sekunden



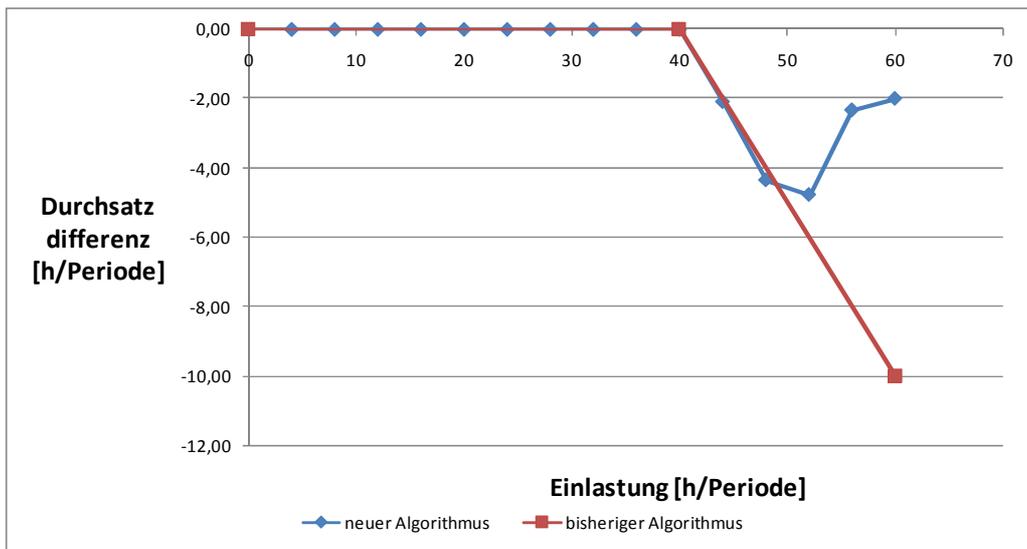
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzkennlinie ASTR2 mit  $\sigma = 225$  Sekunden



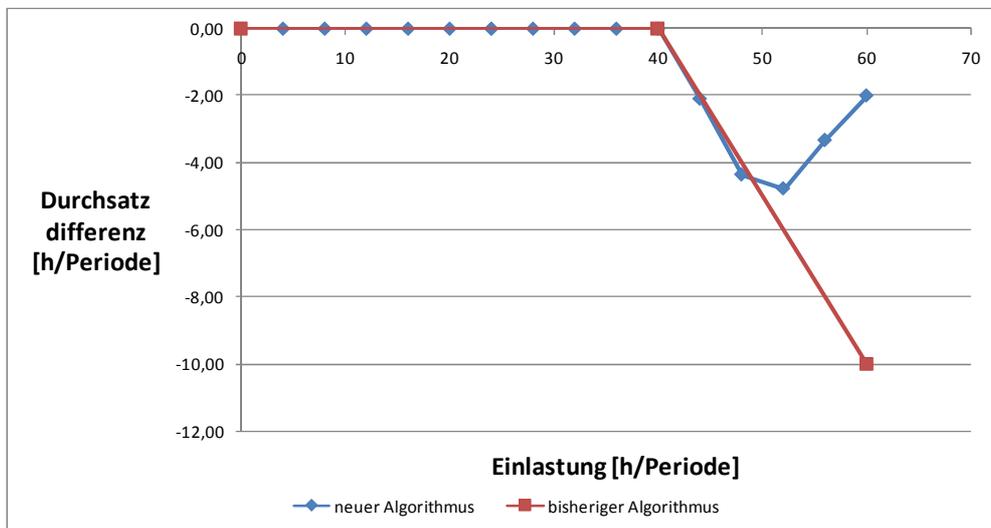
Quelle: eigene Darstellung

Abweichung bei ASTR2 mit  $\sigma = 113$  Sekunden



Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 225$  Sekunden

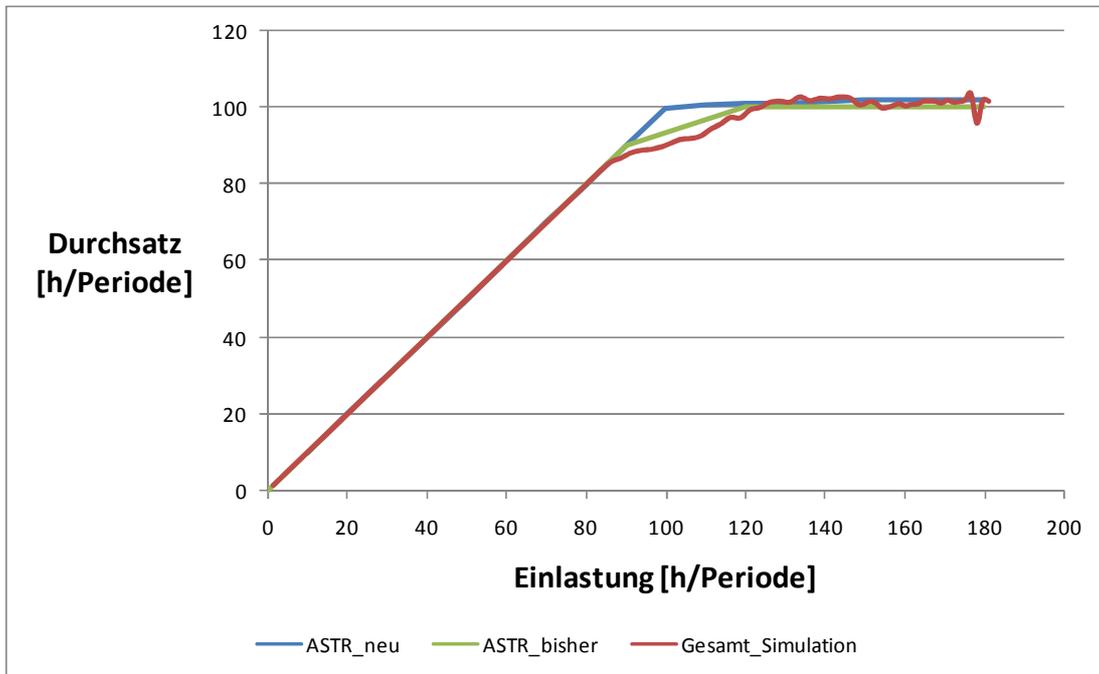


Quelle: eigene Darstellung

Anhang M

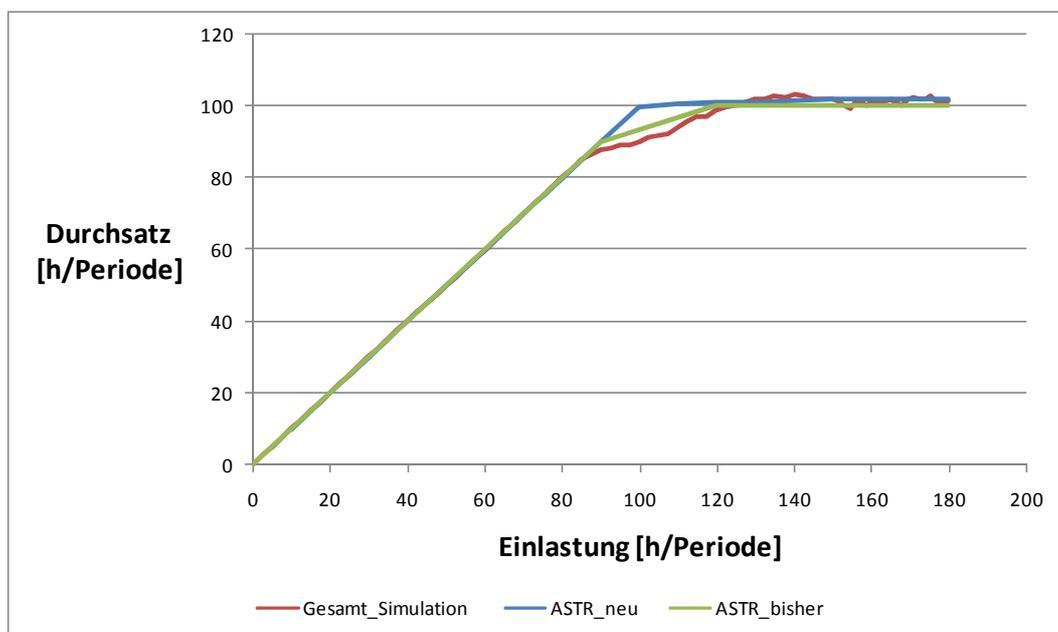
Durchsatzkennlinie ASTR1 bei streuendem Freigabeabstand

Gesamtdurchsatzkennlinie mit  $\sigma = 113$  Sekunden



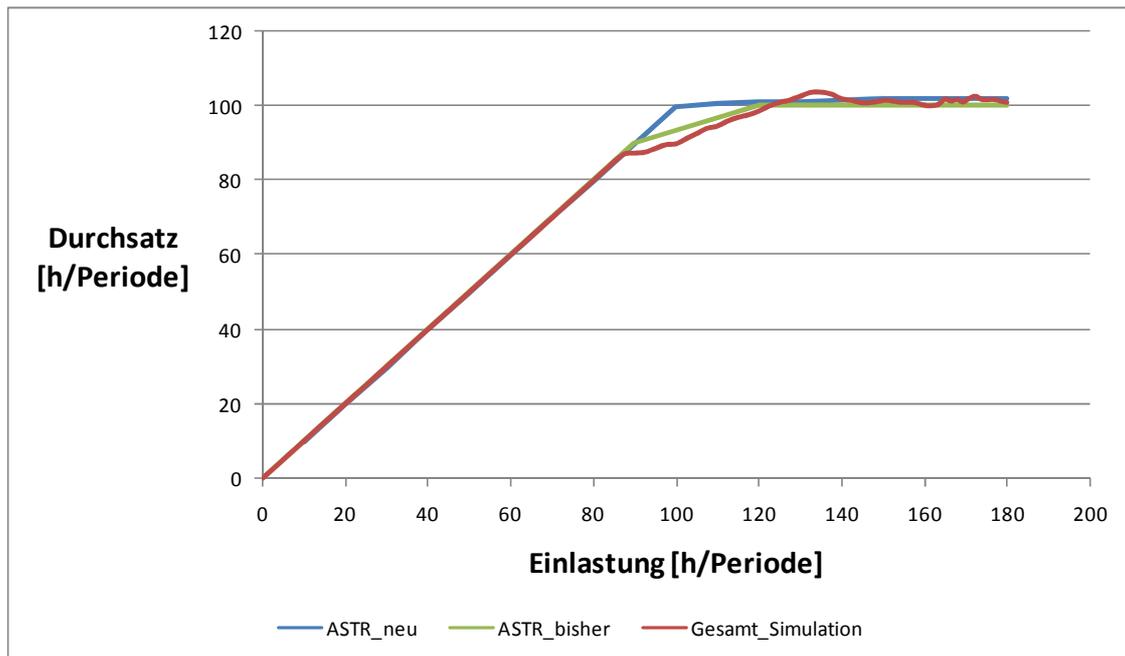
Quelle: eigene Darstellung

Gesamtdurchsatzkennlinie mit  $\sigma = 225$  Sekunden



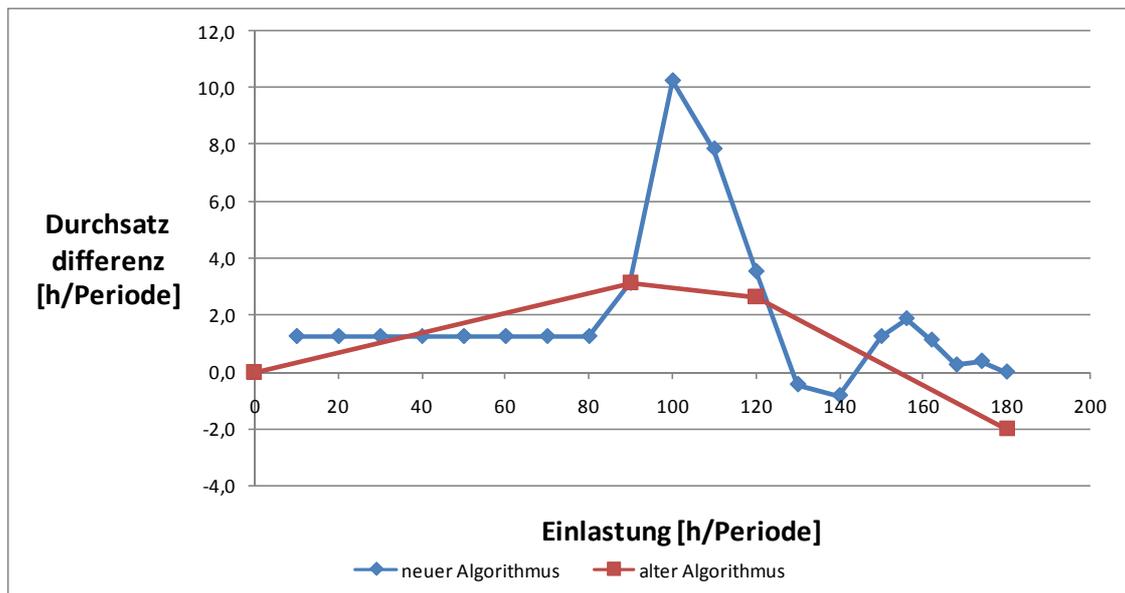
Quelle: eigene Darstellung

Gesamtdurchsatzkennlinie mit  $\sigma = 338$  Sekunden



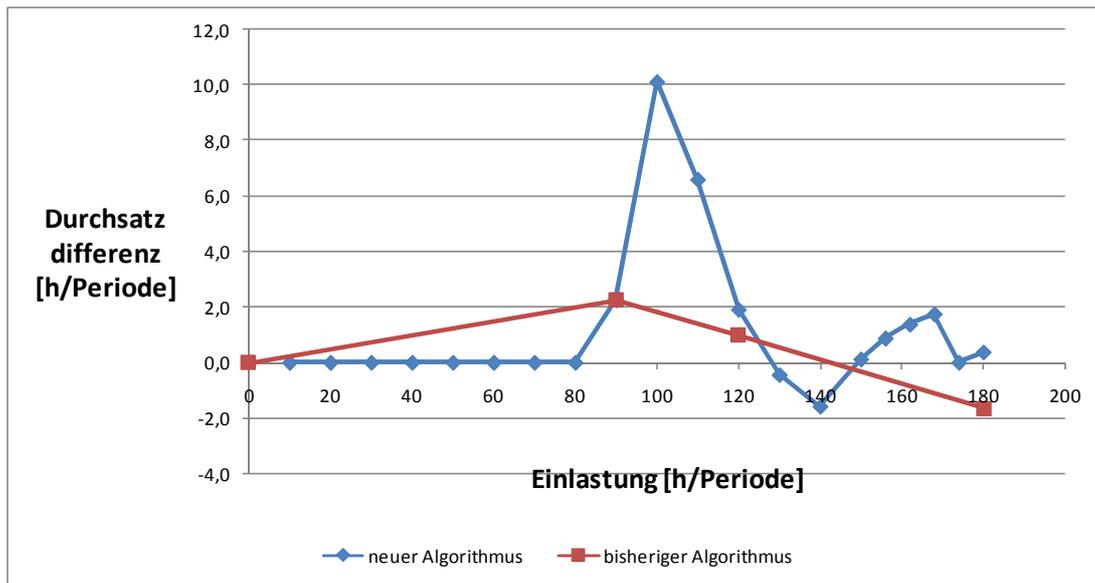
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 113$  Sekunden



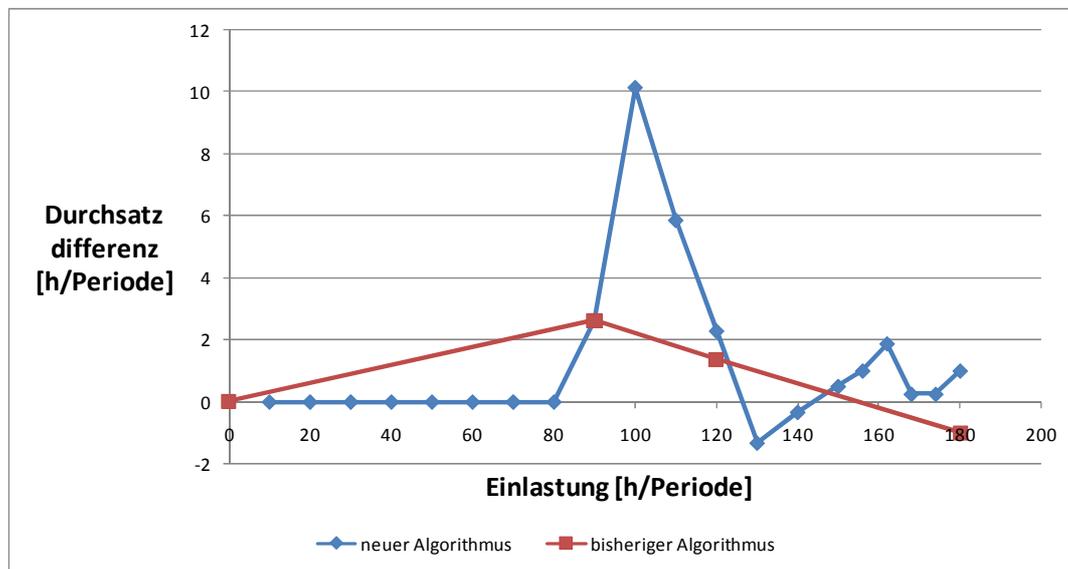
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 225$  Sekunden



Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 338$  Sekunden



Quelle: eigene Darstellung

Anhang N

Automatische Auswertefunktion für variable Arbeitsinhalte pro Auftrag

is

meanWertschöpfungMF1:real;

meanWertschöpfungMF2:real;

meanWertschöpfungMF3:real;

do

-- Auftragsanzahl in Tabelle schreiben

Auswertung[1,Zählwert]:=AnzahlMF1;

Auswertung[2,Zählwert]:=AnzahlMF2MF3;

Auswertung[3,Zählwert]:=AnzahlMF2MF3;

-- durchschnittlichen Wertschöpfungsbeitrag pro Auftrag ermitteln

meanWertschöpfungMF1:=  
(SenkeMF1.statProdArbeitsAnteil\*SenkeMF1.statMittDurchlaufzeit)/3600;

meanWertschöpfungMF2:=  
(SenkeMF2.statProdArbeitsAnteil\*SenkeMF2.statMittDurchlaufzeit)/3600;

meanWertschöpfungMF3:=  
(SenkeMF3.statProdArbeitsAnteil\*SenkeMF3.statMittDurchlaufzeit)/3600;

-- Einlastung pro Materialstrom berechnen

Auswertung[4,Zählwert]:=AnzahlMF1\*meanWertschöpfungMF1;

Auswertung[5,Zählwert]:=AnzahlMF2MF3\*meanWertschöpfungMF2;

Auswertung[6,Zählwert]:=AnzahlMF2MF3\*meanWertschöpfungMF3;

-- Einlastung pro Auftragsstrom berechnen

Auswertung[7,Zählwert]:=Auswertung[5,Zählwert] + Auswertung[6,Zählwert];

Auswertung[8,Zählwert]:=Auswertung[4,Zählwert];

-- Einlastung gesamt berechnen

Auswertung[9,Zählwert]:=Auswertung[7,Zählwert] + Auswertung[8,Zählwert];

-- Durchsatz pro Materialstrom berechnen

Auswertung[10,Zählwert]:=SenkeMF1.statAnzahlAus\*meanWertschöpfungMF1;

Auswertung[11,Zählwert]:=SenkeMF2.statAnzahlAus\*meanWertschöpfungMF2;

Auswertung[12,Zählwert]:=SenkeMF3.statAnzahlAus\*meanWertschöpfungMF3;

-- Durchsatz pro Auftragsstrom berechnen

Auswertung[13,Zählwert]:=Auswertung[11,Zählwert] + Auswertung[12,Zählwert];

Auswertung[14,Zählwert]:=Auswertung[10,Zählwert];

-- Durchsatz gesamt berechnen

Auswertung[15,Zählwert]:=Auswertung[13,Zählwert] + Auswertung[14,Zählwert];

-- Bestand AS1 berechnen

Auswertung[16,Zählwert]:= AS1\_BEMF1\*meanWertschöpfungMF1;

-- Bestand AS2 berechnen

Auswertung[17,zählwert]:= AS2\_BEMF2\*meanWertschöpfungMF2;

Auswertung[18,Zählwert]:= AS2\_BEMF3\*meanWertschöpfungMF3;

Auswertung[19,Zählwert]:= Auswertung[17,zählwert] + Auswertung[18,Zählwert];

--Bestand AS3 berechnen

Auswertung[20,Zählwert]:= AS3\_BEMF1\*meanWertschöpfungMF1;

Auswertung[21,Zählwert]:= AS3\_BEMF2\*meanWertschöpfungMF2;

Auswertung[22,Zählwert]:= Auswertung[20,Zählwert] + Auswertung[21,Zählwert];

-- Bestand AS4 berechnen

Auswertung[23,Zählwert]:= AS4\_BEMF3\*meanWertschöpfungMF3;

-- Bestand AS5 berechnen

Auswertung[24,Zählwert]:= AS5\_BEMF1\*meanWertschöpfungMF1;

-- Bestand AS6 berechnen

Auswertung[25,Zählwert]:= AS6\_BEMF2\*meanWertschöpfungMF2;

Auswertung[26,Zählwert]:= AS6\_BEMF3\*meanWertschöpfungMF3;

Auswertung[27,Zählwert]:= Auswertung[25,Zählwert] + Auswertung[26,Zählwert];

-- Bestand AS7 berechnen

Auswertung[28,Zählwert]:= AS7\_BEMF1\*meanWertschöpfungMF1;

-- Bestand ASTR1 errechnen

Auswertung[29,Zählwert]:= Auswertung[17,Zählwert] + Auswertung[18,Zählwert] +  
Auswertung[21,Zählwert] + Auswertung[23,Zählwert] + Auswertung[25,Zählwert] +  
Auswertung[26,Zählwert];

-- Bestand ASTR2 errechnen

Auswertung[30,Zählwert]:= Auswertung[16,Zählwert] + Auswertung[20,Zählwert] +  
Auswertung[24,Zählwert] + Auswertung[28,Zählwert];

-- Bestand gesamt errechnen

Auswertung[31,Zählwert]:= Auswertung[29,Zählwert] + Auswertung[30,Zählwert];

-- Simulationsparameter erhöhen

Zählwert:=Zählwert+1;

-- Auftragsanzahl MF1 von 1 auf 120 erhöhen

if AnzahlMF1<120

    then AnzahlMF1:= AnzahlMF1 + 2;

    else AnzahlMF1:= AnzahlMF1;

end;

-- Auftragsanzahl MF2 und MF3 von 1 auf 160 erhöhen

if AnzahlMF2MF3<160

    then AnzahlMF2MF3:= AnzahlMF2MF3 + 2 ;

    else AnzahlMF2MF3:= AnzahlMF2MF3;

end;

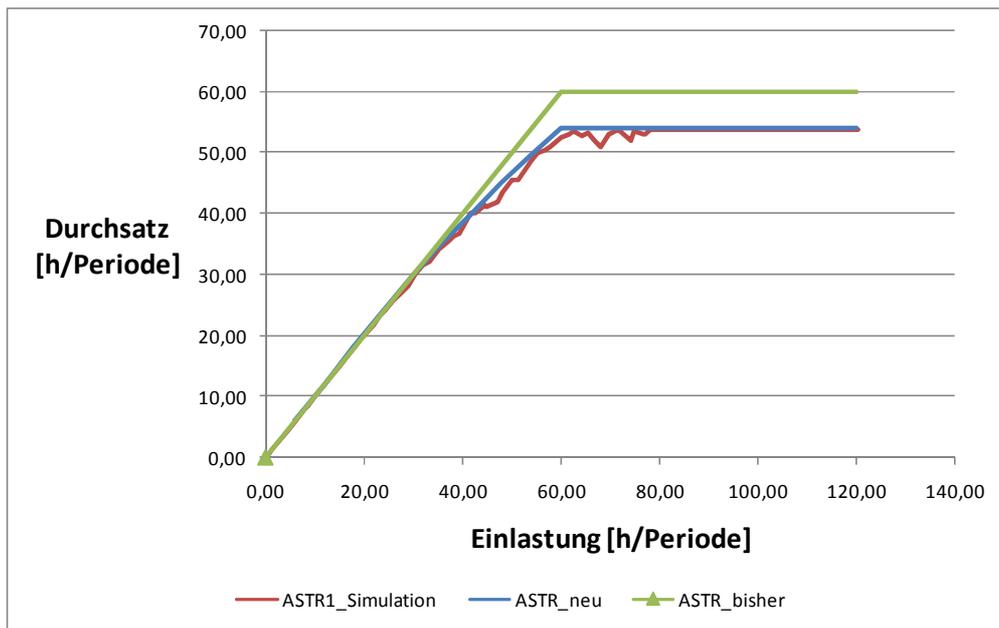
end;

Quelle: eigene Darstellung

Anhang O

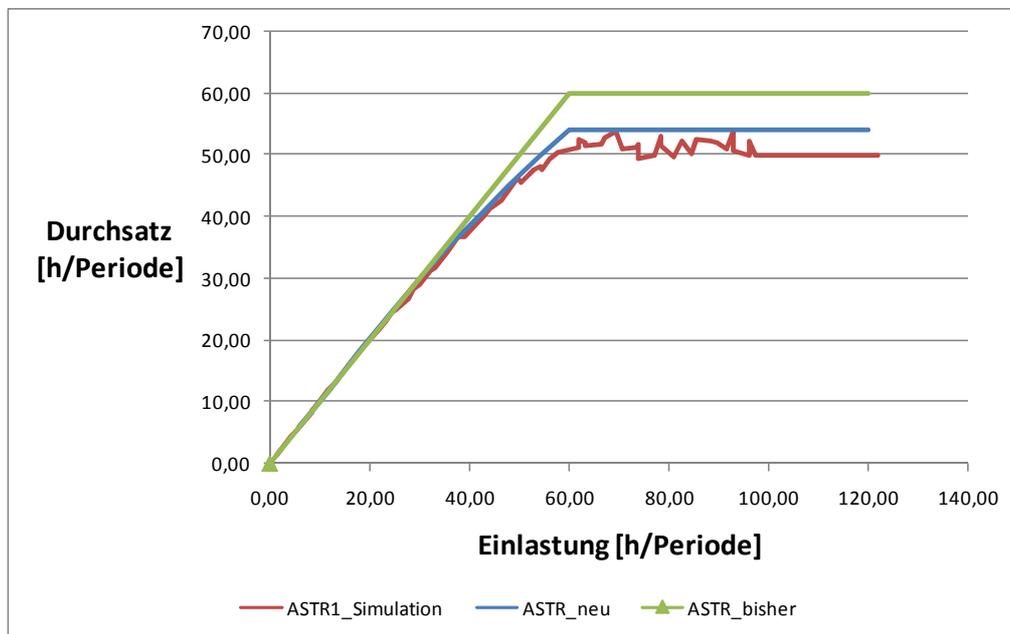
Durchsatzkennlinie ASTR1 bei streuendem Arbeitsinhalt

Durchsatzkennlinie ASTR1 mit  $\sigma = 113$  Sekunden



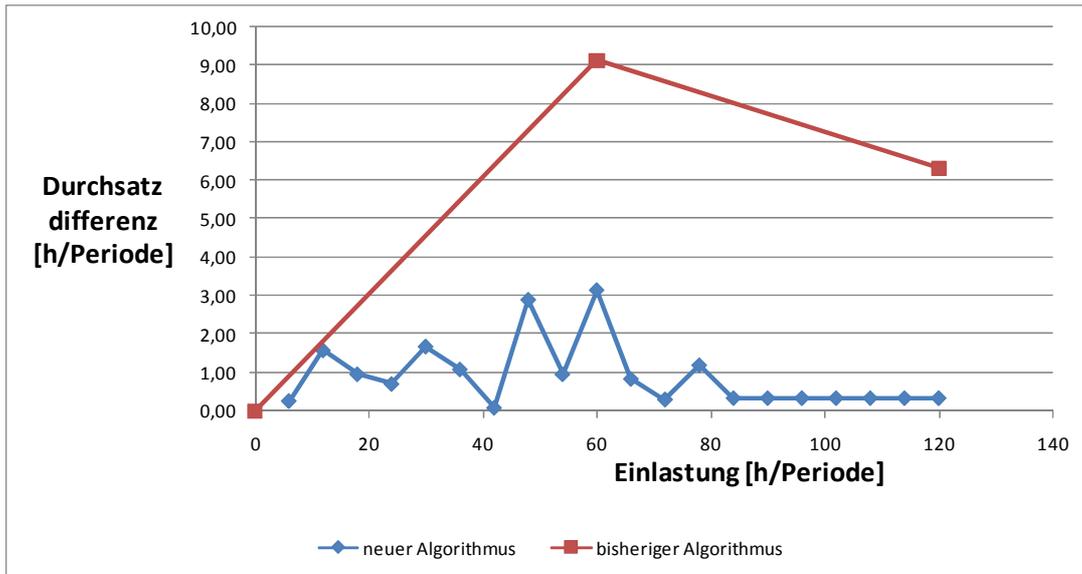
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzkennlinie ASTR1 mit  $\sigma = 225$  Sekunden



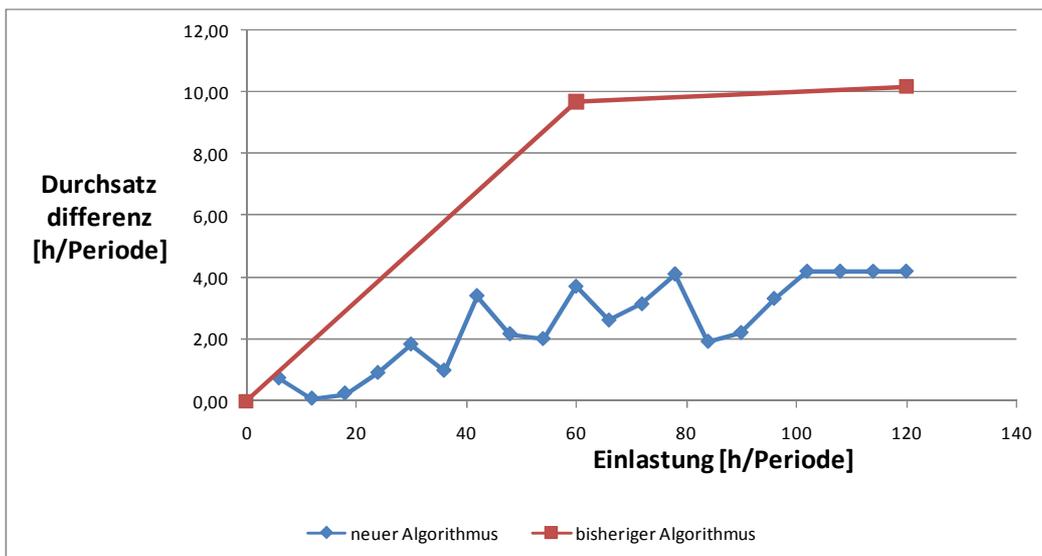
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 113$  Sekunden



Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 225$  Sekunden

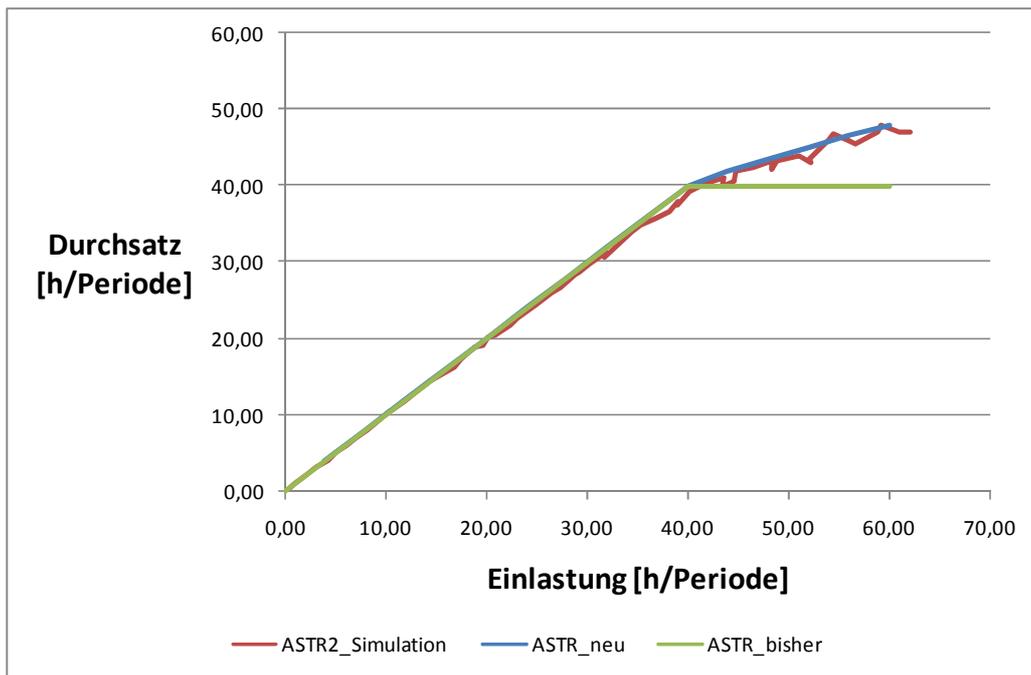


Quelle: eigene Darstellung

Anhang P

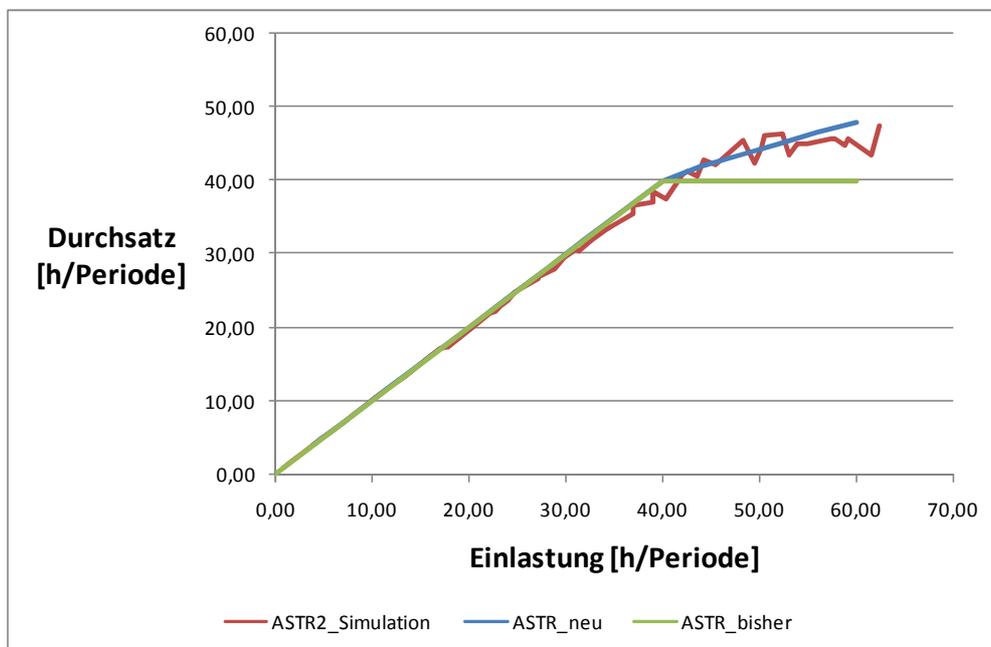
Durchsatzkennlinie ASTR2 bei streuendem Auftragsinhalt

Durchsatzkennlinie ASTR2 mit  $\sigma = 113$  Sekunden



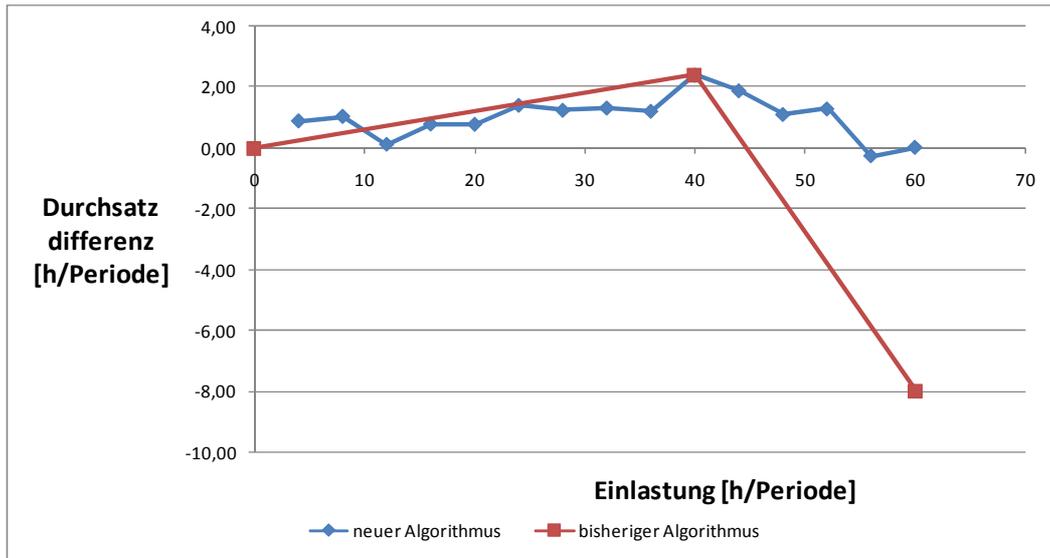
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzkennlinie ASTR2 mit  $\sigma = 225$  Sekunden



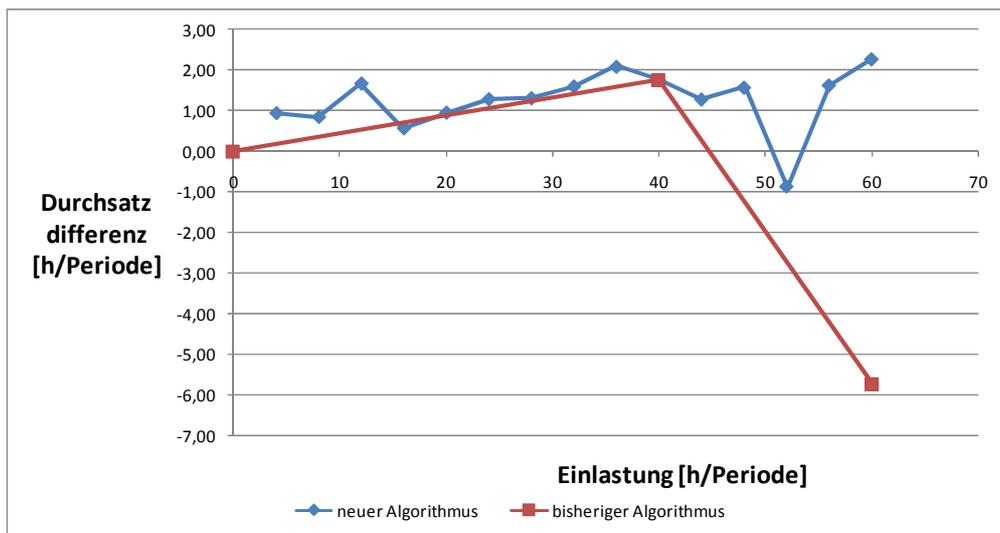
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 113$  Sekunden



Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 225$  Sekunden

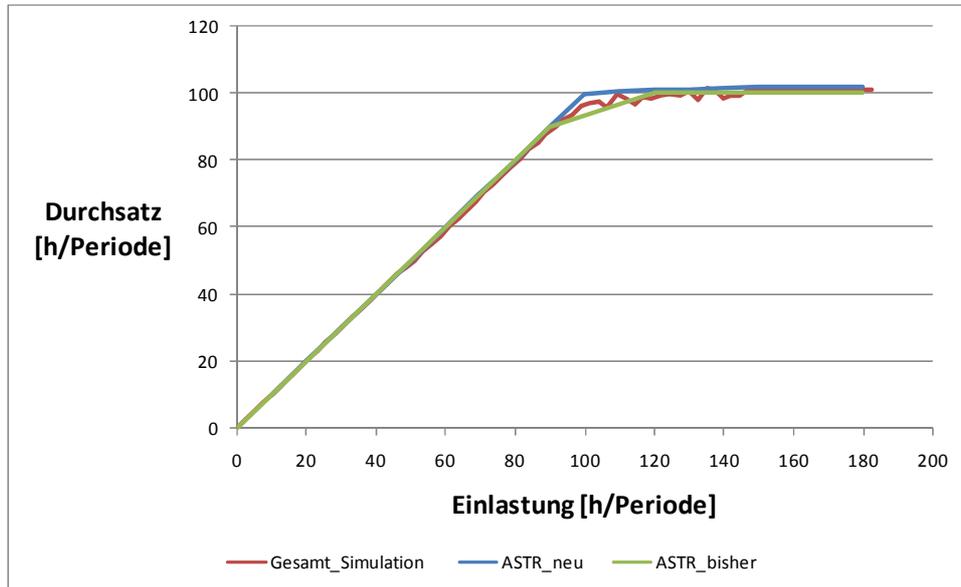


Quelle: eigene Darstellung

Anhang Q

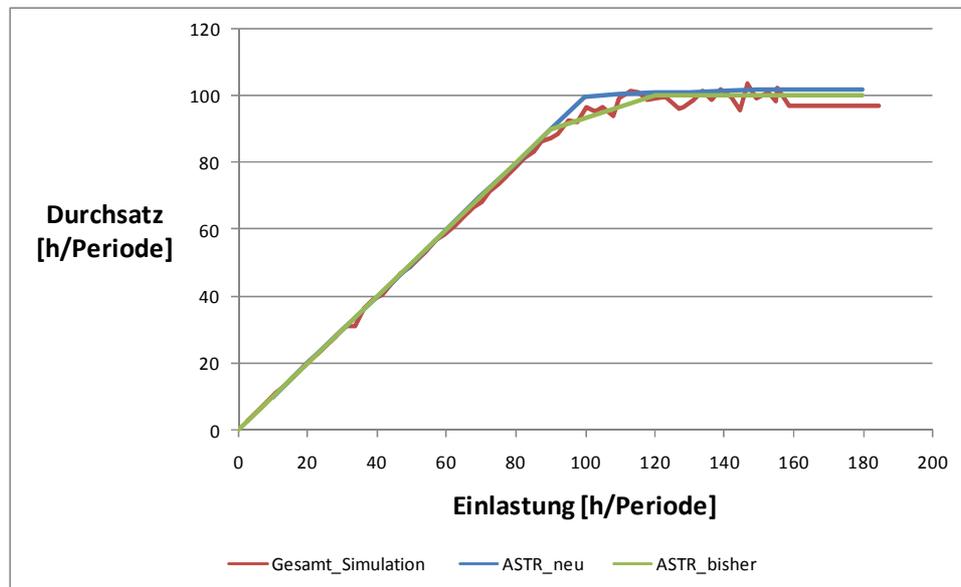
Gesamtdurchsatzkennlinie bei streuendem Auftragsinhalt

Gesamtdurchsatzkennlinie mit  $\sigma = 113$  Sekunden



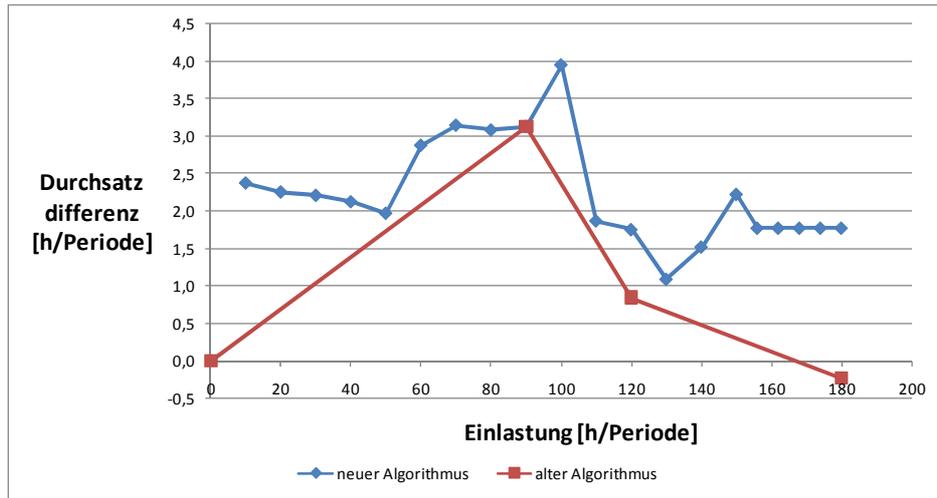
Quelle: eigene Darstellung

Gesamtdurchsatzkennlinie mit  $\sigma = 225$  Sekunden



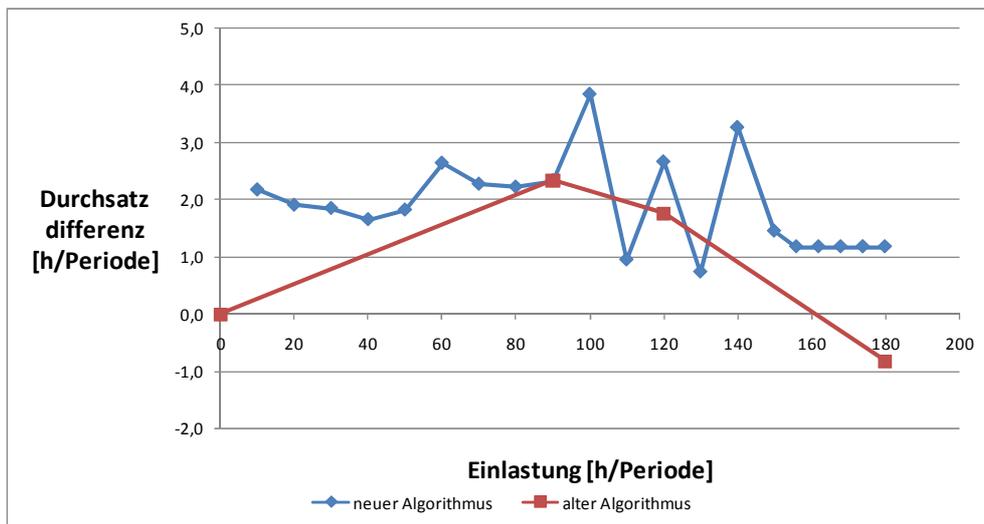
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 45$  Sekunden



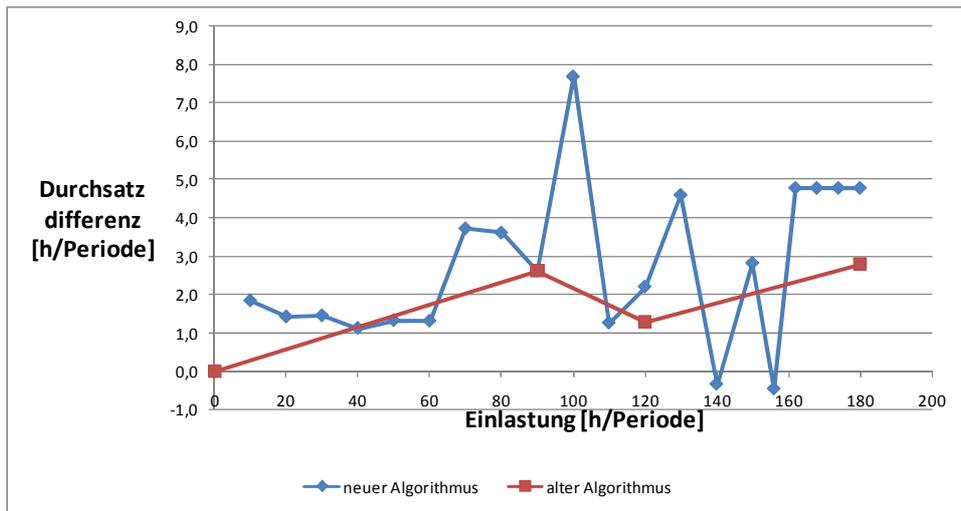
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 113$  Sekunden



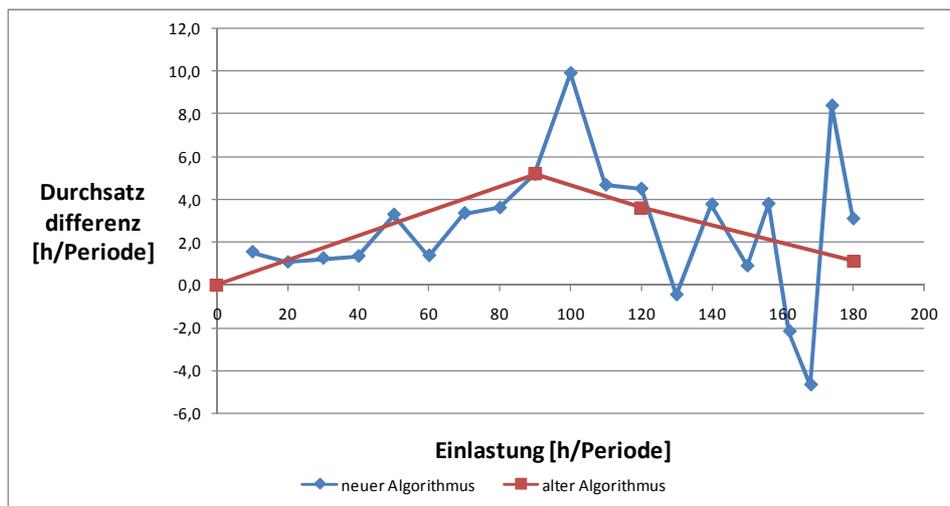
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 225$  Sekunden



Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 338$  Sekunden

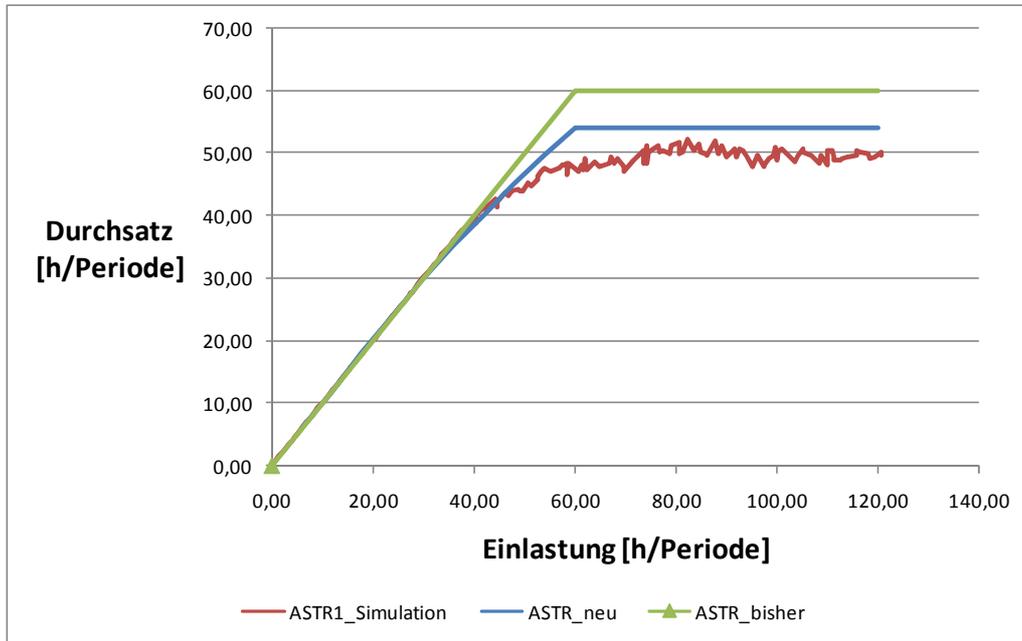


Quelle: eigene Darstellung

Anhang R

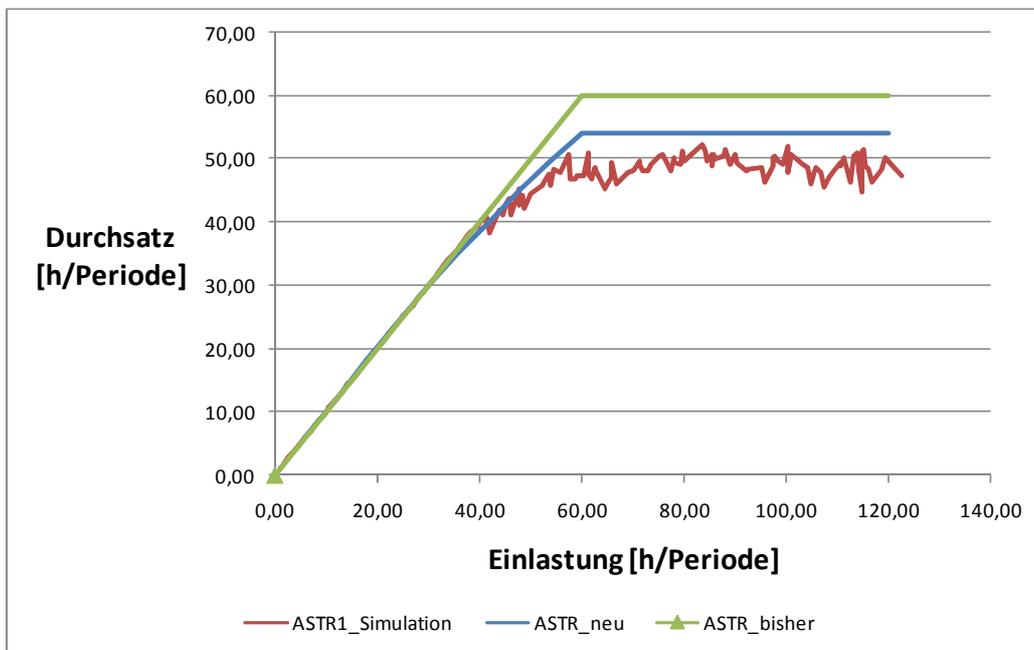
Durchsatzkennlinie ASTR1 bei streuendem Auftragsinhalt und Freigabezeitpunkt

Durchsatzkennlinie ASTR1 mit  $\sigma = 113$  Sekunden



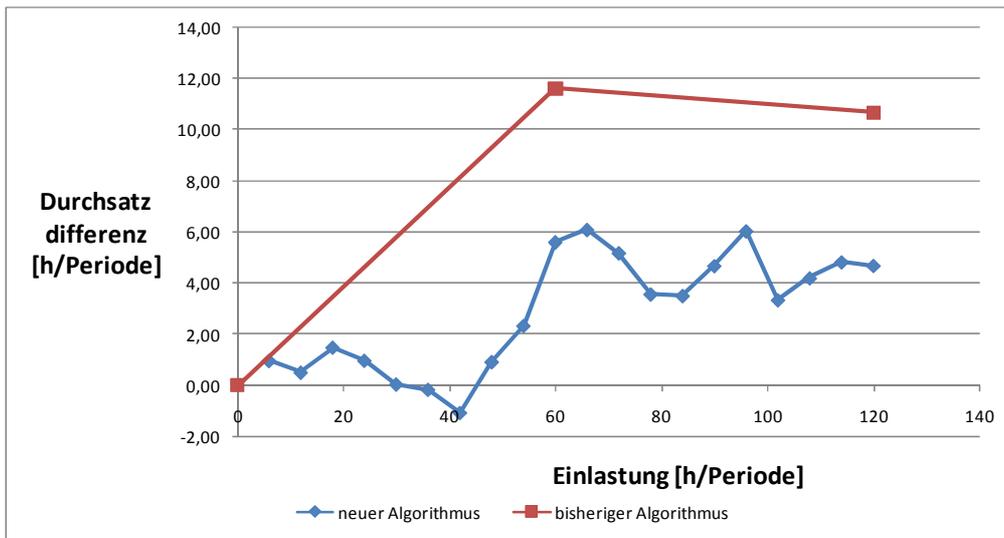
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzkennlinie ASTR1 mit  $\sigma = 225$  Sekunden



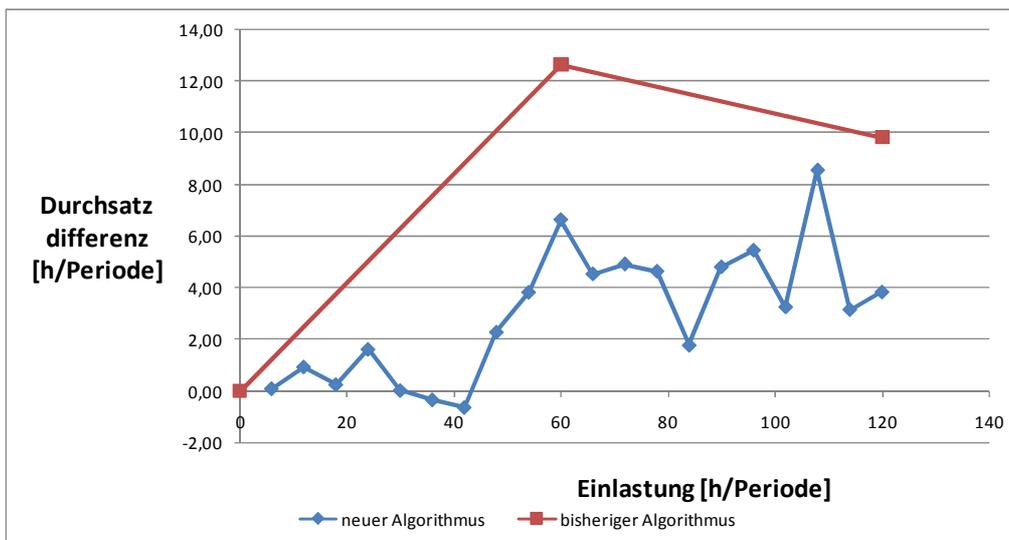
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 113$  Sekunden



Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 225$  Sekunden

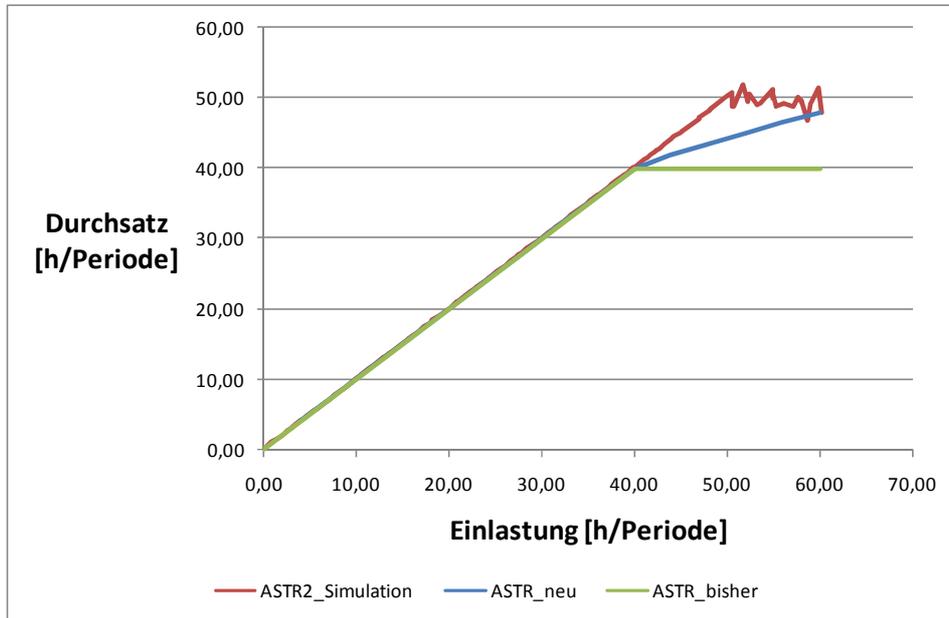


Quelle: eigene Darstellung

Anhang S

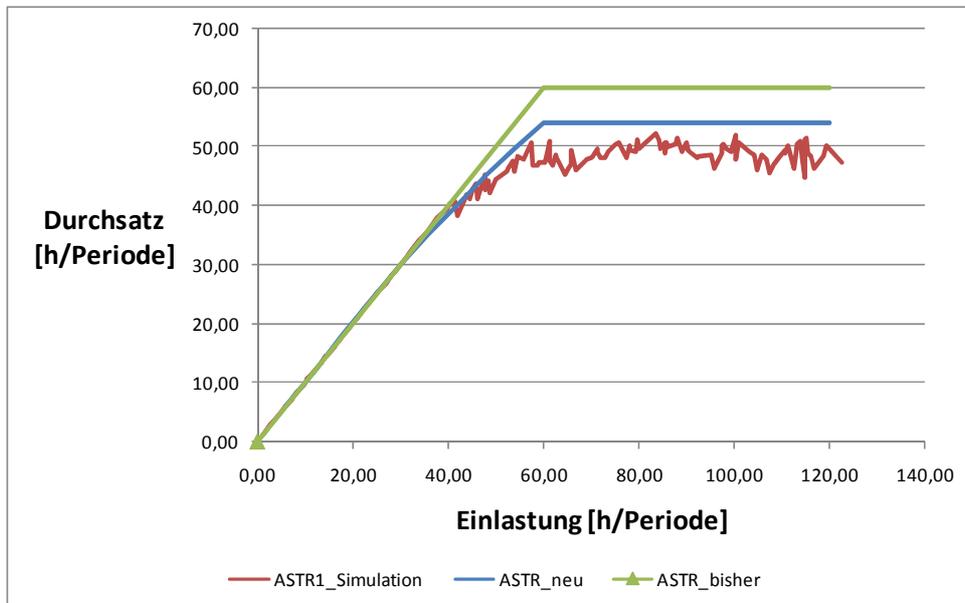
Durchsatzkennlinie ASTR2 bei streuendem Auftragsinhalt und Freigabezeitpunkt

Durchsatzkennlinie ASTR2 mit  $\sigma = 113$  Sekunden



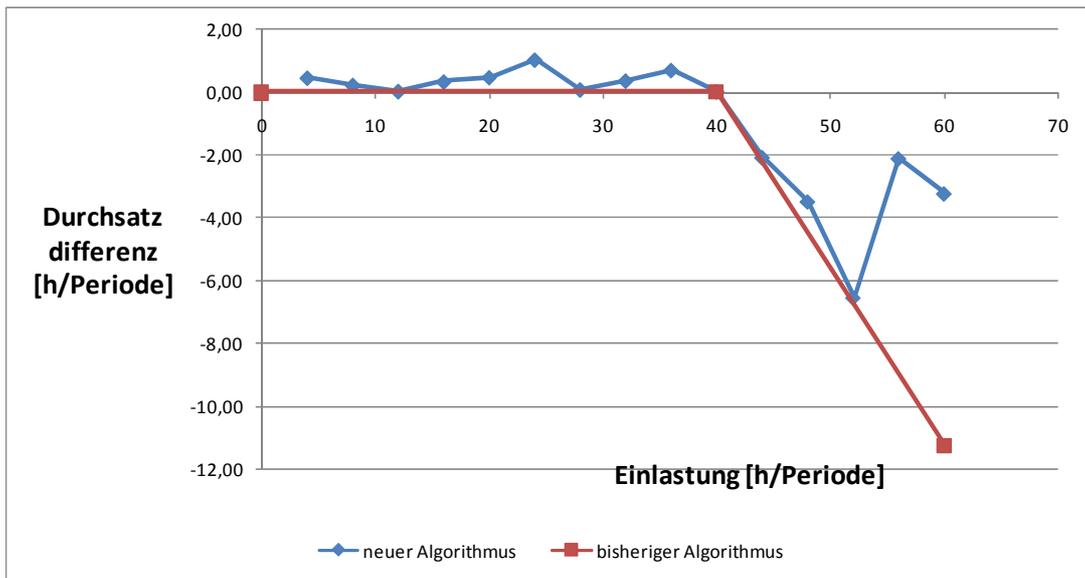
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzkennlinie ASTR2 mit  $\sigma = 225$  Sekunden



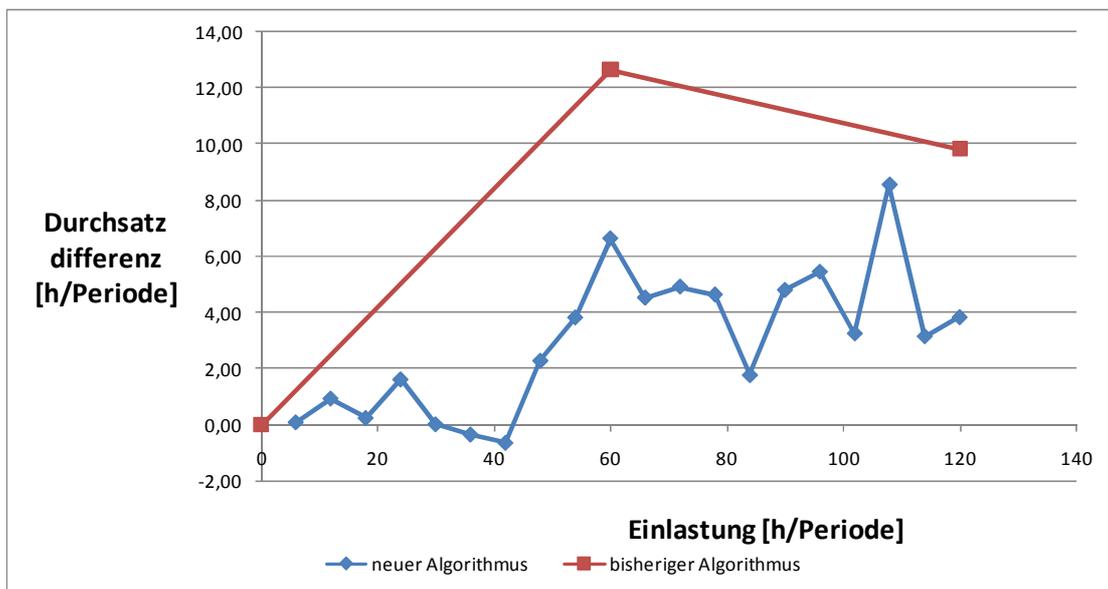
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 113$  Sekunden



Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 225$  Sekunden

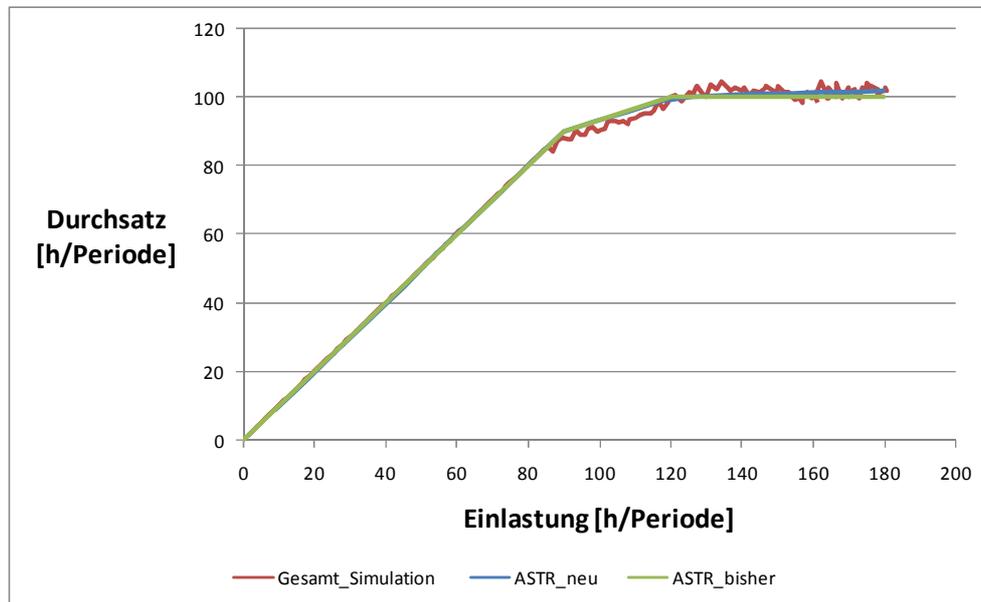


Quelle: eigene Darstellung

Anhang T

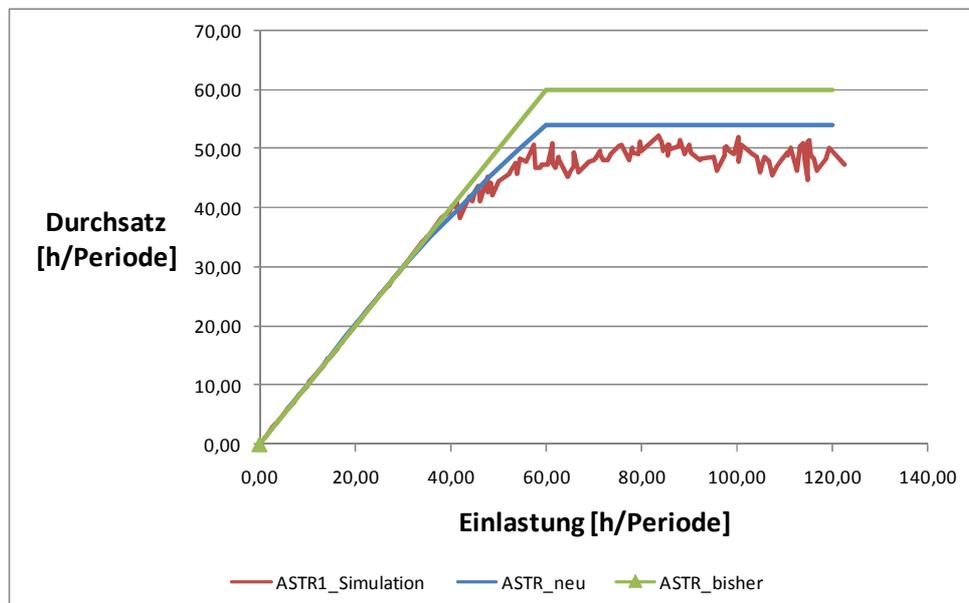
Gesamtdurchsatzkennlinie bei streuendem Auftragsinhalt und Freigabezeitpunkt

Gesamtdurchsatzkennlinie mit  $\sigma = 113$  Sekunden



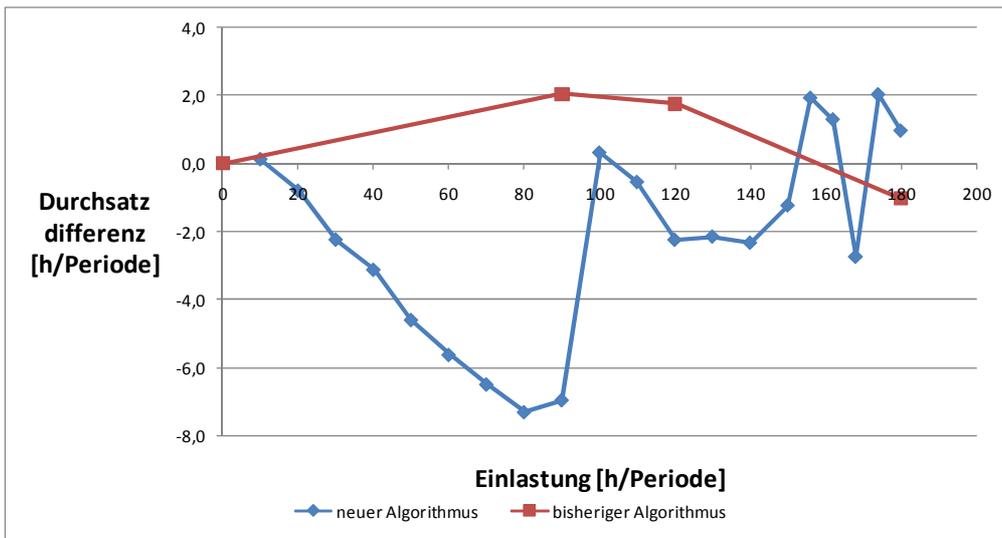
Quelle: eigene Darstellung

Gesamtdurchsatzkennlinie mit  $\sigma = 225$  Sekunden



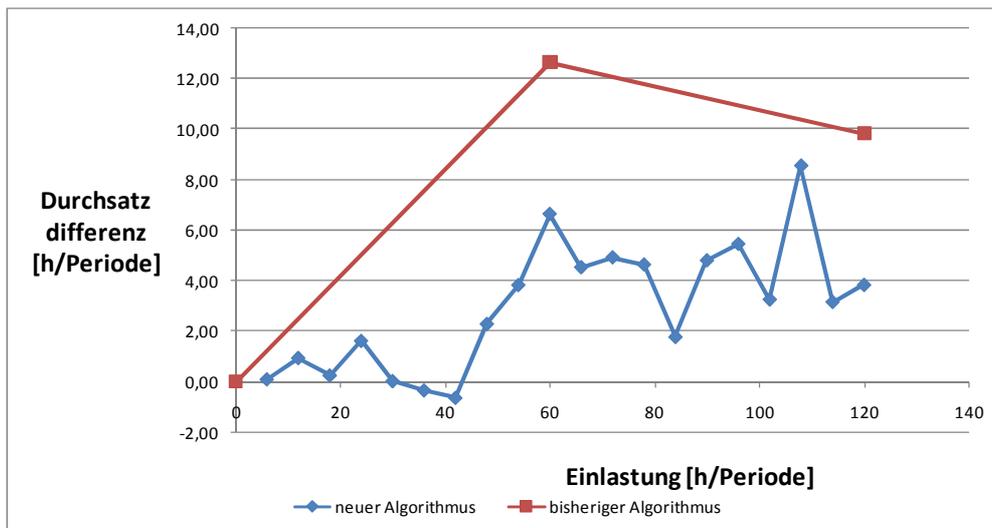
Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 45$  Sekunden



Quelle: eigene Darstellung

Durchsatzdifferenzen Simulation und Berechnungen bei  $\sigma = 113$  Sekunden



Quelle: eigene Darstellung